

Facultad de
Ingenierías
Físico-
mecánicas

Universidad
Industrial de
Santander



PROTECCIÓN CONTRA RAYOS
SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA
PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL

ALBA LILIANA MAYORGA GARCÍA

JUAN CARLOS ROJAS SOLANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011

Facultad de
Ingenierías
Físico-
mecánicas



**PROTECCIÓN CONTRA RAYOS
SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO**

**PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA
PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL**

ALBA LILIANA MAYORGA GARCÍA

JUAN CARLOS ROJAS SOLANO

**TRABAJO DE GRADO EN LA MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIEROS ELECTRICISTAS**

**Director:
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO
Ingeniero Electricista, M.P.E**

**Co-director:
HERMMAN RAÚL VARGAS
Ingeniero Electricista.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTA DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011**



AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a nuestro Director de Proyecto Ingeniero Electricista M.P.E Julio Cesar Chacón Velasco por sus constantes aportes de conocimiento y experiencia, fundamentales en cada etapa de desarrollo de este proyecto.

Al equipo de docentes formadores de la Universidad Industrial de Santander - Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, amigos y compañeros por sus contribuciones respecto a los temas abordados, e interés por la ejecución de nuestro trabajo de grado.



A:

*Dios, Quien me dio la fe, la fortaleza, la salud
y la esperanza para terminar mi carrera.*

*A mi madre Gricelda y mi padre Pedro, quienes a través
de su ejemplo me han transmitido los valores necesarios para
la vida, que Dios me los preste por muchos años.*

*Mi familia, Quienes me brindaron su amor, su cariño,
su estímulo y su apoyo constante.*

*Y sobre todo por estar siempre presentes para compartir
mis dificultades y mis éxitos*

¡Gracias!

Alba Liliana Mayorga García



*Doy gracias a Dios por ser mi guía y darme la fortaleza necesaria
en el cumplimiento de mi propósito.*

*Agradezco y dedico este triunfo a mi padre Carlos Arturo Rojas,
a mi madre Argénida Solano Solano y a toda mi familia
por su apoyo incondicional, por su compañía y palabras de aliento
a lo largo de este largo proceso.*

*A mis compañeros de carrera y amigos que me acompañaron
en los buenos y malos momentos durante el camino.*

Juan Carlos Rojas Solano.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN..... | 22 |
| 1. CONCEPTOS GENERALES..... | 25 |
| 1.1 HISTORIA DEL RAYO | 25 |
| 1.2 EL FENÓMENO DEL RAYO..... | 26 |
| 1.2.1 Descargas entre nubes. | 26 |
| 1.2.2 Descarga entre nube y la ionosfera. | 26 |
| 1.2.3 Descarga entre nube-tierra o tierra-nube. | 26 |
| 1.2.3.1 Descargas de rayo descendentes. | 27 |
| 1.2.3.2 Descargas de rayo ascendentes. | 27 |
| 1.3 PARÁMETROS DEL RAYO | 29 |
| 1.3.1 Amplitud de la corriente de retorno de rayo (I)..... | 32 |
| 1.3.2 La carga de la corriente de rayo (Q)..... | 33 |
| 1.3.3 La energía específica de la corriente de rayo (W/R)..... | 34 |
| 1.3.4 La pendiente media de la corriente del rayo ($\Delta i/\Delta t$)..... | 35 |
| 1.4 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4552..... | 40 |
| 1.5 SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA) | 41 |
| 1.5.1 Sistema de protección externo (SPE). | 43 |
| 1.5.2 Sistema de protección interna (SPI)..... | 43 |
| 1.5.3 Sistema de prevención..... | 44 |
| 1.5.3.1 Guía de seguridad personal. | 45 |
| 1.5.3.2 Sistema de alarma y detección de rayos. | 46 |
| 1.6 NIVELES DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (NPR)..... | 46 |
| 1.7 ZONAS DE PROTECCIÓN CONTRA RAYO (ZPR) | 49 |
| 1.7.1 Zonas externas. | 50 |
| 1.7.1.1 ZPR 0A..... | 50 |
| 1.7.1.2 ZPR 0B..... | 50 |



| | | |
|---------|--|----|
| 1.7.2 | Zonas internas. | 50 |
| 1.7.2.1 | ZPR 1. | 50 |
| 1.7.2.2 | ZPR 2...n. | 50 |
| 2. | DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN | 52 |
| 2.1 | SISTEMA DE CAPTACIÓN | 52 |
| 2.1.1 | Varillas tipo Franklin o bayonetas. | 53 |
| 2.1.2 | Hilos de tendido o cables colgantes. | 53 |
| 2.1.3 | Malla de conductores o jaulas malladas. | 53 |
| 2.1.4 | Dispositivos de cebado. | 53 |
| 2.2 | MÉTODOS DE CAPTACIÓN AÉREA..... | 54 |
| 2.3 | MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO | 54 |
| 2.3.1 | Método de la esfera rodante (MER). | 55 |
| 2.3.2 | Método del ángulo de protección. | 58 |
| 2.3.2.1 | Tipo de instalación de protección en relación al volumen a proteger. | 59 |
| 2.3.3 | Método del enmallado. | 63 |
| 2.3.3.1 | Características generales del enmallado. | 64 |
| 2.3.4 | Construcción del sistema de captación aérea. | 66 |
| 3. | SISTEMA DE CONDUCTORES BAJANTES | 71 |
| 3.1 | BAJANTES..... | 71 |
| 3.2 | TIPOS DE SISTEMA DE BAJANTES | 71 |
| 3.2.1 | Sistema aislado eléctricamente de la estructura. | 71 |
| 3.2.2 | Sistema no aislado o unido eléctricamente a la estructura. | 72 |
| 3.3 | AISLAMIENTO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN | 73 |
| 3.4 | DIVISIÓN DE LA CORRIENTE DEL RAYO A TRAVÉS DE LOS CONDUCTORES BAJANTES..... | 76 |
| 3.5 | EQUIPOTENCIALIZACIÓN DE CONDUCTORES BAJANTES Y PARTES EXTERNAS METÁLICAS..... | 81 |
| 3.5.1 | Uniones equipotenciales contra descargas eléctricas atmosféricas. | 81 |
| 3.5.1.1 | Unión equipotencial para instalaciones metálicas. | 81 |
| 3.5.1.2 | Unión equipotencial para partes conductoras externas. | 81 |
| 3.6 | CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCTORES BAJANTES..... | 81 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.6.1 | Estructuras en concreto reforzado. | 82 |
| 3.6.1.1 | Utilización del refuerzo del concreto. | 83 |
| 3.6.1.2 | Soldadura o sujeción a las varillas de acero de refuerzo. | 84 |
| 3.6.1.3 | Materiales. | 84 |
| 3.6.1.4 | Corrosión. | 85 |
| 3.6.1.5 | Cimentación como terminales de tierra. | 85 |
| 3.6.1.6 | Uniones de expansión. | 85 |
| 3.7 | COMPONENTES NATURALES DE LOS SISTEMAS DE CONDUCTORES BAJANTES. | 86 |
| 3.7.1 | Elementos metálicos. | 87 |
| 3.7.2 | Acero de concreto reforzado. | 87 |
| 3.7.3 | Concreto pre-prensado. | 87 |
| 3.7.4 | Marcos metálicos y/o elementos de fachada. | 87 |
| 3.8 | ESPECIFICACIONES DE LAS CONEXIONES Y UNIONES DE LOS SISTEMAS DE BAJANTES. | 88 |
| 3.8.1 | Uniones de prueba. | 89 |
| 4. | SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 90 |
| 4.1 | ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 93 |
| 4.1.1 | Tomas de tierra. | 93 |
| 4.1.1.1 | Electrodos. | 93 |
| 4.1.2 | Anillos de enlace. | 95 |
| 4.1.3 | Punto de puesta a tierra. | 95 |
| 4.1.4 | Líneas principales de tierra. | 95 |
| 4.2 | PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE LAS TIERRAS. | 96 |
| 4.2.1 | Resistividad del suelo. | 96 |
| 4.2.1.1 | Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica. | 98 |
| 4.3 | CONFIGURACIONES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. | 100 |
| 4.3.1 | Configuración tipo A ó radial. | 100 |
| 4.3.2 | Configuración tipo B ó anillo. | 101 |
| 4.4 | SOBRETENSIONES DEBIDAS A IMPACTOS DIRECTOS DEL RAYO EN LA ESTRUCTURA. | 102 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.5 | SECCIÓN TRANSVERSAL MÍNIMA DE LA PANTALLA DEL CABLE DE ENTRADA PARA EVITAR CHISPAS PELIGROSAS | 104 |
| 4.6 | MEDIDAS DE PROTECCIÓN CONTRA TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO | 106 |
| 4.7 | INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | 108 |
| 4.7.1 | Electrodos de puesta a tierra de cimentación. | 108 |
| 4.7.2 | Electrodos de puesta a tierra radial y vertical..... | 109 |
| 4.7.3 | Electrodos de puesta a tierra en anillos. | 110 |
| 4.7.4 | Electrodos de puesta a tierra en suelo rocoso. | 112 |
| 4.7.5 | Sistemas de puesta a tierra en grandes áreas..... | 112 |
| 4.8 | MATERIALES, DIMENSIONES Y CONEXIONES..... | 113 |
| 4.8.1 | Protección contra la corrosión..... | 116 |
| 4.8.1.1 | Metales en el suelo y aire. | 116 |
| 4.8.1.2 | Metales en concreto. | 118 |
| 5. | APLICACIÓN EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN | 119 |
| 5.1 | DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EDIFICIO. | 119 |
| 5.2 | EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO AL SIPRA EXISTENTE EN EL EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN..... | 120 |
| 5.3 | DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNA | 127 |
| 5.3.1 | Evaluación del nivel de riesgo..... | 128 |
| 5.3.2 | Diseño del sistema de captación..... | 133 |
| 5.3.2.1 | CÁLCULOS DE LA ESFERA RODANTE..... | 134 |
| 5.3.2.2 | Instalación del sistema de captación. | 136 |
| 5.3.3 | Diseño del sistema de conductores bajantes..... | 138 |
| 5.3.3.1 | Aislamiento eléctrico..... | 138 |
| 5.3.3.2 | Instalación del sistema de conductores bajantes. | 142 |
| 5.3.4 | Diseño del sistema de puesta a tierra. | 143 |
| 5.3.4.1 | Configuración tipo A o radial..... | 143 |
| 5.3.4.2 | Configuración tipo anillo o tipo B. | 144 |
| 5.3.4.3 | Corriente parcial de rayo (<i>If</i>). | 145 |
| 5.3.4.4 | Cálculo del calibre del conductor de la malla..... | 146 |



| | |
|--------------------|-----|
| CONCLUSIONES | 149 |
| BIBLIOGRAFÍA | 150 |
| ANEXOS | 151 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Rayo descendente (rayo nube-tierra) | 27 |
| Figura 2. Rayo ascendente (rayo tierra – nube)..... | 27 |
| Figura 3. Mecanismo de descarga de un rayo descendente negativo (Rayo nube – tierra) | 28 |
| Figura 4. Mecanismo de descarga de un rayo descendente positivo (Rayo nube – tierra) | 28 |
| Figura 5. Mecanismo de descarga de un rayo ascendente Negativo y positivo (Rayo tierra – nube) | 29 |
| Figura 6. Descarga de corta duración | 30 |
| Figura 7. Descarga de larga duración | 30 |
| Figura 8. Posibles componentes de una descarga de rayo descendente | 31 |
| Figura 9. Posibles componentes de una descarga de rayo ascendente | 31 |
| Figura 10. Energía producida en punto de impacto por la Q de la corriente de rayo | 33 |
| Figura 11. Efectos de un arco voltaico de corriente de impulso sobre una superficie metálica (Q_{corta})..... | 34 |
| Figura 12. Perforación de chapas metálicas por la acción de arcos voltaicos de larga duración (Q_{larga}) | 34 |
| Figura 13. Calentamiento y efectos magnéticos producidos por la energía específica de la corriente del rayo | 35 |
| Figura 14. Tensión de onda cuadrada inducida en bucles por la pendiente de la corriente $\Delta i/\Delta t$ de la corriente de rayo | 36 |
| Figura 15. Ejemplo de cálculo de tensión inducida en onda cuadrada en bucles cuadrados | 37 |
| Figura 16. Sistema de protección contra rayos..... | 42 |
| Figura 17. Sistema Integral de Protección contra Rayos SIPRA | 42 |
| Figura 18. Sistema de Protección Externo..... | 43 |
| Figura 19. Sistema de Protección Interno..... | 44 |
| Figura 20. Zonas de protección contra rayos ZPR, definidas para un SIPRA | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Avances de cebado en puntas de captación. | 54 |
| Figura 22. Método de la esfera rodante y profundidad de penetración de la misma. | 56 |
| Figura 23. Método de la esfera rodante para edificaciones de geometría compleja | 58 |
| Figura 24. Ángulo de protección dependiendo de la altura relativa y el nivel de protección | 58 |
| Figura 25. Volumen protegido por un cable tendido y por una punta captadora vertical | 59 |
| Figura 26. Método del ángulo de protección para sistemas aislados..... | 60 |
| Figura 27. Ángulo de protección para sistemas no aislados..... | 62 |
| Figura 28. Método del enmallado..... | 64 |
| Figura 29. Método del enmallado en techos inclinados | 65 |
| Figura 30. Posicionamiento de un SIPRA en techo plano y con accesorios en el techo | 67 |
| Figura 31. Protección techo metálico de parqueaderos con instalaciones de suministro eléctrico. | 67 |
| Figura 32. Protección contra rayos de una casa con antena de TV..... | 69 |
| Figura 33. Sistema de bajantes no aislado | 72 |
| Figura 34. Distancia de separación para una estructura con viga voladiza | 75 |
| Figura 35. Cable colgante con sistema de puesta a tierra tipo B..... | 77 |
| Figura 36. Sistema de captación reticulado con puesta a tierra tipo B. | 77 |
| Figura 37. Distancias de separación para un sistema enmallado con puesta a tierra tipo B | 78 |
| Figura 38. Valores de k_c para techos inclinados, con elementos de captación en el lomo y puesta a tierra tipo A..... | 79 |
| Figura 39. Curvatura de conductores..... | 82 |
| Figura 40. Conexión equipotencial en estructura con acero con refuerzo de acero..... | 83 |
| Figura 41. Puntos de conexión al refuerzo en una pared de concreto reforzado...84 | |
| Figura 42. Fachada con cubierta metálica con sistema de bajantes naturales en una estructura de refuerzo de acero en concreto | 86 |
| Figura 43. Conexión de soportes de fachada | 88 |

| | |
|---|-----|
| Figura 44. Conexión de tira continua de ventanas a fachada de cubierta metálica | 89 |
| Figura 45. Potencial en la superficie, tomas de tierra y tensiones cuando están atravesados por la corriente del rayo..... | 92 |
| Figura 46. Elementos del sistema de puesta a tierra | 94 |
| Figura 47. Esquema de un sistema de puesta a tierra..... | 96 |
| Figura 48. Reducción de resistencia por aumento de número de electrodos en paralelo; resistividad aparente $600 \Omega\cdot m$ | 98 |
| Figura 49 .Tierra tipo A vertical y horizontal..... | 100 |
| Figura 50. Longitud mínima de cada electrodo de acuerdo con la clase del NPR | 101 |
| Figura 51. Configuración de puesta a tierra tipo B..... | 102 |
| Figura 52.Tensión de contacto..... | 106 |
| Figura 53. Tensión de paso | 107 |
| Figura 54. Construcción del anillo de puesta a tierra para estructuras de diferente diseño de cimentación | 108 |
| Figura 55. Electrodo de puesta a tierra tipo A con conductor tipo vertical | 110 |
| Figura 56. Electrodo de puesta a tierra tipo A con varilla vertical | 110 |
| Figura 57. Control de potencial..... | 111 |
| Figura 58. Sistema de enmallado de puesta a tierra de una instalación industrial | 113 |
| Figura 59. Fachada Edificio Álvaro Beltrán Pinzón. | 119 |
| Figura 60. Evaluación del numero anual de eventos peligrosos..... | 121 |
| Figura 61. Evaluación de probabilidades de lesiones a seres vivos, daños a sistemas y al edificio por impactos cercanos o directos en la estructura. | 122 |
| Figura 62. Evaluación de probabilidad de daños a sistemas internos por descarga cerca o directa en las acometidas de servicio..... | 123 |
| Figura 63. Evaluación cantidad de pérdidas de vida humana, de servicio público, de valor cultural y económicas | 124 |
| Figura 64. Evaluación componentes de riesgo | 125 |
| Figura 65. Resultado evaluación de riesgo..... | 125 |
| Figura 66. MEG para SIPRA existente edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Fachada principal..... | 127 |



