

1-1-2009

Aplicabilidad de la normatividad vigente en sistemas de apantallamiento y protección contra descargas atmosféricas en instalaciones eléctricas

Fredy Camilo Barreto Morales
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Barreto Morales, F. C. (2009). Aplicabilidad de la normatividad vigente en sistemas de apantallamiento y protección contra descargas atmosféricas en instalaciones eléctricas. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/571

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**APLICABILIDAD DE LA NORMATIVIDAD VIGENTE EN SISTEMAS DE
APANTALLAMIENTO Y PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
INSTALACIONES ELÉCTRICAS**



FREDY CAMILO BARRETO MORALES

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTAFE DE BOGOTÁ D.C.
2009**

**APLICABILIDAD DE LA NORMATIVIDAD VIGENTE EN SISTEMAS DE
APANTALLAMIENTO Y PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
INSTALACIONES ELÉCTRICAS**



FREDY CAMILO BARRETO MORALES

**Proyecto de Grado presentado para optar al título de
Ingeniero Electricista**

Director

Janio Gilberto Guzmán Franco

Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTAFE DE BOGOTÁ D.C.**

2009

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Janio Gilberto Guzmán Franco
Director del proyecto

Ing. Pedro Pineda Parra
Jurado

Ing. Rafael Moreno Vela
Jurado

Bogotá D.C. Marzo de 2009

A Dios y a mis padres
A Carolina y mi hija Ma. Camila

Fredy Camilo Barreto Morales

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos:

A Dios

A Mis padres por ese impulso y apoyo desde el inicio de mi carrera profesional.

A Mi esposa Carolina por su apoyo incondicional y mi hija María Camila por su afecto y ternura.

A Mis padrinos Fabio y Esly, por su ayuda en momentos difíciles.

A La compañía Electrodiseños S.A. por esa escuela de aprendizaje.

A Ing. Janio Gilberto Guzmán Franco, Gerente Técnico de la empresa DIXPRO Ltda.

A La Universidad de La Salle y su Facultad de Ingeniería Eléctrica.

A Todas y cada una de las personas que de una u otra manera colaboraron en la elaboración de este proyecto.

ADVERTENCIA

"El estudio, análisis, investigación y propuestas ideológicas sustentadas por el autor de este documento no comprometen de ninguna forma a la Universidad ni al jurado, en salvaguarda de los derechos fundamentales"

(Reglamento Estudiantil de La Universidad de la Salle Artículo 38)



INTRODUCCIÓN

La normatividad actual sobre sistemas de apantallamiento y protección contra descargas atmosféricas en instalaciones eléctricas basa la protección en la aplicación de un Sistema Integral de Protección contra Rayos – SIPRA - conducente a mitigar los riesgos asociados con la exposición directa e indirecta a los rayos.

Las medidas de protección que se deben adoptar contra los rayos parten de la obligatoriedad impuesta por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE en Colombia (Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008) y las normas que éste reglamento cita. De igual manera el RETIE establece la necesidad de realizar una evaluación de riesgo de daños debido a las descargas eléctricas atmosféricas y un diseño del sistema de protección con base en los métodos que establece la IEC (método esfera rodante, malla y ángulo de protección). Así mismo el RETIE (Resolución No. 18-1294) en su artículo 17, numeral 17.5, considera el uso de los dispositivos de protección contra sobretensiones en sistemas de media y baja tensión.

El rayo es un fenómeno meteorológico de origen natural, cuyos parámetros son variables espacial y temporalmente. La mayor incidencia de rayos en el mundo, se da en las tres zonas de mayor convención profunda: América Tropical, África central y norte de Australia. Colombia por estar situada en la zona de confluencia intertropical presenta una de las mayores actividades de rayos del planeta; de allí la importancia de normalizar la protección contra dicho fenómeno, pues si bien los métodos desarrollados a nivel mundial aplican para Colombia, algunos parámetros del rayo, como densidad de descarga a tierra o nivel cerámico, son particulares de nuestro país.



Las medidas de protección para una edificación 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 apantallamiento y los indirectos a las tensiones inducidas dentro de las instalaciones debidas a la variación de corriente del rayo. A partir de esto, aunque ninguna protección contra rayos es absolutamente 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 y protección interna).

El objetivo fundamental del sistema de protección contra descargas atmosféricas es el de brindar resguardo a una estructura contra daños físicos y lesiones a los seres vivos debido a las tensiones de toque y a las tensiones de paso. Este sistema previene las peligrosas chispas que se pueden producir en el momento de una descarga y ponen en riesgo la integridad de personas, animales y equipos.

El diseñador de las instalaciones eléctricas debe implementar, además de un sistema de protección externo, un sistema de protección contra sobretensiones, cuyo objetivo es la protección de las instalaciones eléctricas y los sistemas informáticos y de comunicaciones. Este sistema está compuesto básicamente de dispositivos de protección contra sobretensiones, que se instalan directamente en los tableros de distribución eléctrica y en la entrada de puertos de comunicaciones y de datos de los equipos electrónicos.



RESUMEN

Actualmente en la ciudad de Bogotá se encuentran instalaciones de tipo eléctrico (comercial, industrial, residencial, etc), en las cuales se ven involucrados personas, materiales o equipos eléctricos y electrónicos, que no ofrecen un adecuado sistema de apantallamiento y protección contra descargas eléctricas atmosféricas, por cuanto no cumplen con los requerimientos técnicos de normas nacionales ni internacionales.

El propósito fundamental durante la ejecución y desarrollo de este proyecto es el de exponer y aplicar a un caso práctico la normatividad vigente en la implementación de sistemas de apantallamiento y protección contra descargas eléctricas atmosféricas en instalaciones eléctricas. Se realizará una evaluación de los diseños en instalaciones eléctricas, para un caso práctico, con el fin de minimizar el riesgo de daños debido a las descargas eléctricas atmosféricas.

Este trabajo no es aplicable a sistemas de transmisión, generación ni distribución de energía eléctrica, instalaciones de comunicaciones, medios de transporte ni estructuras que contienen explosivos o químicos. El alcance del proyecto comprende la evaluación del nivel de riesgo según Norma NTC4552¹, que reduzca significativamente el riesgo de daño tanto a las personas, como a las estructuras, los equipos y las instalaciones; así mismo se implementa dentro de estos diseños un sistema de protección interna para evitar daños en las instalaciones eléctricas producto de sobretensiones transitorias, ya sea por impacto directo de rayos sobre las edificaciones o por tensiones inducidas por impactos indirectos sobre otras edificaciones o estructuras.

¹ La versión de la norma en la que se desarrolló el trabajo es la NTC 4552 (Primera actualización), la cual fue ratificada por el Consejo Directivo del ICONTEC del 2004-12-01.



El contenido del presente documento se desarrolla en seis (6) capítulos los cuales están organizados de la siguiente manera:

El primer capítulo comprende toda la fundamentación teórica que se relaciona con los sistemas de puesta a tierra, su importancia, definiciones más comunes y sus componentes básicos. Lo anterior de manera sencilla y corta para la ubicación rápida del tema.

En el segundo capítulo se abarcan conceptos los cuales están directamente relacionados con la implementación de un sistema integral de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, como son la teoría electromagnética, tensiones de seguridad y perturbaciones de tipo eléctrico originadas por la presencia del rayo.

En el capítulo tercero se tratan las teorías eléctricas sobre los fenómenos atmosféricos. Se exponen temas como son la naturaleza del rayo, su proceso de formación, parámetros del rayo, formas de onda representativas de tensión y corriente del rayo. Así mismo, se explican las sobretensiones transitorias producidas por los rayos, su naturaleza y representación gráfica.

El capítulo cuarto expone los principios generales sobre la protección contra descargas eléctricas atmosféricas en instalaciones eléctricas. Se define el concepto de Sistema Integral de Protección contra Rayos – SIPRA, el cual significa el punto de partida para el dimensionamiento del sistema de protección. De igual manera se definen todos los conceptos asociados a la normatividad actual sobre el sistema de protección contra rayos.

En el quinto capítulo se trata a fondo la importancia de un Sistema Integral de Protección contra Rayos – SIPRA, conducente a mitigar los riesgos asociados con la exposición directa e indirecta a los rayos, en cualquier tipo de instalación eléctrica. Se reseñan los principios físicos aplicables para unas buenas prácticas de ingeniería, con el fin de disminuir los efectos de los impactos del rayo para edificaciones y seres humanos.



Así mismo se dan las consideraciones para la implementación del sistema integral de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, tales como las especificaciones, materiales y ubicación, que deben ser tenidas en cuenta en la etapa de diseño de un sistema de apantallamiento en instalaciones eléctricas.

En esta parte del trabajo se exponen las metodologías que establece la normatividad vigente a nivel mundial, que deben ser utilizadas para propender por la seguridad de las personas y equipos en estructuras de uso común, expuestas a impactos directos o indirectos de rayos. Los temas desarrollados son:

- Definiciones.
- Definición y revisión de metodologías para evaluación de niveles de riesgo.
- Datos estadísticos para la obtención de los parámetros del rayo.
- Materiales para terminales de captación, bajantes y puestas a tierra.
- Criterios para inspección, cálculos y mantenimiento de un sistema integral de protección contra descargas eléctricas atmosféricas.
- Aspectos mínimos para dimensionar protecciones de tipo interno.

El desarrollo de este capítulo no tiene la finalidad de ser un manual de especificaciones de diseño, ni un texto de instrucciones para personal no calificado. Simplemente resaltar de una forma eminentemente técnica el cumplimiento que se espera sea exigido por los usuarios interesados en una buena protección contra rayos, como garantía de protección de sus intereses, en una instalación eléctrica.

En el capítulo sexto se implementa y se aplica a un caso práctico el SIPRA. En esta parte del trabajo y con la colaboración de la empresa DIXPRO Ltda., se realizó el diseño de un



Sistema Integral de Protección contra descargas eléctricas atmosféricas, para la construcción de la nueva sede empresarial de la Cámara de Comercio de Bogotá, ubicada en la zona de Chapinero. Las siguientes fueron las etapas en las que se desarrolló el diseño del proyecto:

- Evaluación del nivel de riesgo: elaboración de las matrices de riesgo conforme a las medidas de protección necesarias, aplicando la metodología establecida por la Norma NTC4552 (Primera actualización 2004-12-01) y mediante el desarrollo de una herramienta computacional como lo es el Software IEC Risk Assessment Calculador, versión 1.0.3.
- Sistema de puesta a tierra: mediciones de resistividad del terreno y diseño de la malla de puesta a tierra de la edificación.
- Medidas de protección: diseño del sistema de protección externo e interno.
- Elaboración de planos, cantidades de obra y especificaciones técnicas.

Como capítulo final del documento se dan las conclusiones que arroja el estudio, evaluación y aplicación de un sistema de apantallamiento en instalaciones eléctricas, así como las recomendaciones finales las cuales se dejan plasmadas en una guía de seguridad personal para usuarios, ante los riesgos asociados a las descargas eléctricas atmosféricas en estructuras de uso común.

CONTENIDO

	Pág.
1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	18
1.1. QUÉ ES UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	18
1.1.1. Funciones y objetivos de un sistema de puesta a tierra	18
1.1.2. Importancia de un sistema de puesta a tierra	20
1.1.3. Constitución de un sistema de puesta a tierra	20
2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	22
2.1. TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA	22
2.1.1. Intensidad de campo eléctrico	22
2.1.2. Campo magnético	23
2.1.3. Campo electromagnético	25
2.1.4. Ley de Faraday	25
2.1.5. Jaula de Faraday	25
2.2. TENSIONES DE SEGURIDAD	27
2.2.1. Tensión de paso	27
2.2.2. Tensión de contacto	27
2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE TIERRA	29
2.3.1. Tierra física	29
2.3.2. Tierra del circuito	29
2.3.3. Tierra del equipo	29
2.3.4. Tierra de protección contra rayos	29
2.3.5. Tierra aislada	30
2.3.6. Tierra de referencia de señal	30

2.4.	RIESGOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA PARA SERES HUMANOS	31
2.4.1.	Umbral de percepción	31
2.4.2.	Electrización	31
2.4.3.	Clases de accidentes con origen eléctrico	31
2.5.	PERTURBACIONES ELÉCTRICAS	33
2.5.1.	Ruido eléctrico	33
2.5.2.	Corrientes espurias	34
3.	LA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA O RAYO	36
3.1.	ESTRUCTURA TRIPOLAR DE LA NUBE DE TORMENTA	37
3.2.	ETAPAS DE UNA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA O RAYO	40
3.2.1.	Encendido de la descarga	40
3.2.2.	Líder escalonada	41
3.2.3.	Proceso de enlace	41
3.2.4.	Descarga de conexión	41
3.2.5.	Descarga de retorno	41
3.2.6.	Líder dardo	41
3.2.7.	Guía rápida	42
3.3.	CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS O RAYO	43
3.3.1.	Intensidad del rayo	43
3.3.2.	Longitud, energía y duración del rayo	43
3.3.3.	El trueno	43
3.3.4.	Curvas características del rayo	44
3.3.5.	Salto de arco del rayo	45
3.3.6.	Intensidad de campo eléctrico en el rayo	45
3.3.7.	Tipos de rayos	46
3.3.8.	Daños y pérdidas debido a los rayos	47
3.4.	PARÁMETROS DEL RAYO	49
3.4.1.	Nivel cerámico	50
3.4.2.	Densidad de descargas a tierra	53
3.4.3.	Polaridad	54

3.4.4. Valor pico de la corriente de retorno del rayo	54
3.4.5. Máxima rata de ascenso de la corriente del rayo	54
3.4.6. Cuadrado de la corriente de impulso del rayo	54
4. PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. PRINCIPIOS GENERALES	56
4.1. SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA)	56
4.1.1. Importancia del SIPRA	57
4.1.2. Implementación del SIPRA	58
4.2. NORMATIVIDAD PARA EL USO E IMPLEMENTACIÓN DEL SIPRA	58
4.2.1. Normas referidas	58
4.2.2. Componentes de la Normatividad	58
4.2.3. Objeto	59
4.2.4. Alcance	60
4.3. DEFINICIONES	60
4.3.1. Sistema Integral de Protección contra rayos- SIPRA	60
4.3.2. Sistema de Protección Externo contra rayos – SPE	60
4.3.3. Terminal de captación	60
4.3.4. Anillo equipotencial	61
4.3.5. Conductor bajante	61
4.3.6. Puesta a tierra de protección contra rayos – PTPR	61
4.3.7. Electrodo de puesta a tierra	61
4.3.8. Resistividad de terreno (ρ)	61
4.3.9. Sistema de puesta a tierra – SPT	61
4.3.10. Barraje equipotencial – BE	61
4.3.11. Conductor de puesta a tierra para equipos	62
4.3.12. Tierra	62
4.3.13. Sistema de protección interna	62
4.3.14. Equipotencializar	62
4.3.15. Transitorio	62
4.3.16. Sobretensión	62
4.3.17. Nivel básico de aislamiento al impulso - BIL	63

4.3.18. Dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias	63
4.3.19. Máxima tensión de operación continua	63
4.3.20. Tensión residual	63
4.3.21. Nivel de protección de tensión	63
4.3.22. Categoría de sobretensión	63
4.3.23. Tensión de limitación medida	64
4.3.24. Conductor activo	64
4.3.25. Rayo	64
4.3.26. Relámpago	64
4.3.27. Trueno	64
4.3.28. Nivel cerámico	64
4.3.29. Densidad de descargas a tierra	65
4.3.30. Corriente pico absoluta promedio del rayo	65
4.3.31. Máxima tasa de ascenso de la corriente del rayo	65
4.3.32. Energía específica	65
4.3.33. Método electrogeométrico	65
4.3.34. Distancia de impacto	65
4.4. ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA	66
5. SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCION CONTRA RAYOS	68
5.1. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO	69
5.1.1. Indicador de gravedad	71
5.1.2. Indicador de exposición al rayo	73
5.1.3. Matriz de Niveles de Riesgo	74
5.1.4. Acciones de protección	74
5.2. SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO	75
5.2.1. Conductor terminal aéreo	76
5.2.2. Terminales de captación o pararrayos	78
5.2.3. Bajantes	80
5.3. PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS	82

5.3.1. Generalidades	83
5.3.2. Condiciones de seguridad	84
5.3.3. Valor y medición PTPR	84
5.3.4. Resistividad del terreno	84
5.3.5. Método Wenner	85
5.3.6. Mediciones de tensiones de paso y de contacto	88
5.3.7. Equipotencialización	88
5.3.8. Medición de equipotencialidad	88
5.3.9. Conexiones	91
5.3.10. Materiales	91
5.3.11. Mantenimiento	92
5.4. SISTEMA DE PROTECCIÓN INTERNO	92
5.4.1. Dispositivos de protección contra sobretensiones - DPS	93
5.4.2. Dimensionamiento de DPS ´s	93
5.5. MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO	94
6. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS	98
6.1. ANTECEDENTES	98
6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	99
6.3. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO	100
6.3.1. Indicador de gravedad	100
6.3.2. Indicador de exposición al rayo	103
6.3.3. Matriz de niveles de riesgo	104
7. CONCLUSIONES	106
ANEXOS	108
BIBLIOGRAFÍA	133

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Elementos básicos de un Sistema de Puesta a Tierra 21
Figura 2	Cargas en un campo eléctrico 23
Figura 3	Campo magnético e intensidad de corriente 24
Figura 4	Jaula de Faraday como sistema de protección externa 26
Figura 5	Exposición a tensión de paso 27
Figura 6	Exposición a tensión de contacto 28
Figura 7	Estructura tripolar de la nube 38
Figura 8	Distribución estadística experimental, en amplitud, de las descargas de rayo positivas y negativas 39
Figura 9	Proceso de formación del rayo 42
Figura 10	Forma de onda de la corriente del rayo 45
Figura 11	Cuatro tipos de rayos 47
Figura 12	Daños y pérdidas según tipo de impacto del rayo 48
Figura 13	Principales ciudades de Colombia 50
Figura 14	Distribución media mensual de tormentas eléctricas Niveles Ceráunicos 51
Figura 15	Sistema Integral de Protección contra Rayos 57
Figura 16	Normas referidas para la implementación del SIPRA 59
Figura 17	Configuración del Sistema Integral de Protección contra Rayos 68
Figura 18	Procedimiento para la evaluación del Nivel de Riesgo 70
Figura 19	Indicador de exposición al rayo 73
Figura 20	Matriz de niveles de riesgo 74
Figura 21	Elementos que componen un sistema de apantallamiento 76

Figura 22	Conductor terminal aéreo	77
Figura 23	Terminal de captación o Pararrayo	79
Figura 24	Detalle conexión bajantes	81
Figura 25	Medición de la resistividad del terreno mediante el método Wenner	86
Figura 26	Equipotencialización sistemas con puesta a tierra	88
Figura 27	Una sola puesta a tierra para todas las necesidades	89
Figura 28	Puestas a tierra separadas o independientes	89
Figura 29	Distancia de impacto r_{sc} en el método electrogeométrico	95
Figura 30	Zona de protección usando el método electrogeométrico	97
Figura 31	Localización proyecto Cámara de Comercio en la ciudad de Bogotá	99
Figura 32	Indicador de exposición al rayo proyecto Cámara de Comercio	104
Figura 33	Matriz de Niveles de Riesgo proyecto Cámara de Comercio	104
Figura 34	Medición resistividad del terreno proyecto Cámara de Comercio	109
Figura 35	Ubicación subestación proyecto Cámara de Comercio Chapinero con respecto a la Subcentral Calle 67 de CODENSA	111
Figura 36	Esquema de modelo implementado para el cálculo de la corriente de cortocircuito S/E Cluster VII	112
Figura 37	Esquema general malla de puesta a tierra Cámara de Comercio	115
Figura 38	Tabla ajuste de protecciones S/E Calle 67 115/11.4kV Circuito CS12 CODENSA	116
Figura 39	Curva CS12 de coordinación característica de Fase y Tierra	117
Figura 40	Evaluación Nivel de Riesgo proyecto Cámara de Comercio según reporte IEC Risk Assessment	119

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Valores máximos de tensión de contacto	28
Tabla 2	Estados en función del grado de humedad y tensión de seguridad	32
Tabla 3	Efectos patológicos de la corriente	33
Tabla 4	Perturbaciones de tipo eléctrico típicas	34
Tabla 5	Ruidos eléctricos en un sistema	35
Tabla 6	Densidad e intensidad del campo eléctrico debidas al rayo	46
Tabla 7	Densidad de Descargas a Tierra en Colombia	53
Tabla 8	Abreviatura Normatividad implementación SIPRA	66
Tabla 9	Simbología Normatividad implementación SIPRA	67
Tabla 10	Funciones Sistema Integral de Protección contra Rayos	69
Tabla 11	Subindicador relacionado con el uso de estructura	71
Tabla 12	Subindicador relacionado con el tipo de estructura	72
Tabla 13	Subindicador relacionado con la altura y área de estructura	72
Tabla 14	Indicador de gravedad	73
Tabla 15	Acciones recomendadas según el Nivel de Riesgo	74
Tabla 16	Características para conductores terminales aéreos	78
Tabla 17	Requerimientos para las bajantes	81
Tabla 18	Valores típicos de resistividad del terreno	85
Tabla 19	Características y requisitos para electrodos de puesta a tierra	91
Tabla 20	Tensión al impulso que deben soportar los equipos	93
Tabla 21	Corriente nominal de descarga por fase	93
Tabla 22	Subindicador relacionado con el uso de estructura -Chapinero	101
Tabla 23	Subindicador relacionado con el tipo de estructura -Chapinero	101

Tabla 24	Subindicador relacionado con la altura y área de estructura Chapinero	102
Tabla 25	Indicador de gravedad - Chapinero	103
Tabla 26	Resultados medición resistividad del terreno - Chapinero	110

LISTA DE ANEXOS

		Pág.
ANEXO 1	Medición resistividad del terreno – Chapinero	108
ANEXO 2	Diseño malla de puesta a tierra - Chapinero	111
ANEXO 3	Informe IEC Risk Assessment Calculator	118
ANEXO 4	Guía de seguridad personal durante tormentas eléctricas	120
ANEXO 5	Sistema de alarma	124
ANEXO 6	Especificaciones técnicas sistema de apantallamiento - Chapinero	125
ANEXO 7	Planos sistema de protección externo - Chapinero	130
ANEXO 8	Planos sistema de protección interno - Chapinero	131
ANEXO 9	Planos diseños de subestación Serie 3 CODENSA - Chapinero	132



1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Cuando se habla de puesta a tierra, nos referimos a la unión o conexión eléctrica de un equipo o componente de un sistema eléctrico con el suelo físico o la tierra por medio de dispositivos conductores de electricidad adecuados. Es una de las definiciones más simples y por tanto más interpretadas. La "resistencia de puesta a tierra" o "resistencia de tierra" o "resistencia de dispersión" es la resistencia ofrecida al paso de la corriente hacia el suelo o terreno.

1.1 QUÉ ES UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La puesta a tierra en un sistema eléctrico, es el elemento encargado de retornar o dispersar las corrientes que circulan en caso de fallas o desbalances. Físicamente es un conjunto de conductores y elementos tales como cables, placas o varillas, que realmente están en contacto con la tierra, de allí su nombre.

Los sistemas de puesta a tierra son componentes cada vez más importantes de los sistemas eléctricos, puesto que deben permitir la conducción hacia el suelo, de cargas eléctricas originadas por rayos, electricidad estática o fallas del sistema. Deben poseer además una capacidad de dispersión, sin que se presenten potenciales peligrosos en la superficie del suelo.

1.1.1 Funciones y objetivos de un sistema de puesta a tierra. La función de un sistema de puesta a tierra (SPT) de una instalación eléctrica es la de forzar la derivación, al suelo, de las intensidades de corriente de cualquier naturaleza que se puedan originar,



ya se trate de corrientes de defecto, baja frecuencia industrial, o debidas a descargas eléctricas atmosféricas, tipo impulso.

La función de la tierra puede considerarse equivalente a la desempeñada por el mar en un sistema hidrográfico, que idealmente está en capacidad de recibir cualquier caudal de agua sin elevar su nivel, así mismo la tierra puede dispersar cualquier corriente sin aumentar su potencial, ya que a pesar de tener alta resistividad, comparada con ciertos metales, presenta baja resistencia, gracias a la magnitud del área que ofrece para la circulación de corriente.

La circulación de las intensidades originadas por la instalación de sistemas de puesta a tierra puede originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo, entre la instalación del sistema de puesta a tierra y el suelo que la rodea o entre dos puntos del mismo sistema, por cuya razón debe concebirse la instalación de una puesta a tierra que incluso con la aparición de las diferencias de potencial aludidas cubra los siguientes objetivos:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar las corrientes de falla con suficiente capacidad.

Debe hacerse especial énfasis en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra, lo que no significa que se deje de reconocer la importancia de los otros tres objetivos. Pero aún trabajando por este objetivo, se debe remarcar que las puestas a tierra no garantizan la inocuidad de las instalaciones eléctricas ante las incalculables conductas, reacciones anómalas, imprudencias y, aún, despropósitos que las personas pueden llevar a cabo con respecto a una instalación de alta tensión y que, por otro lado, incluso serán elementos que lleguen a aumentar la gravedad en caso de accidente por contactos directos.



1.1.2 Importancia de un sistema de puesta a tierra. Toda instalación eléctrica cubierta por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE (Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008), excepto donde se indique expresamente lo contrario, debe disponer de un Sistema de Puesta a Tierra (SPT), de tal forma que cualquier punto del interior o exterior, normalmente accesible a personas que puedan transitar o permanecer allí, no estén sometidos a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de soportabilidad del ser humano cuando se presente una falla.

La exigencia de puestas a tierra para instalaciones eléctricas cubre el sistema eléctrico como tal y los apoyos o estructuras que ante una sobretensión temporal, puedan desencadenar una falla permanente a frecuencia industrial, entre la estructura puesta a tierra y la red.

1.1.3 Constitución de un sistema de puesta a tierra. Existen varias maneras para poner a tierra un sistema eléctrico, que van desde lo más simple como un electrodo, pasar por placas de formas y tamaños diversos, y llegar a complicadas configuraciones de conductores eléctricos, electrodos y placas enterradas en el suelo.

En la Figura 1 se esquematizan los componentes básicos que comprenden un sistema de puesta a tierra, entre los cuales sobresalen tres que nunca deben faltar: cables, conexiones y electrodos.

Los elementos básicos que pueden constituir un sistema de puesta a tierra son:

- *Electrodo de puesta a tierra:* Conductor o conjunto de conductores enterrado(s), que sirven para establecer una conexión con el suelo. El más común es el de una varilla de cobre de 2,4 m de longitud como mínimo.
- *Línea principal de tierra:* Es un conductor o conjunto de conductores que une(n) el electrodo de tierra con una parte de la instalación que se haya de poner a tierra,

siempre y cuando los conductores estén fuera del suelo o colocados en él pero aislados del mismo.

- *Punto de puesta a tierra:* Es un punto situado generalmente fuera del suelo, que sirve de unión de las líneas de tierra con el electrodo, directamente o a través de líneas de enlace con él; también es llamado barraje equipotencial.
- *Línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra:* Es la parte de la línea de tierra comprendida entre el punto de puesta a tierra y el electrodo, siempre que el conductor esté fuera del suelo o colocado aislado del mismo.

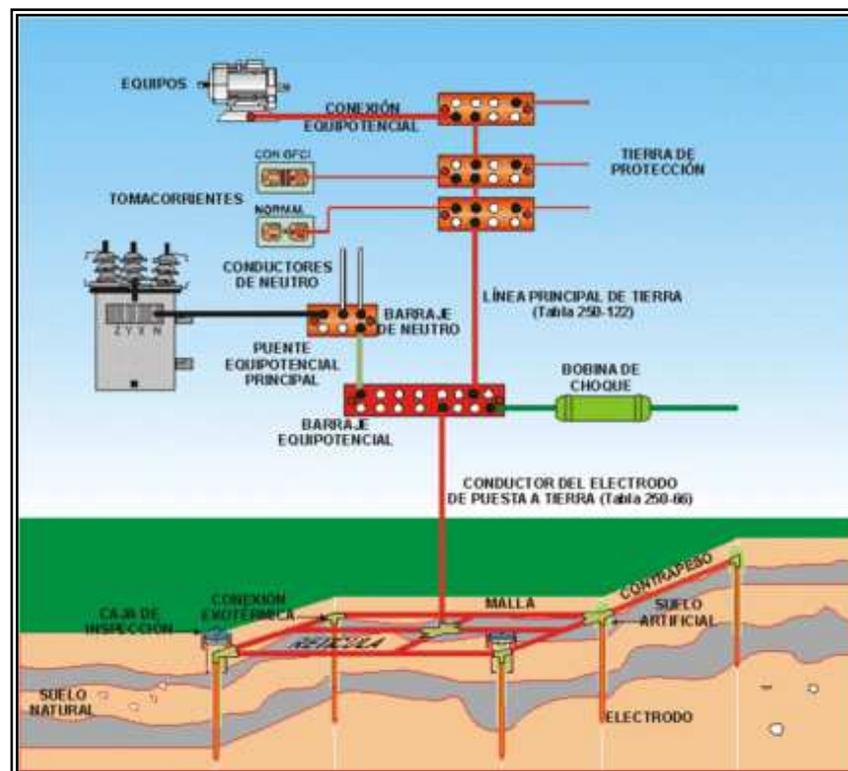


Figura 1. Elementos básicos de un Sistema de Puesta a Tierra

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 23)



2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El estudio concerniente a los sistemas de puesta a tierra y sus aplicaciones, en este caso una protección contra descargas eléctricas atmosféricas, se presta a una gran confusión debido a la enorme cantidad de artículos técnicos, especificaciones y manuales existentes, los cuales no están siempre de acuerdo entre sí, y a la excesiva terminología sin ningún significado técnico determinado. Muchos de estos términos no están oficialmente definidos en ninguna norma; se prestan a significado ambiguo y la mayoría han sido inventados, a través de los años. Si una puesta a tierra es un mecanismo de seguridad para seres vivos y protección para equipos, que ni los más sofisticados equipos de protección trabajan sin él, tenemos que relacionarnos con temas afines. En esta parte del capítulo se recopilan algunos de ellos.

2.1 TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

El concepto de fondo de un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, desde el punto de vista eléctrico, es el de envolver una edificación y sus instalaciones eléctricas dentro de un anillo o jaula de Faraday. De aquí se puede deducir que estos sistemas de protección están directamente relacionados con la teoría electromagnética. Es por esto que se hace necesario hacer una breve reseña de algunos términos, si no los más importantes, relacionados con el desarrollo del presente trabajo.

2.1.1 Intensidad de campo eléctrico. Es una alteración del espacio, que hace que las partículas cargadas, experimenten una fuerza debido a su carga, es decir, si en una región determinada una carga eléctrica experimenta una fuerza, entonces en esa región hay un campo eléctrico. El campo eléctrico es producido por la presencia de cargas eléctricas

estáticas o en movimiento. Su intensidad en un punto depende de la cantidad de cargas y de la distancia a éstas. La intensidad del campo eléctrico se mide en voltios por metro (V/m) ó kV/m la cual representa el efecto eléctrico sobre una carga presente en algún punto del espacio.

El campo eléctrico natural originado en la superficie de la tierra es de aproximadamente 100 V/m mientras que en la formación del rayo, como se tratará más adelante, se alcanzan valores de campo eléctrico hasta de 500 kV/m

Una carga en el seno de un campo eléctrico E experimenta una fuerza proporcional al campo cuyo módulo es $F=qE$, cuya dirección es la misma, pero el sentido puede ser el mismo o el contrario dependiendo de que la carga (q) sea positiva o negativa.

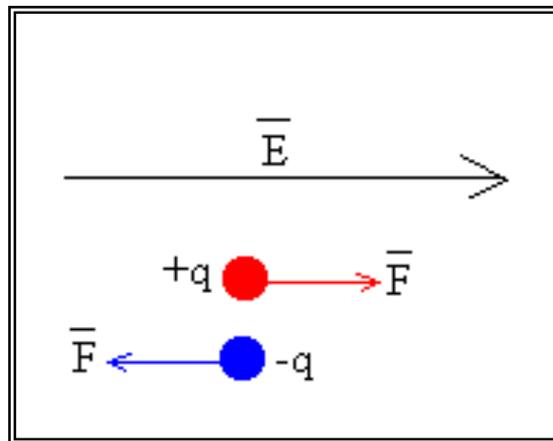


Figura 2. Cargas en un campo eléctrico

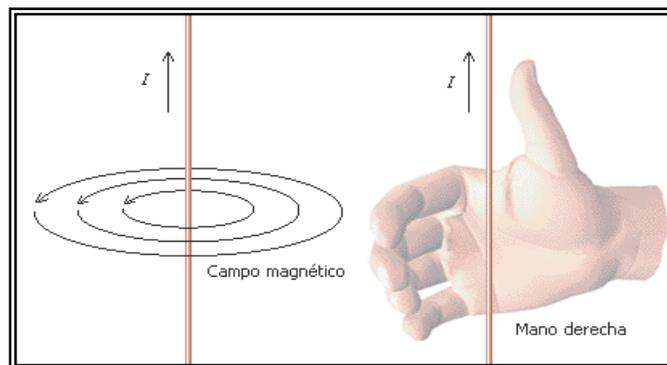
(FUENTE: Autor)

2.1.2 Campo magnético. Es una alteración del espacio que hace que en las cargas eléctricas en movimiento se genere una fuerza proporcional a su velocidad y a su carga. Es producido por imanes o por corrientes eléctricas. Su intensidad en un punto depende de la magnitud de la corriente y de la distancia a ésta o de las propiedades del imán y de la distancia. Este campo también se conoce como magnetostático debido a que su intensidad en un punto no depende del tiempo.

En teoría, se debería hablar de intensidad de campo magnético, pero en la práctica se toma la densidad de flujo magnético, que se representa con la letra B y se mide en Teslas, la cual tiene la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ Tesla} = 1 \text{ N}/(\text{A}\cdot\text{m}) = 1 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2 = 10\,000 \text{ gauss}$$

En la superficie de la tierra la inducción del campo magnético natural es máxima en los polos magnéticos (cerca de 70 mT) y mínima en el ecuador magnético (cerca de 30 mT). El campo magnético es originado por la circulación de corriente eléctrica. Por tanto, todas las instalaciones y equipos que funcionen con electricidad producen a su alrededor un campo magnético que depende de la magnitud de la corriente y de la distancia a ésta, así: a mayor corriente, mayor campo magnético y a mayor distancia menor densidad de campo magnético.



*Figura 3. Campo magnético e intensidad de corriente
(FUENTE: Autor)*

La regla de la mano derecha permite conocer la dirección y sentido del campo magnético creado por un conductor rectilíneo por el que circula una corriente eléctrica (I). Si el pulgar se coloca a lo largo del conductor, en la dirección y sentido de la corriente, los demás dedos se curvan en la dirección y sentido del campo magnético.



2.1.3 Campo electromagnético. Es una modificación del espacio debida a la interacción de fuerzas eléctricas y magnéticas simultáneamente, producidas por un campo eléctrico y uno magnético que varían en el tiempo, por lo que se le conoce como campo electromagnético variable. Es producido por cargas eléctricas en movimiento (corriente alterna) y tiene la misma frecuencia de la corriente eléctrica que lo produce. Por lo tanto, un campo electromagnético puede ser originado a bajas frecuencias (0 a 300 Hz) o a más altas frecuencias.

Las instalaciones del sistema eléctrico de energía producen campos electromagnéticos a 60 Hz Este comportamiento permite medir o calcular el campo eléctrico y el campo magnético en forma independiente mediante la teoría cuasiestática, es decir, que el campo magnético no se considera acoplado al campo eléctrico.

2.1.4 Ley de Faraday. La Ley de inducción electromagnética de Faraday (o simplemente Ley de Faraday) se basa en los experimentos que Michael Faraday realizó en el año 1831 y establece que la tensión inducida en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

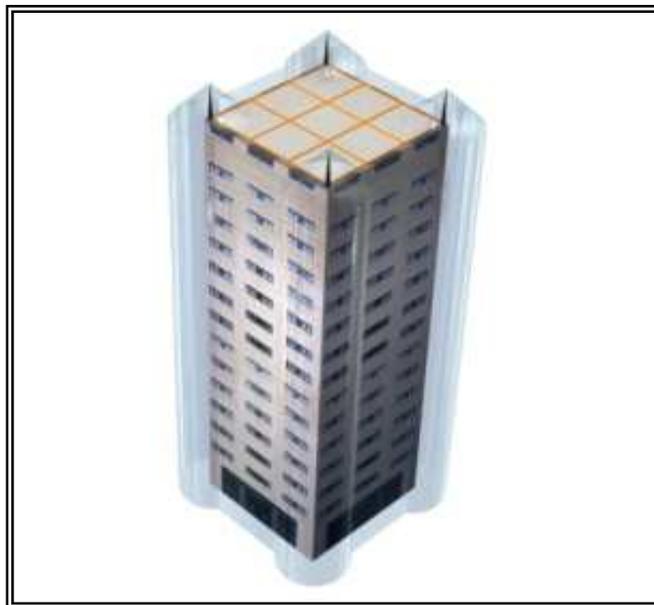
donde E es el campo eléctrico, $d\mathbf{l}$ es el elemento infinitesimal del contorno C , B es la densidad de campo magnético y S es una superficie arbitraria, cuyo borde es C .

2.1.5 Jaula de Faraday. Se define como un recinto metálico de paredes no necesariamente continuas, que constituye una pantalla eléctrica o electrostática. Si en el interior de un conductor existieran cargas eléctricas libres, éstas serían arrastradas por el

campo eléctrico en dirección perpendicular a las superficies equipotenciales, hasta alcanzar la superficie exterior del conductor. Por tanto, en un conductor en equilibrio, las cargas eléctricas libres no pueden existir más que en la superficie.

Por otra parte, si en el interior de un conductor hueco no existe ninguna carga, dentro de dicho conductor el potencial correspondiente será constantemente igual al correspondiente a su superficie, y el campo eléctrico nulo. En consecuencia, bastará rodear un cuerpo con una pantalla metálica unida a tierra para que el campo en el interior sea nulo, por muy intensos que sean los campos eléctricos exteriores.

De esta forma los equipos eléctricos y electrónicos de cualquier instalación eléctrica, para medidas de precisión, pueden ser protegidos contra cualquier perturbación eléctrica externa rodeándolos con una red de conductores, en forma de malla, no necesariamente muy tupida.



*Figura 4. Jaula de Faraday como sistema de protección externa
(FUENTE: <http://sevilla.generadordeprecios.info/IPP/IPP020>)*

2.2 TENSIONES DE SEGURIDAD

En el estudio de factores de riesgo eléctrico, existen tres condiciones que definen el diseño de un sistema de puesta a tierra, como son las tensiones de paso, de contacto y transferida. Las dos primeras se detallan en las figuras 5 y 6, ya que se constituyen en las limitaciones fundamentales para garantizar la seguridad de los seres humanos y animales.

2.2.1 Tensión de paso. La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del suelo, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente del potencial máximo.

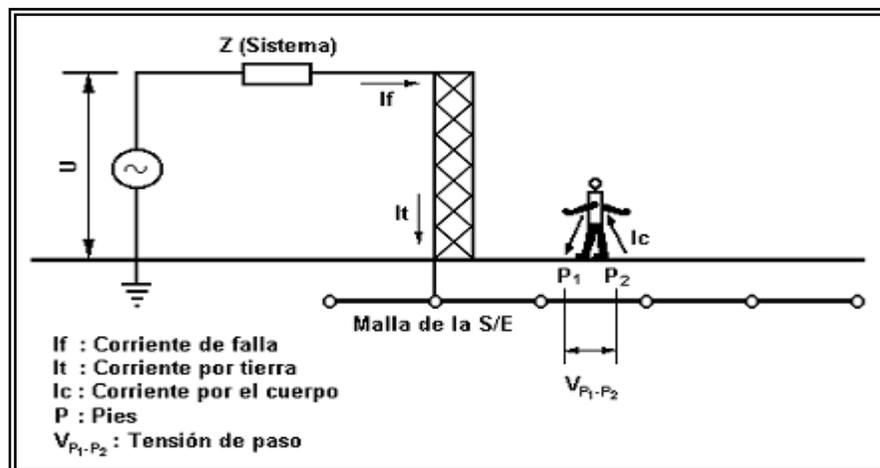


Figura 5. Exposición a tensión de paso

(FUENTE: <http://www.ieb.com.co/medidatensiones>)

2.2.2 Tensión de contacto. La tensión de contacto es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia horizontal máxima que se puede alcanzar, o sea, aproximadamente un metro.

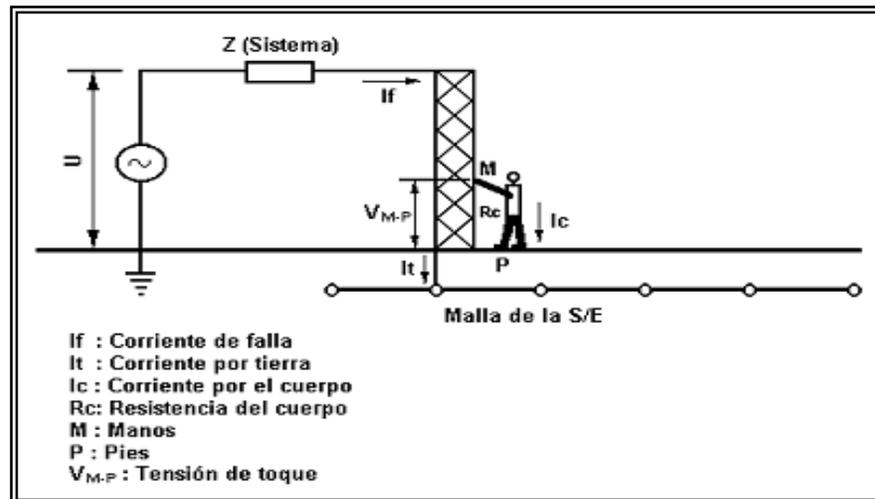


Figura 6. Exposición a tensión de contacto
(FUENTE: <http://www.ieb.com.co/medidatensiones>)

La máxima tensión de contacto aplicada al ser humano que se acepta, está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla. La tensión máxima de contacto o de toque no debe superar los valores dados en la Tabla 1.

TIEMPO DE DESPEJE DE FALLA	MAXIMA TENSION DE CONTACTO ADMISIBLE (Valores en RMS A.C.)
Mayor a dos segundos	50 voltios
750 milisegundos	67 voltios
500 milisegundos	80 voltios
400 milisegundos	100 voltios
300 milisegundos	125 voltios
200 milisegundos	200 voltios
150 milisegundos	240 voltios
100 milisegundos	320 voltios
40 milisegundos	500 voltios

Tabla 1. Valores máximos de tensión de contacto
(FUENTE: Norma IEC 60364 Parte 4, Sección 44)



2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE TIERRA

Como se mencionó anteriormente la materia de puesta a tierra se presta para una gran confusión debido a la gran variedad de artículos técnicos, especificaciones y manuales existentes. En esta parte del capítulo se hace una breve descripción de los diferentes sistemas de tierra con terminología técnica con el fin de poder hablar el mismo lenguaje.

2.3.1 Tierra física. También llamado sistema de electrodo de tierra, es la conexión física de un sistema a un electrodo bajo tierra. Esta es sólo una parte del sistema pues el resto, es decir, la tierra del circuito y la tierra de seguridad o del equipo están arriba de la tierra. Se cree muy a menudo que con tener una baja resistencia en el electrodo de tierra se tiene un buen sistema de tierra.

2.3.2 Tierra del circuito. Es el conductor conectado a tierra o conductor neutro, el cual tiene la función, en caso de un cortocircuito o falla a tierra, de transportar la corriente de falla cedida por el conductor de tierra del equipo. En el punto neutro-tierra del tablero principal de distribución, el neutro proporciona la trayectoria de baja impedancia, para la corriente de falla, de tal forma que se cierre el circuito, lo que facilita el disparo de los interruptores o protecciones principales del circuito.

2.3.3 Tierra del equipo. O sistema de tierra de seguridad, interconecta las partes metálicas de los equipos, que usualmente no acarrear corriente, para mantenerlos a una referencia cero o plano equipotencial. Este sistema previene peligros para las personas, pues en caso de contacto entre un conductor de fase y la carcasa metálica del equipo, lo mantiene a la misma referencia a tierra.

2.3.4 Tierra de protección contra Rayos. La función específica de este sistema es drenar la energía del rayo a tierra, en forma controlada, por medio de los dispositivos pararrayos, conductores bajantes y un electrodo de tierra separado. La Normatividad



vigente exige que el sistema de electrodo de tierra de protección contra rayos esté conectado con el electrodo de tierra de la edificación.

A primera vista, parece ilógico que la Norma exija la interconexión de los dos sistemas. Por un lado, queremos drenar la corriente del rayo a tierra y la Norma nos exige que lo conectemos a nuestro sistema del edificio. Es decir, estamos trayendo parte de la energía del rayo a nuestra instalación eléctrica. Sin embargo, la razón de esta regla es lógica. No debemos olvidar que la razón primordial de la Normatividad es la de garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.

2.3.5 Tierra aislada. En cualquier tipo de instalación eléctrica se pueden experimentar problemas de ruido eléctrico e interferencias de alta frecuencia en los conductos metálicos que protegen los cables de señales o sirven de conductores de tierra. Por ese motivo se inventó otro conductor de tierra, como conductor separado, aislado del conducto, diferente del conductor de seguridad, con la exclusiva función de proporcionar una tierra libre de ruido, separada de la tierra contaminada o tierra "sucia" del edificio.

Este sistema ofrece una tierra libre de ruido eléctrico para equipo electrónico sensible y se usa especialmente en salas de computadoras. También se conoce como tierra dedicada, aunque este término puede crear una gran confusión.

2.3.6 Tierra de referencia de señal. Es el sistema de referencia cero para todos los equipos de señales digitales. Este es un sistema inventado por fabricantes de equipos electrónicos con objeto de proporcionar una tierra sin contaminación, separada de la tierra del equipo, pero si no están interconectadas es una violación de la norma. Muy a menudo cuando los equipos se encuentran ubicados a 30 m o mayor distancia del tablero principal, se conectan a la estructura metálica del edificio. Efectuar esta conexión no es una violación de la Norma, pero puede existir una diferencia de potencial debido a la longitud misma del conductor de tierra.



2.4 RIESGOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA PARA SERES HUMANOS

Electrocución es el paso de corriente eléctrica externa por el cuerpo humano y riesgo de electrocución es la posibilidad de circulación de esa corriente a través del cuerpo. Como la vida de hoy presenta una gran dependencia de la energía eléctrica, es conveniente recordar algunos conceptos fundamentales:

2.4.1 Umbral de percepción. Cuando se siente sensación de cosquilleo sin daño para el 99.5% de las personas. Para una frecuencia de 60 Hz corriente alterna: 1,1 mA para hombres y 0,7 mA para mujeres.

2.4.2 Electrización. Valor de corriente que produce movimientos reflejos de los músculos. Para una frecuencia de 60 Hz corriente alterna: 16 mA para hombres y 10,5 mA para mujeres.

2.4.3 Clases de accidentes con origen eléctrico. Rayos, contactos directos (fase-fase, fase-neutro, fase-tierra); contactos indirectos (inducción, contacto con masa energizada, tensión de paso, tensión de contacto, tensión transferida), irradiaciones e incendios.

Para analizar los individuos expuestos a riesgo eléctrico se clasifican en individuos tipo "A" y tipo "B".

- *Individuo tipo "A"*. Toda aquella persona que lleva conductores eléctricos que terminan en el corazón. Para este tipo de paciente, se considera que la corriente máxima segura es de 10 μA .
- *Individuo tipo "B"*. Aquellos que están en contacto con equipos eléctricos y que no llevan conductores al corazón. Se estima como máxima corriente segura 24 μA .
- Estados en función del grado de humedad y tensión de seguridad.



ESTADO	TENSION DE SEGURIDAD
Piel perfectamente seca (excepcional)	80 voltios
Piel húmeda (normal)	50 voltios (Ambiente seco)
Piel mojada (más normal)	24 voltios (Ambiente húmedo)
Piel sumergida en agua (casos especiales)	12 voltios (Ambiente sumergido)

*Tabla 2. Estados en función del grado de humedad y tensión de seguridad
(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 33)*

- La gravedad de una descarga eléctrica en el ser humano depende de muchos factores, pero ocasiona desde un malestar hasta la muerte. Hay que recordar que el cuerpo humano es un buen conductor de electricidad.
- La resistencia normalizada del ser humano se toma de 1000 ohmios. Experimentalmente se mide entre las dos manos sumergidas en solución salina, que agarran dos electrodos y parado sobre una placa de cobre.
- El corazón es un músculo y la parte más vital del ser humano. La corriente estimada como mínima mortal es de 25 mA si al pasar por el corazón produce fibrilación ventricular.



EFFECTO	CORRIENTE ELECTRICA
Cosquilleo	0 - 2 mA
Contracción muscular involuntaria	2 - 9 mA
Contracción muscular dolorosa	9 - 20 mA
Efectos fatales si no se interrumpe	25 mA
Muerte segura si no se interviene. Ninguna quemadura	100 mA
Muerte cierta. Quemaduras	1 A
Quemaduras graves. No hay fibrilación. Supervivencia posible	5 A

Tabla 3. Efectos patológicos de la corriente

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 34)

2.5 PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

Además de los seres humanos, los equipos están expuestos a varias alteraciones o perturbaciones que pueden provenir de la red de energía o de ellos mismos. Las perturbaciones son fenómenos transitorios o permanentes que alteran el funcionamiento normal de los equipos eléctricos. En la Tabla 4 se hace un resumen de las perturbaciones eléctricas típicas.

2.5.1. Ruido eléctrico. Se denomina ruido eléctrico a todas aquellas señales, de origen eléctrico, no deseadas y que están unidas a la señal principal, de manera que la pueden alterar produciendo efectos que pueden ser perjudiciales. La principal fuente de ruido es la red que suministra la energía eléctrica, y lo es porque alrededor de los conductores se produce un campo magnético a frecuencia de 50 ó 60 Hz En la Tabla 5 se pueden observar las clases y el tipo de ruido asociados a cualquier instalación eléctrica.



2.5.2 Corrientes Espurias. También llamadas errantes, parásitas o vagabundas se pueden presentar por diversas causas, como por ejemplo: transformadores desbalanceados, cercas eléctricas, rayos, cables rotos, aislamientos inadecuados, aislamientos desgastados, cortocircuitos, protecciones galvánicas, tensiones inducidas, circuitos de baterías, electrostática o radio frecuencia.

Sus efectos pueden ser tan nocivos para los equipos como mortales para quien no conozca las técnicas para medir correctamente un sistema de puesta a tierra; tema que se tratará más adelante.

DENOMINACIÓN	DEFINICIÓN
RAYOS	Descarga eléctrica atmosférica nube-tierra directa o indirecta
SUSPENSIONES DE SERVICIO	Cortas: Anulación de tensión en $t < 20$ ms largas: Anulación de tensión en $t > 20$ ms
VARIACIONES DE FRECUENCIA	Cambios en el ritmo de oscilación de la tensión
CORTOCIRCUITOS	Unión franca entre dos puntos energizados a diferente potencial
ARMÓNICOS	Deformación leve y permanente de la onda de tensión. Su nombre completo es Distorsión Armónica Total
RUIDOS	Perturbación entre un equipo y la tierra que comparte con otro equipo
PARPADEOS	También se le llama "Flicker". Es una variación rápida de tensión que se produce en forma repetitiva.
IMPULSOS	Perturbaciones esporádicas de alto valor ($> 100V$) con una duración inferior a 2 ms y frecuencia > 500 Hz
RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	Fenómeno inductivo que altera el funcionamiento normal de un equipo eléctrico

Tabla 4. Perturbaciones de tipo eléctrico típicas

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 37)



CLASES	TIPO DE RUIDO	SOLUCIONES
- De la red	- Por impedancia común	- Cumplimiento de normas técnicas y de seguridad
- Intrínseco de dispositivos	- Acople capacitivo	- Buenas prácticas de cableado
- De interferencia	- Por acople magnético	- Transformador de aislamiento
	- Por transitorios en líneas de transmisión	- Transformador de ultraaislamiento
	- Por cables largos	- Estabilizador de tomas
	- Por cables móviles	- Estabilizador de resolución continua
	- Por AM, FM, RF	- UPS fuera de línea con By-Pass
		- UPS en línea con By-Pass
		- Unificar los sistemas de puesta a tierra

Tabla 5. Ruidos Eléctricos en un Sistema

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 38)



3. LA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA O RAYO

La descarga eléctrica atmosférica, o comúnmente conocido como el rayo, ha sido el fenómeno meteorológico más admirado, temido, interpretado y estudiado por las diferentes culturas a través de los siglos. Su interpretación se remonta a la antigua cultura Acadía (2000 A.C.), la cual representaba el fenómeno del rayo mediante una Diosa parada sobre los hombros de un guardia alado y tras de ella, sobre un carro de cuatro ruedas, el Dios del tiempo lanzando rayos con su fusta.

La descarga eléctrica atmosférica es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera. Los rayos nube-tierra han sido los más estudiados debido, fundamentalmente, a su influencia directa sobre los seres vivos y a las perturbaciones que causan en dispositivos, equipos o sistemas electrónicos, eléctricos o de comunicación.

Los sobrevoltajes transitorios de alto nivel los causan las descargas eléctricas atmosféricas, y en áreas de alta incidencia de rayos, provocan una gran cantidad de perturbaciones y dañan los equipos electrónicos, los cuales cuentan con una gran cantidad de semiconductores de alta sensibilidad a interferencias electromagnéticas.