| | |
|---|-----|
| Figura 67. MEG para SIPRA existente edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Fachada principal..... | 127 |
| Figura 68. Medidas de protección a implementar para la reducción de riesgos, edificio Álvaro Beltrán Pinzón | 128 |
| Figura 69. Evaluación del número anual de eventos peligrosos edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 129 |
| Figura 70. Evaluación de probabilidades de lesiones a seres vivos y daños a sistemas, edificio Álvaro Beltrán Pinzón | 130 |
| Figura 71. Evaluación de probabilidad de daños a sistemas internos por descarga cerca o directa en las acometidas de servicio..... | 130 |
| Figura 72. Evaluación cantidad de pérdidas de vida humana, de servicio público, de valor cultural y económicas | 131 |
| Figura 73. Evaluación componentes de riesgo | 131 |
| Figura 74. Resultado evaluación de riesgo | 132 |
| Figura 75. Terraza nivel superior edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 133 |
| Figura 76. Fotografía terraza nivel segundo piso edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 134 |
| Figura 77. Instalación sistema de captación | 137 |
| Figura 78. Fachadas edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 138 |
| Figura 79. Instalación sistema de conductores bajantes | 142 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Categorías del Nivel Cerámico | 38 |
| Tabla 2. Actividad de rayos en la geografía Colombiana entre 1997-2001..... | 39 |
| Tabla 3. Guía de seguridad personal..... | 45 |
| Tabla 4. Valores máximos de parámetros del rayo de acuerdo con el NPR..... | 47 |
| Tabla 5. Características y eficiencia del NPR de acuerdo al tipo de estructura y las pérdidas en un SIPRA | 48 |
| Tabla 6. Dispositivos de captación y normativa | 53 |
| Tabla 7. Valores mínimos de I_{pico} de rayo negativa y valores máximos de radios de la esfera rodante | 56 |
| Tabla 8. Penetración de la esfera rodante para dos puntas captadoras..... | 57 |
| Tabla 9. Centro de aseguramiento sugerido..... | 61 |
| Tabla 10. Mínimo espesor para cobertizos o tuberías metálicas en sistemas de captación | 63 |
| Tabla 11. Dimensiones del enmallado para los diferentes niveles de protección .. | 64 |
| Tabla 12. Distancia de separación promedio para conductores bajantes..... | 73 |
| Tabla 13. Valores coeficiente k_i para aislamiento externo | 74 |
| Tabla 14. Valores coeficiente k_c para aislamiento externo..... | 74 |
| Tabla 15. Valores coeficiente k_m | 74 |
| Tabla 16. Valores del coeficiente k_c | 76 |
| Tabla 17. Resistividad del suelo | 97 |
| Tabla 18. Resistencia de los electrodos de puesta a tierra..... | 97 |
| Tabla 19. Valores convencionales de puesta a tierra Z y Z_1 en función de la resistividad del suelo | 103 |
| Tabla 20. Longitud del cable que debe ser considerada de acuerdo con la disposición de la pantalla..... | 105 |
| Tabla 21. Distancia de los anillos y profundidades de los controles de potencial | 112 |
| Tabla 22. Materiales y condiciones de uso en un SIPRA. | 114 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 23. Materiales, configuraciones y dimensiones mínimas de los electrodos de tierra. | 115 |
| Tabla 24. Acciones mitigantes del efecto corrosivo | 116 |
| Tabla 25. Acciones preventivas ante el fenómeno corrosivo | 117 |
| Tabla 26. Acción y efecto de metales en concreto..... | 118 |
| Tabla 27. Riesgos tolerables en la evaluación de riesgo. | 126 |
| Tabla 28. Riesgos obtenidos en la evaluación de riesgo edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 126 |
| Tabla 29. Cuadro comparativo riesgos tolerables según la NTC 4552-2 y calculados. | 132 |
| Tabla 30. Elementos necesarios para la instalación del sistema de captación.... | 136 |
| Tabla 31. Datos correspondientes al sistema de captación | 137 |
| Tabla 32. Especificaciones diseño sistema de conductores bajantes..... | 139 |
| Tabla 33. Variables presentes en el cálculo del aislamiento eléctrico. | 139 |
| Tabla 34. Cuadro comparativo entre coeficiente k_c y distancias de aislamiento..... | 141 |
| Tabla 35. Elementos necesarios para la instalación del sistema de conductores bajantes..... | 142 |
| Tabla 36. Elevación máxima de la temperatura en grados K, de diferentes materiales conductores..... | 143 |
| Tabla 37. Variables presentes en el cálculo de k_e | 145 |
| Tabla 38. Parámetros de la malla de puesta a tierra. | 146 |
| Tabla 39. Constantes de los materiales | 146 |
| Tabla 40. Cables de cobre desnudo, tipo THW | 147 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| ANEXO 1. Mapa de ISO-Niveles cerámicos para Colombia. | 151 |
| ANEXO 2. Mapa de DDT para Colombia 1999..... | 152 |
| ANEXO 3. Material, configuración y mínima área de la sección transversal para cables o varillas del sistema de captación y los conductores bajantes. | 153 |
| ANEXO 4. Descripción general edificio Álvaro Beltrán Pinzón. | 154 |
| ANEXO 5. Descripción exteriores edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 155 |
| ANEXO 6. Descripción general edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Planta sub-sótano. | 156 |
| ANEXO 7. Descripción general edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Planta primer piso, segundo piso..... | 157 |
| ANEXO 8. Características de las acometidas de servicio edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 158 |
| ANEXO 9. Descripción elementos y equipos eléctricos edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Subestación eléctrica..... | 159 |
| ANEXO 10. Descripción Tableros eléctricos edificio Álvaro Beltrán Pinzón. | 160 |
| ANEXO 11. Componentes de riesgo, pérdidas y daños causados al edificio Álvaro Beltrán Pinzón ante una descarga atmosférica. | 161 |
| ANEXO 12. MEG para nuevo diseño de protección externa contra rayos edificio Álvaro Beltrán Pinzón. | 162 |
| ANEXO 13. Planos diseño de protección externo contra rayos. Edificio Álvaro Beltrán Pinzón..... | 163 |
| ANEXO 14. Guía básica de protección contra rayos. Sistema de protección externo..... | 163 |



RESUMEN

TÍTULO: PROTECCIÓN CONTRA RAYOS. SISTEMAS DE PROTECCIÓN EXTERNA PARA EDIFICACIONES DE USO FINAL*.

AUTORES: MAYORGA GARCÍA Alba Liliana. ROJAS SOLANO Juan Carlos**.

PALABRAS CLAVES: Descargas atmosféricas, Rayos, Sistemas de protección externo, Sistema de captación, Conductores bajantes, Puesta a tierra.

DESCRIPCIÓN

El presente documento muestra de forma general el sistema integral de protección contra rayos SIPRA, más específicamente el sistema de protección externo SPE, basado en la norma técnica Colombiana NTC 4552, 2008.

En su primer capítulo, este trabajo de grado presenta conceptos generales a cerca de los parámetros más relevantes del rayo, un panorama del SIPRA, normativa, y finalmente expone conceptos generales del sistema de protección externo y la forma en cómo este se compone. En su segundo capítulo, se describe el sistema de captación, métodos electrogeométricos y aplicaciones. El tercer capítulo describe el sistema de conductores bajantes, distancias de aislamiento eléctrico, bajantes naturales, sistemas eléctricamente aislados y no aislados. El cuarto capítulo expone conceptos básicos sobre sistemas de puesta a tierra, elementos que lo componen, tipos de configuraciones propuestas por la NTC 4552-3 y equipotencialización.

En el quinto capítulo se realizó el diseño del sistema de protección externa para el edificio Álvaro Beltrán Pinzón ubicado dentro de las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, la metodología implementada consistió en una evaluación del diseño de protección existente y el rediseño del mismo lo que implicó una nueva evaluación de riesgo, diseño de un nuevo sistema de captación, un nuevo sistema de conductores bajantes y un nuevo sistema de puesta a tierra.

Finalmente se desarrolló una guía básica “Protección contra rayos, sistema de protección externa SPE”.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: M.P.E. Julio César Chacón Velasco. Codirector: Dr. Hermann Raúl Vargas.



ABSTRACT

TITLE: LIGHTNING PROTECTION. EXTERNAL LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS FOR END-USE BUILDINGS*.

AUTHORS: MAYORGA GARCÍA Alba Liliana. ROJAS SOLANO Juan Carlos**.

KEYWORDS: atmospheric discharge, lightning, external lightning protection systems, Air terminal system, Dow conductors system, Earthing system, .

DESCRIPTION:

This document presents an overview of the lightning protection system LPS, more specifically the external lightning protection systems ELPS, based on the standard technique Colombian NTC 4552, 2008.

In his first chapter, this thesis presents general concepts about the most relevant parameters of lightning, an overview of ELPS, regulations, and finally presents general concepts of external lightning protection systems and its components. The second chapter describes the Air terminal system, rolling sphere method, protective angle method and mesh method. The third chapter describes the Dow conductors system, electrical isolation distances, dow natural elements, electrically isolated systems and not isolate. The fourth chapter presents basic concepts of earth termination systems, component elements, types of configurations proposed by the NTC 4552-3 and equipotencial bonding.

The fifth chapter present the design of external lightning protection systems for the building Álvaro Beltrán Pinzón located within the facilities of the Industrial University of Santander. The methodologies consisted of an evaluation of existing protection design and redesign it. This meant a new risk assessment, a new design of Air terminal system, a new design of Dow conductors system and a new desing of earth termination systems.

Finally we developed a basic guide: "Lightning Protection, external lightning protection systems ELPS".

* Graduate Thesis Work.

** Physical - Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School. Director: MPE. Julio César Chacón Velasco. Co-director: Dr. Hermann Raúl Vragas.



INTRODUCCIÓN

En muchos lugares del mundo, personas mueren producto de descargas atmosféricas ya sea porque son impactadas directamente o porque a consecuencia del rayo se desencadenan una serie de eventos que conllevan a la fatalidad; de ahí que ante un acto natural e inevitable, se busque la forma de mitigar los daños no solo de pérdida de vida sino también de bienes económicos.

Conscientes de esta realidad, y promovidos por el interés que despierta tal fenómeno, se desarrolló el proyecto sistemas de protección externa, que integra una serie de medidas, estudios y aplicaciones a estructuras reales, fundamentados en la investigación y el análisis de normas, que de la mano con reglamentos técnicos crean una perspectiva de la forma de proceder cuando se desea proteger una estructura.

Una metodología apropiada para la protección contra rayos consiste en hacer una evaluación de riesgo, es decir, ver que tan peligroso puede resultar el lugar donde se encuentre en el momento en que se produzca tal fenómeno y la forma en cómo se debe actuar estando en esa situación, de ahí la importancia de estar bien informados; sujeto a esta evaluación se implementa el sistema de protección externa quien actúa como una gran jaula de Faraday evitando que la energía transmitida por el rayo y los miles de amperios causen algún tipo de daño ya sea a la estructura o a las personas, y finalmente son los sistemas de protección interna quienes complementan este proceso ya que son los encargados de proteger los equipos que allí se encuentran.

La integración de estos sistemas llevan a la implementación de un sistema integral de protección contra rayos quien además de proteger frente a sobretensiones originadas por descargas atmosféricas también protege frente a sobretensiones originadas por conmutaciones de redes de alta tensión, conexión y desconexión de grandes cargas, etc.



1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 HISTORIA DEL RAYO

La descarga atmosférica, más conocida como Rayo, es uno de los fenómenos meteorológicos que desde tiempos remotos ha despertado admiración y temor, y que ha sido interpretado y estudiado por las diferentes culturas a lo largo de la historia.

La interpretación del rayo se remonta a la antigua cultura Acadia (2000 a.C), que representaba el fenómeno mediante una diosa parada sobre los hombros de un guardián alado y tras de ella, sobre un carro de cuatro ruedas, el dios del tiempo lanzando rayos con su látigo [1].

La mitología china representa al rayo con la diosa Tien Mu, rodeada del “ministerio de las tormentas” cuyo jefe es Lei Tsu, dios de los truenos, y su servidor Lei Kung llamado el tamborilero contador de rayos. Los griegos relacionaban el rayo a uno de los atributos propios de Zeus, dios de los fenómenos de la atmósfera, los romanos lo relacionaban con Júpiter, los germanos con Thor y la cultura inca interpretaba dicho fenómeno mediante el dios Ilyapa.

No fue hasta mediados del siglo XVII, en el año 1752, en el que Benjamín Franklin lleva a cabo en Filadelfia su famoso experimento con la cometa¹, demostrando así que las nubes están cargadas de electricidad y los rayos son descargas eléctricas. Gracias a éste experimento creo su más famoso invento, el pararrayos, y concluyó que la parte baja de las nubes de tormenta generalmente estaban cargadas negativamente, pero algunas veces se encontraban en estado positivo [1].

Transcurrieron más de 150 años hasta que en 1920, los investigadores ingleses, Charles Thomson Rees Wilson y George C. Simpson comenzaron a investigar sobre la estructura de la distribución de cargas en una nube de tormenta, siendo C. T. R. Wilson el primero en efectuar mediciones del campo eléctrico y quién después de realizar observaciones de tormentas a cierta distancia, concluyó que la estructura básica de una nube de tormenta era la de un dipolo positivo², luego G. C. Simpson midiendo la carga de la lluvia producida por nubes de tormenta llegó a la conclusión opuesta: La región inferior de una nube de tormenta está cargada positivamente y la superior negativamente formando así un dipolo negativo.

¹ Ató una cometa con esqueleto de metal a un hilo de seda, en cuyo extremo llevaba una llave metálica. Haciéndola volar en un día de tormenta.

² Cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior de la nube.



Finalmente, después de más de cuatro décadas de observación y experimentación, se estableció la estructura de la distribución de cargas básica de las nubes tormenta diciendo que ésta es tripolar³.

1.2 EL FENÓMENO DEL RAYO

La descarga eléctrica atmosférica, más conocida como rayo, es un fenómeno meteorológico que se produce durante una tormenta eléctrica y que puede definirse como la transferencia de carga eléctrica a través de un dieléctrico como es el aire, generando altas corrientes y transformando energía eléctrica en energía lumínica (relámpago), causado por la ionización del aire y energía audible (trueno), producido por la onda de choque al calentarse y expandirse rápidamente el aire.

Según el origen y destino, las descargas atmosféricas o rayos presentan unas características que permiten clasificarlas en tres grupos:

1.2.1 Descargas entre nubes. Indican el paso de electricidad entre la base de la nube con carga negativa y los niveles superiores cargados positivamente. Este tipo de suceso ilumina la nube y se da con una frecuencia aproximada del 50 %.

Cuando estas descargas ocurren entre nubes separadas es llamada descarga inter-nube y cuando ocurre entre zonas de diferente potencial eléctrico dentro de una misma nube se denomina descarga intra-nube.

1.2.2 Descarga entre nube y la ionosfera. Este tipo de descarga es también conocida como espectro y viaja de forma ascendente a la atmósfera alta, este tipo de fenómeno se da con mayor frecuencia en zonas templadas o tropicales.

1.2.3 Descarga entre nube-tierra o tierra-nube. Este tipo de descargas atmosféricas realizan una compensación de carga entre las cargas de las nubes y las cargas electrostáticas en tierra, estos tipos de rayos tienen una clasificación de acuerdo a la polaridad y dirección de la transferencia de carga ya sea ascendente o descendente.

³ Tripolar: Una región negativa N (centro nube), dos regiones positivas P (superior e inferior) de la nube.