Algunos de los impactos socioeconómicos de las descargas eléctricas atmosféricas se reflejan en cifras como las siguientes: estadísticas recogidas en un lapso de 20 años indican que la mayor causa de perturbaciones (58%) en la red de interconexión de Colombia, fue originada por descargas eléctricas atmosféricas. Una empresa de energía



mediana, gasta fácilmente en reposición de transformadores de distribución una cantidad anual aproximada de US\$2´500.000. ²

Las normas que rigen el diseño y especificaciones del sistema de protección las establece el Código de protección frente a descargas eléctricas atmosféricas, preparado por la Asociación Nacional de Protección, contra Incendios (NFPA, pos sus siglas en inglés), la misma organización que elaboró el Código Eléctrico Nacional. Estas normas vigentes fueron establecidas en 1904. El comité encargado de elaborar este código lo formaron el comité de la NFPA, el Comité de Protección contra Rayos (ASA), la Oficina Nacional de Normas (National Bureau of Standard) y el Instituto Americano de Ingenieros Electricistas (IEEE). Hoy el Código de Protección contra Rayos es el NFPA-780.

3.1 ESTRUCTURA TRIPOLAR DE LA NUBE DE TORMENTA

Desde que Benjamín Franklin demostró que el rayo es una descarga eléctrica gigante muchas investigaciones científicas sobre relámpagos, rayos y tormentas se han efectuado y registrado en varios países. En todos estos estudios se ha aceptado que el relámpago es el paso de carga eléctrica, positiva o negativa, de una región de una nube a otra, y que el rayo es el tránsito de nube a tierra o viceversa. Para que esta descarga ocurra, la nube debe hallarse electrificada, o sea, las cargas positivas deben estar separadas de las negativas.

Durante buena parte del siglo XX investigadores de diferentes partes del mundo estudiaron la estructura eléctrica de las nubes de tormenta. Hoy en día es aceptado por la gran mayoría de la comunidad científica internacional que una nube de tormenta presenta una estructura de carga eléctrica tripolar: con una región principal negativamente cargada y comprendida entre dos regiones cargadas positivamente, según muestra la Figura 7.

² DIAZ, Pablo. Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución. Capítulo 17. Editorial McGraw Hill. México D.F. 2001.

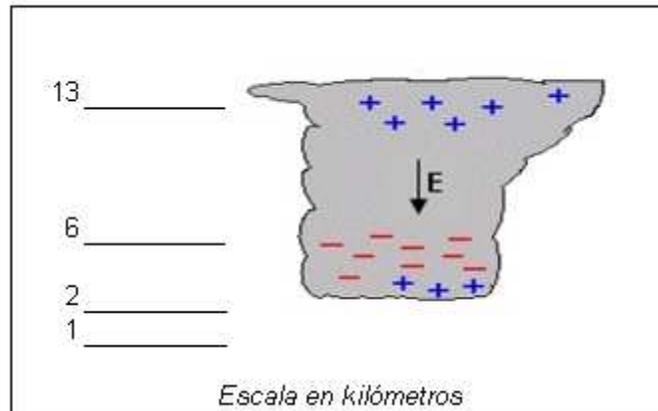


Figura 7. Estructura tripolar de la nube

(FUENTE: Norma NTC 4552, 1ª Actualización, Anexo E, Pág.33)

Las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo por consiguiente concentraciones desiguales de la carga en el seno de la misma. Y alrededor del 90% de las nubes poseen la concentración de cargas negativas en su parte inferior. La explicación del porqué la concentración es de esa forma tiene que ver con las temperaturas existentes en la parte superior de la nube (-40°C), que hace que las gotas de agua se conviertan en cristales de hielo y en conjunto con las cargas que se mueven desde la superficie, por efecto de la convección, y las colisiones entre estas partículas dan origen a dicha distribución (cristales de hielo = q^{+} y gotas de agua = q^{-}).

Las descargas del rayo se distinguen o clasifican según dos criterios principales, que son sus sentidos de desplazamiento y su polaridad.

- Descargas de rayo descendentes: desarrollo de trazador de las nubes al suelo (caso de terrenos planos).
- Descargas de rayo ascendentes: desarrollo del trazador del suelo hacia las nubes. (caso de terrenos montañosos).

- Descargas de rayo negativas: cuando la parte negativa de la nube se descarga (80% de los casos, en países templados).
- Descargas de rayo positivas: cuando se producen por eliminación de la parte positiva.

La distribución estadística experimental de las descargas de rayo, en amplitud, corresponde, según la Figura 8.

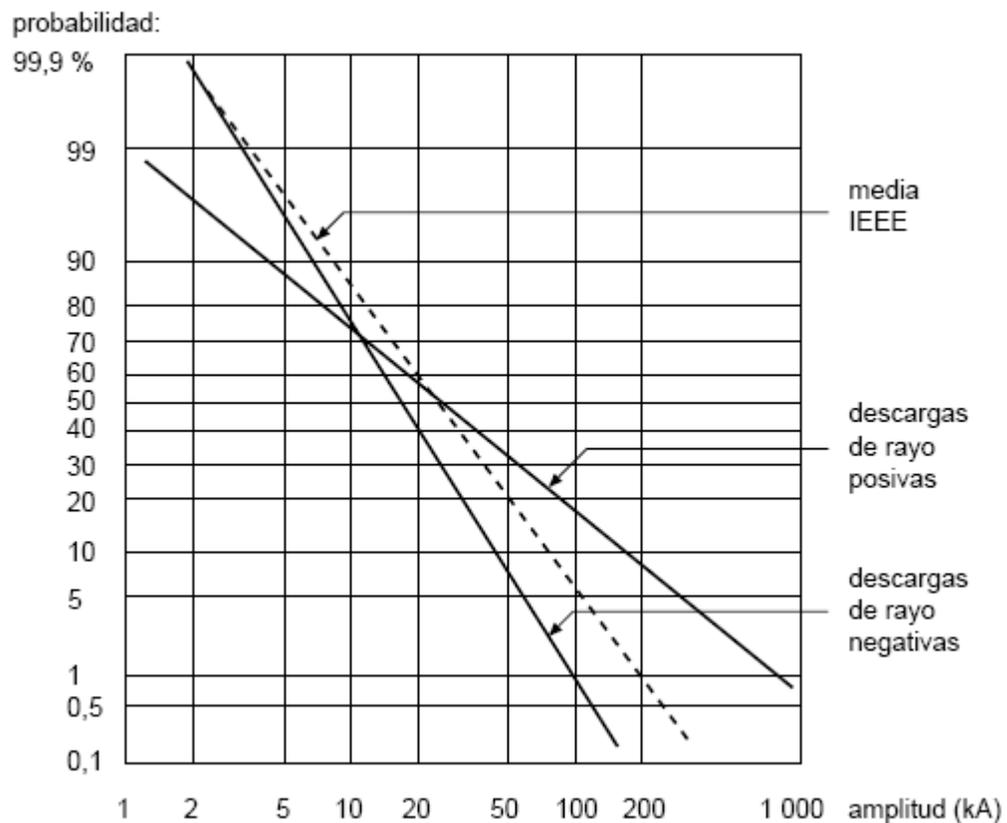


Figura 8. Distribución estadística experimental, en amplitud, de las descargas de rayo positivas y negativas.
(FUENTE: Cuaderno técnico No. 168 Schneider, Pág. 8)



3.2 ETAPAS DE UNA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA O RAYO

En una nube convectiva los mecanismos de generación y separación de cargas tienden a aumentar la energía eléctrica del sistema. Cuando el campo eléctrico o el potencial superan un valor crítico, se produce el rayo o descarga eléctrica que tiende a reducir tal energía, con una nueva redistribución de las cargas eléctricas: en la nube, en el suelo y en la atmósfera. Durante un corto período de tiempo la energía electrostática acumulada es liberada en forma de energía electromagnética (relámpago visible más ondas de radio), energía acústica (trueno) y energía calorífica. El efecto global de las corrientes puestas en juego es el del transporte de cargas negativas hacia el suelo y positiva a niveles altos de la atmósfera

La acumulación local de cargas produce dos tipos de descargas: las NN (dentro de la nube o entre Nube y Nube) y las NT (entre la Nube y Tierra). Normalmente existe una proporción de 5 (o más) a 1 a favor de las NN frente a las NT, ya que los procesos de carga son producidos dentro de la nube y la disminución de la presión con la altura favorece la aparición de los NN. Podemos subdividir los del tipo NT en positivos (descargas NT(+)) o negativos (descargas NT(-)), según sea el origen de la descarga y los centros que lo generen. Lo que sí podemos afirmar es que la mayoría se suelen generar en la región principal de cargas negativas y son del tipo NT(-). En general se llamará rayo a las descargas eléctricas que se producen en la atmósfera de tipo NN ó NT.

La mayoría de descargas NT se inician por el fuerte campo eléctrico que existe entre la carga situada debajo de la nube y la carga de polaridad opuesta ubicada en su base. En términos generales las etapas que comprenden una descarga eléctrica atmosférica son:

3.2.1 Encendido de la descarga (Preliminary Breakdown). Ocurre en el interior de la nube, pero no hay acuerdo entre los investigadores sobre la forma exacta y localización del encendido de la descarga en el interior de la nube.



3.2.2 Líder escalonada (Stepped Leader). Particularizando a los rayos que se generan desde la nube a tierra, tipo NT, la generación de la descarga comienza en la gran mayoría de los casos, entre la región principal de carga negativa y la superficie terrestre (cargada positivamente por inducción). La chispa tiende a seguir un camino, que se va creando por sucesivos impulsos, desde la nube a tierra. Es la llamada guía escalonada (Step Leader) que con arranques y paradas sucesivas va acercándose a tierra.

3.2.3 Proceso de enlace (Attachment Process). A medida que la punta del líder avanza hacia la tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos o en irregularidades propias del terreno crece hasta alcanzar el valor de disrupción en el aire y una o más descargas ascendentes son iniciadas desde esos puntos.

3.2.4 Descarga de conexión. Cerca de la superficie terrestre se va generando, poco a poco y sobre ciertos puntos llamados de descarga, una acumulación de cargas positivas que son las primeras en conectar con la guía escalonada descendente, llegando a cerrar el circuito nube-tierra.

3.2.5 Descarga de Retorno (Return Stroke). Se produce en este momento la primera descarga de retorno que se desplaza desde la tierra a la nube transportando gran cantidad de carga en el canal y en un tiempo muy pequeño, aumentando enormemente la temperatura, liberando gran cantidad de energía calorífica y electromagnética, con los efectos luminosos y sonoros por todos conocidos.

3.2.6 Líder Dardo (Dard Leader). Las descargas de retorno que ocurren después de la primera son iniciadas generalmente por líderes dardo. El líder dardo deposita carga en el canal remanente de la descarga previa, el cual puede componerse de una o más ramas principales si la descarga anterior fue la primera, y de esta manera el canal se pone en un potencial alto respecto a la tierra, estableciendo la etapa o fase para las subsecuentes descargas de retorno. Según lo dicho anteriormente, un rayo se compone de varias descargas de retorno, lo que comúnmente se conoce como multiplicidad del rayo.

3.2.7 Guía rápida. En la mayoría de los casos, cuando la primera descarga de retorno ha desaparecido, baja otra guía, pero esta vez sin pausa. Es la llamada guía rápida (Dart Leader) que baja de una sola vez de forma no pulsante. Posteriormente a su llegada al suelo aparece una segunda descarga de retorno (menos energética que la primera) y así sucesivamente hasta unas 5 o 10 veces por término medio (se han llegado a detectar hasta 42 descargas de retorno por un mismo camino). Para el ojo humano todo sucede tan rápido que lo que se observa es un solo destello.

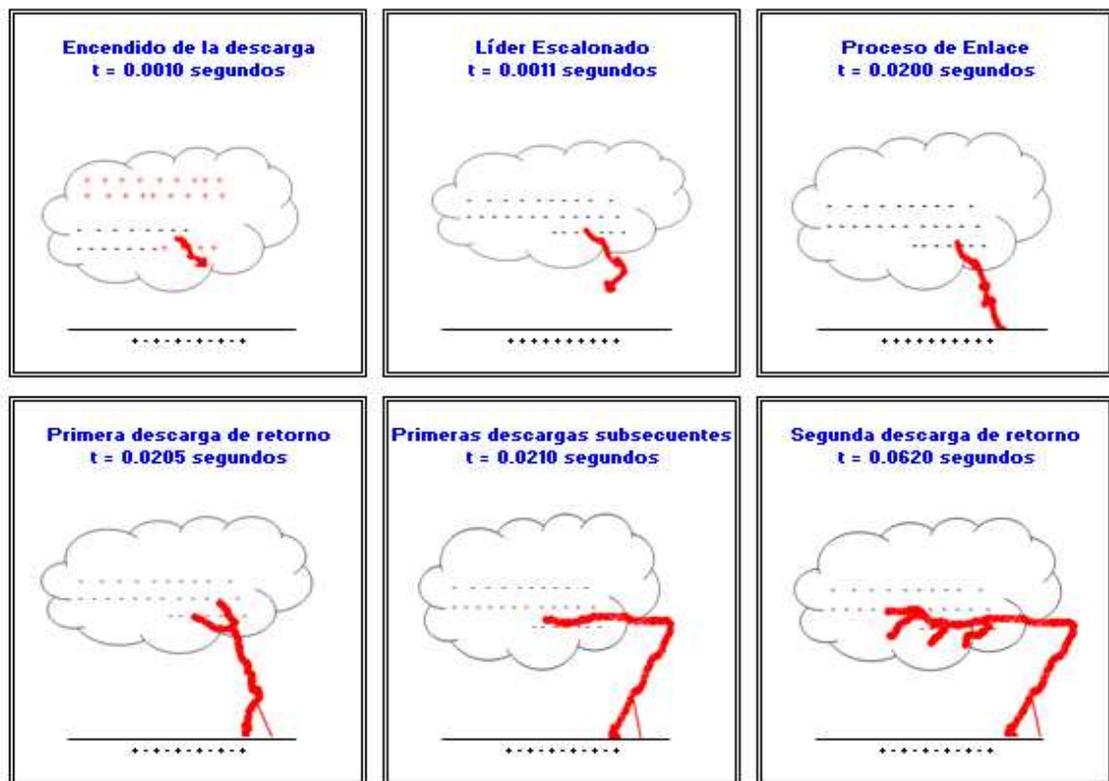


Figura 9. Proceso de formación del Rayo

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 44)



3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS O RAYO

3.3.1 Intensidad del rayo. Los rayos pueden alcanzar intensidades de 200 kA (ocasionalmente 500 kA) con una energía media disipada por el canal de descarga de 10^5 J/m. No es factible ni rentable proteger un circuito contra la caída de un rayo directo, pero sí es factible la protección de circuitos contra los efectos del 95% de las descargas y contra sus efectos secundarios, que se estiman en tensiones de más de 5 kV y corrientes de unos 6 kA.

3.3.2 Longitud, energía y duración del rayo. La longitud media de un rayo es de 3 km y la energía media total por descarga es de 3×10^9 J². La duración media de una descarga es de manera aproximada de 30 μ s. La potencia media por rayo es de unos 10^{13} W. Cada rayo consta de cuatro descargas, por término medio, separadas unos 40 ms. Usualmente los rayos empiezan en la base de la nube, en un punto cuyo campo eléctrico es del orden de los 30000 V/m. Cada componente del rayo sólo dura décimas de milisegundo.

Se estima que una descarga típica de rayo puede tener aproximadamente 3 billones de kilowatts de potencia a un nivel de tensión aproximado de 100 millones de Voltios y una corriente promedio de 18 kA.

3.3.3 El trueno. Una porción de la energía de una descarga atmosférica se disipa en forma acústica, llamada trueno y otra mucho mayor de aproximadamente un 75% se disipa en forma de calor, alcanzando una temperatura en el canal de descarga de 15000 a 30000 °C y, como consecuencia, la presión de los gases generados puede llegar a unas 100 atmósferas.

² DIAZ, Pablo. Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución. Capítulo 17. Editorial McGraw Hill. México D.F. 2001.



El trueno es el sonido de la explosión a lo largo de todo el canal de descarga de estos gases. El efecto más importante del rayo es el efecto inductivo o di/dt máximo debido a la ley de Faraday:

$$V = -L(di / dt)$$

Este efecto de sobretensión transitorio tiene lugar en los primeros 2 o 3 μs . La impresión de que el destello del rayo dura más de un segundo se debe a los efectos posteriores en la retina del ojo.

3.3.4 Curvas características del rayo. Una nube llega a cargarse eléctricamente hasta tal grado, que la gran diferencia de potencial con relación a tierra, produce el salto del arco o rayo. Las nubes y el suelo pueden considerarse como las placas de un gran condensador que se descarga a través del canal del rayo. La impedancia del canal es del orden de los 5 $k\Omega$. Aunque los rayos pueden tener muchas formas de onda, la curva característica de la corriente de un rayo se muestra en la Figura 9.

La Figura 10 muestra las características de la curva 8/20 μs de corriente. El tiempo de ascenso lo define la IEEE, Std 4-1978 como:

$$1.67(t_{90} - t_{30})$$

En donde:

t_{90} y t_{30} = el tiempo de ascenso entre el 30% y 90% de la amplitud de la onda.

La duración se define como el tiempo entre el origen virtual y el 50% del tiempo de decaimiento. El origen virtual es el punto donde una línea recta entre el 30% y el 90% del frente de la onda intersecta la línea de tensión cero. En este caso 8 μs es el tiempo de ascenso y 20 μs es el tiempo de decaimiento hasta el 50% de la cola de la onda.

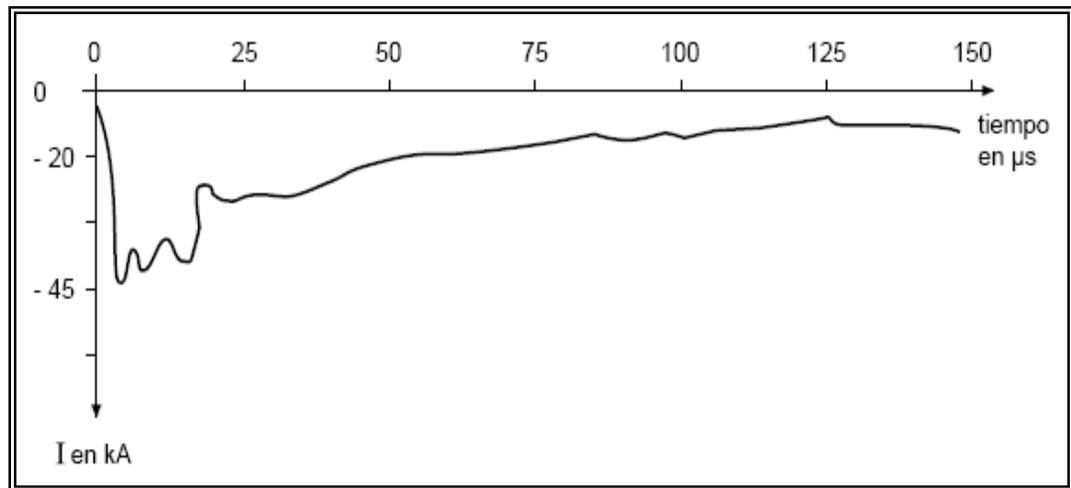


Figura 10. Forma de onda de la corriente de rayo. Curva representativa de una descarga atmosférica 8/20 μ s.
(FUENTE: Cuaderno técnico No. 168 Schneider, Pág. 8)

3.3.5 Salto de arco del rayo. Muchas organizaciones mundiales registran diariamente la incidencia de rayos en áreas geográficas específicas. Los datos obtenidos indican que el salto del arco de un rayo destructivo puede tener un nivel de 30 kA a un nivel de tensión de 30 millones de Voltios. Las sobretensiones transitorias inducidas por rayos en el sistema de alimentación pueden causar el mal funcionamiento del equipo o introducir datos o mandatos erróneos.

3.3.6 Intensidad de campo eléctrico en el rayo. Dada la gran variedad de la trayectoria y el valor de las descargas eléctricas de los rayos, que pueden alcanzar 200 kA cualquier dispositivo de protección frente a ellos es prohibido.

Los efectos secundarios de un rayo a cierta distancia (1 km a la redonda) del punto de caída también son considerables. La siguiente Tabla muestra la densidad espectral y la intensidad del campo eléctrico debidas a un rayo de 100 kA medido a 100 m de distancia del punto de caída.

FRECUENCIA	MARGEN DE FRECUENCIA	ANCHO DE BANDA (dB/MHz)	RAYO (DE)	IC
10 kHz	1-32 kHz	-30	244	214
100 kHz	32-320 kHz	-11	216	205
1 MHz	0.32-1.7 MHz	9	199	208
3 MHz	1.7-5.8 MHz	19	175	194
10 MHz	5.8-7 MHz	29	155	184
30 MHz	17-58 MHz	39	135	174
100 MHz	58-170 MHz	49	115	164
300 MHz	170-580 MHz	59	95	154
1 GHz	0.58-1.7 GHz	69	75	144
3 GHz	1.7-5.8 GHz	79	55	134
10 GHz	5.8-20 GHz	89	35	124
DE = Densidad espectral dB $\mu\text{V}/\text{m}/\text{MHz}$				
IC = Intensidad de campo eléctrico, dB $\mu\text{V}/\text{m}$				

Tabla 6. Densidad e intensidad del campo eléctrico debidas al rayo

(FUENTE: DIAZ, Pablo. Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.

Capítulo 17. Pág. 165)

3.3.7 Tipos de Rayos. Los rayos se pueden dividir en cuatro tipos, de acuerdo con la dirección de movimiento: ascendentes o descendentes y de acuerdo con la polaridad del líder que inicia la descarga positiva o negativa, según se muestra en la Figura 11. Un rayo descendente negativo se inicia en la carga negativa de la nube y la mayor parte de la trayectoria entre nube y tierra es cubierta por líder descendente. Un Rayo de polaridad positiva esta asociado a la carga positiva dentro de la nube, y la dirección de movimiento está definida por el líder que cubre la mayor parte del canal de la descarga.

Hasta ahora ha sido aceptado a nivel mundial que las descargas más comunes son descendentes de polaridad negativa, sin embargo en Colombia se ha encontrado que en algunas zonas por ejemplo el Magdalena medio, y en determinados meses las descargas son en su mayoría descendentes de polaridad positiva.

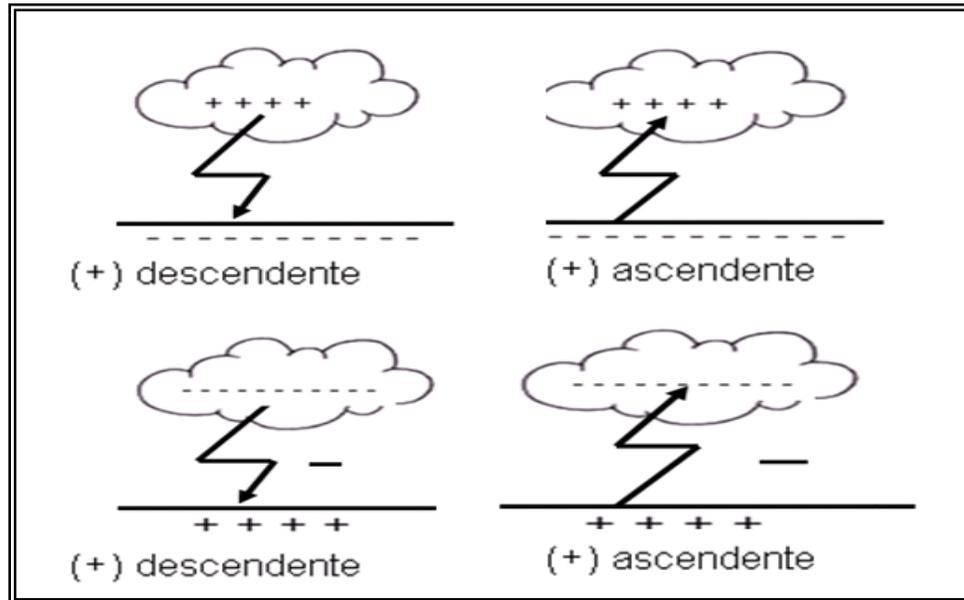


Figura 11. Cuatro tipos de Rayos

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 44)

3.3.8 Daños y pérdidas debido a los rayos. En la figura 12 se aprecian los tipos de daños y pérdidas que están directamente relacionadas con el tipo de impacto de una descarga eléctrica atmosférica.

Punto de impacto

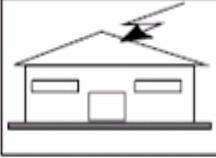
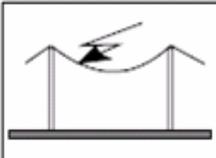
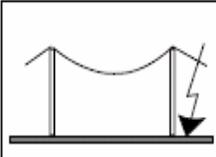
- **S1** Directo a la Estructura
- **S2** Cercano a la estructura
- **S3** Impacto en la acometida de la edificación
- **S4** Cercano a la acometida de la edificación

Tipo de lesiones

- **D1** Seres vivos debido a tensiones de paso y de contacto
- **D2** Daños físicos (fuego, explosión, destrucciones mecánicas)
- **D3** Fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos debido a sobretensiones

Tipo de pérdidas

- **L1** Vidas humanas
- **L2** Servicios públicos
- **L3** Patrimonio cultural
- **L4** Pérdidas económicas

	PUNTO DE IMPACTO	TIPO DE DAÑO	TIPO DE PERDIDA
	S1	D1 D2 D3	L1 L1, L2, L3, L4 L1, L4
	S2	D2 (**) D3 (***)	L1 (*), L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L2, L3, L4
	S4	D3	L1 (*), L2, L4

(*) En el caso de hospitales e instalaciones con riesgo de explosión

(**) En el caso de instalaciones con riesgo de explosión

(***) En el caso de instalaciones con equipos electrónicos

Figura 12. Daños y pérdidas según tipo de impacto del rayo
(FUENTE: Norma IEC 62305-1, Ed.1, Protection Against Lightning, Pág. 20, Tabla 2a)



3.4 PARÁMETROS DEL RAYO

Los parámetros del rayo han sido medidos en latitudes norte o sur pero muy poco en zonas tropicales o semitropicales. Los parámetros recomendados por organismos como VDE y CIGRE (International Council on Large Electric Systems) se basan en las mediciones directas llevadas a cabo por el investigador K. Berger en Monte Salvatore localizado en la frontera Suiza - Italia.

Los parámetros del rayo están siendo evaluados por el comité CIGRE 33.01 "Ligtning". Dentro de este comité se ha propuesto tener en cuenta la variación espacial y temporal de dichos parámetros. Hasta tanto no se publiquen los valores actualizados se recomienda considerar probabilísticamente los valores sugeridos por CIGRE en la latitud norte o los estimados para Colombia a partir de cualquiera de los tres sistemas de medición y localización:

- Programa de Adquisición y Análisis de señales - P.A.A.S.- Universidad Nacional de Colombia (1 sensor TSS-420).
- RECMA, propiedad de interconexión Eléctrica S.A. - ISA (6 sensores tecnología LPATS).
- Empresas Públicas de Medellín - EPPM (4 sensores tecnología LLP).