1.2.3.1 Descargas de rayo descendentes.

Figura 1. Rayo descendente (rayo nube-tierra)



Fuente: <http://www.tiempo.com/ram/2886/videos-comentados-de-descargas-nube-tierra-los-principios-bsicos-de-los-rayos-en-accin/>

- Descarga nube-tierra negativa (NTN).
- Descarga nube-tierra positiva (NTP).

1.2.3.2 Descargas de rayo ascendentes.

Figura 2. Rayo ascendente (rayo tierra – nube)

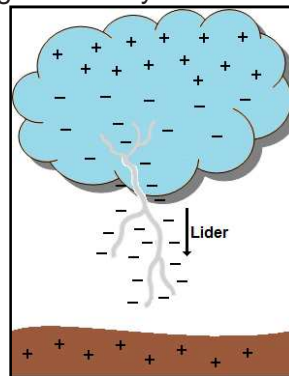


Fuente: <http://malaga-meteo.blogspot.com/2011/03/de-pleno-rayos-impactando-en-la-torre.html>

- Descarga tierra-nube negativa (TNN).
- Descarga tierra-nube positiva (TNP).

Las descargas nube – tierra de polaridad negativa (NTN) se originan cuando las cargas eléctricas se desplazan entre la base de una nube cargada negativamente y el suelo, con carga positiva, por lo que cualquier objeto solido en contacto con él es mejor conductor de electricidad que el aire, por lo general los terrenos planos, árboles y edificios bajos son más propensos a ser alcanzados por este tipo de rayos.

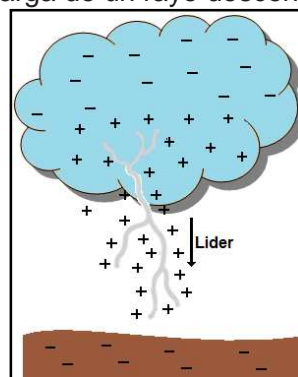
Figura 3. Mecanismo de descarga de un rayo descendente negativo (Rayo nube – tierra)



Fuente: Autores

Las descargas nube-tierra de polaridad positiva (NTP) se dan cuando las cargas positivas de la parte alta de la nube reaccionan con las negativas del suelo y envían un poderoso rayo desde la parte superior de la nube hacia el suelo [2].

Figura 4. Mecanismo de descarga de un rayo descendente positivo (Rayo nube – tierra)



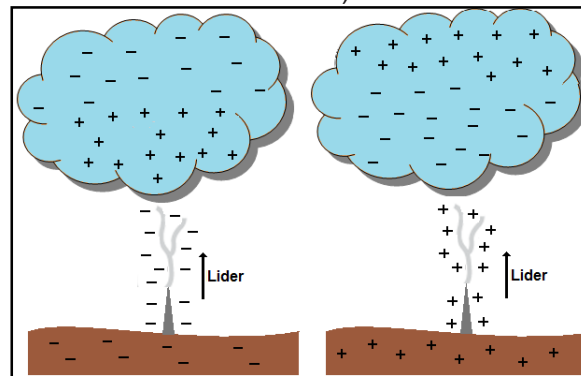
Fuente: Autores

La proporción de la polaridad de los rayos nube-tierra se ha establecido entre el 90% y 95% para polaridad negativa y entre 5% y 10% para positiva, pero estos

porcentajes pueden cambiar dependiendo de la época del año y las zonas climáticas [3].

Las descargas tierra-nube son descargas entre la tierra y una nube cumulonimbos⁴ que son iniciadas por líderes ascendentes, cuya velocidad es similar a la del líder de la descarga descendente, son mucho más raras que las descargas nube-tierra y se originan generalmente en estructuras de gran altura ya sean picos de montañas o edificios.

Figura 5. Mecanismo de descarga de un rayo ascendente Negativo y positivo (Rayo tierra – nube)



Fuente: Autores

Es importante destacar que debido a la frecuencia con que se dan las descargas descendentes nube-tierra de polaridad negativa, éstas suelen causar daños o pérdidas más frecuente en sistemas e instalaciones eléctricas y lesiones a seres vivos. Por lo tanto se posee una mayor cantidad de registros y medidas de estas descargas en el mundo al ser ampliamente estudiadas.

1.3 PARÁMETROS DEL RAYO

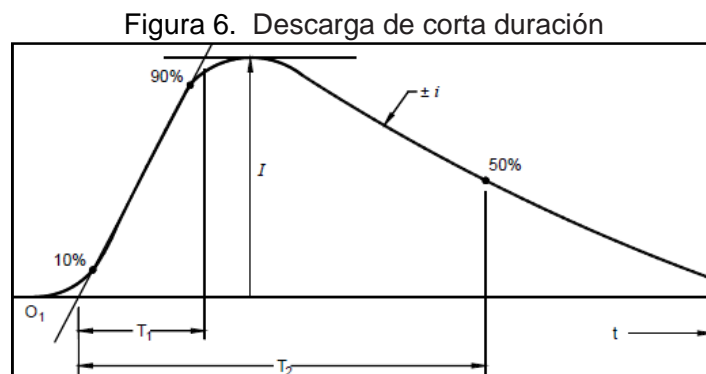
Un rayo puede considerarse como una fuente de corriente capaz de fluir a través de una impedancia, es por ello que se hace necesario conocer acerca de sus parámetros y formas de ondas normalizadas que se utilizan para simular los efectos del rayo sobre los elementos de protección contra rayos en forma individual, y así llegar finalmente a realizar un análisis del comportamiento del sistema integral de protección contra rayos SIPRA.

⁴ Nube cumulonimbos: nubes de gran desarrollo vertical, que están formadas por una columna de aire cálido y húmedo, que se eleva en forma de espiral rotatoria. Suelen producir lluvias intensas y tormentas eléctricas.

Dependiendo del tipo de rayo, cada uno de estos se compone de una o varias descargas parciales:

- Descargas de corta duración.

Descargas con un tiempo de duración menor a 2 ms.



Fuente: NTC 4552-1, 2008

Dónde: O_1 = origen virtual.
 I = Corriente pico.
 T_1 = Tiempo de frente.
 T_2 = Tiempo al valor medio.

- Descargas de larga duración.

Descarga con un tiempo de duración mayor a 2 ms.

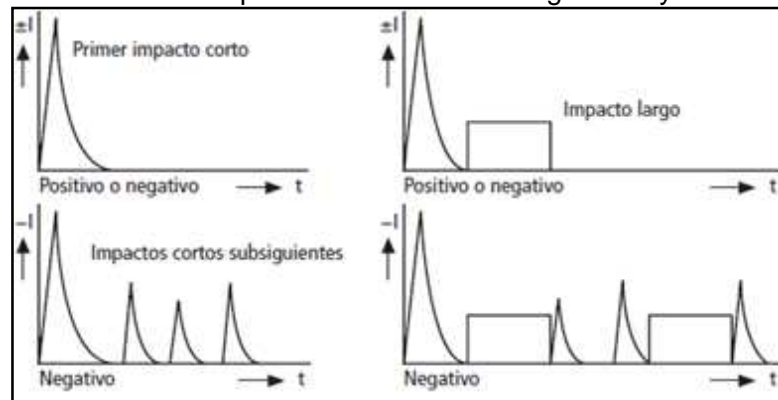


Fuente: NTC 4552-1, 2008

Dónde: T_{largo} = Tiempo de duración.
 Q_{Largo} = Carga de impacto largo

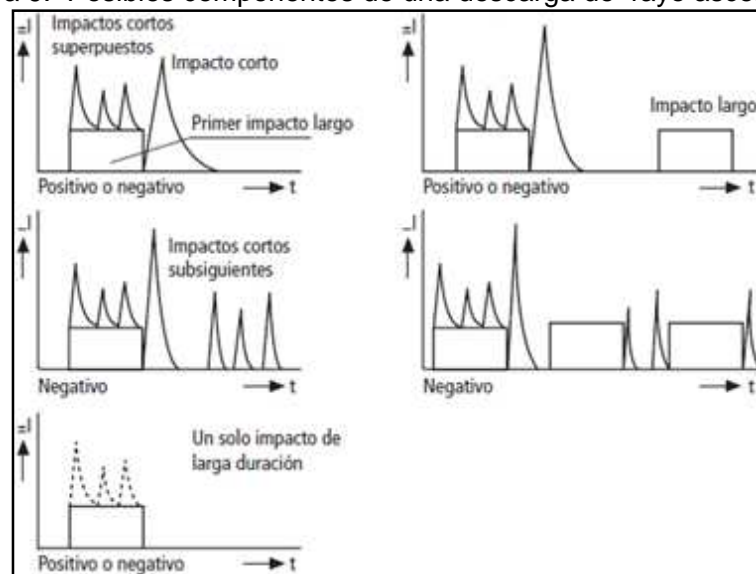
Otras características que diferencian estas descargas parciales son su polaridad (positiva o negativa) y su posición temporal en la descarga de rayo (primer rayo parcial, rayo parcial subsiguiente o rayo parcial superpuesto) generándose así unas posibles combinaciones de estas descargas parciales ya sea en un rayo descendente o en un rayo ascendente.

Figura 8. Posibles componentes de una descarga de rayo descendente



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

Figura 9. Posibles componentes de una descarga de rayo ascendente



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN



De las figuras 8 y 9, en las que se muestra el desarrollo de la corriente de rayo, se pueden deducir cuatro parámetros relevantes para el desarrollo de elementos de protección contra rayos:

1.3.1 Amplitud de la corriente de retorno de rayo (I). Es la corriente pico entre el centro de carga de la nube y tierra, producida por la primera descarga de retorno, que a su vez se da cuando una de las descargas ascendentes de la tierra, en el proceso de formación del rayo, hace contacto con el líder escalonado que desciende, ionizando totalmente el camino nube – tierra y poniendo al líder al potencial de tierra.

La amplitud de corriente de retorno de rayo tiene un valor típico promedio de más de 30 kA en latitudes templadas y de 43,5 kA en latitudes tropicales con un tiempo de cero a pico de unos pocos microsegundos [3].

Estas corrientes a tierra caen a la mitad del valor pico en cerca de 50 μs y corrientes del orden de cientos de amperios pueden fluir por tiempos de unos cuantos hasta varios cientos de milisegundos. Después de que la corriente de retorno ha dejado de fluir, el rayo, incluido el movimiento de carga de la nube, finaliza [3].

Esta amplitud de la corriente de retorno del rayo puede ser estimada mediante mediciones directas, o mediante modelos matemáticos en función del campo eléctrico o magnético medido y la distancia. El modelo matemático más aceptado por la comunidad internacional es el modelo modificado de la línea de transmisión [3]:

$$I(t) = \frac{2\pi cr}{\mu_0 v} B_\phi \left(\tau + \frac{r}{c} \right) t < t_0 \quad (1.1)$$

Esta ecuación puede emplearse para calcular la corriente a partir de mediciones remotas de campo magnético radiado (B_ϕ) o a partir de campo eléctrico (E_z) a partir de la relación:

$$\frac{E_z}{B_\phi} = c \quad (1.2)$$

Dónde: μ_0 = Permeabilidad magnetica del espacio libre [H/m]
 v = Velocidad efectiva de la descarga de retorno [m/s]
 c = Velocidad de la luz [m/s]
 r = radio de impacto de la descarga [m]
 t, τ = Tiempo [s]

Para Colombia se tiene una mediana⁵ del valor pico de la corriente de retorno del rayo de 43 kA, basándose en mediciones de campo eléctrico vertical llevadas a cabo en 1995, las cuales fueron comparadas con los registrados por el sensor de tormentas TSS-420 en operación en la Universidad Nacional en Bogotá y la distancia de impacto se calculó utilizando la información suministrada por la red colombiana de localización de rayos RECMA [4].

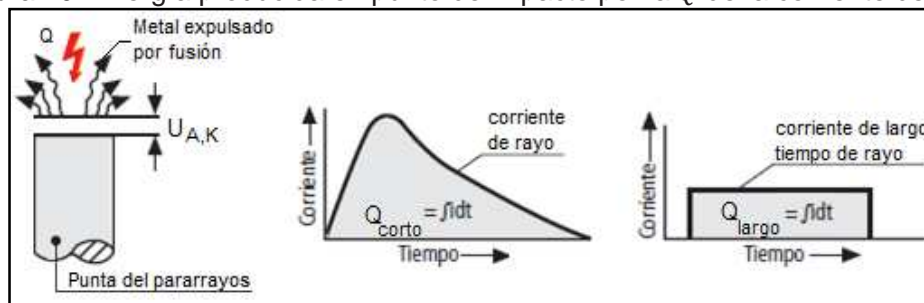
1.3.2 La carga de la corriente de rayo (Q). La carga de la corriente de rayo se compone de la Q_{corta} o carga del impacto corto y de la Q_{larga} o carga del impacto largo. Se puede expresar como:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad \rightarrow \quad Q = \int i dt \quad (1.3)$$

La carga de la corriente de rayo determina la energía producida directamente en el punto de impacto del rayo y en todos aquellos puntos en los que la corriente de rayo se propaga en forma de un arco eléctrico por encima de una zona de aislamiento.

La energía producida " W " en el punto donde se genera el arco eléctrico se origina como producto de la carga Q y de la caída de tensión ánodo/cátodo $U_{A,K}$ con valores en el rango micrométrico $U_{A,K}$.

Figura 10. Energía producida en punto de impacto por la Q de la corriente de rayo



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

El valor medio de $U_{A,K}$ es de unos 10 V y depende de la amplitud y la forma de onda de la corriente:

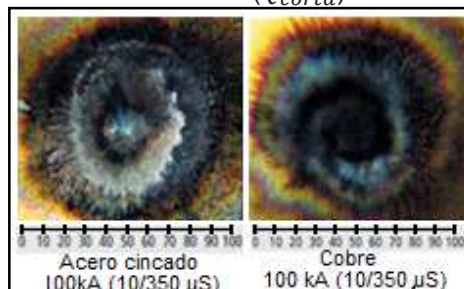
$$W = Q \cdot U_{A,K} \quad (1.4)$$

⁵ Representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenado.

De este modo, la carga de la corriente de rayo puede volatilizar o fundir los componentes del sistema de protección externa sobre los que el rayo descarga directamente [2]. Pero además, la carga es determinante para los esfuerzos a que se ven sometidas las vías de chispas de protección, separación y los descargadores de sobretensiones basados en esta tecnología.

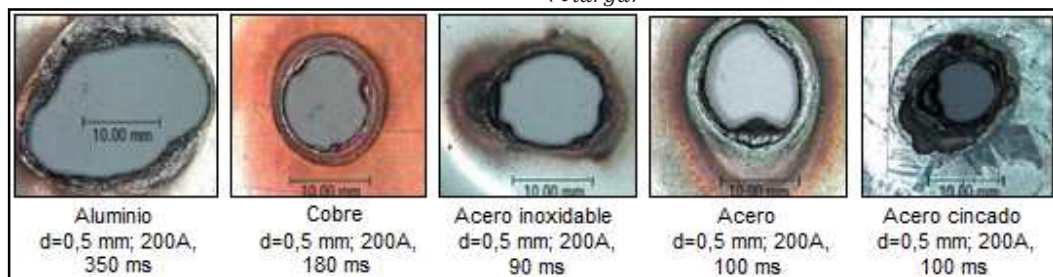
Investigaciones recientes han mostrado que, sobre todo, la carga de larga duración Q_{larga} de la corriente continua del rayo, como consecuencia de la duración más larga del efecto del arco eléctrico, es capaz de fundir e incluso de evaporar grandes volúmenes de material como se puede observar en las figuras 11 y 12 [2].