De acuerdo con resultados de investigaciones se ha planteado la hipótesis que en países tropicales, como Colombia, se puede 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.

Los principales parámetros del rayo que se tiene en cuenta para protección contra rayos de vidas humanas, semovientes, estructuras y equipos eléctricos y electrónicos se presentan a continuación:

3.4.1 Nivel cerámico (NC). El nivel cerámico de un lugar es el número promedio de días al cabo del año en los que hay una tormenta. Se considera día con tormenta a aquel en el que al menos se oye un trueno.

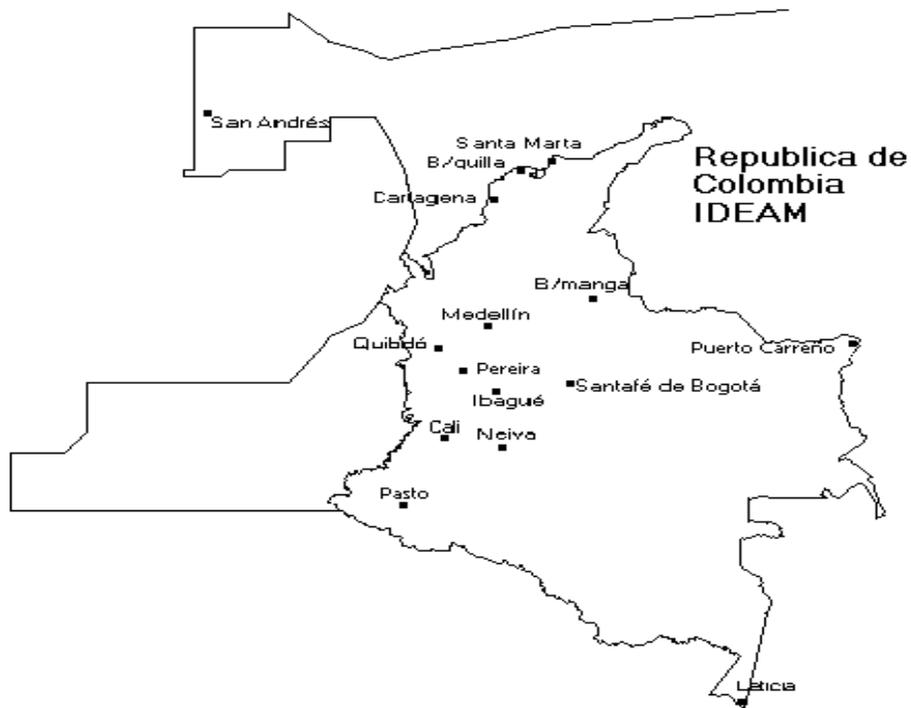


Figura 13. Principales ciudades de Colombia
(FUENTE: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/tormen>)

En la Figura 14 se pueden apreciar los niveles cerámicos en Colombia los cuales corresponden a los promedios multianuales entre 1974 y 1998, elaborados por convenio entre la Universidad Nacional de Colombia y el HIMAT (Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras).

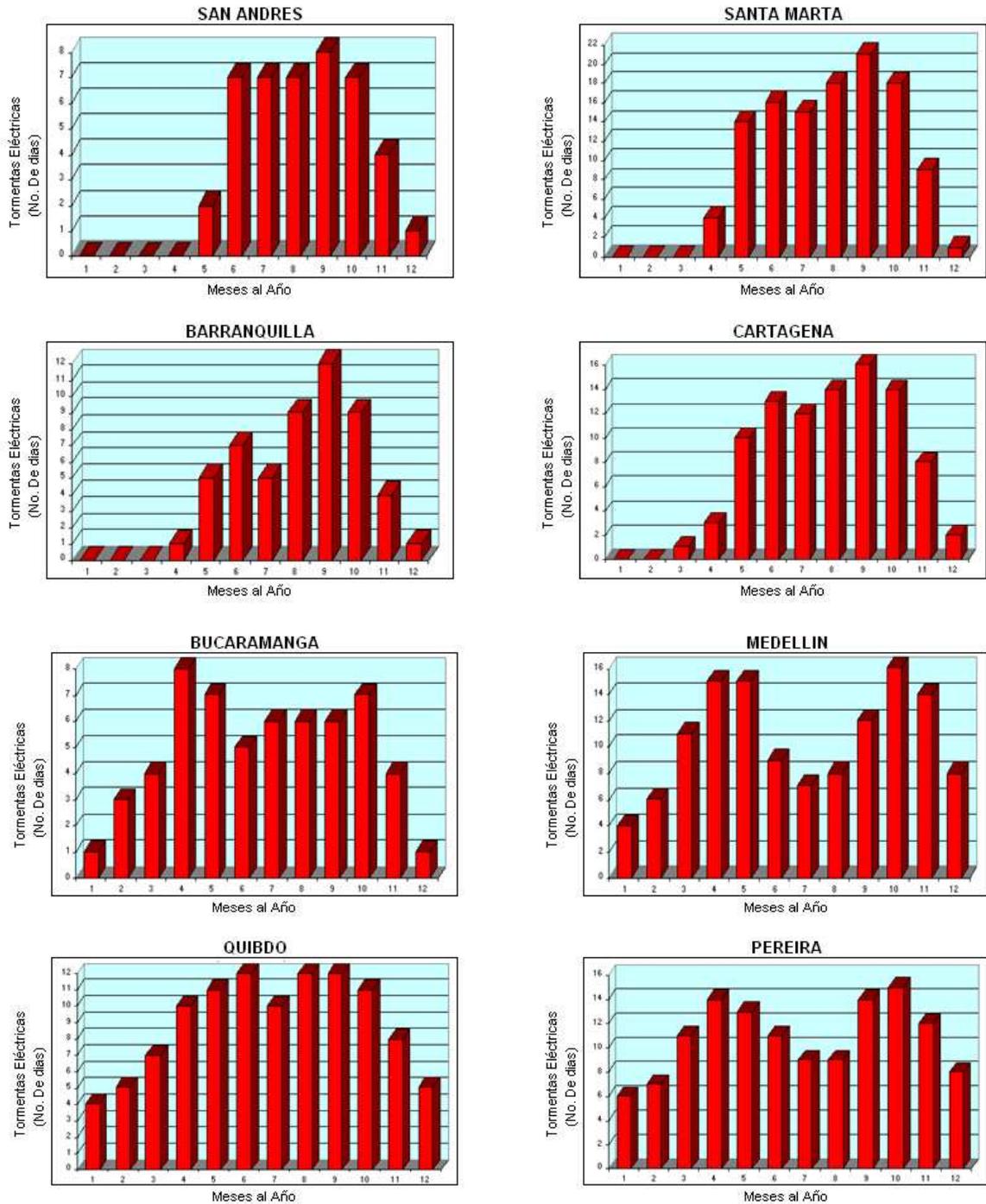


Figura 14. Distribución media mensual de tormentas eléctricas – Niveles Cerámicos
 (FUENTE: Tabla de valores mensuales de los principales parámetros meteorológicos del IDEAM <http://bart.ideam.gov.co>)

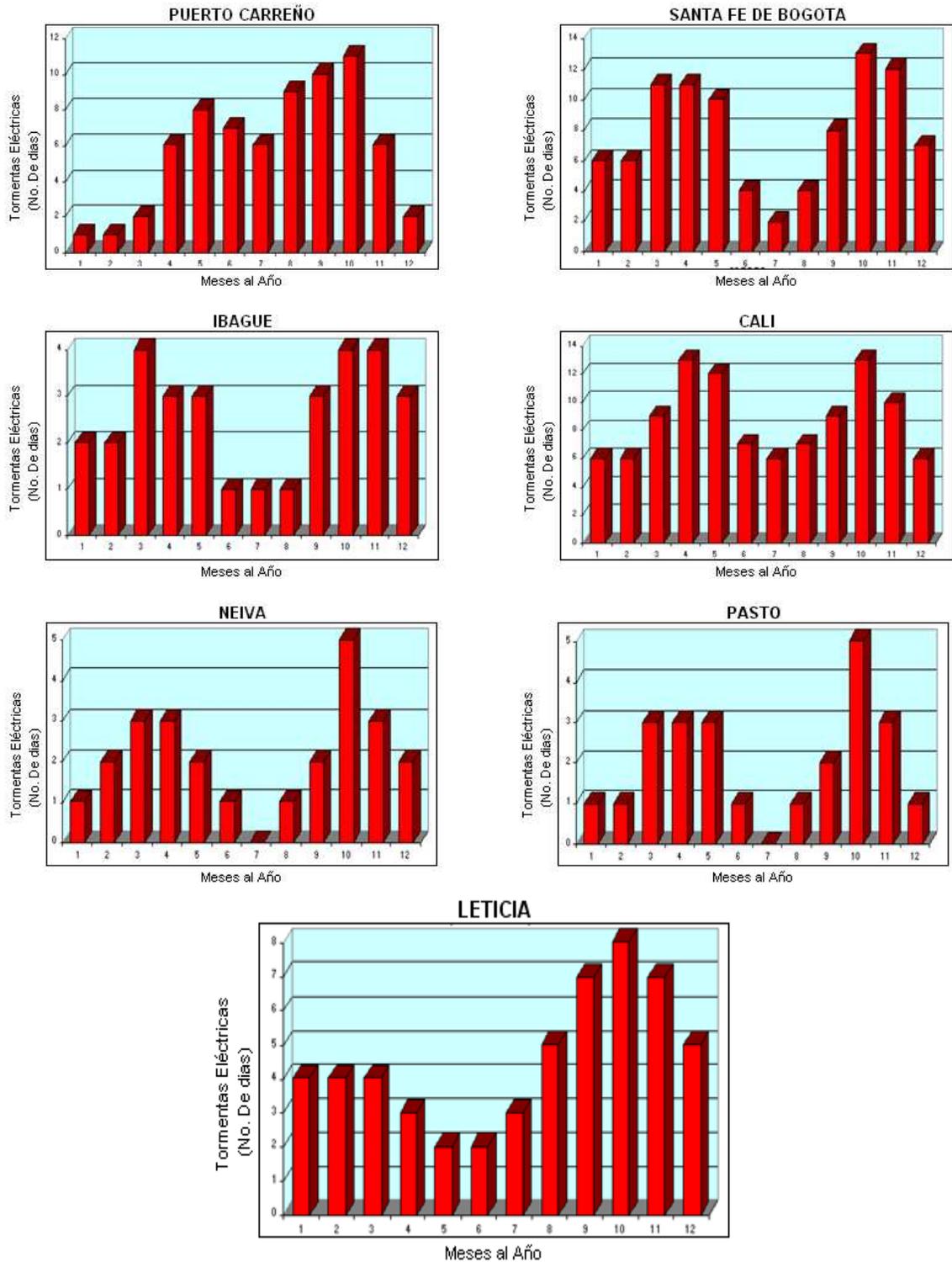


Figura 14 (Continuación). Distribución media mensual de tormentas eléctricas – Niveles Ceráunicos
 (FUENTE: Tabla de valores mensuales de los principales parámetros meteorológicos del IDEAM <http://bart.ideam.gov.co>)



3.4.2 Densidad de Descargas a Tierra (DDT). La densidad es un parámetro complementario al NC, que permite cuantificar la incidencia de rayos en la zona. En Colombia, a partir de los datos de los sistemas de medición y de localización de rayos se pueden obtener este y otros parámetros del rayo. En la Tabla 7 se presentan los parámetros de densidad de las principales ciudades y zonas de Colombia.

Ciudad		Rango de DDT (rayos/km ² x año) para áreas de 3 km x 3 km
Arauca	Puerto Inárida	1-2
Barranquilla	Riohacha	
Bogotá	San Andrés	
Bucaramanga	San J. del Guaviare	
Cali	Tumaco	
Cartagena	Tunja	
Cúcuta	Valledupar	
Florencia	Villavicencio	
Ipiales	Armenia	
Leticia	Ibagué	
Mitú	Manizales	
Mocoa	Medellín	
Neiva	Montería	
Pasto	Ocaña	
Popayán	Santa Marta	
Puerto Carreño	Sincelejo	
	Yopal	
Corozal	Magangue	3-5
Pereira	Turbo	
Girardot		6-9
Barranca		
Quibdó		
Samaná		10-14
El Banco		
Bagre		
Remedios		
La Palma		15-20
Nechí		
Zona rural de Quibdó		8-14
Zona rural de La Palma		8-12
Zona rural de Samaná		10-16
Serranía de San Lucas y Estribaciones		20-40
Magdalena Medio		8-16

Tabla 7. Densidad de Descargas a Tierra principales ciudades de Colombia
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Anexo A, Pág.23)



3.4.3 Polaridad. Tipo de carga (positiva o negativa) asociado con la descarga de retorno de rayo.

3.4.4 Valor pico de la corriente de retorno del rayo. También llamado corriente máxima del rayo (Lightning Peak Current), dado en kiloamperios, es importante para el cálculo de la caída de tensión de la resistencia al impulso de la puesta a tierra de la instalación cuando el rayo impacta y el cálculo de la distancia de impacto (r_s) del rayo a la estructura. La corriente máxima del rayo se estima indirectamente por un sistema localizador de rayos. Tales sistemas tienen sensores remotos que miden el campo eléctrico y/o magnético producido por un rayo a grandes distancias, lo que permite el cálculo de la corriente del rayo. Para estimar la corriente pico, en los sistemas localizadores instalados en Colombia, se asume una relación entre el campo magnético pico y la corriente pico.

3.4.5 Máxima tasa de ascenso de la corriente del rayo $(di/dt)_{máx}$. El valor $(di/dt)_{máx}$ se utiliza para el cálculo de las tensiones electromagnéticas inducidas que se presentan en los lazos metálicos, abiertos o cerrados, en cualquier instalación y son las causantes de daños en equipos electrónicos. El máximo valor de tensión inducida ($V_{máx}$), en Voltios, en un lazo metálico se expresa como:

$$V_{máx} = M (di/dt)_{máx}$$

en donde M es la inductancia propia del lazo metálico, expresada en Henrios, la cual depende de la geometría y, $(di/dt)_{máx}$ es la máxima tasa de ascenso de la corriente del rayo expresada en kA/ μ s .

3.4.6 Cuadrado de la corriente de impulso del rayo (i^2dt). Se utiliza para el cálculo del calentamiento y los esfuerzos electromecánicos al circular la corriente del rayo por conductores metálicos.



Para un conductor de resistencia ohmica R , la energía W , disipada en forma de calor, y expresada en Julio, es:

$$W = R \int i^2 dt$$

Estos parámetros característicos del rayo son básicos para estudios de potenciales a tierra, tensiones de acople de líneas apantalladas, cálculo de corrientes permitidas en el cuerpo humano, cálculo de tensiones de paso, calentamiento de conductores y sobretensiones inducidas, entre otros.



4. PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. PRINCIPIOS GENERALES

El rayo es un fenómeno meteorológico de origen natural, cuyos parámetros son variables espacial y temporalmente. La mayor incidencia de rayos en el mundo, se da en las tres zonas de mayor convección profunda: América Tropical, África central y norte de Australia. Colombia, por estar situada en la zona de confluencia intertropical presenta una de las mayores actividades de rayos del planeta; de allí la importancia de normalizar la protección contra dicho fenómeno, pues si bien los métodos desarrollados a nivel mundial aplican para Colombia, algunos parámetros del rayo, como densidad de descarga a tierra o nivel cerámico, son particulares de nuestro país.

4.1 SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA)

A un alto nivel de riesgo siempre corresponderá un alto nivel de protección. Cuando se vive en una zona del mundo con alta incidencia de rayos, es apenas lógico complementar el tema de tierras con el de protección contra rayos. En la Figura 15, se presenta esquemáticamente un Sistema Integral de Protección contra Rayos, el cual se ha propuesto e implementado en casos reales en Colombia.

Como se puede apreciar, el sistema de puesta a tierra es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos.



Figura 15. Sistema Integral de Protección contra Rayos

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 46)

4.1.1 Importancia del SIPRA. El propósito de la protección externa es hacer posible la descarga y dispersión de las elevadas corrientes del rayo hacia la tierra a través de elementos conductores, sin causar sobretensiones peligrosas tanto para las personas como para los equipos. Así mismo el estudio del SIPRA tiene por objeto establecer las protecciones requeridas por los equipos eléctricos y electrónicos instalados en una edificación a fin de protegerlos contra los efectos de los Impulsos Electromagnéticos Generados por los Rayos – IEMRA.

Los IEMRA ingresan al sistema eléctrico por acoplamiento con las acometidas eléctricas (red externa), telefónica, de datos o con el sistema de puesta a tierra. Igualmente puede presentarse acoplamiento de los IEMRA con el cableado interno de la edificación al circular una corriente de rayo por las bajantes del sistema externo de protección contra rayos.



4.1.2 Implementación del SIPRA. Todas las consideraciones para la implementación del SIPRA, tales como las especificaciones, materiales y ubicación, deben ser tenidas en cuenta, preferiblemente, en la etapa de diseño de una estructura a construir. Ello implica un consenso entre los diseñadores, constructores, y propietarios. Solo así será más benéfico y menos costoso llegar a conciliar las exigencias técnicas con la parte estética. La implementación del SIPRA parte de la base que los cableados de la instalación a proteger están de acuerdo con lo establecido en la NTC 2050.

4.2 NORMATIVIDAD PARA EL USO E IMPLEMENTACIÓN DEL SIPRA

La normatividad vigente sobre los sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas en Colombia, ha sido concebida para estar en armonía con las demás normas nacionales e internacionales que tienen que ver con la protección contra rayos. La norma basa la protección en la aplicación del Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA) conducente a mitigar los riesgos asociados con la exposición directa e indirecta a los rayos. Se fundamenta en que la instalación de un SIPRA no induce ni previene la formación del rayo.

4.2.1 Normas referidas. Las recomendaciones generales para el uso e implementación del SIPRA actualmente se hacen siguiendo las siguientes normas nacionales e Internacionales:

- IEC 61024-1 Protection of Structures Against lightning.
- IEC 61312-1 Protection Against the Effects of lightning electromagnetic impulses.
- Norma NTC 4552, 1ª Actualización. Protección contra rayos. Principios generales.

4.2.2 Componentes de la Normatividad. Los componentes principales en que se basan estas normas son:

- Evaluación del Nivel de Riesgo
- Definiciones

- Datos estadísticos para la obtención de los parámetros del rayo.
- Materiales para terminales de captación, bajantes y puestas a tierra.
- Criterios para inspección, cálculos y mantenimiento.
- Aspectos mínimos para dimensionar protecciones internas.

Las anteriores normas referidas no tienen la finalidad de ser un manual de especificaciones de diseño, ni un texto de instrucciones para personal no calificado, ni provee el soporte legal para hacer la minuta de un contrato. Son documentos de carácter eminentemente técnico, cuyo cumplimiento se espera que sea exigido por los usuarios interesados en una buena protección contra rayos, como garantía de protección de sus intereses.

4.2.3 Objeto. Las normas establecen la metodología que debe ser utilizada para propender por la seguridad de las personas ubicadas en estructuras de uso común, expuestas a impactos directos o indirectos de rayos.

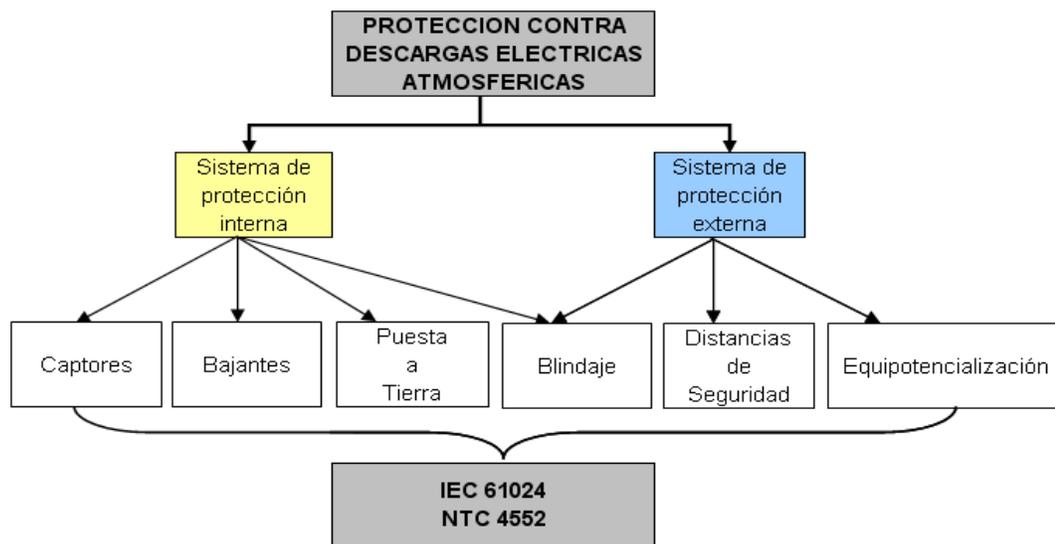


Figura 16. Normas referidas para la implementación del SIPRA

(FUENTE: Autor)



4.2.4 Alcance. Las normas son aplicables al diseño, construcción, inspección y mantenimiento de un Sistema Integral de Protección contra Rayos para estructuras de uso común, tales como teatros, centros educativos, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas al aire libre, parques de diversión, aeropuertos, hospitales, prisiones. Estas normas no son aplicables a sistemas de transmisión, generación ni distribución de energía eléctrica, instalaciones de comunicaciones, medios de transporte ni estructuras que contienen explosivos o químicos.

4.3 DEFINICIONES

A continuación se reseñan las definiciones más relevantes de la Normatividad vigente en sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas, las cuales sirven de referencia para el contenido del presente documento.

4.3.1 Sistema Integral de Protección contra rayos- SIPRA. Sistema con el que se puede alcanzar un alto grado de seguridad para las personas y equipos, mediante la combinación de varios elementos como la protección externa, la protección interna, la guía de seguridad personal y el sistema de alarma.

4.3.2 Sistema de Protección Externo contra rayos – SPE. Es el conjunto comprendido por terminales de captación, bajantes, puesta a tierra de protección contra rayos, conectores, herrajes y otros, cuya función es captar las descargas y conducir las a tierra en forma segura, ejerciendo un control sobre la descarga.

4.3.3 Terminal de captación o dispositivo de intercepción de rayos (Air Terminal). Elemento metálico cuya función es interceptar los rayos que podrían impactar directamente sobre la instalación a proteger. Comúnmente se conoce como pararrayos.



4.3.4 Anillo equipotencial (Equipotential Ring). Elemento conductor utilizado para interconectar los terminales de captación y/o las bajantes, con el fin de proveer equipotencialidad y distribuir la corriente del rayo.

4.3.5 Conductor bajante (Down Conductor). Elemento conectado eléctricamente entre los terminales de captación o la red de terminales de captación y la puesta a tierra de protección contra rayos – PTPR, cuya función es conducir las corrientes de rayo que puedan incidir sobre la instalación a proteger.

4.3.6 Puesta a tierra de protección contra rayos - PTPR (Earth Termination). Conductor o grupo de ellos inmerso en el suelo cuya función específica es dispersar y disipar las corrientes del rayo en el suelo. Esta puesta a tierra hace parte del sistema de puesta a tierra general de la edificación.

4.3.7 Electrodo de puesta a tierra (Earthing Electrodes). Conductor o conjunto de conductores enterrados que sirven para establecer una conexión con el suelo y que forma parte de todo el sistema de puesta a tierra.

4.3.8 Resistividad de terreno (ρ) (Resistivity). Es la resistencia específica de una sustancia. Numéricamente es la resistencia ofrecida por un cubo de 1 m x 1 m x 1 m medida entre dos caras opuestas. Se da en ohmio por metro ($\Omega.m$)

4.3.9 Sistema de puesta a tierra – SPT (Earthing System – Grounding System). Conjunto de elementos conductores de una edificación, sin interrupciones ni fusibles, que se unen con el suelo o terreno.

4.3.10 Barraje equipotencial – BE (Bonding Bar). Conductor en forma de barra, placa o cable que permite la unión de dos o más conductores y que garantiza el mismo potencial.



4.3.11 Conductor de puesta a tierra para equipos (Equipment Grounding Conductor). Es un conductor usado para conectar partes metálicas que no transportan corriente de equipos, canalizaciones y otros encerramientos con el conductor de servicio puesto a tierra (neutro) o con la fuente del sistema derivado.

4.3.12 Tierra (Earth – Ground). Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra. En temas eléctricos se asocia al suelo, terreno, masa chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El termino masa sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, barcos y carros.

4.3.13 Sistema de protección interna (Internal Lightning Protection System). Es el conjunto de dispositivos que limitan las sobrecorrientes y sobretensiones transitorias que se pueden presentar al interior de una instalación.

4.3.14 Equipotencializar. Es la acción de interconectar partes conductoras y/o conductores activos con el sistema de puesta a tierra por medio de conductores eléctricos y/o dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias para llevarlas a la mínima diferencia de potencial y así propender por la seguridad.

4.3.15 Transitorio (Transient). Es el cambio en las condiciones de energía de un sistema entre dos estados estables, de corta duración comparado con la escala de tiempo de interés.

4.3.16 Sobretensión (Voltage Surge). Tensión anormal entre dos puntos del sistema eléctrico, que es mayor que el valor máximo presentado entre los mismos dos puntos bajo condiciones de servicio normal⁵.

⁵ En el contexto del presente trabajo, se considera como la sobretensión producida por el rayo, definida como una onda transitoria de tensión que se propaga a lo largo de una línea o circuito y que se caracteriza por un rápido incremento seguido por un decrecimiento lento de la tensión, del orden de microsegundos.

4.3.17 Nivel básico de aislamiento al impulso (Basic Insulation Level - BIL). Es la tensión al impulso asignada por los fabricantes a un equipo o a una parte de este, que caracteriza la capacidad específica de su aislamiento para soportar sobretensiones.

4.3.18 Dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias – DPS (Surge Protective Device). Dispositivo destinado a limitar las sobretensiones transitorias, evacuando las corrientes asociadas a dichas sobretensiones. Puede contener uno o más elementos no lineales. Ejemplos de estos dispositivos son los varistores, diodos de suspensión, vías de chispas, tubos de gas, tiristores y triacs.

4.3.19 Máxima tensión de operación continua (Maximum Continuous Operating Voltaje). Máxima tensión AC o DC que puede ser aplicada continuamente a un DPS en cualquier modo de protección. Es igual a la tensión nominal del dispositivo.

4.3.20 Tensión residual (Residual Voltage). Es el valor pico de la tensión que aparece entre los terminales de un DPS debido al paso de una corriente de descarga.

4.3.21 Nivel de protección de tensión (Voltaje Protection Level). Parámetro que caracteriza el comportamiento de un dispositivo de protección contra sobretensiones DPS para limitar la tensión a través de sus terminales, debe ser mayor que el valor máximo de la tensión de limitación medida.

4.3.22 Categoría de sobretensión (Overvoltage Category). Es un número que define una condición de sobretensión transitoria, soportable por un equipo. Se clasifican en:

- Categoría I: equipo para ser conectado a circuitos ramales en los cuales se toman acciones para limitar las sobretensiones transitorias a un nivel apropiadamente bajo. Ejemplo de tales equipos son los electrónicos.



- Categoría II: equipo para ser conectado a circuitos ramales cuyo consumo de energía es mayor que los de categoría I. Ejemplo de tales equipos son: herramientas portátiles y otros electrodomésticos.
- Categoría III: equipo donde la confiabilidad y la disponibilidad de este, se encuentra sujeto a requerimientos especiales. Ejemplos de tales equipos son aquellos para su uso industrial con conexión permanente a la red, motores estacionarios, tableros de distribución secundaria, barrajes, cables.
- Categoría IV: equipo para uso en el origen de la instalación. Ejemplo de tales equipos son: medidores eléctricos, equipos de protección contra sobrecorriente.

4.3.23 Tensión de limitación medida. Máxima magnitud de tensión que es medida entre los terminales de un DPS durante la aplicación de impulsos de forma de onda y amplitud especificada.

4.3.24 Conductor activo. Aquella parte destinada a la transmisión de electricidad y por tanto sometida a un cambio de tensión en su condición de operación normal.

4.3.25 Rayo (Lightning). La descarga eléctrica atmosférica o más comúnmente conocida como rayo es un fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera.

4.3.26 Relámpago (Flash). Energía visible producida por el rayo.

4.3.27 Trueno (Thunder). Energía audible producida por el rayo.

4.3.28 Nivel cerámico – NC. Número de días al año en los cuales es oído por lo menos un trueno.



4.3.29 Densidad de descargas a tierra – DDT. Número de descargas individuales (Strokes) a tierra por kilómetro cuadrado al año. Medida en área de 9 km². Permite cuantificar la incidencia de rayos en la zona.

4.3.30 Corriente pico absoluta promedio del rayo. El valor con el 50% de probabilidad de que sea la corriente máxima del rayo, sin importar la polaridad.

4.3.31 Máxima rata de ascenso de la corriente del rayo – di/dt (Maximum Current Rate of Rise). Variación del valor de corriente durante el tiempo de frente de la onda. Se utiliza para el cálculo de tensiones electromagnéticas inducidas.

4.3.32 Energía específica (Action Integral). Energía disipada por la corriente del rayo en una resistencia unitaria. Es la integral en el tiempo de la corriente del rayo al cuadrado durante la duración del rayo.

4.3.33 Método electrogeométrico. Procedimiento que permite establecer cual es el volumen de cubrimiento de protección contra rayos (zona de protección) de una estructura para una corriente de diseño (corriente del rayo especificada) según la posición y altura de la estructura interceptora. Este método se utiliza en el diseño de instalaciones de captación de rayos.

4.3.34 Distancia de impacto (r_{sc}). Longitud definida por el método electrogeométrico (que es función exponencial de la corriente de retorno del rayo) que determina la posición de la estructura interceptora con respecto a la estructura protegida, o como el radio de una esfera que permite establecer cual es el área de cubrimiento de una estructura para una corriente dada.



4.4 ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

En las Tablas 8 y 9 se ilustran las abreviaturas y la simbología correspondientemente, de la Normatividad vigente en sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

DENOMINACION	DEFINICION
BE	Barraje equipotencial
DDT	Densidad de Descargas a Tierra
DPS	Dispositivo de Protección contra sobretensiones transitorias
labs	Corriente piso absoluta promedio del rayo
di/dt	Rata de ascenso de la corriente del rayo
RECMA	Red Colombiana de Medición y localización de rayos
rsc	Distancia de impacto o distancia de atracción del rayo
SIPRA	Sistema Integral de Protección contra Rayos
PTPR	Puesta a Tierra de Protección contra Rayos
SPE	Sistema de protección externo
SPI	Sistema de protección interno
Vc	Tensión de contacto
Vp	Tensión de paso
NC	Nivel cerámico o ceraunio

*Tabla 8. Abreviatura Normatividad implementación SIPRA
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Págs. 7 y 8)*

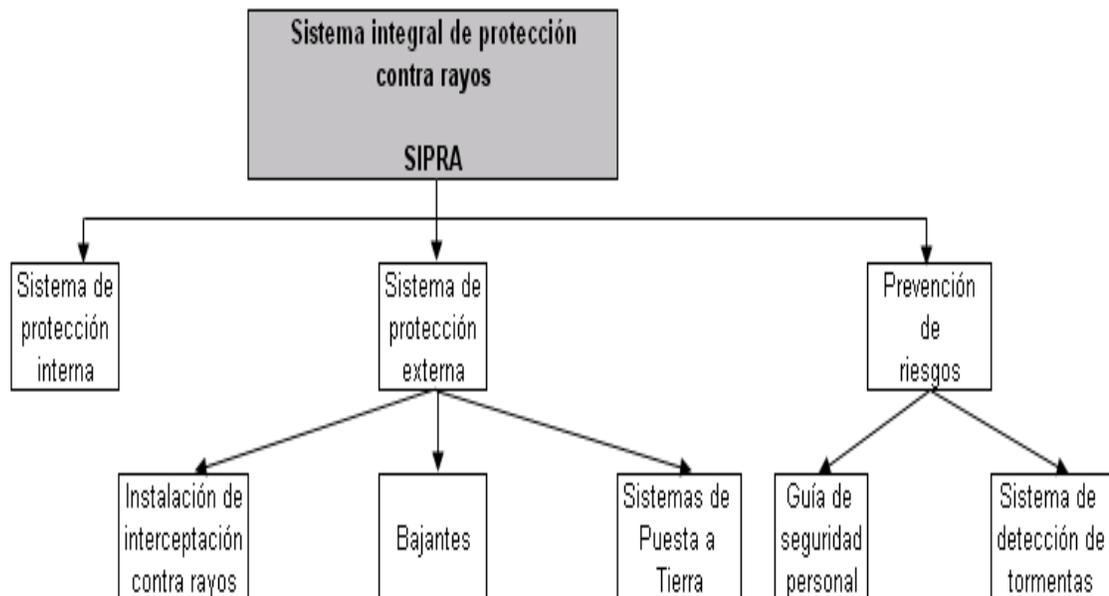
Para facilitar la aplicación de la normatividad vigente en protección contra descargas eléctricas atmosféricas, se sugiere la utilización de la siguiente simbología en los planos que deben acompañar todo proyecto:

SIMBOLO	DESCRIPCION	SIMBOLO	DESCRIPCION
	Altura del techo		Conexión de acero de la construcción
	Antena	ACERO	Construcción en acero
	Áreas con riesgo de explosión		Contorno de la edificación
	Ascensor		Cubierta metálica
	Bajante		Chimenea
	Barraje equipotencial		Descargador a gas
	Caja de inspección		Varistor
	Conector desnudo y conexión		Electrodo de puesta a tierra
	Conductor interceptador de rayos		Vía de chispas
	Conductor subterráneo		Mástil sobre el techo
	Conductor sensible		(Pararrayos) Terminal de captación
	Puesta a tierra		Masa

Tabla 9. Simbología Normatividad implementación SIPRA
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Págs. 8 y 9)

5. SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Respecto a los rayos se puede afirmar, sin lugar a dudas, que no existen medios para evitarlos pero existen medidas que ofrecen seguridad a las personas y a los equipos eléctricos y electrónicos. Por tanto, las preocupaciones de protección apuntan hacia los efectos y a las consecuencias de un rayo. En la Figura 17 se presenta esquemáticamente el Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA), que se recomienda sea utilizado en Colombia.



*Figura 17. Configuración del Sistema Integral de Protección contra Rayos
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 10)*



COMPONENTE	FUNCION QUE CUMPLE
SISTEMA DE PROTECCION INTERNA	Limitar las sobretensiones transitorias al interior de la instalación
Equipotencialización con DPS o conductores	Limitar sobretensiones
Apantallamiento localizados	Reducir efectos internos del campo magnético en equipos electrónicos
Topología de cableados	Contribuir a la compatibilidad electromagnética
SISTEMA DE PROTECCION EXTERNO	Controlar las perturbaciones conducidas
Terminales de captación	Canalizar el rayo hasta el suelo en forma segura
Bajantes	Interceptar el rayo
Puestas a tierra de protección contra rayos	Conducir el rayo, reducir el di/dt, atenuar efectos internos de campo magnético
PREVENCION DE RIESGOS	
Guía de seguridad personal	Lograr comportamientos seguros de las personas
Sensor de tormentas: fijo o portátil	Suspender actividades de alto riesgo

*Tabla 10. Funciones Sistema Integral de Protección contra Rayos
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 10)*

5.1 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO

A partir de la entrada en vigencia del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, en instalaciones donde se tenga concentración de personas, tales como, viviendas multifamiliares, oficinas, hospitales, hoteles, centros educativos, centros comerciales, supermercados, parques de diversión, industrias, prisiones o aeropuertos, debe hacerse una evaluación del nivel de riesgo de exposición al rayo.

La evaluación del nivel de riesgo se realiza para determinar si se requiere implementar un sistema de protección contra rayos y las acciones que permiten disminuir el riesgo a un nivel tolerable.

El nivel del riesgo se obtiene de la ponderación del indicador de gravedad y del indicador de exposición al rayo que puede implicar un impacto directo o indirecto de rayo sobre la estructura. En la Figura 18 se muestra esquemáticamente el procedimiento a seguir para evaluar el Nivel de Riesgo.

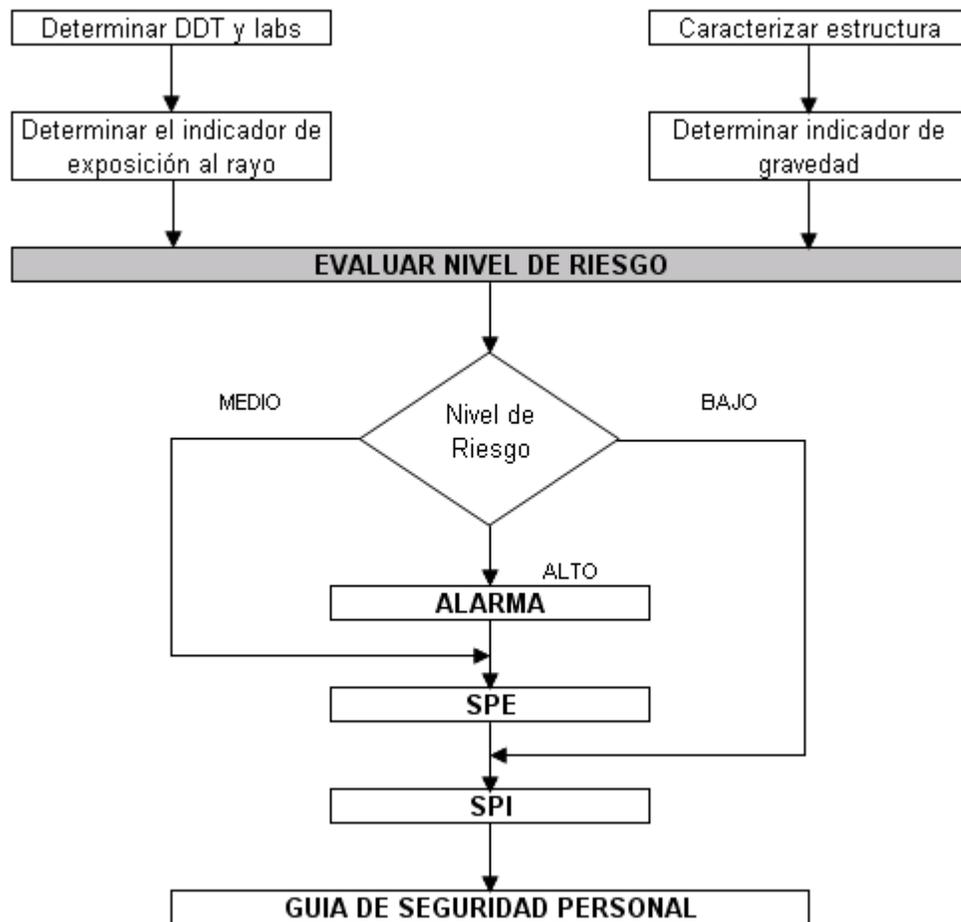


Figura 18. Procedimiento para la evaluación del Nivel de Riesgo
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 11)



5.1.1 Indicador de gravedad. Para la obtención de este indicador se procede de la siguiente manera:

$$I_G = I_{USO} + I_T + I_{AA}$$

En donde:

I_{USO} = Subindicador relacionado con el uso de la estructura (Tabla 11)

I_T = Subindicador relacionado con el tipo de estructura (Tabla 12)

I_{AA} = Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura (Tabla 13)

Clasificación de la estructura	Ejemplos de estructura	Indicador
A	Teatros, centros educativos, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas al aire libre, parques de diversión, aeropuertos, hospitales, prisiones	40
B	Edificios de oficinas, hoteles, viviendas, grandes industrias, áreas deportivas cubiertas	30
C	Pequeñas y medianas industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20
D	Estructuras no habitadas	0

*Tabla 11. Subindicador relacionado con el uso de la estructura
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)*

Tipo de estructura	Indicador
No metálica	40
Mixta	20
Metálica	0

Tabla 12. Subindicador relacionado con el tipo de estructura
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

Altura y área de la estructura	Indicador
Area menor a 900 m2	
Altura menor a 25 m	5
Altura mayor o igual a 25 m	20
Area mayor o igual a 900 m2	
Altura menor a 25 m	10
Altura mayor o igual a 25 m	20

Tabla 13. Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

Para obtener el indicador de gravedad se suman los subindicadores relacionados con el uso, tipo y geometría de la estructura, y el valor del índice del indicador se obtiene de la Tabla 14.

Resultado de la suma de subindicadores de estructura	Indicador de Gravedad
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Media
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

Tabla 14. Indicador de Gravedad

(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 12)

5.1.2 Indicador de exposición al rayo. El indicador de exposición al rayo de la Figura 19 se obtiene a partir de 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 densidad de las mismas. Por esta razón, se tomaron proporciones de 0,7 para la DDT y de 0,3 para la I_{abs} . Los valores de I_{abs} y DDT deben tener el 50% de probabilidad de ocurrencia o menos, a partir de datos multianuales.

Densidad de descargas a tierra [Descargas/km ² - año]	Corriente pico absoluta promedio [kA]		
	40 ≤ I_{abs}	20 ≤ I_{abs} < 40	I_{abs} < 20
30 ≤ DDT			
15 ≤ DDT < 30			
5 ≤ DDT < 15			
DDT < 5			

	Severos		Altos
	Medios		Bajos

Figura 19. Indicador de exposición al Rayo

(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 12)

5.1.3 Matriz de Niveles de Riesgo. Para concluir la evaluación del nivel de riesgo asociado con la instalación se ponderan, a través de la matriz de niveles de riesgo, los indicadores de gravedad y de exposición al rayo, tal como se muestra en la Figura 20.

I. RAYO \ I. GRAVEDAD	Severa	Alta	Media	Baja	Leve
	Severo				
Alto					
Medio					
Bajo					

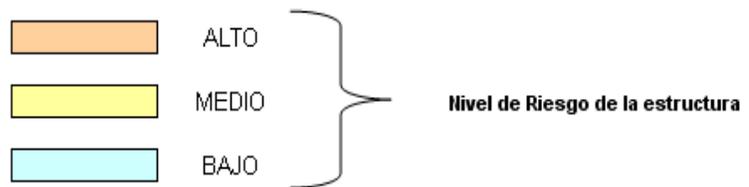


Figura 20. Matriz de Niveles de Riesgo
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

5.1.4 Acciones de protección. De acuerdo con el nivel de Riesgo el SIPRA debe estar conformado por los componentes que le correspondan según lo establecido en la Tabla 15.

Nivel de Riesgo	Acciones recomendadas
NIVEL DE RIESGO BAJO	SPI para acometidas aéreas
	Cableados y PT según NTC 2050 - IEEE 1100
NIVEL DE RIESGO MEDIO	SPI
	Cableados y PT según NTC 2050 - IEEE 1100
	SPE
NIVEL DE RIESGO ALTO	SPI
	Cableados y PT según NTC 2050 - IEEE 1100
	SPE
	Plan de prevención y contingencia

Tabla 15. Acciones recomendadas según el Nivel de Riesgo
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 14)



5.2 SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO - SPE

El sistema de protección externo comprende los terminales de captación, las bajantes, la PTPR, conectores, herrajes y otros equipos que se requieren para completar el sistema. Estos componentes del sistema de protección, al interceptar, conducir y disipar la descarga principal del rayo, no aseguran que no habrá posibles efectos secundarios de la descarga. Por lo tanto, se requieren conductores secundarios para interconectar los objetos metálicos y mantenerlos al mismo potencial a fin de evitar el salto del arco. El objetivo principal del sistema es interceptar la descarga inmediatamente encima del objeto o estructura que tienen más probabilidades de estar expuestos al impacto a fin de proporcionar un camino directo a tierra.

Es importante destacar que una baja resistividad del suelo es deseable pero no esencial. Si comparamos un sistema en suelo de arcilla con baja resistividad y el otro en suelo rocoso, podemos establecer que en los dos hay un buen sistema. Para el primero, un esquema simple proporciona los medios para coleccionar y disipar la energía del rayo. Para el sistema en suelo rocoso el método más práctico es colocar una red de conductores extendidos sobre la roca, alrededor del edificio, y conectados al conductor bajante. Este sistema produce los mismos resultados que el primero, pues también se encuentra sobre suelo conductor.

En la Figura 21 se pueden observar los elementos básicos que comprende un sistema de apantallamiento y protección externa, los cuales se deben tener en cuenta para su construcción y que se tratarán y explicarán a continuación:

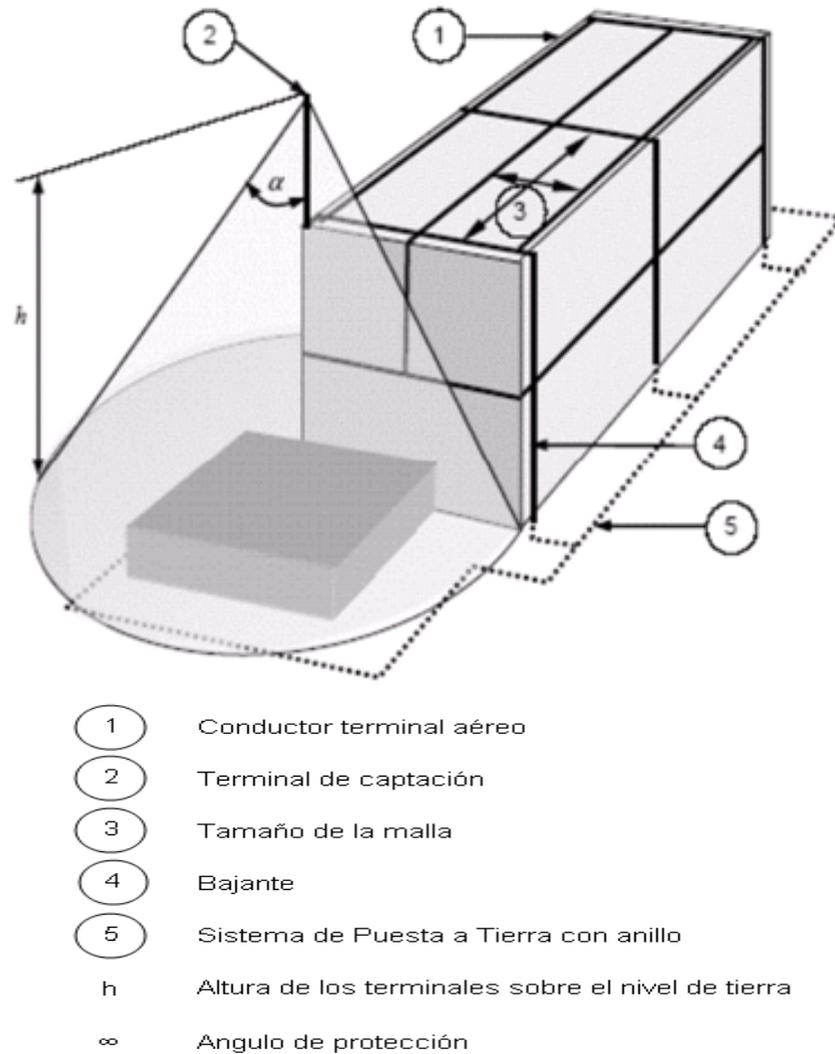


Figura 21. Elementos que componen un Sistema de Apantallamiento y su Protección Externa
 (FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 29)

5.2.1 Conductor terminal aéreo. En la Tabla 16, adaptada de la Norma IEC 62305, se presentan las características que deben cumplir los conductores terminales aéreos a emplear especialmente para este fin. Con este conductor se construye el enmallado sobre la estructura de la edificación.

Cuando la malla se instala en techo la idea es que el cable no toque el techo, debido a que en una descarga éste podría dañarse, por lo que se recomienda el uso de soportes adecuados. La Figura 22 muestra un tipo convencional del conductor terminal aéreo y sus soportes. La envoltura y fondo de los soportes pueden ser de polietileno negro.

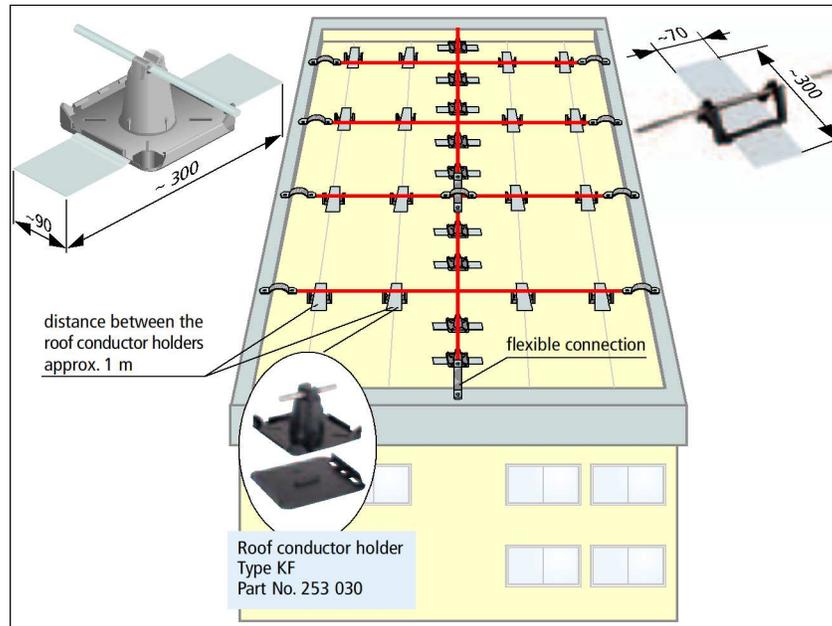


Figura 22. Conductor terminal aéreo
(FUENTE: <http://powercol.com>)

MATERIAL	CONFIGURACION	AREA MINIMA ¹ (mm ²)	DIAMETROS Y ESPESORES MINIMOS ²
Cobre	Cinta Sólida	50	2 mm min. de grosor
	Alambre	50	8 mm de diámetro
	Cable	50	1,7 mm min. de diámetro por hilo
	Varilla	200	16 mm de diámetro
Aluminio	Cinta Sólida	70	3 mm min. de grosor
	Alambre	50	8 mm de diámetro
	Cable	50	1,7 mm min. de diámetro por hilo
Aleación de aluminio 6201	Cinta Sólida	50	2,5 mm min. de grosor
	Alambre	50	8 mm de diámetro
	Cable	50	1,7 mm min. de diámetro por hilo
	Varilla	200	16 mm de diámetro
Acero galvanizado en caliente	Cinta Sólida	50	2,5 mm min. de grosor
	Alambre	50	8 mm de diámetro
	Cable	50	1,7 mm min. de diámetro por hilo
	Varilla	200	16 mm de diámetro Espesor mínimo de la capa: 50µm.
Acero inoxidable	Cinta Sólida	50	2,5 mm min. de grosor
	Alambre	50	8 mm de diámetro
	Cable	70	1,7 mm min. de diámetro por hilo
	Varilla	200	16 mm de diámetro
Bronce	Alambre	50	8 mm de diámetro
	Tubo	50	4 mm de grosor
	Varilla	200	16 mm de diámetro
1. Si aspectos térmicos y mecánicos son importantes, estas dimensiones se pueden aumentar a 60 mm ² para cinta sólida y a 78 mm ² para alambre			
2. En las dimensiones de grosor, ancho y diámetro se admite una tolerancia de ±10%			

Tabla 16. Características para conductores de terminales aéreos, terminales de captación y bajantes
(FUENTE: RETIE - Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008, Pág. 107)

5.2.2 Terminales de captación o pararrayos. Tienen la función de interceptar los rayos que pueden impactar directamente sobre la instalación a proteger. En la Tabla 16, adaptada de la IEC 62305, se presentan las características que deben cumplir los pararrayos o terminales de captación construidos especialmente para este fin. Cualquier elemento metálico de la estructura que se encuentre expuesto al impacto del rayo, como antenas de televisión, chimeneas, techos, torres de comunicación y cualquier tubería que sobresalga, debe ser tratado como un terminal de captación siempre que se garantice su capacidad de conducción y continuidad eléctrica.

Para efectos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, se considera que el comportamiento de todo terminal de captación debe tomarse como el de un terminal tipo Franklin. La Figura 23 muestra los tipos convencionales de terminales de captación.

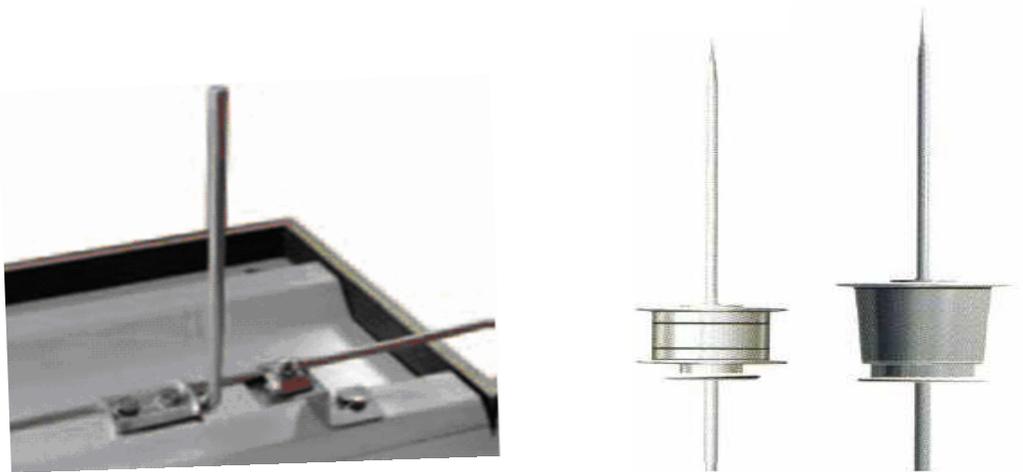


Figura 23. Terminales de captación o pararrayos
(FUENTE: <http://torrexinternational.com/pararrayos>)

Dependiendo del tipo de estructura a emplear se deben tener en cuenta los siguientes aspectos, para con los terminales de captación:

- Se debe tener en cuenta que los terminales de captación deben ser preferiblemente varillas sólidas o tubulares en forma de bayonetas; 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 y no menor a 0,6 m para intervalos máximos de 8 m
- En caso de que un terminal exceda los 0,6 m por encima de las partes altas de la estructura se debe sujetar en un punto no menor a la mitad de su altura.