Figura 11. Efectos de un arco voltaico de corriente de impulso sobre una superficie metálica (Q_{corta})



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

Figura 12. Perforación de chapas metálicas por la acción de arcos voltaicos de larga duración (Q_{larga})



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

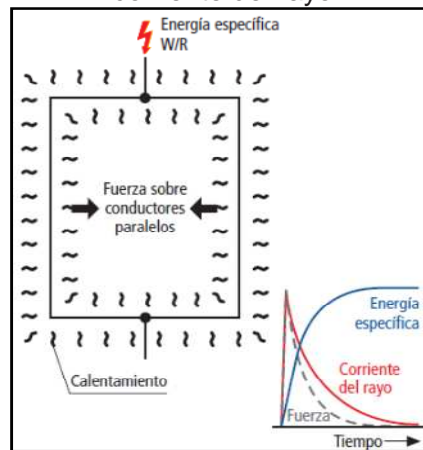
1.3.3 La energía específica de la corriente de rayo (W/R). La energía específica W/R de una corriente de impulso es la energía generada por la corriente de impulso en una resistencia de 1Ω .

$$W/R = \int i^2 dt \quad (1.5)$$

Esta energía es la integral del cuadrado de la corriente de impulso por el tiempo de duración de la misma. Por esto, la energía específica es denominada, con frecuencia, como impulso del cuadrado de la corriente [2].

Esta energía específica es determinante para el calentamiento de conductores por los que fluye la corriente de impulso de rayo, así como para efectos mecánicos de las fuerzas magnéticas entre conductores recorridos por corrientes de impulso de rayo.

Figura 13. Calentamiento y efectos magnéticos producidos por la energía específica de la corriente del rayo



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

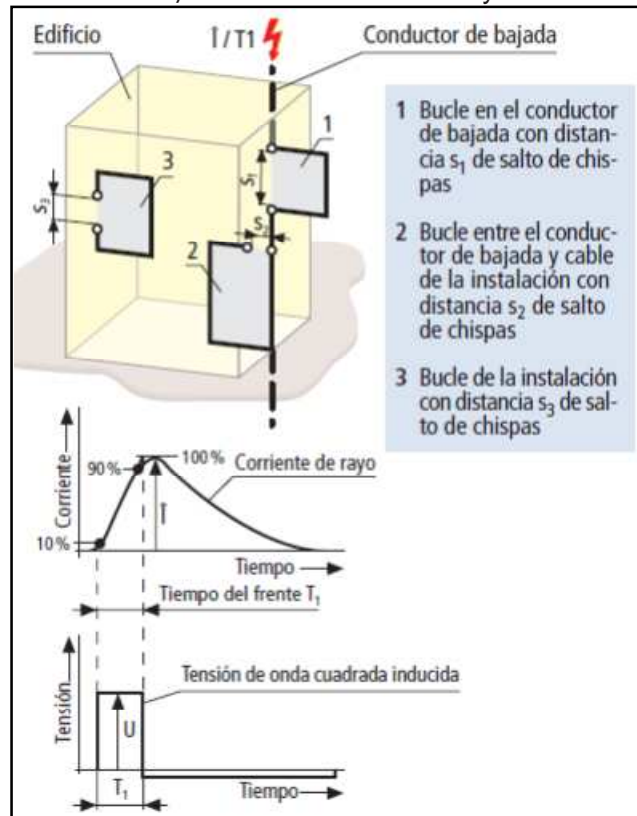
Para la energía W generada en un conductor con resistencia R se tiene:

$$W = R \cdot \int i^2 dt \quad (1.6)$$

1.3.4 La pendiente media de la corriente del rayo ($\Delta i / \Delta t$). Es la variación de la corriente de rayo en un intervalo de tiempo y determina el nivel de las tensiones electromagnéticas inducidas en todos los bucles de conductores abiertos cerrados, que están ubicados en el entorno de los conductores recorridos por corrientes de rayo [2].

En la figura 14 se observan algunas posibles configuraciones de bucles de conductores en los que se pueden inducir tensiones a causa de corrientes de rayo.

Figura 14. Tensión de onda cuadrada inducida en bucles por la pendiente de la corriente $\Delta i/\Delta t$ de la corriente de rayo



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

La tensión U inducida durante el intervalo Δt en un bucle de conductor es:

$$U = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1.7)$$

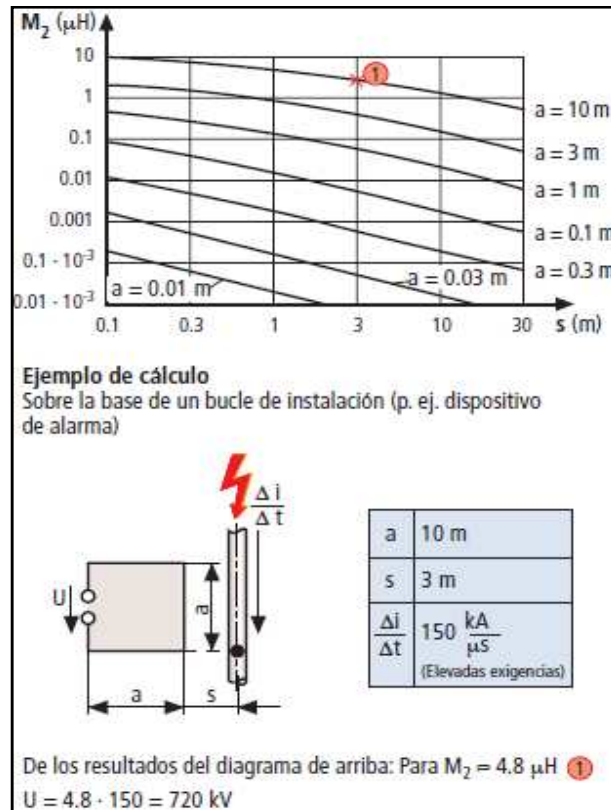
Dónde: $M =$ Inductancia mutua del bucle.

$\frac{\Delta i}{\Delta t} =$ Pendiente de la corriente de rayo.

Para calcular la máxima tensión inducida en bucles de conductores se utiliza el valor de la pendiente de la corriente de rayo de los impactos de rayo subsiguientes [2].

La figura 15 muestra un ejemplo del cálculo de la tensión inducida en un bucle de conductor.

Figura 15. Ejemplo de cálculo de tensión inducida en onda cuadrada en bucles cuadrados



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

Otros parámetros del rayo que se tienen en cuenta para aplicaciones en la protección contra rayos, son los parámetros de incidencia.

➤ Nivel cerámico (NC).

Definido como el número de días de tormenta al año en una región [3], siendo un día de tormenta un día en el cual por lo menos se escucha un trueno y se observa un relámpago, para obtener resultados que permitan comparación. De acuerdo a esta definición el nivel cerámico se determina en las estaciones meteorológicas por medio de observaciones directas, permitiendo las primeras comparaciones cuantitativas de ocurrencia de tormentas en regiones de un país en diferentes épocas del año.

El nivel cerámico puede ser usado como parámetro cuando no hay disponibilidad de mediciones directas de densidad de descargas directas a tierra.

Los rangos de los niveles cerámicos se pueden clasificar como:



Tabla 1. Categorías del Nivel Cerámico

| NIVEL CERÁUNICO | CATEGORÍA |
|-----------------|-----------|
| 30 a 50 | Bajo |
| 50 a 70 | Medio |
| 70 a 100 | Alto |
| Mayor que 100 | Muy alto |

Fuente: NTC 4552-3, 2008

De acuerdo a estudios locales realizados en diferentes países alrededor del mundo sobre descargas atmosféricas, se puede decir que el nivel cerámico es mayor en latitudes tropicales que en latitudes templadas, apreciando grandes variaciones de la actividad eléctrica atmosférica con valores promedios de niveles cerámicos multianuales de 10 hasta más de 160 días tormentosos/año [3].

Observando el mapa de niveles cerámicos de Colombia (Anexo 1.) se puede reconocer la definición del mayor o menor nivel cerámico y por tanto de la mayor actividad eléctrica atmosférica, apreciando los más altos niveles cerámicos en los pie de monte de las cordilleras.

Desde una perspectiva espacial – local existen áreas en países tropicales donde la actividad eléctrica atmosférica es muy baja, por lo tanto, si el objetivo es diseñar un sistema de protección contra rayos en un sitio especificado, se requiere estimar el valor del nivel cerámico para el sitio en cuestión.

➤ Densidad de descargas a tierra (DDT).

Definida como el número de descargas eléctricas a tierra por kilómetro cuadrado – año [3], la cual es determinada tradicionalmente por mediciones directas con equipos contadores de rayos, sistemas localizadores o, más recientemente, mediante sistemas satelitales [3] y otras veces por ecuaciones empíricas que relacionan la densidad de descargas a tierra con el nivel cerámico.

La medición de DDT para la geografía colombiana entre 1997 y 2001 se realizó para áreas de $300 \times 300 \text{ km}^2$, para un total de $1393 \times 900 \text{ km}^2$ cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

Presentando variaciones en valores desde 0,0012 hasta 11,4 con un valor de media aritmética de 3 (*Descargas/km² – año*) [4].

Tabla 2. Actividad de rayos en la geografía Colombiana entre 1997-2001.

| Año | Total descargas | DDT_{mediq} (Descargas/ km^2 – año) |
|------|-----------------|--|
| 1997 | 2 875 660 | 2,29 |
| 1998 | 2 828 774 | 2,25 |
| 1999 | 1 987 061 | 1,58 |
| 2000 | 1 147 459 | 0,91 |
| 2001 | 1 888 503 | 1,5 |

Fuente: NTC 4552-1, 2008

Cuando la DDT es evaluada en la geografía colombiana a nivel regional (Anexo 2) en áreas de $30 \times 30 \text{ km}^2$ se pueden encontrar en la zona tropical valores de DDT de 35 (Descargas/ km^2 – año), pero para propósitos de diseño de sistemas de protección contra rayos es ideal realizar una evaluación local de DDT en áreas menores, de $3 \times 3 \text{ km}^2$ siendo esta evaluación solo obtenible a través de los datos de un sistema de localización de rayos [4].

Debido a que el concepto de nivel cerámico es muy básico y débil para dar una medida utilizable de la intensidad de las tormentas y para dar información sobre la existencia de áreas locales propensas a descargas atmosféricas, se relaciona la DDT con el nivel cerámico por medio de la siguiente ecuación:

$$DDT = 0,0017 \cdot NC^{1,56} \quad (1.8)$$

La cual provee un concepto más riguroso de la actividad eléctrica atmosférica para Colombia y que fue desarrollada por el programa PAAS⁶ de la Universidad nacional de Colombia, dando buenas aproximaciones con errores relativamente despreciables con respecto a las mediciones hechas con el contador de rayos RSA10 en la ciudad de Bogotá [3].

Esta ecuación se obtuvo para áreas de $30 \times 30 \text{ km}^2$, un área de gran tamaño teniendo en cuenta que generalmente se diseñan sistemas de protección contra rayos para áreas de unos pocos metros cuadrados, pero representa una buena aproximación si no se tiene ningún dato de la zona a proteger.

⁶ Programa de investigación sobre adquisición y análisis de señales.



1.4 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4552

En algunas regiones de Colombia se registran unas de las más altas densidades de rayos del planeta, produciendo esto una gran riqueza para nuestro país debido a que los rayos fertilizan el suelo cuando activan el ciclo del nitrógeno, no obstante, al observar un aumento en el fenómeno rayo debido al cambio climático y a que Colombia es un país que posee dos océanos, tres grandes cordilleras, una gran riqueza hídrica y una ubicación geoestratégica privilegiada que concentra gran actividad atmosférica, se puede decir que los rayos producen daños significativos a equipos electrónicos, animales, personas y estructuras pudiendo llegar a afectar la economía del país.

Consciente de los beneficios de la protección contra rayos, Colombia como país en vía de desarrollo a través del Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), publica la Norma Técnica Colombiana de protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos) NTC 4552-1-2-3, siendo fortalecida en su aplicación por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) en el artículo 18, que estableció requisitos de protección contra rayos y en el numeral 18.1 definió que las instalaciones eléctricas debían contar con una evaluación del nivel de riesgos por exposición al rayo.

La Norma Técnica Colombiana NTC 4552-1-2-3 en armonía con normas internacionales como la IEC 62305-1-2-3 proporciona herramientas que permiten al ingeniero hacer un buen diseño de protección contra rayos apuntando hacia los efectos y consecuencias de la descarga, ya que dichas perturbaciones son inevitables y es imposible implementar una protección que garantice un 100% de efectividad.

En cada una de sus versiones la Norma NTC 4552, desde 1999, 2004 y finalmente su última actualización en el 2008, se refiere a un sistema integral de protección contra rayos exponiendo siempre un mismo objetivo, establecer la medidas necesarias para una protección eficaz contra riesgos asociados a la exposición directa e indirecta de personas, animales, equipos, instalaciones y medio ambiente excluyendo los sistemas de transmisión y distribución de energía para los cuales existen sus propias normas.

En su primera parte, la Norma NTC 4552-1 (Principios generales), hace una presentación de las características y parámetros para llevar a cabo la simulación de los efectos del rayo, los riesgos y daños que estos generan a estructuras, acometidas, y seres vivos, las conveniencias económicas de una protección efectiva contra rayos y finalmente se exponen los procedimientos, medidas y principios de protección a seguir para reducir lesiones en seres vivos, daños físicos a estructuras y fallas en sistemas eléctricos y electrónicos.



En su segunda parte, la Norma NTC 4552-2 (Manejo del riesgo), establece un procedimiento para la evaluación del nivel de riesgo en una estructura o en sus acometidas de servicio debido a descargas atmosféricas, partiendo de una situación en la que la estructura no está protegida, para determinar en primer lugar, la necesidad de implementar un sistema de protección contra rayos óptimo, tanto desde el aspecto técnico como desde el económico, que lleven a reducir el nivel de riesgo a un límite tolerable o por debajo de él.

En su tercera parte, la Norma NTC 4552-3 (Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida), presenta los requisitos necesarios para la protección de estructuras contra daños materiales y daños a seres vivos como consecuencia de la acción de la corriente de rayo o por la formación de ondas peligrosas, especialmente en el caso de descargas directas del mismo, por medio de un sistema de protección contra rayos (SIPRA), que incluye un sistema de protección externa y un sistema de protección interna, según sea el nivel de riesgo.

Este compendio presenta a su vez las medidas de protección contra lesiones a seres vivos debido a tensiones de contacto y de paso, y presenta los objetivos del mantenimiento e inspección de un sistema de protección contra rayos.

1.5 SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA)

La seguridad de los seres vivos, el adecuado funcionamiento de los dispositivos, equipos eléctricos y electrónicos y la estabilidad física de las estructuras son de gran importancia a la hora de hablar de sistemas de protección contra rayos. Estos sistemas deben proteger físicamente a las personas, reducir el riesgo de fuego, evitar el deterioro de los equipos y minimizar las interrupciones en una producción a un nivel tolerable.

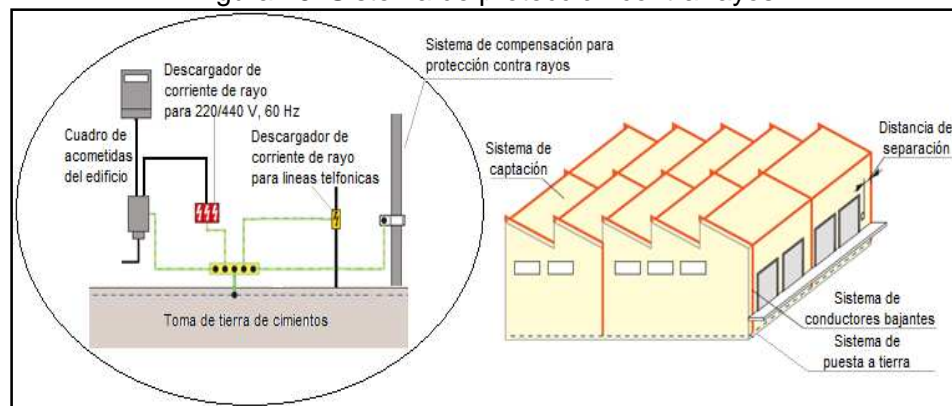
En Colombia se desarrolla la Norma NTC 4552 la cual establece el desarrollo de un SIPRA, para garantizar una protección eficaz contra los riesgos asociados a la exposición directa o indirecta de personas, animales, equipos y el entorno a las descargas eléctricas atmosféricas.

En su definición un SIPRA es un conjunto de dispositivos o partes que entran en la composición de un todo, sin la que no puede subsistir una cosa., es decir, que no falta ninguna de sus partes [3] y que se integran para brindar un nivel de protección contra rayos adecuado.

El sistema integral de protección contra rayos es usado para minimizar los efectos directos o indirectos causados a una estructura o conjunto de estructuras y seres vivos por impactos cercanos de rayos, refiriéndose a efectos directos como los causados por el impacto de la corriente de rayo en el sistema de captación y a

efecto indirecto como las tensiones inducidas dentro de las instalaciones debidas a la variación de corriente de rayo (di/dt).

Figura 16. Sistema de protección contra rayos

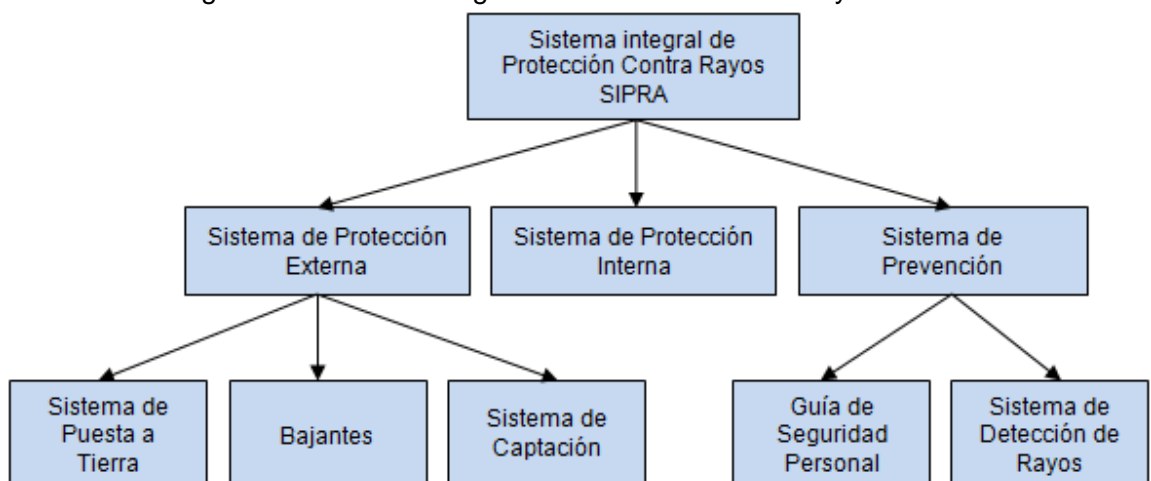


Fuente: de protección contra rayos, DEHN

Aunque ninguna protección contra rayos es ciento por ciento confiable, puede lograrse un alto nivel de seguridad si se diseña y construye el sistema de protección contra rayos utilizando la combinación de varios elementos como son:

- Sistema de protección externa (SPE).
- Sistema de protección interno (SPI).
- Sistema de prevención.

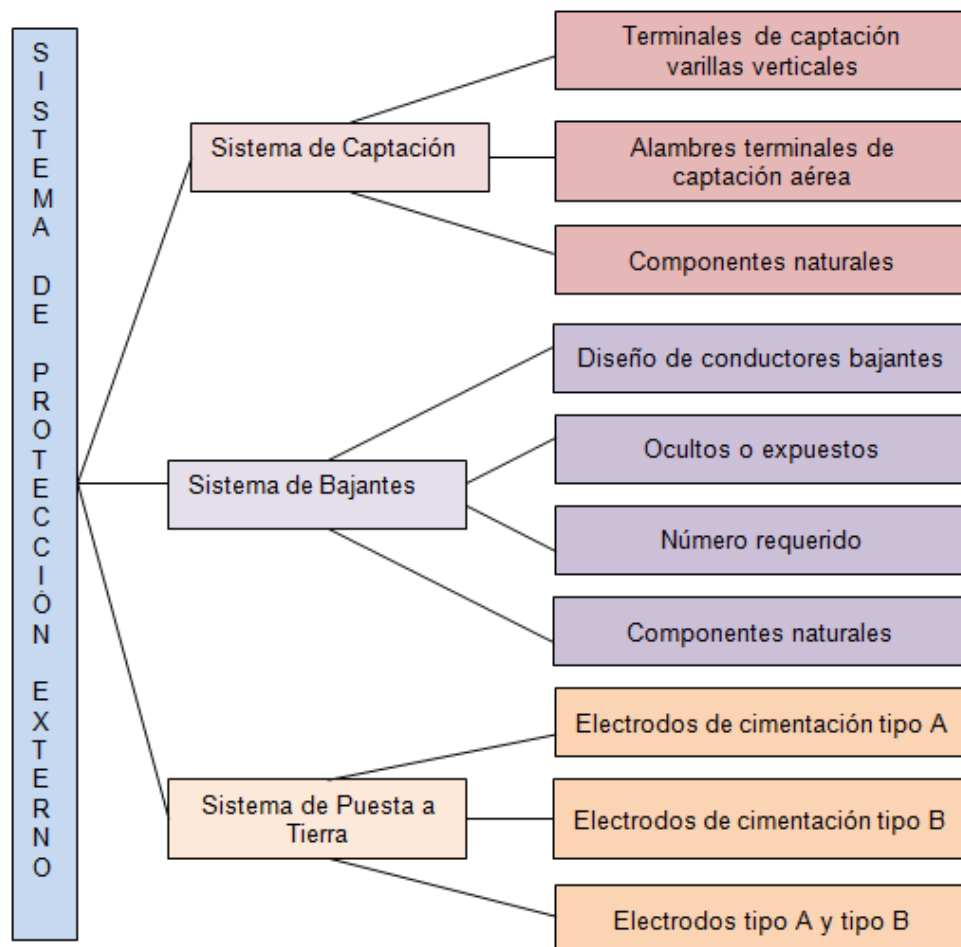
Figura 17. Sistema Integral de Protección contra Rayos SIPRA



Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

1.5.1 Sistema de protección externo (SPE). Es el conjunto de dispositivos situados en o sobre el objeto a proteger que tienen como objetivo interceptar los impactos directos de rayo que se dirijan a una estructura, incluyendo aquellos que impacten al costado de esta, conduciendo y dispersando de manera segura la corriente de rayo desde el punto de impacto a tierra sin causar daños térmicos o mecánicos ni producir chispas peligrosas que puedan dar inicio a incendios o explosiones [6]. Dicha protección consta principalmente de un sistema de captación, un sistema de conductores bajantes y un sistema de puesta a tierra.

Figura 18. Sistema de Protección Externo

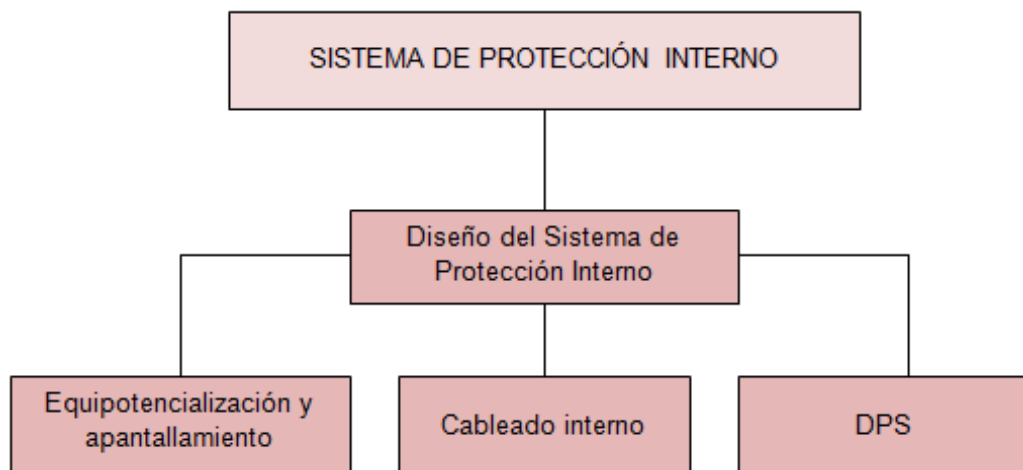


Fuente. Autores

1.5.2 Sistema de protección interna (SPI). Se conoce como SPI al conjunto de elementos y medidas, como la equipotencialización y distancias de separación entre los componentes del SIPRA, orientadas a reducir y evitar la ocurrencia de

chispas (descargas eléctricas) peligrosas que podrían presentarse en el interior de la estructura afectando tanto a seres vivos como a equipos, también para reducir los efectos que producen las sobretensiones originadas por la descarga del rayo y los campos electromagnéticos asociados, las sobretensiones transmitidas por los sistemas eléctricos y electrónicos que ingresan a la estructura, ocasionadas por descargas atmosféricas en dichos sistemas, procesos de conmutación en la red de alta tensión, arranque de motores, asociación de condensadores para la regulación del factor de potencia y elevación del potencial del sistema de puesta a tierra debido a descargas en las proximidades de la instalación [7].

Figura 19. Sistema de Protección Interno



Fuente. Autores

1.5.3 Sistema de prevención. 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 el caso de Colombia, en la zona central⁷ colombiana la actividad de rayos es más intensa durante los meses de abril, mayo, octubre y noviembre. En la zona del Caribe colombiana durante los meses de julio-agosto y en la zona sur⁸ durante los meses de diciembre-enero [3].

Por estos motivos se dan las siguientes recomendaciones generales para minimizar las probabilidades de riesgo de impacto de rayo a personas que trabajen o tengan actividades al aire libre, en caso de aproximarse una tormenta eléctrica.

⁷ Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Caldas, Quindío, Risaralda, Valle y los Llanos.

⁸ Amazonas, Cauca y Putumayo.

1.5.3.1 Guía de seguridad personal. Se puede creer que la seguridad es la ausencia de peligro, pero en realidad seguridad es un conjunto de reglas y hábitos que se adquieren mediante la capacitación en materia de prevención, que nos permita actuar en cualquier situación de riesgo que se presente.

Tabla 3. Guía de seguridad personal

| | |
|--|--|
| <p>A menos que sea absolutamente necesario no salga al exterior ni permanezca a la intemperie durante una tormenta o en lugares donde se pronostica alta actividad de rayos.</p> |  |
| <p>Busque refugio en el interior de edificaciones, vehículos u otras estructuras que ofrezcan protección contra el rayo.</p> |  |
| <p>Si está en una instalación recreativa, siga las órdenes de los brigadistas de emergencia.</p> |  |
| <p>En caso que una persona sea impactada por un rayo, aplique los primeros auxilios y solicite ayuda a personal especializado.</p> |  |

Fuente. Autores



1.5.3.2 Sistema de alarma y detección de rayos. El sistema de alarma es un elemento de seguridad pasiva, lo que significa que no evita una situación donde se presenten descargas atmosféricas, pero si proporciona la posibilidad de advertir la inminente ocurrencia de rayos, salvando vidas y evitando la posible falla de equipos, procesos y sistemas.

El funcionamiento de un sistema de alarma dentro de un SIPRA, puede basarse en la detección de los campos eléctricos producidos por las nubes de tormenta durante su proceso de electrificación o mediante la detección de los campos magnéticos producidos por la ocurrencia de rayos.

Características principales que debe tener un sistema de alarma [3]:

- Resolución omnidireccional, es decir, que cubra 360°.
- La eficiencia en la detección de rayos debe ser de 100% en un radio de 20 *km*.
- Debe activarse únicamente por detección de rayos y no por falsas señales de otro origen.
- Debe predecir si existe una alta probabilidad de ocurrencia de rayos dentro de un radio de 15 *km*, para un intervalo de tiempo de 15 minutos⁹.
- Debe ser audible en un radio mínimo de 200 *m*.

1.6 NIVELES DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (NPR)

Colombia se encuentra ubicada en la zona de mayor actividad eléctrica atmosférica del planeta, el trópico. Estudios realizados por el grupo PAAS de la Universidad Nacional en Bogotá, comprueban experimentalmente que el nivel cerámico, la densidad de descargas a tierra y la corriente pico medidas en Colombia, son en general mayores a las detectadas en otros lugares del mundo.

A pesar de la falta de información registrada en Colombia, se estima que aproximadamente 100 personas mueren cada año [3], sin contar con las personas que sufren algún tipo de lesión y los daños materiales causados por los efectos de una descarga atmosférica o rayo.

Por lo expuesto anteriormente se hace necesario la instalación de un sistema de protección contra rayos que cumpla con la normatividad existente (NTC 4552, 2008) la cual establece como primer paso para realizar un análisis de riesgo definir un NPR siendo este un número (Nivel I, II, III y IV) que además de relacionarse con un conjunto de valores de parámetros del rayo, se relaciona con la geometría de la estructura, el uso final de la misma, el número de personas que transitan en ella y los diferentes tipos de pérdidas que se puedan presentar como, pérdida de

⁹ Tiempo que se considera prudente para que las personas puedan poner en práctica las instrucciones generales dadas en la guía de seguridad personal.

vidas humanas, pérdida de servicios esenciales, pérdidas económicas y pérdidas culturales llevando a la instalación de un SIPRA.

En la tabla 4 se muestran los valores máximos de los parámetros de rayo de acuerdo con los NPR.

Tabla 4. Valores máximos de parámetros del rayo de acuerdo con el NPR

| Primera descarga corta | | | NPR | | | |
|----------------------------|-------------|---------------|--------|-------|-------|----|
| Parámetro | Símbolo | Unidad | I | II | III | IV |
| Corriente pico | I | kA | 200 | 150 | 100 | |
| Carga corta | Q_{corta} | C | 100 | 75 | 50 | |
| Energía específica | W/R | kJ/O | 10 000 | 5 625 | 2 500 | |
| Descarga corta subsecuente | | | NPR | | | |
| Parámetro | Símbolo | Unidad | I | II | III | IV |
| Corriente pico | I | kA | 54 | 40,5 | 27 | |
| Carga corta | di/dt | $kA/\mu s$ | 120 | 90 | 60 | |
| Energía específica | T_1/T_2 | $\mu s/\mu s$ | 0,4/50 | | | |
| Descarga larga | | | NPR | | | |
| Parámetro | Símbolo | Unidad | I | II | III | IV |
| Carga larga | Q_{larga} | C | 100 | 75 | 50 | |
| Parámetro de tiempo | T_{largo} | S | 0,5 | | | |
| Rayo | | | NPR | | | |
| Parámetro | Símbolo | Unidad | I | II | III | IV |
| Carga | Q_{rayo} | C | 300 | 225 | 150 | |

Fuente: NTC-4552, 2008

➤ Pérdida de vidas humanas.

Estas pérdidas son medidas de acuerdo a la concentración de personas dentro de la estructura a proteger, dando prioridad a grandes concentraciones de niños o personas con algún tipo de discapacidad, por tal motivo este tipo de pérdidas es de vital importancia al momento de seleccionar el nivel de protección para la estructura.

➤ Pérdidas económicas.

Este tipo de pérdidas siempre estarán presentes en cada estructura a proteger, pero de acuerdo al tipo de estructura, su uso y los elementos que resguarda se puede decidir si la pérdida es aceptable o no, dando otro factor en la selección del nivel de protección contra rayo.

➤ Pérdida de servicios públicos o esenciales.

Estas pérdidas se refieren a aquellas que puedan hacer que la estructura a proteger deje de proveer servicios básicos a sus usuarios causando emergencias mayores o la pérdida de vidas humanas. Este tipo de pérdida tiene una alta influencia al momento de seleccionar un NPR.

➤ Pérdidas de bienes culturales.

Pérdidas asociadas a la estructura misma o a elementos que se resguarden en ella, de valor cultural y gran importancia para la sociedad.