- Para estructuras de altura mayor a 25 m sólo podrán utilizarse varillas sólidas y el diámetro mínimo de éstas deben ser 16 mm
- Todo edificio que requieran un sistema de protección externo, tengan o no terminales de captación, deben tener un anillo de apantallamiento en la parte superior de la estructura. Cuando tenga terminales de captación, todos ellos deben estar unidos mediante el anillo.
- Si el montaje es sobre superficies de aluminio, deben construirse los terminales de captación en aluminio para evitar corrosión galvánica, con las dimensiones descritas en la Tabla 16, y su conexión a la bajante debe realizarse por medio de un conector bimetálico.
- Por razones medioambientales, se recomienda no utilizar dispositivos de interceptación con elementos radiactivos.

5.2.3 Bajantes. El objeto de los bajantes es derivar la corriente del rayo que incide sobre la estructura e impacta en los terminales de captación. El cálculo de las bajantes refleja el compromiso de una protección técnicamente adecuada y económica, puesto que mediante el incremento del número de bajantes, se logra una reducción de la magnitud de la corriente que circula por cada bajante y de su tasa de asenso; así mismo, se reduce la magnitud de las inducciones magnéticas en los lazos metálicos de la instalación y las diferencias de potencial a tierra.

Con el fin de reducir la probabilidad de daño debido a corrientes de rayo fluyendo por el sistema de protección externo de una edificación, los conductores que cumplen la función de bajantes, deben ser al menos dos y con la mínima longitud para los caminos de corriente.



Figura 24. Detalle de conexión bajantes
(FUENTE: <http://powercol.com>)

Por razones eléctricas, mecánicas y térmicas los conductores de las bajantes del sistema equipotencial y derivaciones deben cumplir con los requisitos de la Tabla 16, y así mismo, estar de acuerdo con los indicados en la Tabla 17.

Altura de la estructura	Número mínimo de bajantes	Calibre mínimo del conductor de acuerdo con el material	
		Cobre	Aluminio
Menor que 25 metros	2	2 AWG	1/0 AWG
Mayor que 25 metros	4	1/0 AWG	2/0 AWG

Tabla 17. Requerimientos para las bajantes
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 15)

Dependiendo del tipo de estructura a emplear se deben tener en cuenta los siguientes aspectos, para el uso de las bajantes:



- Cada una de las bajantes debe terminar en un electrodo de puesta a tierra, estar separadas un mínimo de 10 m y siempre buscando que se localicen en las partes externas de la edificación.
- Para estructuras de altura superior a 25 m se deben instalar anillos adicionales al anillo de apantallamiento, distanciados máximo 25 m medidos a partir del nivel del suelo. En estructuras con altura mayor o igual a 25 m se deben instalar adicionalmente anillos horizontales cada 25 m
- En caso de no cumplir con esta configuración, el ingeniero de diseño debe realizar los análisis de tensión de paso y contacto y se debe garantizar que una persona con resistencia de 1000Ω no vaya a soportar más de 30 J
- La zona de conexión del conductor bajante a los electrodos de puesta a tierra debe tener una protección mecánica y eléctrica mediante tubería aislada de 2 m de longitud.

5.3 PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

La puesta a tierra de protección contra rayos, debe cumplir con los requisitos que le apliquen del artículo 15°, Capítulo II (Requisitos generales de las puestas a tierra), del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008, especialmente en cuanto a materiales e interconexión.

El SPT en una locación comprende la unión de todos los equipos eléctricos, estructuras metálicas, tierra de subestaciones, etc., a una o varias puestas a tierra de resistencias óhmica baja, para establecer una condición equipotencial entre todos los equipos y estructuras, ofreciendo así un camino de baja impedancia a los rayos, la reducción del ruido en telecomunicaciones y un camino de retorno en circuitos eléctricos y electrónicos.



5.3.1 Generalidades. El SPT es una parte fundamental del sistema de protección contra rayos que contribuye de forma sustancial a la seguridad del personal y de los equipos en caso de la incidencia de un rayo; puesto que provee una equipotencialidad a los equipos y estructuras y ofrece una trayectoria de baja resistencia a la corriente del rayo, permitiendo, su dispersión y disipación en el terreno sin causar daño.

Para el diseño de la puesta a tierra de protección contra rayos se debe tener en cuenta:

- La resistividad del suelo
- La agresividad del suelo (pH)
- La estructura física del suelo (rocas, arenas, arcillas)
- La forma de interconexión con las otras puestas a tierra y los sistemas de protección contra la corrosión.
- Los efectos adicionales en otros sistemas eléctricos y de comunicaciones

Una puesta a tierra además de resistencia, presenta capacitancia e inductancia debido a la configuración de la puesta a tierra; cada uno de estos parámetros R , L , C , influyen en la capacidad de conducción de corriente en el suelo; por lo tanto, no se debe pensar solamente en la resistencia de puesta a tierra sino en una impedancia. Por ejemplo, si se inyecta una onda de impulso de corriente al suelo, similar a la resultante de un rayo, ésta también sufre la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones.

En caso de corrientes con componentes de alta frecuencia se debe considerar el efecto capacitivo, principalmente en suelos de alta resistividad porque la capacitancia varía proporcionalmente con el contenido de humedad del suelo.



5.3.2 Condiciones de seguridad. Para el cálculo de las tensiones de paso y contacto se debe utilizar un valor del 50% de probabilidad de ocurrencia para la corriente de rayo. Con el objetivo de reducir tensiones de paso y de contacto, y para cumplir con lo establecido sobre el tema en el numeral 5.2.3 (Bajantes), se deben instalar mínimo dos electrodos de puesta a tierra interconectados separados a una distancia mínima de 2 veces su longitud, para que no se interfieran entre ellos. Para minimizar los efectos que puedan causar diferencias de potencial ocasionadas por impacto de un rayo a las estructuras metálicas, éstas deben estar a un mismo potencial mediante un barraje equipotencial y conexiones equipotenciales, al sistema de puesta a tierra general.

5.3.3 Valor y medición PTPR. El valor de la resistencia para cada puesta a tierra del sistema de protección contra rayos debe ser siempre menor que 10Ω , preferiblemente inferior a 1Ω , de tal forma que al pasar la corriente de rayo a tierra las tensiones de paso y contacto producidas sean inferiores a los valores soportados por los seres humanos.

Si la resistencia del electrodo de puesta a tierra no cumple con el valor establecido, se recomienda hacer tratamiento del terreno con rellenos alrededor de las varillas y de los conductores de unión con suelos de baja resistividad.

No es recomendable el uso de sales, porque en corto tiempo se pierde su efectividad. También se puede instalar contrapesos máximo a 60 m en diagonal con una varilla en el extremo o colocar varillas adicionales, espaciadas 5 m y conectadas con cable # 2/0 AWG.

5.3.4 Resistividad del terreno. El suelo en su estado normal es un mal conductor de electricidad y totalmente seco se comporta como un material semiconductor o un aislante. El valor de la resistividad fluctúa para distintas rocas en límites muy amplios, dependiendo de la composición de las mismas, de la conductividad de sus partículas, de su estructura, de la presencia de agua, de las sales y otros parámetros. La tabla que se indica a continuación muestra los valores típicos de la resistividad del terreno.



Clase de terreno	ρ (Ω -m)
Tierra pantanosa	50
Tierra arcillosa humeda	100
Tierra arcillo-arenosa humeda	200
Tierra arenosa seca	1000
Tierra de arenisca dura	2000
Suelo con estrato de roca	10000

Tabla 18. Valores típicos de resistividad del terreno

(FUENTE: Tierras soporte de la seguridad eléctrica – Favio Casas 1ª edición Pág. 63)

Debido a que el suelo es uno de los materiales involucrados en el SPT, su medición se vuelve determinante para un diseño correcto. Aunque existen varios métodos de medición de la resistividad del terreno, es conveniente revisar el método de Wenner, por ser el más aceptado y adecuado a las necesidades de una puesta a tierra de protección contra rayos.

5.3.5 Método Wenner. Es un caso particular del método de los 4 electrodos, sólo que aquí se disponen en línea recta y equidistantes una distancia "a", simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de los electrodos auxiliares, sobrepase los 30 cm .El instrumento de medida es un telurómetro con 4 terminales, siendo los dos electrodos extremos los de inyección de la corriente de medida (C₁ y C₂) y los dos centrales los electrodos de medida del potencial (P₁ y P₂).

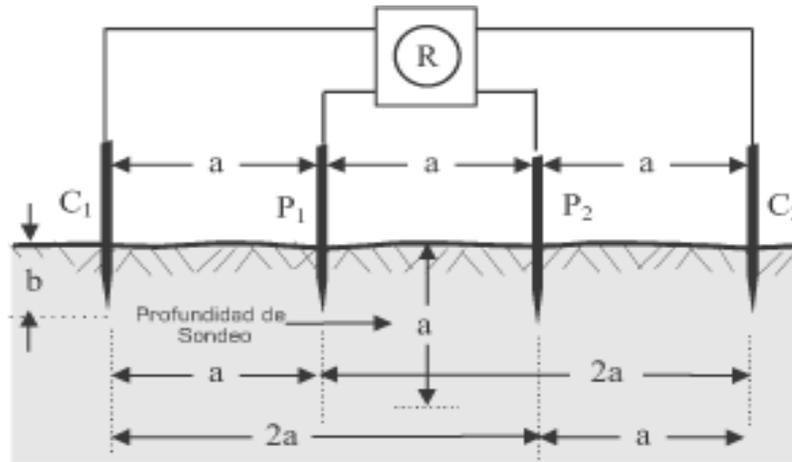


Figura 25. Medición de la resistividad de terreno mediante el método Wenner
(FUENTE: http://procobreperu.org/pub_red_elec01_2)

La ecuación exacta para el cálculo es:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right)}$$

En donde:

- ρ = Resistividad aparente del terreno (Ω -m)
- R = Resistencia medida por el telurómetro (Ω)
- a = Distancia entre electrodos adyacentes (metros)
- b = Profundidad de enterramiento de los electrodos (metros)

Cuando b es muy pequeño comparado con a se tiene la siguiente expresión simplificada:

$$\rho = 2\pi a R$$



5.3.6 Medición de tensiones de paso y de contacto. Después de construido el SPT, se harán las comprobaciones y verificaciones precisas en el sitio y se efectuarán los cambios necesarios que permitan alcanzar valores de tensión aplicada inferiores o iguales a los máximos admitidos. El montaje para medición debe aproximarse a la situación real; pero en el caso de una falla reportada como permanente, es válido efectuar lecturas reales tomando todas las medidas de seguridad. Para la metodología de medición de tensiones de paso y de contacto, deben seguirse los siguientes criterios adoptados de la Norma ANSI/IEEE Std 81-1983.

- Los sitios de medición deben tomarse al azar, tanto en la parte externa como interna y en tantos puntos como lo permita la instalación. Se dará prioridad a los sitios cercanos a las mallas de cerramiento, pues en estos sitios perimetrales existe mayor probabilidad de tensiones altas, en especial los soportes metálicos de equipos, vallas metálicas de cerramiento, puerta metálicas de acceso, rejillas de ventilación accesibles a personas, carriles para el desplazamiento de transformadores y, en general, cualquier otro tipo de elemento que, en un momento dado, pueda estar en contacto con las personas, referenciando todos los lugares con una clara identificación.
- Los electrodos de medida para simulación de los pies deberán tener una superficie de 200 cm² cada uno con un disco metálico de 16 cm de diámetro. El cuerpo humano se reemplaza por una resistencia de 1000 Ω
- Se emplearán fuentes de alimentación adecuadas para simular la falla, de forma que la corriente inyectada sea suficientemente alta, a fin de evitar que las medidas no queden falseadas como consecuencia de corrientes espurias. Se procurará que la intensidad inyectada sea del orden del 1% de la corriente para la cual ha sido dimensionada la instalación.
- Los cálculos se harán suponiendo que existe proporcionalidad para determinar las tensiones máximas posibles.

5.3.7 Equipotencialización. Se define como la acción de interconectar partes conductoras y/o conductores activos con el sistema de puesta a tierra por medio de conductores eléctricos y/o dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias para llevarlas a la mínima diferencia de potencial y así propender por la seguridad.

Para la protección de las instalaciones eléctricas y electrónicas se debe realizar la interconexión a tierra de todos los sistemas. Con ello se obtiene un potencial común, y se logra que las instalaciones se eleven al mismo potencial, evitando accidentes y luego, dadas las peligrosas diferencias de potencial y los arcos que pueden aparecer en las instalaciones.

5.3.8 Medición de equipotencialidad. Aunque es un concepto que en rigor científico sólo se cumple para corriente continua y para electrostática, en toda instalación con sistema de puesta a tierra, es muy importante equipotencializar todas sus partes. Cuando por requerimientos de un edificio existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente tal como aparece en la Figura 26.

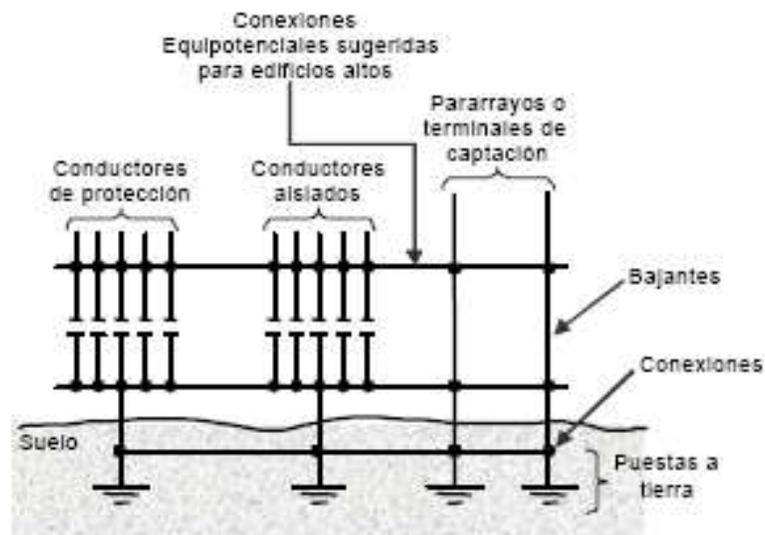


Figura 26. Equipotencialización sistemas con puestas a tierra
(FUENTE: RETIE - Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008, Pág. 61)

Igualmente, para una misma edificación quedan expresamente prohibidos los sistemas de puesta a tierra que aparecen en las Figuras 27 y 28.

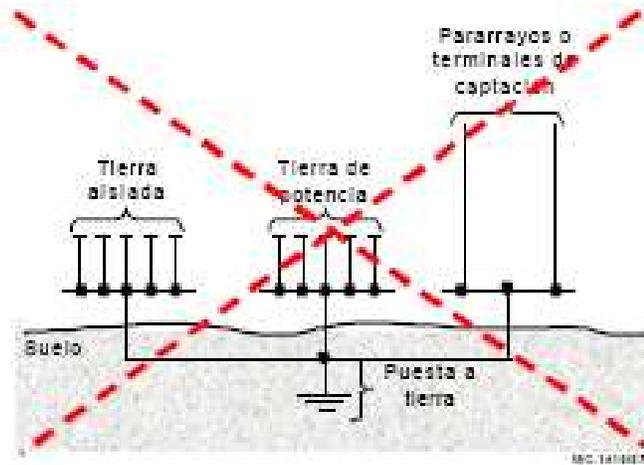


Figura 27. Una sola puesta a tierra para todas las necesidades
(FUENTE: RETIE - Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008, Pág. 61)

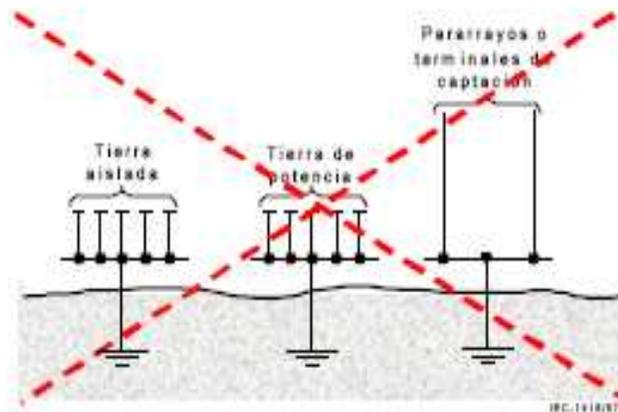


Figura 28. Puestas a tierra separadas o independientes
(FUENTE: RETIE - Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008, Pág. 61)



Un sistema equipotencial se compone de un conductor, grupo de conductores o DPS, que unen las diferentes instalaciones que se deben interconectar al barraje equipotencial (BE). Para la protección de las instalaciones eléctricas y electrónicas se debe realizar la interconexión a tierra de todos los sistemas. Con ello se obtiene un potencial común, y se logra que las instalaciones se eleven al mismo potencial, evitando accidentes y fuego, dadas las peligrosas diferencias de potencial y los arcos que pueden aparecer en las instalaciones.

Todas las partes metálicas no portadoras de corriente como ductos de agua, ductos de gas, sistemas eléctricos, etc., se deben conectar a un mismo BE, para disminuir las consecuencias de un rayo, debidas a las grandes diferencias de potencial en la instalación de puestas a tierra.

- Los conductores del sistema de puesta a tierra que unen puntos de conexión deben ser lo más cortos y rectos.
- Los BE pueden ser en forma de barras o anillos. Su geometría debe ser muy simple.
- El espacio libre entre el BE y las paredes debe ser suficiente para una fácil conexión por ejemplo entre 0,03 m y 0,05 m
- Cada bajante debe terminar en un electrodo de puesta a tierra localizado lo más cercano posible a la fachada, preferiblemente a una distancia de 50 cm desde el borde de la pared o estructura que soporta la bajante.
- Unir o separar las tierras involucra un estudio detallado de factores como la evaluación del riesgo para seres humanos, daño de equipos, los valores de corriente de falla, la resistencia de puesta a tierra de cada uno de los sistemas que se van a unir, la resistencia mutua entre sistemas de puesta a tierra. En principio, todas las puestas a tierra deben interconectarse.



5.3.9 Conexiones. Se debe emplear soldadura exotérmica o conectores que cumplan con las recomendaciones de la Norma NTC 4628 (Calificación de conexiones permanentes usadas en puestas a tierra en subestaciones). También se requiere tomar medidas adicionales de protección contra la corrosión en suelos muy agresivos.

5.3.10 Materiales. La PTPR puede construirse con electrodos de varios tipos, como varillas, tubos, mallas y contrapesos. Cuando se requieran electrodos de más de 2,4 m se deben acoplar dos varillas. En cualquier caso se debe cumplir con lo establecido en la Tabla 19, en la NTC 2050 numeral 250-83, ítem c) numeral 2, y en la NTC 2206 (Equipo de conexión y puesta a tierra).

Tipo de Electrodo	Materiales	Dimensiones mínimas			
		Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Espesor (mm)	Recubrimiento (µm)
Varilla	Cobre	12,7			
	Acero Inoxidable	10			
	Acero Galvanizado en caliente	16			70
	Acero con recubrimiento electrodepositado de cobre	14			250
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero Inoxidable	25		2	
	Acero Galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje	Cobre		50	2	
	Acero Inoxidable		90	3	
	Cobre Cincado		90	2	40
Cable	Cobre	1,8 para cada hilo	25		
	Cobre Estañado	1,8 para cada hilo	25		
Placa	Cobre		20 000	1,5	
	Acero Inoxidable		20 000	6	

Tabla 19. Características y requisitos electrodos puesta a tierra

(FUENTE: RETIE - Resolución No. 18-1294 del 6 de Agosto de 2008, Págs. 61 y 62)



5.3.11 Mantenimiento. Para que el sistema de protección contra rayos permanezca con el grado de confiabilidad diseñado, se deben seguir las siguientes pautas:

- *Periodicidad.* Para inspeccionar el sistema de protección se debe verificar la resistencia de puesta a tierra cada 3 años; si se tienen terrenos con tratamiento, la revisión debe hacerse cada año.
- *Época.* Debido al riesgo que se está manejando, se debe tener en consideración la caracterización temporal para establecer la programación de los mantenimientos.
- *Actividades.* Como resultado de las inspecciones deben eliminarse los defectos encontrados, cambiando los elementos que presentan corrosión, reparando o reponiendo cables deteriorados, cambiando conectores fundidos o inservibles, limpiar y apretar uniones flojas y ante todo restablecer los valores fijados de las resistencias de puesta a tierra.

5.4 SISTEMA DE PROTECCION INTERNO - SPI

Para evitar que chispas, arcos eléctricos o cortocircuitos que pueden ser originados por sobretensiones transitorias ya sea por impacto directo de rayo en la edificación, o en sus acometidas de servicios (tales como electricidad, teléfono, gas, ductos metálicos), al igual que por tensiones inducidas por impactos indirectos o lejanos, que puedan generar incendios, explosiones o sobretensiones que pongan en riesgo vidas humanas, se debe equipotencializar las acometidas de servicios, pantallas de cables, y otras partes metálicas normalmente no energizadas.

Los lineamientos que se exponen están de acuerdo con los principios de coordinación de aislamiento; por lo tanto, los equipos para los cuales se especifican los métodos de mitigación deben tener definida una categoría de sobretensión; es decir, un nivel básico al impulso (BIL) de acuerdo con su ubicación en las instalaciones. La categoría de sobretensión se presenta en la Tabla 20.

Nivel de tensión de operación de los equipos (V)	BIL requerido en (kV)			
	Contadores	Tableros, interruptores, cables, etc	Electrodomésticos, herramientas portátiles	Equipo electrónico
	IV	III	II	I
120/240 ; 120/208	4	2,5	1,5	0,8
254/440 ; 277/480	6	4	2,5	1,5

Tabla 20. Tensión al impulso que deben soportar los equipos
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 19)

5.4.1 Dispositivos de protección contra sobretensiones - DPS. La selección e instalación de DPS depende en gran medida de la combinación de las técnicas que se apliquen en cada instalación.

Indicador de parámetros del rayo (véase Figura 18)	Onda de prueba	
	DPS con onda de prueba 10/350 μ s	DPS con onda de prueba 8/20 μ s
BAJO	2 kA	20 kA
MEDIO	5 kA	50 kA
ALTO	10 kA	100 kA
SEVERO	*	*

* Por acuerdo entre cliente y proveedor

NOTA: Los valores de la tabla son aplicables por cada conductor activo en el punto de conexión de la acometida (IEEE C 62.41-2)

Tabla 21. Corriente nominal de descarga por fase
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 22)

5.4.2 Dimensionamiento de DPS. Considerando el amplio uso de los DPS, a continuación se presentan algunos aspectos que se deben tener en cuenta para su selección e instalación:



- Cuando se requieran los DPS, se deberán instalar en el origen de la red interna.
- Los DPS se deben conectar entre los conductores activos y la puesta a tierra o el conductor de puesta para equipos.
- El nivel de protección de los DPS debe ser menor que el nivel básico de aislamiento BIL dado para la categoría II de la Tabla 20.
- La máxima tensión de operación continua - MCOV del DPS debe ser mayor o igual al 1,1 veces la máxima tensión nominal línea a neutro.
- En caso de falla del DPS su capacidad de cortocircuito junto con los mecanismos internos o externos asociados, debe ser igual o mayor que la máxima corriente de corto circuito esperada en el punto de instalación teniendo en cuenta los aparatos de protección de sobrecorriente especificados por el fabricante del DPS.
- Para instalaciones con riesgo bajo y que requieran DPS, la corriente nominal de descarga deberá ser mayor que 5 kA por fase en onda 8/20 μ s. Para riesgo medio o alto la corriente nominal de descarga deberá cumplir con la Tabla 21.

5.5 MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO

El método electrogeométrico tiene su aplicación en el estudio del apantallamiento que proveen varillas verticales y conductores horizontales a estructuras y líneas de transmisión, respectivamente. La principal hipótesis en que se basa el método es que la carga espacial contenida en el líder escalonado, previo a la descarga de retorno, está relacionada con la magnitud de la corriente de descarga. Con base en estudios teóricos y experimentales de la tensión de ruptura dieléctrica de grandes espacios, se establece una expresión matemática que relaciona la carga espacial, la magnitud máxima de la corriente

de retorno del rayo ($I_{\text{máx}}$) y la distancia de impacto r_{sc} , la cual sintetiza la teoría del método electrogeométrico.

El método fue desarrollado para diseños de apantallamientos en líneas de transmisión de energía eléctrica, sin embargo sus fundamentos tienen aplicación en cualquier tipo de estructura que se desee proteger contra rayos. En él se busca que los objetos a ser protegidos (por ejemplo una estructura como un edificio o una torre de comunicaciones) sean menos atractivos a los rayos que los elementos de protección externa (por ejemplo, varillas tipo Franklin).

Esto se logra determinando la llamada distancia de impacto r_{sc} del rayo a una estructura u objeto, que es la longitud del último paso del líder de un rayo, bajo la influencia de un terminal que lo atrae, o de la tierra. La figura 29 ilustra el concepto fundamental de la distancia de impacto.

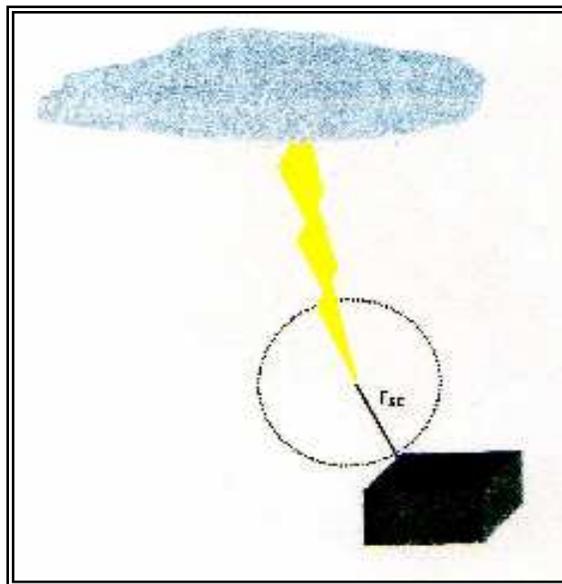


Figura 29. Distancia de impacto r_{sc} en el método electrogeométrico
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 42)



Durante varias décadas los miembros del Comité CIGRE WG 33.01 han trabajado en pruebas de laboratorio y campo para desarrollar la ecuación que mejor se ajuste al método electrogeométrico. Actualmente esta ecuación es ³:

$$r_{sc} = 2.i_{\max} + 30 \left[1 - e^{-\frac{i_{\max}}{6,8}} \right] (\text{metros})$$

En donde i_{\max} es la magnitud máxima de la corriente de retorno del rayo expresado en kA

Una expresión más sencilla de esta ecuación es:

$$r_{sc} = 10.(i_{\max})^{0,65} (\text{metros})$$

En la práctica, para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de protección o interceptación, se trazan arcos de circunferencia con radio igual a la distancia de impacto r_{sc} , entre los objetos a ser protegidos y los dispositivos de interceptación (por ejemplo varillas tipo Franklin), de tal forma que los arcos sean tangentes a la tierra y a los objetos, o tangentes entre objetos; cualquier estructura por debajo de los arcos estará protegida por él o los objetos que conformen el arco, y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas.