Tabla 5. Características y eficiencia del NPR de acuerdo al tipo de estructura y las pérdidas en un SIPRA

| NPR | ESTRUCTURAS | TIPO DE PÉRDIDAS | PRIORIDAD | CARACTERÍSTICAS | (E) ¹⁰ EN UN SIPRA |
|-----|---|----------------------|-----------|--|-------------------------------|
| I | Hospitales, clínicas de reposo, escuelas. | Humanas | Alto | <ul style="list-style-type: none"> Nivel cerámico elevado. Gran concentración de personas. Riesgo elevado de pérdidas humanas. No admite fallas en los servicios esenciales. | 0,95<E>0,98 |
| | | Servicios esenciales | Alto | | |
| | | Culturales | Bajo | | |
| | | Económicas | Alto | | |
| | Plantas de servicios públicos. | Humanas | Bajo | | |
| | | Servicios esenciales | Alto | | |
| | | Culturales | Bajo | | |
| | | Económicas | Alto | | |

¹⁰ Eficiencia.

| | | | | | |
|-----|---|----------------------|-------|--|-------------|
| II | Hogares. | Humanas | Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Nivel cerámico medio. • Riesgo elevado de pérdidas humanas. • Admite fallas en los servicios esenciales. | 0,90<E>0,95 |
| | | Servicios esenciales | Medio | | |
| | | Culturales | Bajo | | |
| | | Económicas | Medio | | |
| | Teatros, hoteles, almacenes grandes, áreas deportivas, prisiones. | Humanas | Alto | | |
| | | Servicios esenciales | Medio | | |
| | | Culturales | Bajo | | |
| | | Económicas | Medio | | |
| III | Bancos, compañías de seguros, centros comerciales. | Humanas | Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Nivel cerámico bajo o tolerable. • Riesgo medio o bajo de pérdidas humanas. • Admite fallas en los servicios esenciales. | 0,80<E>0,90 |
| | | Servicios esenciales | Medio | | |
| | | Culturales | Bajo | | |
| | | Económicas | Medio | | |
| IV | Museos y sitios arqueológicos, patrimonios históricos, iglesias. | Humanas | Alto | | 0<E>0,80 |
| | | Servicios esenciales | Bajo | | |
| | | Culturales | Alto | | |
| | | Económicas | Alto | | |

Fuente: Proyecto de grado protección contra rayos. Sistemas de protección interna para edificaciones de uso final, Sandra Pulido, Juan Fernando Martínez, 2011

1.7 ZONAS DE PROTECCIÓN CONTRA RAYO (ZPR)

Una estructura sometida a descargas atmosféricas, presenta la necesidad de proteger la vida de los seres vivos, los dispositivos y equipos eléctricos o electrónicos dentro de esta, llevando a cabo los estudios adecuados para los factores de riesgo presentes y para la necesidad de protección que presenten los equipos instalados.

En una estructura podrían presentarse daños causados por los impulsos electromagnéticos generados por rayos (IEMR), incluyendo sobretensiones inducidas, por lo tanto las medidas de protección contra los IEMR deben evitar estos daños en los sistemas internos de la estructura, para lo cual la NTC 4552-1 propone una protección basada en el concepto de compatibilidad electromagnética¹¹ y que define diferentes áreas dentro de una estructura o sus alrededores con similares ambientes electromagnéticos [3] llamadas zonas de protección contra rayos.

¹¹ Capacidad de un dispositivo, equipo o sistema eléctrico, electrónico o de comunicación para operar satisfactoriamente dentro de un ambiente electromagnético; sin inducir fallas electromagnéticas en los demás sistemas y sin degradarse o fallar.



1.7.1 Zonas externas. Zonas donde no existe atenuación del IEMR y donde los sistemas internos pueden conducir corrientes totales o parciales de rayo.

1.7.1.1 ZPR 0A. Zona expuesta a impactos directos del rayo, debe soportar la corriente total del rayo y campos magnéticos muy intensos y no amortiguados. En esta zona se experimentan eventos de alta energía [3].

1.7.1.2 ZPR 0B. Zona protegida contra impactos directos de rayo pero existen IEMR sin atenuar, campos electromagnéticos intensos y no atenuados. Los sistemas internos pueden conducir corrientes parciales de rayo

1.7.2 Zonas internas. Zonas protegidas contra impactos directos de rayo.

1.7.2.1 ZPR 1. Zona protegida contra impactos directos del rayo mediante DPS en las fronteras, la corriente de rayo está limitada por división de corriente. La corriente parcial o inducida del rayo y el campo magnético son amortiguados mediante apantallamiento.

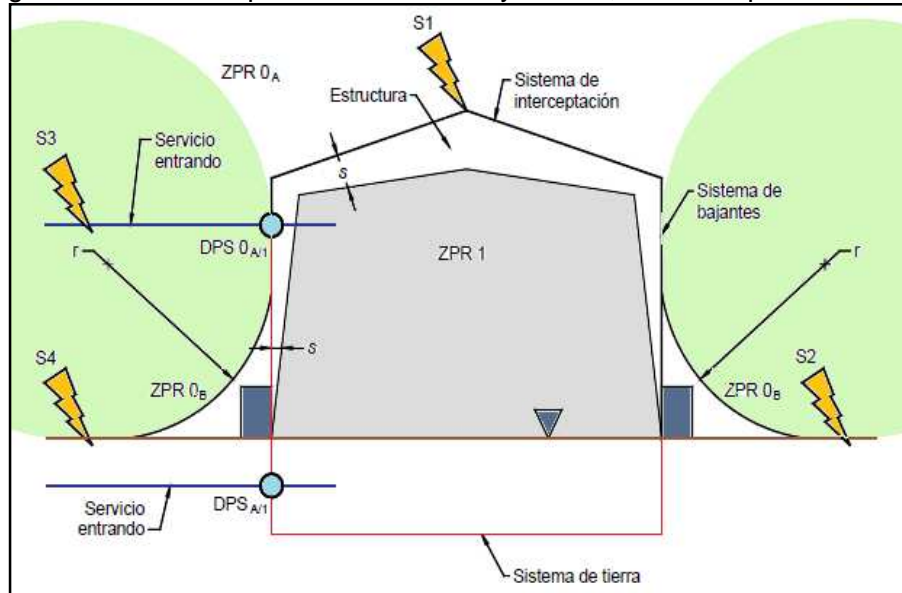
1.7.2.2 ZPR 2...n. Zona como la ZPR 1 pero el campo magnético es más amortiguado mediante el uso de más DPSs y más apantallamiento.

Estas zonas son volúmenes teóricamente asignados donde el nivel de emisión, medido en términos de tensión, corriente y campo magnético del IEMR, es compatible con el nivel de inmunidad¹² del sistema interno [3]. Estas zonas se caracterizan por cambios significativos en el nivel de emisión de los IEMR y sus límites están definidos por los niveles de riesgo y las medidas de protección empleadas.

El objetivo de estas zonas de protección contra rayos es atenuar las interferencias electromagnéticas de los equipos vulnerables, determinando cuantas son necesarias de acuerdo a las propiedades físicas de la estructura y la susceptibilidad o inmunidad de los equipos.

¹² Capacidad de los equipos, dispositivos o sistemas de operar satisfactoriamente sin ser interferidos por otros

Figura 20. Zonas de protección contra rayos ZPR, definidas para un SIPRA



Fuente: NTC-4552, 2008

Dónde:



Basados en estas zonas de protección se puede definir los dispositivos y componentes de protección contra rayos y sobretensiones que se van a utilizar, ya sean descargadores de corrientes de rayo, descargadores de sobretensiones y descargadores combinados o integrados, que se escogen según su capacidad de derivación, nivel de protección aportado y su ubicación. Estos descargadores deben poder operar durante varias descargas sin destruirse evitando de esta manera la penetración de corrientes dañinas en las instalaciones eléctricas de un edificio.



2. DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN

La protección contra rayos es tan compleja, que va mas allá de la instalación de unos dispositivos de captación o de un circuito cerrado de protección, de ahí a que se tomen en cuenta todos los elementos o partes metálicas que estén sobre la estructura o sobresalgan de la misma y que en conjunto puedan ser punto de impacto del rayo. Por lo tanto, se han establecido tres niveles de protección ante una posible descarga atmosférica; un primer nivel son los dispositivos de captación aérea o estructuras metálicas, un segundo nivel es el relacionado con la alimentación de equipos o de sistemas y el tercer nivel es con referencia a las líneas de transmisión de datos o equipos electrónicos.

Para efectos de este proyecto, se estudiará el primer nivel de seguridad ante un impacto directo o indirecto de rayos en una estructura o edificación de uso final.

2.1 SISTEMA DE CAPTACIÓN

El sistema de captación como parte del sistema de protección externa es el encargado de interceptar los rayos que vayan a impactar directamente sobre la estructura para luego derivar la corriente de forma segura al subsuelo. Este sistema funciona como un circuito de poca resistencia permitiendo establecer el último segmento del camino de la descarga del rayo, influyendo en la dirección de éste cuando esta a una distancia de 10 a 100 metros de caer en la estructura.

Los dispositivos de captación pueden resultar producto de la combinación de los siguientes elementos:

- Varillas tipo Franklin o bayonetas.
- Cables colgantes.
- Malla de conductores.

Las varillas tipo Franklin es uno de los elementos más efectivos en la captación de rayos, por lo que se considera captador universal por la norma IEC 62305 y la NTC 4552, sin embargo, otro tipo de elementos menos convencionales como los dispositivos de cebado son usados en diferentes países europeos y están contemplados en normativas como la francesa y la española.

A continuación se describen brevemente los diferentes tipos de dispositivos de captación:



Tabla 6. Dispositivos de captación y normativa

| SISTEMAS DE PROTECCIÓN | NORMAS |
|--|--------------------------------------|
| Varilla tipo Franklin o bayonetas | IEC 62305-3, 2005 / NTC 4552-3, 2008 |
| Hilos tendidos o cables colgantes | IEC 62305-3 2005 / NTC 4552-3, 2008 |
| Malla de conductores o jaulas malladas | IEC 62305-3 2005 / NTC 4552-3, 2008 |

Fuente: Autores

2.1.1 Varillas tipo Franklin o bayonetas. Son las encargadas de atraer los rayos hacia su zona de influencia; por su geometría, este tipo de varillas y su mástil de extensión son el punto más alto sobre la superficie de la estructura a proteger lo que permite aumentar la probabilidad de que el rayo caiga allí.

En cuanto a su material las varillas o bayonetas deben ser de cobre sólido o tubular, de aluminio, aleación de aluminio, o acero entre otros, eliminando completamente cualquier tipo de material radioactivo.

2.1.2 Hilos de tendido o cables colgantes. Consiste en uno o varios cables que se sitúan sobre la estructura; en sus extremos estos cables están aterrizados a tierra lo que permite derivar la corriente del rayo en forma segura.

2.1.3 Malla de conductores o jaulas malladas. Este sistema consiste en una serie de varillas o puntas captadoras conectadas entre sí por medio de un cable conductor formando un enmallado; dicho enmallado, permite dividir la corriente del rayo mitigando perturbaciones y posibles daños a la estructura.

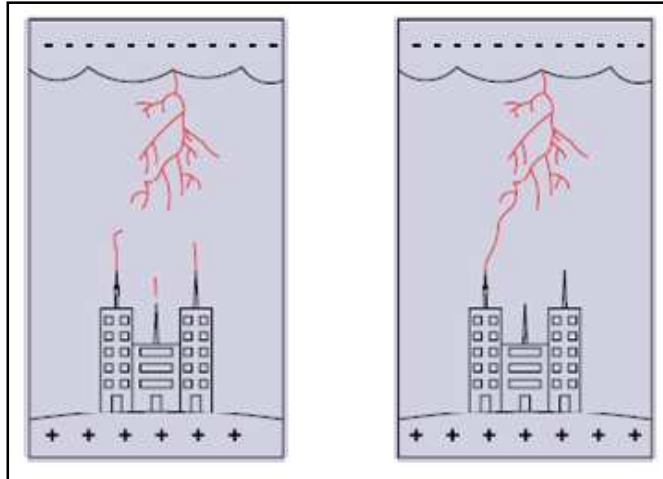
2.1.4 Dispositivos de cebado. Este dispositivo tiene una geometría igual a la varilla tipo Franklin que a su vez cuenta con una parte electrónica cuya función es la de emitir una señal a una frecuencia y una amplitud determinada permitiendo la formación de un trazador ascendente que intercepta anticipadamente el trazador descendente que va a caer sobre la estructura.

En pruebas realizadas en laboratorios de alta tensión, se observó que el leader¹³ ascendente tiene una velocidad media de $1 m/\mu s$ sobre el leader descendente,

¹³ Líder en idioma inglés.

obteniendo así una ganancia de tiempo y distancia en cuanto al momento y punto de impacto, haciendo que la zona a proteger sea más segura [9], ver figura 21.

Figura 21. Avances de cebado en puntas de captación.



Fuente: Catálogo general protección contra rayos. HELITA.

2.2 MÉTODOS DE CAPTACIÓN AÉREA

A partir del método electrogeométrico el cual se basa en observaciones hechas sobre el efecto de protección de cables de guarda y de torres de alta tensión, se desarrollan tres métodos de captación aérea cimentados en la aplicación de un apantallamiento de la estructura por parte de varillas y conductores conectados a tierra, todo esto con el fin de garantizar que cada una de las zonas expuestas de la estructura estén totalmente protegidas.

2.3 MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO

El método electrogeométrico MEG, es un sistema analítico cuya finalidad es la de probar que tan efectivo resulta un apantallamiento, previniendo o evitando totalmente el impacto del rayo en un área o zona determinada, por medio de usos o arreglos de puntos que producen una descarga que debilite el campo eléctrico y cause que el rayo se oriente en otra dirección.

Este método parte del concepto de radio de impacto el cual se define entre la punta del líder descendente del rayo y la estructura en tierra cuando aparece el líder ascendente o de conexión. A medida que el líder escalonado se acerca a la tierra, se aumenta la intensidad del campo electromagnético lo que ioniza a su vez el aire generando una avalancha de cargas. Es por ello que se deben tener en cuenta las diferentes etapas de formación del rayo, desde su inicio y propagación



de penachos hasta la transición y conexión entre los líderes ascendentes y descendentes.

Los métodos desarrollados a partir del MEG que permiten implementar de forma independiente o combinada cada uno de los sistemas de captación expuestos anteriormente son:

- Método de la esfera rodante (MER).
- Método del ángulo de protección (MAP).
- Método del enmallado (ME).

En cuanto al criterio de selección, éste está apoyado en la clasificación de los edificios según el nivel de protección contra rayos NPR, en la altura y en la forma de la estructura; al igual que el tipo de sistema de protección ya sea aislado o no aislado.

2.3.1 Método de la esfera rodante (MER). Aplicado a estructuras con alturas no superiores a los 55 m cuya geometría sea compleja.

El método de la esfera rodante, permite ubicar y dimensionar los dispositivos de captación. Consiste en colocar una esfera imaginaria de radio igual al radio de impacto del rayo r_{sc} sobre el plano de referencia de la estructura, luego, ésta se desplaza a través de la periferia marcando los puntos de contacto como sitios de posibles descargas atmosféricas ubicando allí los dispositivos de captación.

Cuando se presenta el fenómeno del rayo, el líder ascendente realiza el proceso de enlace con el líder descendente, por lo tanto, la esfera representa la longitud del último paso del líder y se calcula a partir de la corriente probabilística mínima del rayo siendo esta la corriente pico definida para cada nivel de protección; dichas corrientes son usadas para el cálculo del radio de la esfera rodante y están dadas para que cualquier corriente igual o superior a la escogida sea interceptada por los dispositivos de captación evitando un impacto directo sobre la estructura.

El radio de la esfera rodante, según la norma técnica Colombiana NTC 4552-1, 2008 calculado para zonas tropicales se da a partir de la siguiente fórmula:

$$r_{sc} = 3,9 \cdot (I_p)^{0,78} (m) \quad (2.1)$$

Pueden existir rayos que impacten en esquinas, bordes, techos planos, etc. Sin embargo, la probabilidad de impacto en los costados es muy baja para estructuras menores a 60 m.