Un corolario del método electrogeométrico corresponde al método de la esfera rodante, que consiste en imaginar una esfera de radio igual a la distancia de impacto rodando sobre los volúmenes de las estructuras a proteger contra rayos. Todas las estructuras que logre tocar la esfera estarán expuestas a descargas directas. El propósito es que las únicas estructuras que toque la esfera sean los dispositivos de protección o apantallamiento.

³ Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 43

Para el ejemplo mostrado en la figura 30, la estructura B estará protegida debido a que se encuentra por debajo de arco $a'-b'$, tangente al mástil y a la tierra. La estructura A no está protegida por que no está por debajo de arco $a'-a''$, sin embargo, la estructura C estará protegida por la estructura A y el mástil, pues está por debajo del arco $a'-a'''$.

En esta figura se ilustra además el concepto de altura inútil, que es la sobre elevación del dispositivo de protección o interceptación que no incrementa el arco de protección. La altura inútil se da por encima de una altura del dispositivo de protección igual a la distancia de impacto.

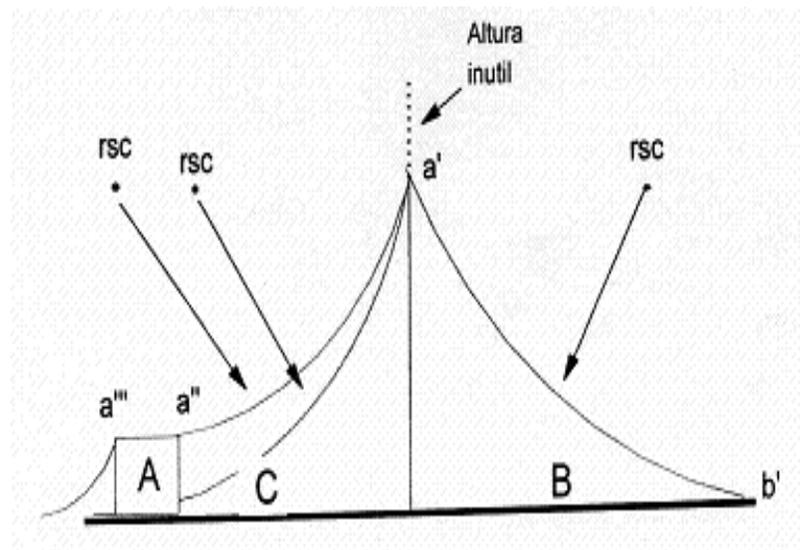


Figura 30. Zona de protección usando el método electrogeométrico
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 43)



6. IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Las medidas de protección que se deben adoptar contra los rayos parten de la obligatoriedad impuesta por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE en Colombia y las normas que este reglamento cita. Son importantes tanto el diseño como la instalación de un sistema de protección contra rayos para salvaguardar la integridad de las personas y del equipo electrónico sensible.

Aparte de implementar un sistema de protección contra rayos, el ingeniero diseñador de las instalaciones eléctricas debe implementar un sistema de protección contra sobretensiones, cuyo objetivo es la protección de las instalaciones eléctricas y los sistemas informáticos y de comunicaciones. Este sistema está compuesto básicamente de dispositivos de protección contra sobretensiones que se instalan directamente en los tableros de distribución eléctrica y en la entrada de puertos de comunicaciones de los equipos electrónicos. Para tal efecto del diseño nos apoyaremos en las Norma NTC4552 (Primera actualización 2004-12-01) e IEC 62305.

6.1 ANTECEDENTES

Actualmente en la ciudad de Bogotá se encuentran instalaciones de tipo eléctrico (comercial, industrial, etc), en las cuales se ven involucrados personas, materiales o equipos eléctricos y electrónicos, que no ofrecen un adecuado sistema de apantallamiento y protección contra descargas eléctricas atmosféricas, por cuanto no cumple con los requerimientos técnicos de las normas nacionales ni internacionales.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Inversiones por cincuenta mil millones de pesos realizará la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) para ampliar sus servicios a los afiliados en la capital del país. Actualmente avanzan las obras para crear una nueva sede en el sector de Chapinero, en la Calle 67 con Carrera 8ª, en la ciudad de Bogotá, que incluye un edificio donde se prestarán servicios a los afiliados y operará el programa de Bogotá Emprende, a través del cual la Cámara busca promover la formalización de negocios y la apertura de nuevas unidades productivas.⁷

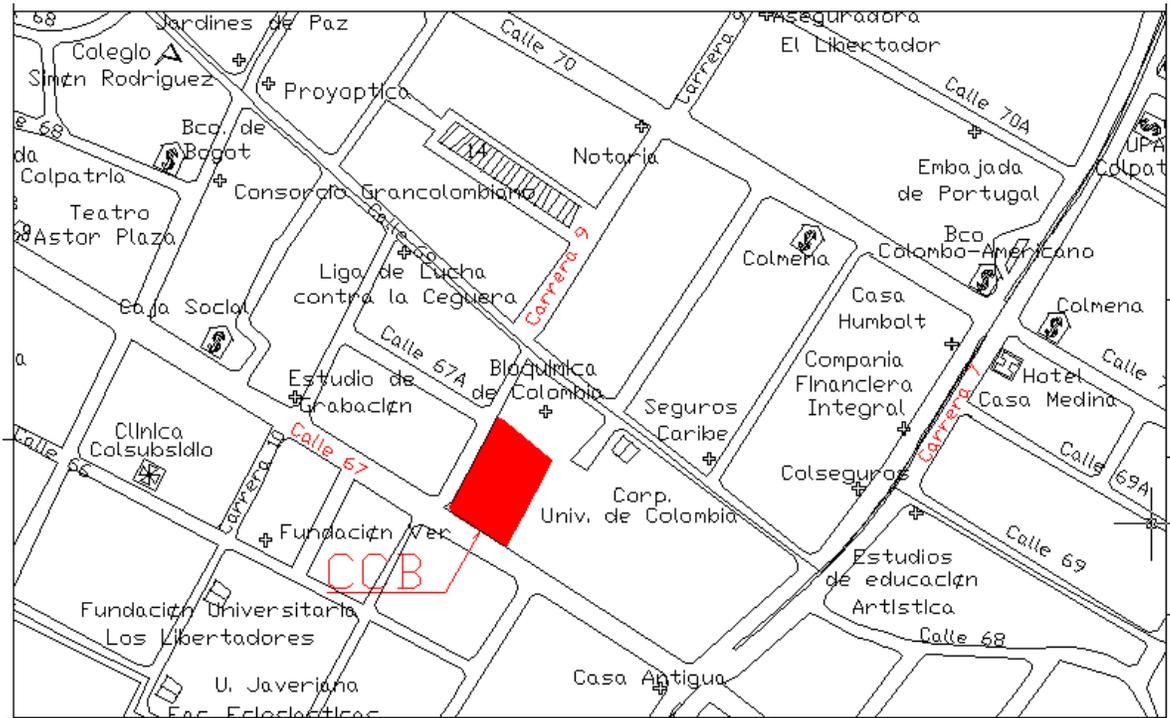


Figura 31. Localización proyecto CCB en la ciudad de Bogotá

(FUENTE: Autor)

⁷ Las especificaciones técnicas constructivas del proyecto, como son tipo de estructura y el área de la edificación se reseñan como Anexo del documento.



Bajo este orden de ideas estamos hablando de la construcción de un nuevo proyecto de instalaciones eléctricas de tipo comercial en el cual se ven involucradas personas, materiales o equipos eléctricos y electrónicos. De esta manera por ser un proyecto nuevo, y teniendo en cuenta la obligatoriedad de la normatividad vigente, es indispensable realizar la evaluación de los diseños para un sistema integral de protección contra descargas eléctricas atmosféricas. De igual manera existen actualmente otras construcciones cercanas donde se está construyendo el proyecto, pero no ofrecen un adecuado sistema de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas.

6.3 EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO

La evaluación que se presenta a continuación se estudia de acuerdo a la metodología planteada por la Norma Técnica Colombiana NTC 4552 (Primera actualización 2004-12-01). Se pretende determinar si se requiere implementar un sistema de protección contra rayos y las acciones que permitan disminuir el riesgo a un nivel tolerable.

El nivel de riesgo se obtiene de la ponderación de los indicadores de exposición al rayo y de la gravedad que puede implicar el impacto de un rayo. El procedimiento para la evaluación del riesgo para la nueva sede de la Cámara de Comercio (CCB), se presenta a continuación:

6.3.1 Indicador de gravedad. Según lo expuesto en el numeral 5.1.1 y de acuerdo a las Tablas 11, 12 y 13 se procede a evaluar el indicador de gravedad de la siguiente manera:

$$I_G = I_{USO} + I_T + I_{AA}$$

En donde:

I_{USO} = Subindicador relacionado con el uso de la estructura

I_T = Subindicador relacionado con el tipo de estructura

I_{AA} = Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura

Se evalúa el subindicador relacionado con el uso de la estructura:

Clasificación de la estructura	Ejemplos de estructura	Indicador
A	Teatros, centros educativos, iglesias, supermercados, centros comerciales, áreas deportivas al aire libre, parques de diversión, aeropuertos, hospitales, prisiones	40
B	Edificios de oficinas, hoteles, viviendas, grandes industrias, áreas deportivas cubiertas	30
C	Pequeñas y medianas industrias, museos, bibliotecas, sitios históricos y arqueológicos	20
D	Estructuras no habitadas	0

Tabla 22. Subindicador relacionado con el uso de la estructura (CCB)
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

El subindicador asociado con el uso de la estructura se clasifica como "B", lo cual corresponde a un indicador $I_{USO} = 30$ puntos, como se aprecia en la Tabla 22.

Se evalúa el subindicador relacionado con el tipo de la estructura:

Tipo de estructura	Indicador
No metálica	40
Mixta	20
Metálica	0

Tabla 23. Subindicador relacionado con el tipo de estructura (CCB)
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

El subindicador asociado con el tipo de la estructura se clasifica como "Mixta", lo cual corresponde a un indicador $I_T = 20$ puntos, como se aprecia en la Tabla 23.

Se evalúa el subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura, teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura (Longitud: 60 m Ancho: 30 m y Altura: 25 m).
Área de colección: 32.971 m²

Altura y área de la estructura	Indicador
Area menor a 900 m2	
Altura menor a 25 m	5
Altura mayor o igual a 25 m	20
Area mayor o igual a 900 m2	
Altura menor a 25 m	10
Altura mayor o igual a 25 m	20

Tabla 24. Subindicador relacionado con la altura y el área de la estructura (CCB)
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

El subindicador asociado con la altura y el área de la estructura corresponde a un indicador $I_{AA} = 20$ puntos, como se aprecia en la Tabla 24.

De acuerdo con los subindicadores encontrados se obtiene que:

$$I_G = I_{USO} + I_T + I_{AA}$$

$$I_G = 30 + 20 + 20$$

$$I_G = 70$$

De la Tabla 25 y para una suma de subindicadores de 70 puntos obtenemos un indicador de gravedad de valor "**Alta**".

Resultado de la suma de subindicadores de estructura	Indicador de Gravedad
0 a 35	Leve
36 a 50	Baja
51 a 65	Media
66 a 80	Alta
81 a 100	Severa

Tabla 25. Indicador de Gravedad (CCB)
(FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 12)

6.3.2 Indicador de exposición al rayo. Este indicador se obtiene a partir de la densidad de descargas a tierra (DDT) y la corriente pico absoluta promedio (I_{abs}) expresada en kiloamperios. Se debe considerar que los valores de DDT e I_{abs} deben tener el 50% de probabilidad de ocurrencia o menos, de acuerdo con la Norma NTC4552 (Primera actualización 2004-12-01). Considerando una probabilidad del 50%, se tiene un valor de corriente pico absoluta I_{abs} , aproximado de 40kA para Colombia.

Según lo mostrado en la Tabla 7 (*Densidad de Descargas a Tierra de las principales ciudades y Poblaciones de Colombia*), para la ciudad de Bogotá, se considera un rango de Densidad de Descargas a Tierra entre 1 y 2.

De acuerdo con los valores de "DDT" e " I_{abs} ", se obtiene un valor del indicador de exposición al rayo "**Medio**", según la figura 32.

Densidad de descargas a tierra	Corriente pico absoluta promedio [kA]		
[Descargas/km ² - año]	40 ≤ labs	20 ≤ labs < 40	labs < 20
30 ≤ DDT			
15 ≤ DDT < 30			
5 ≤ DDT < 15			
DDT < 5	X		

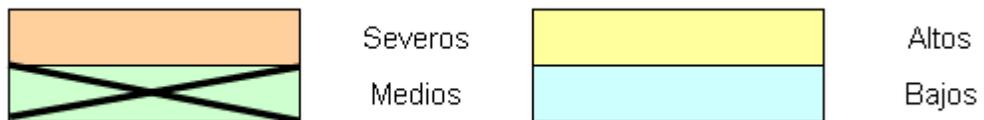


Figura 32. Indicador de exposición al Rayo (CCB)
 (FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 12)

6.3.3 Matriz de niveles de riesgo. Para concluir la evaluación del nivel de riesgo asociado con la instalación de la nueva sede de la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB), se aplica la matriz de niveles de riesgo como se muestra en la Figura 33.

I. RAYO \ I. GRAVEDAD	Severa	Alta	Media	Baja	Leve
	Severo				
Alto					
Medio		X			
Bajo					

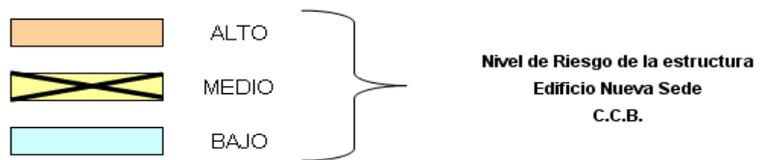


Figura 33. Matriz de Niveles de Riesgo (CCB)
 (FUENTE: Norma NTC 4552 1ª actualización, Pág. 13)

Ponderando el indicador de exposición al rayo **“Medio”** y el indicador de gravedad **“Alto”**, se obtiene como resultado un nivel de riesgo para la edificación del tipo **“Medio”**.



7. CONCLUSIONES

- Según el nivel de Riesgo obtenido para la edificación en la cual funcionará la nueva sede empresarial Chapinero de la Cámara de Comercio de Bogotá, el Sistema Integral de Protección contra Rayos - SIPRA, se conformó por los componentes que le corresponden según lo establecido en la Tabla 16 - Acciones recomendadas según el nivel de riesgo. Tabla obtenida de la Norma Colombiana NTC-4552 (Primera actualización 2004-12-01).
- Se diseñó un sistema de protección externa - SPE, es decir un sistema de apantallamiento, que se encargue de captar y conducir en forma segura las corrientes de rayos hacia el sistema de puesta a tierra, sin generar problemas adicionales derivados de la conducción de estas corrientes a través del edificio (Anexos 6 y 7).
- Debido a que en la edificación del proyecto se requiere un elevado nivel de seguridad y confiabilidad en su operación, y para el equipamiento de valor, se diseñó un sistema de protección interna - SPI, para evitar daños en las instalaciones producto de sobretensiones transitorias, ya sea por impacto directo de rayos sobre la edificación o por tensiones inducidas por impactos indirectos sobre otras edificaciones o estructuras, para lo cual se procede a equipotencializar el sistema (Anexos 6 y 7).
- Actualmente existen construcciones cercanas donde se está desarrollando el proyecto en referencia, pero no ofrecen un adecuado sistema de apantallamiento contra descargas eléctricas atmosféricas, por cuanto no cumple con los



requerimientos técnicos de la norma nacional (NTC 4552) ni internacional (IEC 62305). De ahí también se deriva la necesidad de haber implementado un SIPRA.

- En instalaciones a campo abierto, como las canchas deportivas, es muy costosa y complicada técnicamente la construcción de sistemas de protección contra rayos. Por esta razón se deben aplicar medidas de protección de tipo preventivo que permitan la evacuación oportuna de estos sitios en caso de la inminencia de tormentas eléctricas.
- Debido a las características constructivas del edificio, fue preciso utilizar su estructura como parte del sistema de protección contra rayos.
- En cualquier edificación el riesgo de accidentes y muerte para las personas, se produce por los posibles choques eléctricos por las tensiones de paso y de contacto originadas por el impacto del rayo. Es decir, el rayo no necesariamente tiene que impactar directamente sobre la persona (lo cual es una situación muy poco probable), para ocasionarle un choque eléctrico lo suficientemente intenso que comprometa su salud.
- Es preciso hacer las recomendaciones básicas al personal directivo y administrativo de cualquier tipo de edificación, con el fin de tener un manejo de riesgo de accidentes de personas debido a descargas eléctricas atmosféricas (Anexo 4).
- Las protecciones contra descargas eléctricas atmosféricas cien por ciento seguras, no son técnica ni económicamente viables, pero si se siguen las recomendaciones de la normatividad nacional e internacional sobre el tema, la probabilidad de ocurrencia de daños en las instalaciones eléctricas será mínima.



ANEXO 1

MEDICIÓN RESISTIVIDAD DEL TERRENO PROYECTO CÁMARA DE COMERCIO

Para el cálculo de la resistencia del sistema de apantallamiento del proyecto Nueva sede Chapinero de la Cámara de Comercio de Bogotá, fue necesario caracterizar el terreno, razón por la cual se realizó la medida de la resistividad del mismo.

La medición de la resistividad del terreno fue realizada por la empresa DIXPRO LTDA utilizando el Método Wenner. Esta medida fue tomada en direcciones alrededor de la zona en la cual será construida la malla de puesta a tierra.

La metodología de diseño IEEE 80 sólo admite un modelo de suelo homogéneo, por lo tanto teniendo en cuenta que el numeral 13.4.1 Uniform soil assumption de la norma IEEE 80 – 2000 permite obtener un modelo de suelo homogéneo a partir del promedio de las resistividades de un modelo multicapa, se tomó el promedio de las resistividades medidas a diferentes profundidades. Estas resistividades están reportadas en el Certificado de Pruebas Resistividad de Terreno presentado por DIXPRO LTDA y se presentan en el documento como Anexo 1.

La resistividad promedio utilizada es de 54 Ω .m

ELECTRODISEÑOS EDIFICIO CAMARA Y COMERCIO BOGOTÁ SEDE CALLE 67 – CRA 9 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD			
Fecha	Pag.	Preparado por	Revisado por
06/12/07	1 de 2	Ing. Pedro L. Rojas	Ing. Janio Guzmán

1. OBJETIVO

Realizar la medición de la resistividad del terreno para el proyecto EDIFICIO DE LA CAMARA y COMERCIO DE BOGOTÁ, Sede Calle 67 con Cra 9.

2. FICHA TÉCNICA

Procedimiento : Medición de resistividad por el método de Wenner a dos profundidades distintas 10 y 30 cm, en ejes perpendiculares y diagonales del terreno.

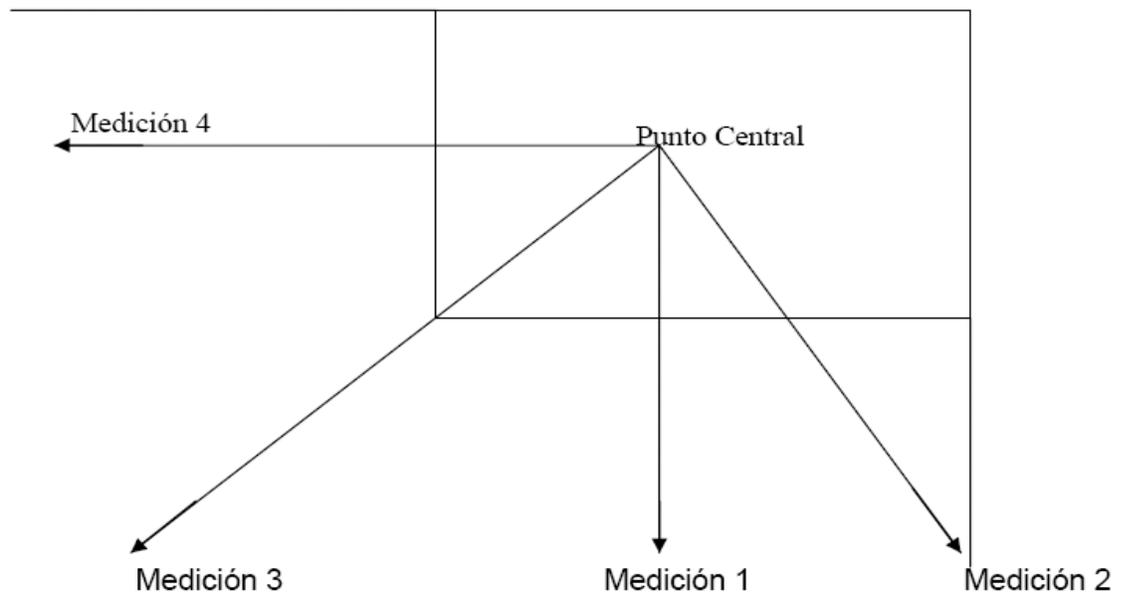


Figura 34. Medición resistividad del terreno CCB

ELECTRODISEÑOS EDIFICIO CAMARA Y COMERCIO BOGOTÁ SEDE CALLE 67 – CRA 9 MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD			
Fecha	Pag.	Preparado por	Revisado por
06/12/07	2 de 2	Ing. Pedro L. Rojas	Ing. Janio Guzmán

3. RESULTADOS

Distancia Interlectrónica	2 metros	4 metros
Profundidad	20 cms	30 cms
Medición	Valor Ω -m	Valor Ω -m
1	115.4	43.9
2	51.5	28.8
3	58.5	48.5
4	68	15.5
VALOR PROMEDIO	73.4	34.2

Tabla 26. Resultados medición resistividad del terreno CCB

4. CONCLUSIONES

Las mediciones se hicieron con el terreno altamente húmedo y la baja resistividad obtenida es propia de un terreno de tierra negra, saturado en humedad. A mayor profundidad el terreno presenta la misma composición, por lo cual se puede deducir que el comportamiento de la resistividad del terreno a mayor profundidad es similar a las mediciones tomadas.

ANEXO 2

DISEÑO MALLA DE PUESTA A TIERRA PROYECTO CÁMARA DE COMERCIO

La metodología utilizada para realizar el diseño de la malla de puesta a tierra de la subestación eléctrica del edificio de la sede Chapinero de la Cámara de Comercio de Bogotá es la que está definida en la norma IEEE 80 – 2000.



Figura 35. Ubicación subestación CCB Chapinero con respecto a la Subcentral Calle 67 de CODENSA

Calculo de Corriente de Cortocircuito Monofásico en S/E CCB Chapinero en 11,4 kV

Para el cálculo de las tensiones de paso y contacto, las cuales son los criterios de aceptación de una malla de puesta a tierra, se debe determinar el valor de la corriente que es inyectada por la malla de puesta a tierra hacia el terreno. Para el caso de la S/E CCB Chapinero una falla monofásica en los terminales de 11,4 kV sería la que inyectaría corriente desde la malla hacia el terreno y por lo tanto sería la que produciría tensiones de paso y contacto.

La Subestación CCB Chapinero se alimentará desde la subcentral Calle 67 del operador de red local CODENSA a través de un circuito conformado subterráneo de 750 m de longitud. Para el cálculo de la corriente de cortocircuito en la S/E CCB Chapinero se asumió el barraje de 11,4 kV de la S/C Calle 67 como infinito.

Utilizando el software ATP (Alternative Transient Program) se modeló el tramo de línea que alimenta la S/E CCB Chapinero.

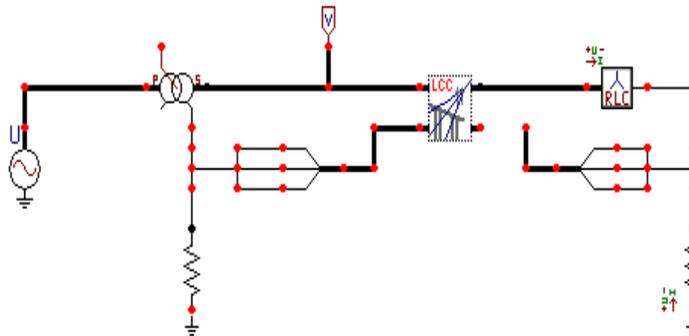


Figura 36. Esquema del modelo implementado para el cálculo de la corriente de cortocircuito S/E Cluster VII

Como resultado de la modelación se obtuvo el nivel de la corriente de cortocircuito en la S/E CCB Chapinero asumiendo una resistencia de puesta a tierra de $4,08 \Omega$ en ésta (se asume este valor debido a que el máximo que exige el operador de red local CODENSA es de 5Ω).



$I_{cc_{1\phi}} = 1360 \text{ A}$ *Corriente asimétrica de cortocircuito monofásico en la S/E CCB Chapinero*

Calculo de Corriente de Cortocircuito Monofásico en S/E CCB Chapinero en 208 V

Para determinar el calibre mínimo que se debe utilizar para construir la malla de puesta a tierra es necesario determinar la máxima corriente que puede circular por esta. En la S/E CCB Chapinero se instalará un transformador de 500 kVA. Por lo tanto la máxima corriente que podría circular por los conductores del sistema de puesta a tierra seria la resultante de una falla monofásica en el devanado de 208V

Por lo tanto usando la expresión (1) se puede calcular la corriente de cortocircuito en el devanado de 208V.

$$I_{cc} = \frac{S}{\sqrt{3} V Z} \quad (1)$$

Donde:

S es la potencia aparente del transformador

V es la tensión nominal del devanado donde se calculará la corriente de cortocircuito

Z es la impedancia de cortocircuito del transformador en p.u.

Para el caso del transformador que se instalará en el Clúster VII se tiene los siguientes valores.

S = 500 kVA

V = 208 V

Z = 0,08 p.u.



Con los anteriores datos se obtuvo un valor de 17,3 kA como corriente asimétrica de cortocircuito en el devanado de 208 V. Por lo tanto los electrodos y conductores de puesta a tierra deben tener un área mínima de 19,5 mm² (No. 4 AWG).

Diseño de la malla de puesta a Tierra S/E CCB Chapinero

Como parámetros de entrada se utilizaron los siguientes valores.

Resistividad del Terreno (ρ)	=	54 Ω m
Resistividad Capa Superficial (ρ_s)	=	3000 Ω m
Espesor de la capa superficial (h_s)	=	0,1 m
Profundidad malla (h)	=	0,6 m
Tiempo de despeje de la Falla (t)	=	0,348 s ⁸
Numero de Varillas	=	10
Longitud de las varillas	=	2,4 m

Tomando en cuenta los parámetros de entrada se calcularon las máximas tensiones de paso y contacto permitidas en la malla.

$$V_{paso-max} = 2657 V$$

$$V_{contacto-max} = 812 V$$

Utilizando la geometría de malla mostrada en la Figura 37 y el parámetro de resistividad descrito anteriormente, se obtuvo como resultado una resistencia de puesta a tierra de 4,05 Ω y unas tensiones de malla y de paso de 780 V y 586 V respectivamente.