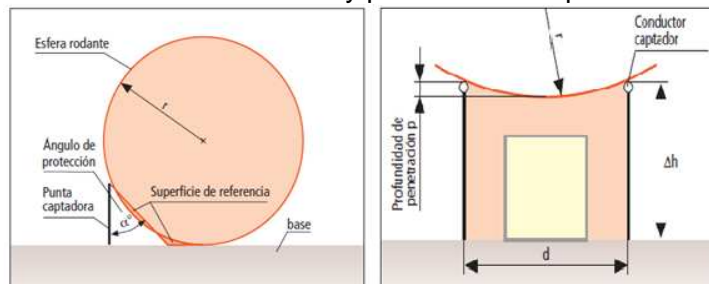
Tabla 7. Valores mínimos de I_{pico} de rayo negativa y valores máximos de radios de la esfera rodante

| PARÁMETRO | NPR | | | |
|--|------|------|------|------|
| | I | II | III | IV |
| Corriente pico mínima de polaridad negativa en zona tropical (NTC 4552-1, 2008) [kA] | 17 | 21 | 26 | 30 |
| Probabilidad que la corriente pico sea mayor al mínimo | 0,99 | 0,97 | 0,91 | 0,84 |
| Radio esfera rodante según NTC 4552-3, 2008 | 35 | 40 | 50 | 55 |

Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

Cuando en un sistema de captación se tiene varillas ubicadas paralelamente, el contacto de la esfera rodante con estos elementos determinan una profundidad de penetración que debe ser menor que la altura del dispositivo de captación garantizando el área protegida que se encuentra debajo de la esfera.

Figura 22. Método de la esfera rodante y profundidad de penetración de la misma.



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

Dicha profundidad se puede calcular por medio de la fórmula (2.2) o a través de la mayor distancia de separación existente entre los dispositivos de captación así como se muestra a continuación.

$$p = r - \left[r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Dónde: r = radio de la esfera rodante
 d = distancia de separación entre los captadores



En la tabla 8, se presentan los cálculos realizados con base en la fórmula (2.2) para dos varillas de captación o conductores paralelos, usando la distancia máxima entre ellas (m) y el radio de la esfera rodante correspondiente a la altura de la estructura y al nivel de protección contra rayos.

Tabla 8. Penetración de la esfera rodante para dos puntas captadoras.

| d | Penetración de la esfera rodante (m) (redondeada) | | | |
|----|---|-----------|------------|-----------|
| | Nivel de protección con radio de la esfera rodante en metros | | | |
| | I (20 m) | II (30 m) | III (45 m) | IV (60 m) |
| 2 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| 4 | 0.10 | 0.07 | 0.04 | 0.03 |
| 6 | 0.23 | 0.15 | 0.10 | 0.08 |
| 8 | 0.40 | 0.27 | 0.18 | 0.13 |
| 10 | 0.64 | 0.42 | 0.28 | 0.21 |
| 12 | 0.92 | 0.61 | 0.40 | 0.30 |
| 14 | 1.27 | 0.83 | 0.55 | 0.41 |
| 16 | 1.67 | 1.09 | 0.72 | 0.54 |
| 18 | 2.14 | 1.38 | 0.91 | 0.68 |
| 20 | 2.68 | 1.72 | 1.13 | 0.84 |
| 23 | 3.64 | 2.29 | 1.49 | 1.11 |
| 26 | 4.80 | 2.96 | 1.92 | 1.43 |
| 29 | 6.23 | 3.74 | 2.40 | 1.78 |
| 32 | 8.00 | 4.62 | 2.94 | 2.17 |
| 35 | 10.32 | 5.63 | 3.54 | 2.61 |

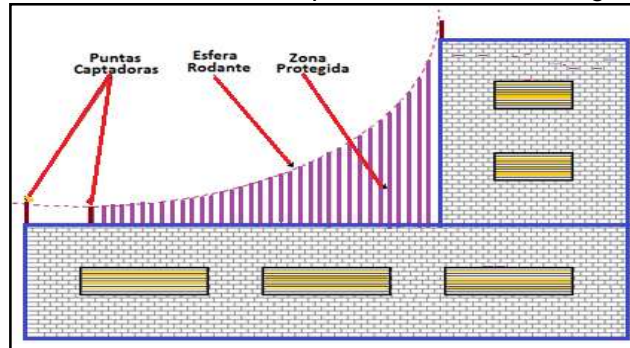
Fuente: Manual de protección contra rayos. DEHN

Cuando se tiene cuatro varillas, la distancia d corresponde a las diagonales del cuadrado o rectángulo formado por los dispositivos de captación.

Aplicación

Los puntos que ofrecen mayor intensificación del campo eléctrico son aquellos que están ubicados en la parte más alta de los edificios, casas y estructuras en general, además de los vértices, aristas y techos salientes, por lo que el método de la esfera rodante proporciona una buena opción en el momento de diseñar un sistema de captación.

Figura 23. Método de la esfera rodante para edificaciones de geometría compleja



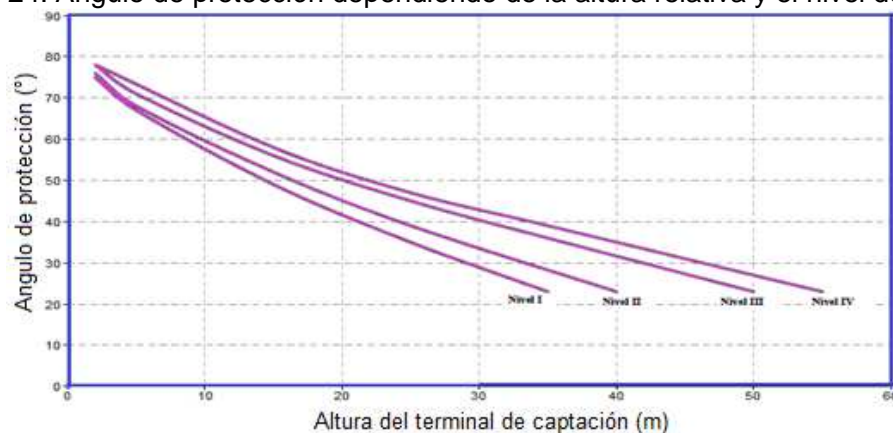
Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

Cabe resaltar que el método de la esfera rodante fue desarrollado inicialmente para líneas de transmisión de energía eléctrica lo que pone en entredicho que se use en el diseño de protección contra rayos para estructuras más complejas; más aún cuando el radio de impacto de la esfera rodante es igual para superficies planas, puntas o bordes y limita su diseño para estructuras con altura superior a los 60 m.

2.3.2 Método del ángulo de protección. El método del ángulo de protección tiene aplicación en estructuras pequeñas de geometría no tan compleja, con alturas menores a los 20 m o en pequeñas partes de grandes estructuras.

A partir del NPR y de la altura de las varillas o puntas captadoras, se estipula el ángulo de protección del terminal de captación o del cable aéreo el cual puede determinarse por medio de la figura 24.

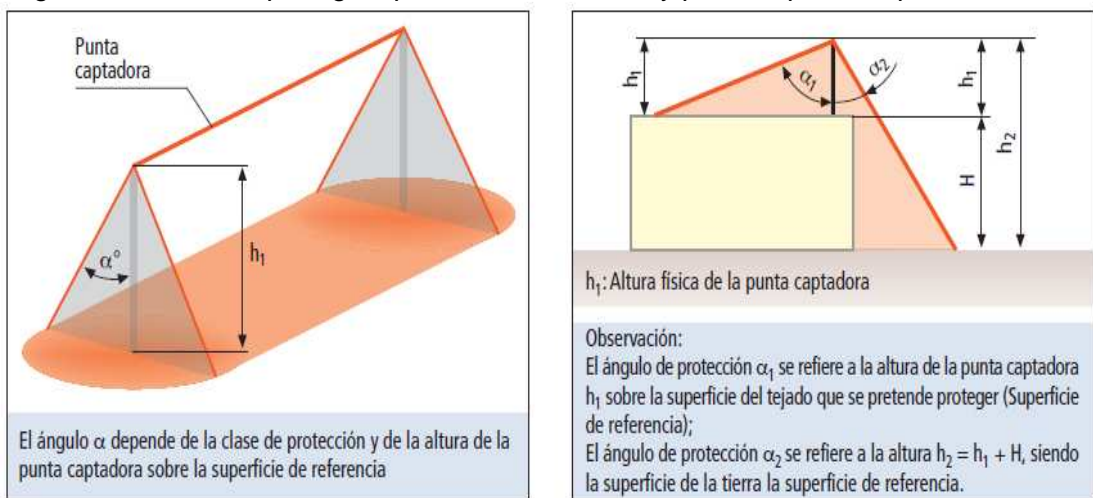
Figura 24. Ángulo de protección dependiendo de la altura relativa y el nivel de protección



Fuente: Norma NTC 4552-3, 2008

Con base en una altura relativa dada respecto a la superficie del suelo, se escoge una altura h que corresponde a la altura del elemento captador con referencia a la superficie de la estructura a proteger, la cual permite obtener a partir de la figura 24, el ángulo de protección. Al observarse en 3D la varilla captadora y el ángulo de protección generan un cono proyectado sobre el plano de referencia haciendo un barrido de un ángulo α a la vertical en todas las direcciones el cual debe envolver completamente la estructura, esto se logra ubicando estratégicamente en la superficie de la estructura los mástiles varillas y alambres.

Figura 25. Volumen protegido por un cable tendido y por una punta captadora vertical



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

Este método presenta limitaciones en cuanto a la altura h del terminal de captación ya que ésta no puede ser mayor a la del radio de la esfera rodante incidiendo así en la determinación del volumen a proteger, también es importante tener en cuenta las posibles salidas o techos voladizos del edificio ya que si las puntas captadoras no son suficientes, se debe recurrir al método de la esfera rodante.

2.3.2.1 Tipo de instalación de protección en relación al volumen a proteger.

El tipo de instalación de protección depende del sistema que se desee implementar ya sea aislado o no aislado, dicha selección, debe obedecer a los materiales usados en la construcción de la edificación; en cuanto al volumen de la estructura, éste determina la ubicación y las características generales de cada uno de los dispositivos de captación.

➤ Sistema aislado.

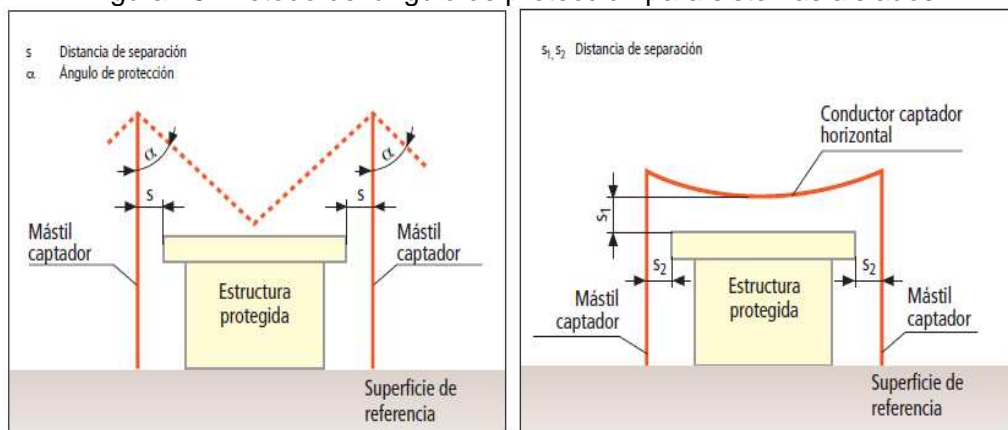
Los dispositivos de captación así como los bajantes no tienen ningún tipo de contacto con el volumen a proteger, es decir, no utiliza la estructura metálica de la edificación, imposibilitando descargas laterales a través de la estructura.

 **Aplicación**

Este tipo de instalación puede llevarse a cabo cuando se tienen estructuras con techos de material como paja y madera, dicho material no debe permanecer en contacto directo con los componentes del sistema de protección conservando una distancia de separación S igual a $0,15\text{ m}$ entre éstos y los dispositivos de captación tales como varillas, cables colgantes y mallas. Para otro tipo de materiales combustibles se debe considerar una distancia de separación S no menor de $0,20\text{ m}$. De igual forma, no se deben situar los elementos de protección bajo una cubierta de tejado o láminas metálicas que pueda ser perforada en caso de descarga directa de rayo produciendo posibles incendios por chispa y flujo de corriente.

En cuanto a su construcción, se puede obtener un sistema de protección usando dos mástiles de captación ubicados a una distancia S de la estructura; dicha distancia se establece en concordancia con el aislamiento eléctrico que debe existir entre los elementos de protección y las partes internas de la edificación, ya sean metálicas, eléctricas o de comunicación entre otras.

Figura 26. Método del ángulo de protección para sistemas aislados



Fuente: Manual de protección contra rayos. DEHN

➤ Sistemas no aislados.

Los dispositivos de captación así como los bajantes están en contacto con el volumen a proteger ya sea parcial o totalmente, estos se ubican sobre la superficie de la estructura evitando cualquier flujo de corriente del rayo a través de la misma.

En cuanto a la implementación del sistema de protección, se unen captadores y bajantes a través de conductores que se fijan a la superficie del techo usando accesorios espaciados. Las longitudes medias de fijación para estos conductores están dadas por:

Tabla 9. Centro de aseguramiento sugerido

| ARREGLO | LONGITUDES MEDIAS DE FIJACIÓN PARA CONDUCTORES DE CINTA Y TRENZADO (mm) | LONGITUDES MEDIAS DE FIJACIÓN PARA CONDUCTORES SÓLIDOS CILÍNDRICOS (mm) |
|---|---|---|
| Conductores horizontales sobre superficies horizontales | 500 | 1 000 |
| Conductores horizontales sobre superficies verticales | 500 | 1 000 |
| Conductores verticales desde tierra hasta 20 m | 1 000 | 1 000 |
| Conductores verticales desde 20 m en adelante | 500 | 1 000 |

No aplica para fijaciones internas las cuales requieren una consideración especial.
Se debe cumplir con condiciones ambientales (ej. Carga del viento) y verificar si son necesarias longitudes medias de fijación diferentes.

Fuente: NTC 4552-3, 2008



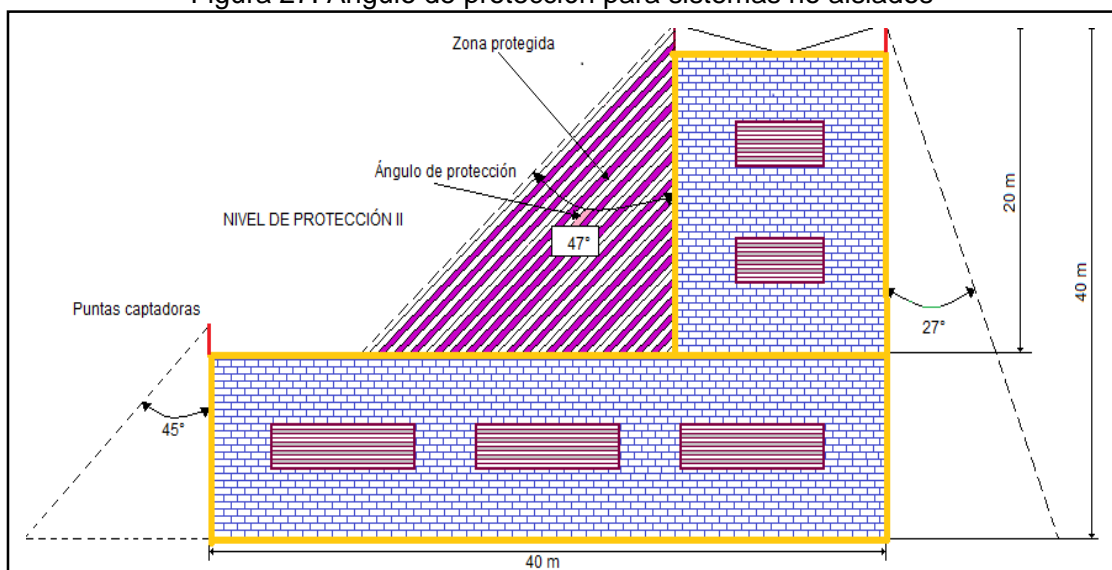
Aplicación

La mayoría de las edificaciones usan materiales no combustibles para su construcción, lo que permite instalar los dispositivos de captación sobre la estructura sin significar un peligro inminente para ellas, sin embargo, cuando se tiene antenas o aires acondicionados entre otro tipo de elementos, se puede recurrir a la combinación de los sistemas aislados y no aislados al fijar los dispositivos de captación por medio de materiales aislantes como plástico reforzado o fibra de vidrio, al objeto, evitando así el flujo de corrientes a través de éstos.