⁸ El tiempo de despeje de falla se obtuvo de la curva de operación del relé del circuito CS12 de la subcentral Calle 67 suministrada por CODENSA S.A.

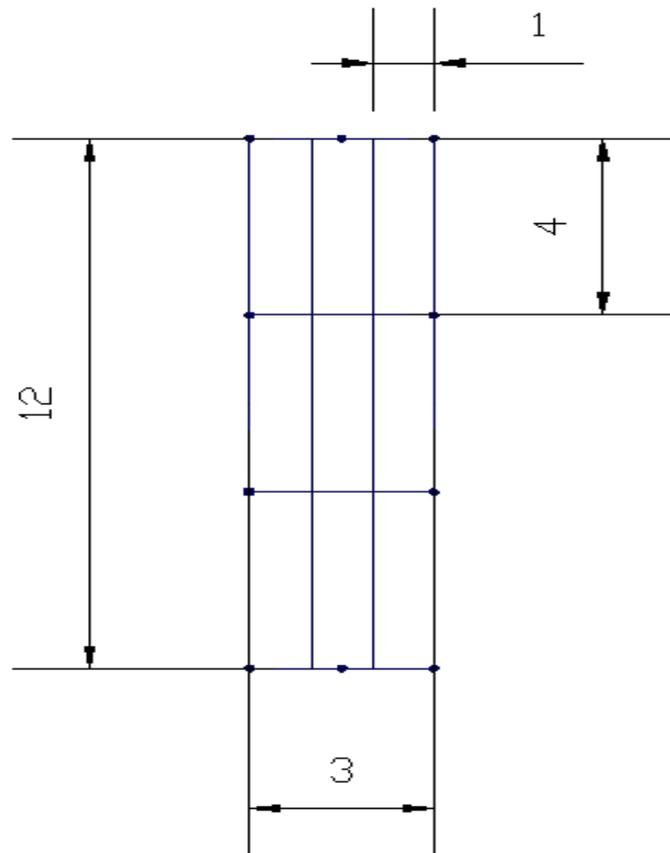


Figura 37. Esquema general malla de puesta a tierra

La malla debe ser construida utilizando conductor de cobre calibre 2/0 AWG y 8 varillas de puesta a tierra cobre-cobre de 0,015 m de diámetro y 2,4 m de longitud.



NOV-26-2007 06:01 PM R

93600742

CODENSA SA ESP

TABLA DE AJUSTE DE PROTECCIONES DE : CIRCUITO CS12 T CASTILLO

PROTECCION	SUBESTACIÓN			CARACTERÍSTICA	CALLE 67		
	RCT'S	MARCA	TIPO		TAP	TIME DIAL	INSTANTÁNEO
FASE	80	ARTECHE	PL50	NORMAL INVERSE	8	0,08	71
TIERRA	80	ARTECHE	PL50	NORMAL INVERSE	0,5	0,18	59

CODENSA
Mucho más que energía

DEPARTAMENTO DE PROTECCIONES Y CALIDAD DE PRODUCTO

SUBGERENCIA DE OPERACIÓN

SUBESTACION CALLE_67
115/11.4 KV
CIRCUITO CS12 T_CASTILLO
Características de Fase y Tierra

Figura 38. Tabla ajuste de protecciones S/E Calle 67 115/11.4kV Circuito CS12 CODENSA



NOV-26-2007 06:02 PM R

93600742

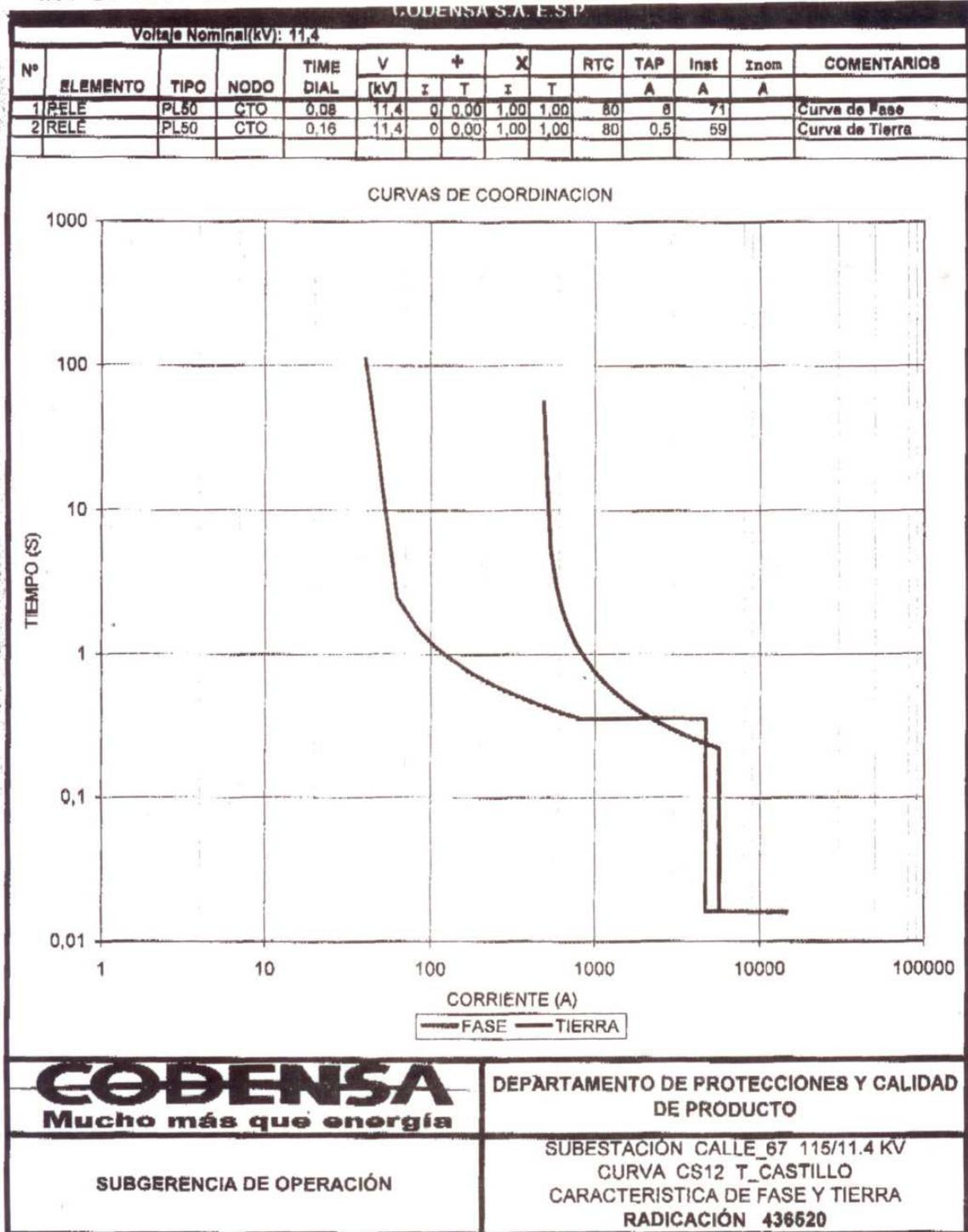


Figura 39. Curva CS12 de coordinación característica de Fase y Tierra



ANEXO 3

INFORME IEC RISK ASSESSMENT CALCULATOR

En la Figura 39 del presente Anexo, se muestra el panorama de riesgo elaborado para la edificación en referencia. En este caso la evaluación del nivel de riesgo se ha hecho con base en el reporte técnico IEC 1662 "Assessment of the risk due lighting", teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El edificio no representa patrimonio histórico o cultural de la ciudad.
- No existe cerca ninguna construcción de altura similar o mayor al edificio que ofrezca una condición de apantallamiento favorable.
- En el edificio el riesgo de accidentes para las personas se produce por los posibles choques eléctricos por las tensiones de paso y de contacto debidas a impactos directos de rayo.
- La red de datos requiere de una alta confiabilidad, así como los equipos electrónicos que la constituyen. Por tanto se considera que las sobretensiones ocasionadas tanto por impactos directos de rayos (en las instalaciones) como indirectos (en las acometidas y cercanos) son causantes de pérdidas por interrupción del servicio y daño de quipo electrónico sensible.

Las anteriores consideraciones fueron tenidas en cuenta de acuerdo a la figura 12 del presente documento, la cual es obtenida de la norma IEC 62305-1.



IEC Risk Assessment Calculator Project: ELECTRODISEÑOS CCB-CHAPINERO

Archivo Opciones Llenar Ayuda

Dimensiones de la estructura:

Longitud de la estructura (m): 60
 Anchura de la estructura (m): 30
 Altura del plano del tejado (m)*: 25
 Altura del mayor saliente del tejado (m)*: 25
 * Medido desde la tierra
 Área de colección (m2): 32.971 m2

Características de la estructura:

Riesgo de incendio y daños físicos: Normal
 Eficacia del apantallamiento: Buena
 Tipo de cableado interno: No apantallado

Influencias ambientales:

Situación respecto a los alrededores: Altura similar
 Factor ambiental: Urbano
 Nº de días de tormenta: 30 days/year
 Densidad anual equivalente de rayos: 3.0 flashes/km2
 Ver mapa isoceraúnico: Ver Mapa

Líneas de conducción eléctrica:

Línea eléctrica:
 Línea que llega a la estructura: Cable enterrado
 Tipo de cable externo: Apantallado
 Existencia de transformador MT/BT: Transformador

Otros servicios aéreos:
 Número de servicios conducidos: 0
 Tipo de cable externo: No apantallado

Otros servicios enterrados:
 Número de servicios conducidos: 1
 Tipo de cable externo: Apantallado

Medidas de protección:
 Clase de SPDR: Nivel II
 Protección contra incendios: Sistemas automáticos
 Protección contra sobretensiones: Coord. según IEC62305-4

Tipos de las pérdidas:

Tipo 1 - Pérdidas de vidas humanas:
 Riesgos especiales para la vida: Riesgo de pánico medio
 Por incendios: Comercios, colegios, ...
 Por sobretensiones: Hay sist. de seguridad crit

Tipo 2 - Pérdidas de servicios esenciales:
 Por incendios: No hay servicios esenc
 Por sobretensiones: No hay servicios esenc

Tipo 3 - Pérdidas de patrimonio cultural:
 Por incendios: Sin valor histórico

Tipo 4 - Pérdidas económicas:
 Riesgos económicos especiales: Sin riesgos especiales
 Por incendios: Propiedad comercial
 Por sobretensiones: Zona industrial o comerci
 Por tensión de paso/contacto: Sin riesgo de stock
 Riesgo tolerable de pérd. económ.: 1 en 1000 años

Riesgos calculados:

Pérdidas de vidas humanas:	Riesgo aceptable (Rt)	Riesgo imp. directo (Rd)	Riesgo imp. indirecto (Ri)	Riesgo calculado (R)
1,00E-05	1,00E-05	1,30E-06	4,14E-07	1,71E-06
1,00E-03	1,00E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1,00E-03	1,00E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
1,00E-03	1,00E-03	1,09E-05	4,12E-05	5,21E-05

IEC

Este cálculo del índice de riesgo de IEC pretende orientar en el análisis de diversos criterios que determinan el riesgo de pérdidas debidas al rayo. No es posible cubrir todos los elementos especiales de una estructura que puedan hacer que sufra más o menos daños debidos al rayo. En casos especiales hay factores económicos y personales que podrían ser muy importantes y considerarse junto con el índice obtenido mediante esta herramienta. Se pretende que este programa se utilice en combinación con la versión escrita de la norma IEC62305-2.

Calculos

Project: ELECTRODISEÑOS CCB-CHAPINERO

Database: v1.0.3 Map: SPANISH 14/12/2007

Figura 40. Evaluación Nivel de Riesgo CCB según reporte IEC Risk assessment Calculator



ANEXO 4

GUÍA GENERAL DE SEGURIDAD PERSONAL DURANTE TORMENTAS ELÉCTRICAS

Como anexo al presente documento, se hace reseña sobre las recomendaciones que deben tener las personas cuando se ven enfrentadas a tormentas eléctricas en cualquier tipo de edificación. La siguiente guía de comportamiento para el usuario, es obtenida y basada en la Norma Técnica Colombiana NTC4552 (Primera actualización 2004-12-01).

Durante una tormenta eléctrica son evidentes los peligros a los que se exponen, no solo las edificaciones y los sistemas eléctricos y electrónicos, sino las personas. Es por ello que se deben conocer algunas recomendaciones para tener en cuenta durante una tormenta, evitando riesgos para las personas.

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. En la zona central colombiana (Cundinamarca, Antioquia, Boyacá, Santander, Caldas, Quindío, Risaralda, Valle del Cauca y los llanos) la actividad de rayos es más intensa durante los meses de Abril, Mayo, Octubre y Noviembre; en la zona del caribe colombiano (Atlántico, Magdalena, Sucre, Córdoba, Guajira) durante los meses de Julio y Agosto; y en la zona sur (Amazonas, Cauca y Putumayo) durante los meses de Diciembre y Enero.

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



Cuando se tenga indicios de tormenta eléctrica es recomendable, como medida de protección, seguir las siguientes instrucciones:

- Aterrice y proteja adecuadamente los equipos sensibles de uso eléctrico, electrónico, telefónico o de comunicaciones contra sobretensiones de acuerdo con los criterios y recomendaciones presentadas en la norma, de lo contrario desconéctelos retirando el enchufe del tomacorriente evitando así el uso de ellos.
- Busque refugio en el interior de vehículos, edificaciones y estructuras que ofrezcan protección contra rayos.
- A menos que sea absolutamente necesario no salga al exterior ni permanezca a la intemperie durante una tormenta eléctrica.
- Permanezca en el interior del vehículo, edificación o estructura hasta que haya desaparecido la tormenta.

Protéjase de los rayos en:

- Contenedores totalmente metálicos.
- Refugios subterráneos.
- Automóviles y otros vehículos cerrados con carrocería metálica.
- Viviendas y edificaciones con un sistema adecuado de protección contra rayos

Estos sitios ofrecen poca o ninguna protección contra rayos:

- Edificaciones no protegidas alejadas de otras viviendas.



-
- Tiendas de campaña y refugios temporales en zonas despobladas.
 - Vehículos descubiertos o no metálicos.

Aléjese de estos sitios en caso de tormenta eléctrica:

- Terrenos deportivos y campo abierto.
- Piscinas, playas y lagos.
- Cercanía a líneas de transmisión eléctrica, cables aéreos, vías de ferrocarril, tendedores de ropa, cercas ganaderas, mallas eslabonadas y mallas metálicas.
- Árboles solitarios de todos en general.
- Torres metálicas: de comunicación, de líneas de alta tensión, de perforación, etc.

Si debe permanecer en una zona de tormenta:

- Busque zonas bajas.
- Evite edificaciones sin protección adecuada y refugios elevados.
- Busque edificaciones y refugios en zonas bajas.

Si se encuentra aislado en una zona donde se esté presentando una tormenta:

- No se acueste sobre el suelo.
- Junte los pies.



-
- No escampe bajo un árbol solitario.
 - No coloque las manos sobre el suelo, colóquelas sobre las rodillas.



ANEXO 5

SISTEMA DE ALARMA

Para completar el Sistema Integral de Protección contra Rayos propuesto en la figura 18 y dado que no existe una protección contra rayos que sea completamente segura, se debe considerar, la instalación de una alarma de prevención de rayos con el fin de avisar al personal para que se tomen las precauciones respectivas y para desconectar manual o automáticamente equipos electrónicos o de comunicación susceptibles de daño.

El sistema de alarma debe cumplir, entre otras, con las siguientes especificaciones mínimas:

- Su resolución debe ser omnidireccional, es decir que cubra 360°
- La eficiencia en la detección de rayos debe ser 100% en un radio de 30 km
- Debe activarse únicamente por detección de rayos, es decir, que no se generen falsas alarmas por señales de otro origen.
- Debe predecir si existe una alta probabilidad de rayos dentro de un radio de 15 km para un intervalo de tiempo de 10 a 15 minutos, tiempo que se considera prudente para que las personas pueden poner en práctica las instrucciones dadas en la Guía de Seguridad Personal (Anexo 4).
- La alarma debe ser audible en un radio mínimo de 200 m



ANEXO 6

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SISTEMA DE APANTALLAMIENTO PROYECTO CÁMARA DE COMERCIO

Las siguientes son las especificaciones técnicas de las medidas de protección que se deben implementar para el Sistema Integral de Protección contra Rayos, en el edificio de la nueva sede Chapinero de la Cámara de Comercio de Bogotá. Todos los componentes y materiales a instalar deben ser nuevos y de primera calidad, y se deberá demostrar con las correspondientes certificaciones el cumplimiento con la normatividad técnica planteada en el presente documento, así como el cumplimiento de certificación de producto bajo norma RETIE.

PROTECCIÓN EXTERNA

Norma IEC 62305-3 Protection against lightning

Part 3: Physical Damage to Structures and life hazard

El objetivo de la protección externa es minimizar el riesgo de daños físicos a las edificaciones y la protección de las personas contra choques eléctricos en las cercanías del sistema de protección contra rayos y en los alrededores del edificio. De acuerdo con los resultados del cálculo del nivel de riesgo (tanto con la Norma NTC-4552, como la IEC 62305), se requiere un sistema de protección contra rayos con nivel de protección II. El sistema se puede apreciar en el plano correspondiente al anexo 7.



Las especificaciones técnicas que deben cumplir los componentes del sistema de protección externa conforme a IEC 62305-3, son:

Elementos de captación o pararrayos

Como elementos de captación, se consideran varillas sólidas de Aluminio, de 60 cm de longitud y una sección mínima de 200 mm², conforme a IEC 62305. En el anexo 7 se muestra un detalle de los elementos de fijación y conexión de las varillas. Las puntas de captación deberán estar interconectadas entre sí, y a las bajantes mediante un anillo en varilla de aluminio de sección mínima de 50 mm²

Bajantes

Se utilizarán dos tipos de bajantes: bajantes artificiales en las fachadas en mampostería, y bajantes naturales para fachadas metálicas. Para la utilización de la fachada metálica como bajante natural el edificio, se realizaran las comprobaciones requeridas en las cláusulas 5.3.5, 5.6.2 y 5.5.2 de IEC 62305-1, en lo que respecta a dimensiones mínimas de los materiales y continuidad eléctrica. La distancia mínima entre bajantes será de 10 metros. Para las bajantes se podrá utilizar conductor de aluminio con una sección mínima de 70 mm² respectivamente.

Debido a la dualidad de materiales entre las bajantes y los electrodos de puesta a tierra (aluminio y cobre), la interconexión entre estos dos componentes se deberá hacer a través de un elemento bimetálico adecuado y se deberán utilizar elementos de conexión y fijación compatibles electroquímicamente con cada uno de los componentes (acero inoxidable). Las conexiones entre bajante y electrodo serán con conectores mecánicos.

Electrodos de puesta a tierra

Se utilizarán combinaciones de electrodos tipo A y B conforme a 5.4.2 de IEC 62305-3. Cada bajante deberá conectarse a un electrodo tipo A (conductor sólido enterrado



verticalmente) de 2,4 m de longitud. En las zonas donde sea posible, y donde se presente una mayor circulación de personas, se combinarán los electrodos tipo A con electrodos tipo B (conductor de cobre enterrado horizontalmente) alineados con la dirección de circulación del personal. Los electrodos tipo B deberán estar enterrados externamente al menos 50 cm y distanciados a 1 m de muros o paredes.

Equipotencialización

Se conectará al sistema de protección externa todo elemento metálico que esté en la cubierta como antenas, barandas, escaleras, etc. También se debe unir al sistema los elementos metálicos que estén dentro del predio como encerramiento, tanques de almacenamiento de combustibles, etc. Como elemento de interconexión entre las diferentes partes metálicas, se deberá utilizar conductor de cobre de al menos 16 mm² de sección (No. 4 AWG).

PROTECCION INTERNA

Los dispositivos de protección contra sobretensiones DPS deberán ser instalados en todos los posibles puntos de acople de sobretensiones tales como circuitos de alimentación de energía, señales de instrumentación y señales de control y comunicaciones. El sistema se puede apreciar en el plano correspondiente al anexo 7. Para implementar un esquema de protección eficiente, el sistema de protección considera la instalación de los DPS en los sistemas eléctricos, de datos y comunicaciones, y señales de instrumentación provenientes de equipos lejanos. Por tanto, los DPS a instalar se pueden clasificar como DPS de energía, y DPS en líneas de control e instrumentación.

DPS en circuitos de energía

Los DPS para circuitos de energía se clasifican, conforme la norma internacional IEC 61643-1, como clase I, clase II, clase III, y combinaciones de éstas.



Para facilitar las labores de mantenimiento, los DPS deberán ser instalados a través de un interruptor automático según se encuentra especificado en el diagrama unifilar del plano correspondiente al anexo 8.

En el sistema de red normal de 480 V (no soportado por UPS), se instalarán DPS de cuatro polos en protección en modo común fase-neutro y neutro-PE. En los tableros de distribución de 220 V tanto de la red comercial como de la red regulada, se utilizarán DPS de cuatro polos con protección en modo común: fase-neutro, neutro-PE.

La conexión de los DPS se debe hacer de tal forma que se minimice el lazo inductivo formado entre los cables de derivación y el conductor de puesta a tierra. Por tal razón se deberá evitar en lo posible, que la longitud de los cables de derivación exceda los 50 centímetros. La tensión máxima de operación continua de los DPS basados en varistores de óxido de zinc deberá mantenerse entre un 10% y un 20% de la tensión nominal fase-PE del sistema. Los DPS deben cumplir con los requerimientos y certificaciones según norma IEC 61643-1.

DPS Clase I+II 50 kA en forma de onda 10/350

Estos DPS se instalarán en los barrajes de distribución general de 480 V de cada subestación. Se deberá garantizar coordinación energética entre los DPS clase I y clase II considerando que serán instalados en el mismo barraje. Considerando la existencia de equipo electrónico alimentado directamente del barraje de 480 V se deberá garantizar un nivel de protección menor o igual a 1500 V para equipo electrónico categoría de aislamiento I según norma IEC 60664-1.

DPS Clase I+II 50 kA en forma de onda 8/20

Se instalarán en los barrajes de los tableros que alimentan las bombas contra-incendio, entrada de UPS, y barraje de red normal a 208 V. Considerando la existencia de equipo



electrónico alimentado directamente del barraje de 480 V se deberá garantizar un nivel de protección menor o igual a 1500 V para equipo electrónico categoría de aislamiento I según norma IEC 60664-1. En el sistema de 208 V los DPS instalados deberán garantizar un nivel de protección menor o igual a 800 V para equipo electrónico categoría de aislamiento I según norma IEC 60664-1.

DPS Clase II

Los DPS clase II se configuran dependiendo de la carga alimentada, en dos, tres o cuatro polos y se instalarán en los barrajes de 480 V y 208 V de los tableros de red normal y red regulada.

DPS Clase III

Los DPS clase III se instalarán en los circuitos de alimentación a la entrada de los equipos por determinar.

DPS en líneas de control e instrumentación

Considerando que la gran mayoría de las comunicaciones del sistema se hacen a través de la red de fibra óptica, se reduce el uso de los DPS sólo a aquellas señales de instrumentos y comunicaciones tendidas en conductor de cobre tales como R485 y lazos de control 4-20 mA

Los DPS instalados no deberán ocasionar ninguna interferencia con la señal del circuito, y deberán ser instalados lo más cerca posible al equipo protegido.



ANEXO 7

PLANOS SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

(Ver Planos en Trabajo de Grado impreso)

- PUNTAS CAPTORAS Y ANILLOS SUPERIORES
- ANILLO INFERIOR Y ELECTRODOS
- BAJANTES



ANEXO 8

PLANOS SISTEMA DE PROTECCIÓN INTERNO

(Ver Planos en Trabajo de Grado impreso)



ANEXO 9

**PLANO DISEÑOS DE SUBESTACION SERIE 3 CODENSA
PROYECTO CAMARA DE COMERCIO SEDE CHAPINERO**

(Ver Plano en Trabajo de Grado impreso))



BIBLIOGRAFÍA

1. REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS - RETIE. Ministerio de Minas y Energía. Resolución No. 18-1294 del Agosto 6 de 2008. Artículo 15, Puestas a tierra. Bogotá D.C. Año 2008.
2. REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS – RETIE. Ministerio de Minas y Energía. Resolución No. 18-1294 del Agosto 6 de 2008. Artículo 18, Requisitos de protección contra rayos. Bogotá D.C. Año 2008.
3. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION - ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 4552 (Primera actualización, edición 2004-12-13). Protección contra Rayos. Principios generales. Bogotá D.C. ICONTEC, 2004.
4. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION - ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 2050 (Primera actualización). Código Eléctrico Colombiano. Bogotá D.C. ICONTEC, 1998.
5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION - ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 2206. Electrotecnia. Equipo de conexión y puesta a tierra. Bogotá D.C. ICONTEC, 1986.
6. INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS - CIGRE. Working Group WG.33.01 Characterization of Lightning for Applications in Electric Power Systems, TF33.01.02 Lightning Location Systems, Dubrovnic, 1998.



-
7. INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS - CIGRE. Working Group WG.05 Protection of MV and LV networks against lightning. Part I: Basic Information. Dubrovnic. 1995.
 8. CASAS O, Favio. Tierras, soporte de la seguridad eléctrica. (Primera edición). Colombia. Bogotá D.C. 1998.
 9. DIAZ, Pablo. Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución. Capítulo 17. Editorial McGraw Hill. México D.F. 2001.
 10. RICO G, Edward. Especificaciones Técnicas Sistema de Apantallamiento Empresa de licores de Cundinamarca en Cota. Bogotá D.C. 2007.
 11. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Norma IEC 60364. Electrical Installations for Buildings - Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances 1990.
 12. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Norma IEC 61024-1-2, Protection of structures against lightning - Part 1-2: General principles - Guide B - Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems, 1998
 13. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Norma IEC 62305, Ed. 1.0. Protection against lightning - Part 1. General Principles. 2003.
 14. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Norma IEC 62305, Ed. 1.0. Protection against lightning - Part 2. Risk management. 2003.
 15. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Norma IEC 62305, Ed. 1.0. Protection against lightning - Part 3. Physical damage to structures. 2003.



-
16. NORMA ANSI/IEEE Std 80. IEEE Guide to Safety in AC Substation Grounding. 1986.
 17. NORMA ANSI/IEEE Std 81. IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system. 1983.
 18. NORMA ANSI/IEEE C62.41.1. IEEE Guide on the Surge Environment in low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits. 2002.
 19. NORMA ANSI/IEEE C62.41.2. IEEE Recommended Practice on characterization of Surges in Low-Voltage. (1000 V and less) AC Power Circuits. 2002.