Es importante tener en cuenta, que por su geometría se puede generar en un techo plano cierta acumulación de agua, por lo que los dispositivos de captación deben ser instalados por encima del nivel máximo de agua a ser acumulada.

Para su construcción, si se tiene un plano inclinado, el eje del cono que protege la estructura es la perpendicular a la superficie sobre la cual está instalada la varilla de captación coincidiendo el terminal de la varilla con la parte superior del cono.

Figura 27. Ángulo de protección para sistemas no aislados



Fuente: Protección contra rayos. Horacio Torres Sánchez.

- Componentes naturales de las instalaciones captadoras.

Se puede utilizar partes metálicas de la edificación como componente natural del sistema de protección contra rayos siempre y cuando estas presenten continuidad eléctrica ininterrumpida.

Estos componentes son:

- Cobertizos metálicos.** Dichos cobertizos deben cumplir las siguientes condiciones:
 - Continuidad eléctrica y durable entre sus partes como soldaduras, grapas, abrazaderas metálicas, entre otros.
 - Espesor capaz de soportar el impacto directo del rayo.
 - El cobertizo metálico no debe estar revestido por ningún material aislante.

Tabla 10. Mínimo espesor para cobertizos o tuberías metálicas en sistemas de captación

| CLASE DE SIPRA | MATERIAL | ESPESOR ^a (mm) | ESPESOR ^b (mm) |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Nivel de protección del I al IV | Plomo | - | 2,0 |
| | Acero inoxidable galvanizado | 4 | 0,5 |
| | Titanio | 4 | 0,5 |
| | Cobre | 5 | 0,5 |
| | Aluminio | 7 | 0,65 |
| | Zinc | - | 0,7 |
| ^a Previene perforaciones, puntos calientes o ignición. ^b Láminas metálicas si no es importante prevenir perforaciones, puntos calientes o ignición | | | |

Fuente: NTC 4552-3, 2008

b) Componentes metálicos

- Material del techo debajo de la superficie no metálica.
- Rieles, tuberías metálicas, ornamentación, tanques sobre el techo, que cumplan con secciones transversales iguales o mayores a lo especificado por la NTC 4552-3.
- Platinas de una fachada metálica.
- Cables o varillas y conductores bajantes (Anexo 3)

c) Elementos combustibles o mezclas explosivas

- Tuberías metálicas y tanques transportadores de este tipo de fluidos que cumplan con lo establecido en la tabla 10 y cuya temperatura interna no genere peligro de explosión.
- No se considera componente natural aquellas tuberías que contenga uniones o juntas sin equipotencializar adecuadamente.
- El uso de aislantes de 1 mm de asfalto o de 0,5 mm de PVC no son suficientes para considerar este tipo de elementos como de captación.
- No debe usarse como componente natural tanques o tuberías que contengan gas o líquido bajo alta presión e inflamables.

2.3.3 Método del enmallado. El método del enmallado es utilizado principalmente para estructuras cuya superficie es plana, independientemente de su altura.

Consiste en colocar una malla conductora sobre la superficie de la estructura que intercepte cualquier tipo de descarga atmosférica directa, ubicando los dispositivos de captación sobre terrazas, techos voladizos o bordes exteriores; este tipo de diseño, permite que la corriente del rayo sea evacuada por más de dos caminos aminorando los posibles daños a la estructura.

Las dimensiones de la malla se dan en función del nivel de protección y están dados en la tabla 11.

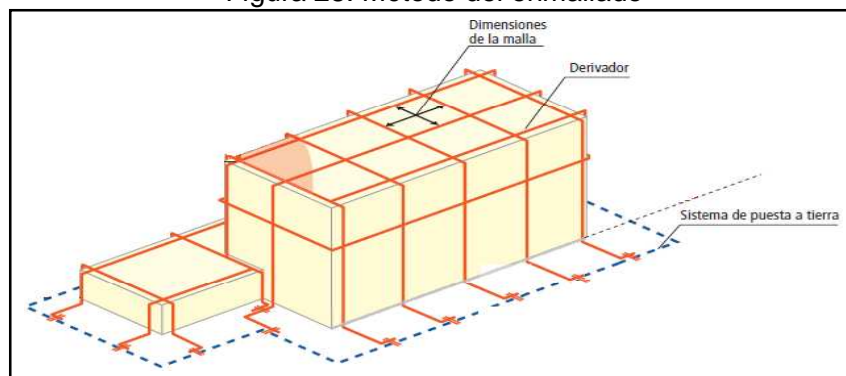
Tabla 11. Dimensiones del enmallado para los diferentes niveles de protección

| NIVEL DE PROTECCIÓN | MALLA [m] |
|---------------------|-----------|
| Nivel I | 5 x 5 |
| Nivel II | 10 x 10 |
| Nivel III | 15 x 15 |
| Nivel IV | 20 x 20 |

Fuente: NTC 4552-3, 2008

En cuanto a su instalación, se asume la profundidad de penetración de la esfera rodante como cero y se pueden utilizar cobertizos metálicos y bordes exteriores propios de la estructura como componentes naturales del sistema de captación aéreo.

Figura 28. Método del enmallado



Fuente: Catálogo protección contra rayos. DEHN

2.3.3.1 Características generales del enmallado. El enmallado debe cumplir con las siguientes condiciones:

a) Ubicación de los sistemas de captación

- Se pueden ubicar en las líneas de borde del techo.
- Salientes del techo.

b) Dimensiones

- No deben ser superiores a lo especificado en la tabla 6.
- No deben sobresalir instalaciones del volumen protegido.
- Si la superficie del techo excede el tamaño de la malla, deben instalarse conductores adicionales.

c) Rutas de evacuación (metálicas)

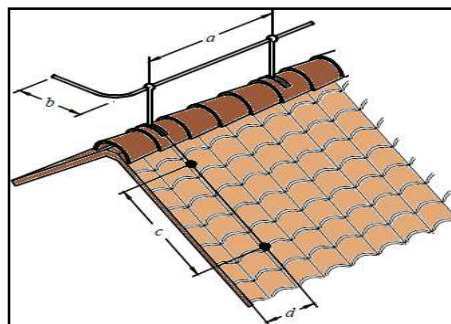
- Deben existir más de dos caminos de evacuación de la corriente del rayo a tierra.
- Las rutas deben ser cortas, rectas y directas.
- Se puede tomar en consideración, que entre mayor sea el número de rutas, el campo electromagnético del edificio se reduce.



Aplicación

Los dispositivos de captación tales como varillas captadoras y cables conductores, además de ubicarse sobre superficies planas, pueden estar ubicados en estructuras de techo inclinado con conductores escondidos (previniendo la corrosión) y terminales verticales desnudos con intervalos cortos de separación no mayores a los 10 m o en el caso de platinas metálicas, espaciadas no más de 5 m . También se puede fijar el conductor en la parte superior de la cubierta reduciendo cualquier daño en las tejas producto de una descarga directa; este tipo de instalación facilita la inspección y mantenimiento del sistema de protección

Figura 29. Método del enmallado en techos inclinados



Fuente: Sistema de protección contra sobretensiones y contra rayos.OBO Bettermann



- Dónde:
- a* distancia entre puntas verticales o soportes del sistema de captación.
 - b* punta terminal del sistema de captación sobre el lomo de un techo inclinado.
 - c* distancia de separación entre conectores del conductor bajante del techo
 - d* distancia del borde del techo al conductor bajante.

2.3.4 Construcción del sistema de captación aérea. Conocidos los diferentes métodos implementados en el diseño del sistema de protección contra rayos SIPRA, muchos otros elementos se involucran con el fenómeno de la descarga atmosférica como son: conectores, accesorios, conductores y bajantes cuyas especificaciones en cuanto a su conexión son de vital importancia para una buena práctica de ingeniería y complementan lo descrito anteriormente.

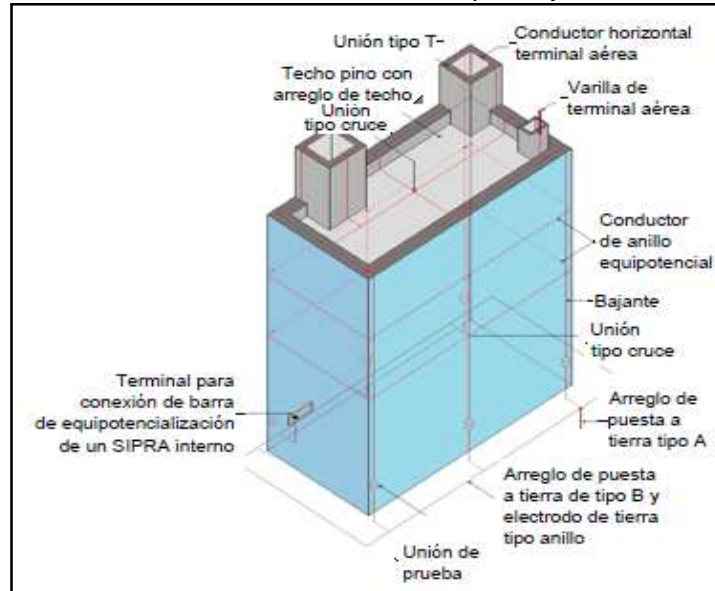
a) Uso de cables o conductores

- Temperatura de los conductores.
 - No se debe exceder la temperatura máxima de los conductores si su sección transversal esta en conformidad con lo expuesto en la tabla 11.
 - Evitar peligrosas elevaciones de temperatura en techo o muros construidos con material combustible aplicando cualquiera de las siguientes técnicas: incremento en la sección transversal de los conductores, aumento de las distancias de separación entre éstos y la cubierta del techo y finalmente fijación de una capa de protección entre los conductores y la cubierta del techo.

b) Implementación según el tipo de estructura

- Estructuras altas.
 - Estructuras con altura superior a los 120 m, deben tener dispositivos de captación en las superficies laterales correspondientes al 20% más alto de la edificación.
 - Para estructuras largas, se debe conectar conductores adicionales a los del sistema de captación.

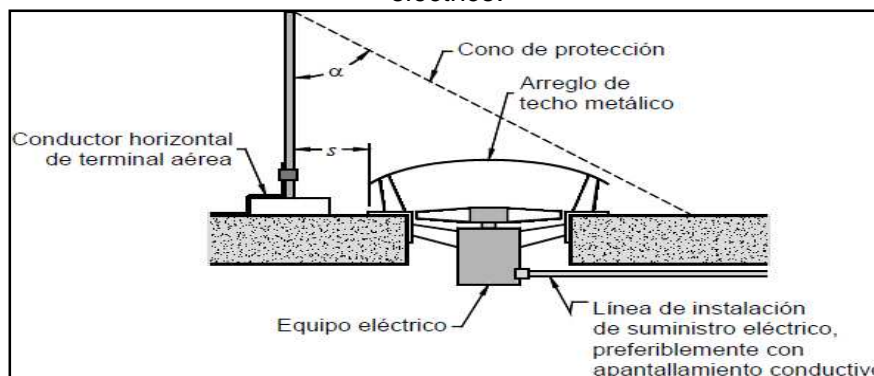
Figura 30. Posicionamiento de un SIPRA en techo plano y con accesorios en el techo



Fuente: NTC 4552-3, 2008

- Protección contra rayos para parqueaderos multinivel.
 - Se pueden conectar al acero de refuerzo del techo elementos de captación en forma de monte; de no ser posible estos deben ser ubicados en las uniones de la malla.
 - **MARGEN DE SEGURIDAD:** Para establecer un margen de seguridad se debe, cumplir con la distancia adecuada para evitar contacto directo con conductores de terminal aéreo, colocar señales de precaución

Figura 31. Protección techo metálico de parqueaderos con instalaciones de suministro eléctrico.



Fuente: NTC4552-3,2008



- Estructuras de concreto con acero de refuerzo y techos no accesibles al público.
 - Se debe conectar el sistema de captación al acero de refuerzo del techo.
 - Pueden ser usadas como componentes naturales del sistema de captación cubrimientos metálicos de paredes externas.
 - Cuando se tienen láminas conductoras en el techo, se deben usar soportes de aislamiento eléctrico; si se usan soportes conductivos, la conexión a la lámina del techo debe soportar una corriente de descarga parcial.
 - En la implementación del sistema de captación para la construcción del anillo sobre el techo, se pueden usar conductores naturales si se permite un daño temporal a la fachada de la estructura de hasta *100 mm*.

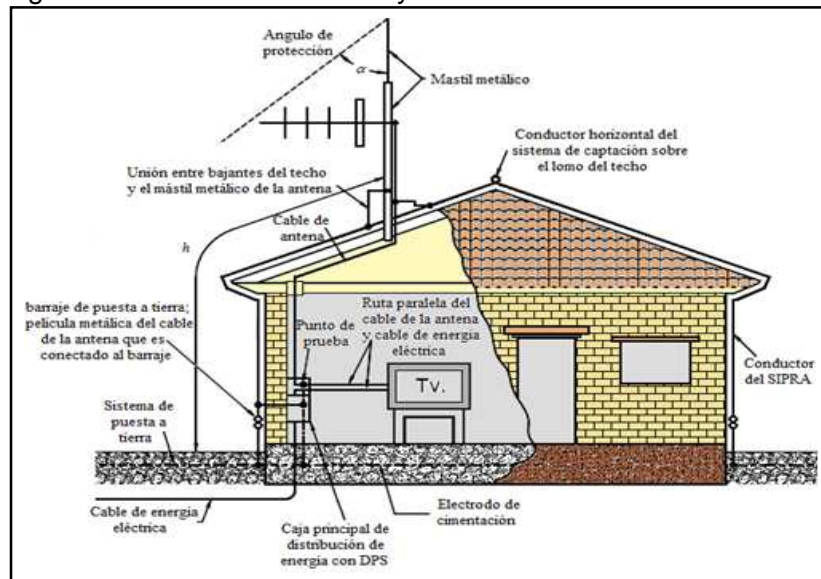
- Provisión de un adecuado apantallamiento.
 - Las paredes y techos externos, pueden ser usados como apantallamiento electromagnético del espacio encerrado.
 - En la instalación del sistema de captación sobre el techo, todas aquellas partes conductoras que tengan una longitud mayor de 1 m, se deben interconectar a la malla de protección.
 - Cuando se usan elementos no conductivos, reducir el espaciamiento entre los conductores del techo, mejora el apantallamiento de la estructura.

- Protección de accesorios sobresalientes en el techo sin instalaciones conductoras.
 - Accesorios metálicos del techo no protegidos por el sistema de captación que no requieren protección:
 - ✓ La altura por encima del nivel del techo está por debajo de los 0,3 m
 - ✓ El área total de la estructura es de $1 m^2$.
 - ✓ La longitud de la superestructura no excede los 2 m.
 - ✓ Los accesorios no conductivos que estén por debajo de 0,5 m de la superficie formada por el sistema de captación.

 - Accesorios del techo no protegidos por el sistema de captación que requieren protección:
 - ✓ Aquellas conexiones entre partes sobresalientes del techo y el interior del edificio.
 - ✓ Chimeneas de material aislante, ya que por tener en su superficie interna depósitos de hollín, pueden conducir corrientes producto de una descarga.

- ✓ Si no se cumple con las distancias de separación para el aislamiento eléctrico, los accesorios metálicos deben ser unidos al sistema de captación.
- Protección de techos que cubran equipos eléctricos y de procesamiento de información
 - Los conductores deben ser unidos al sistema de captación y en lo posible a la estructura de acero, así no cumpla con las distancias de separación.
 - Se pueden conectar DPS a las partes activas del nivel del techo si se requiere de una mayor protección.
 - Tanto en rutas aéreas como aquellas que van través de materiales sólidos, se toma $k_m = 0,5$ para las distancias de separación.
 - Para instalaciones eléctricas por encima de la superficie de protección:
 - ✓ El mástil de la antena que este sobre la estructura debe ser unido al sistema de captación a nivel del techo y en el barraje principal de puesta a tierra.
 - ✓ El cable de la antena debe entrar a la estructura en el punto común de los servicios o en los puntos mencionados en el ítem anterior.
 - ✓ Cuando no se es posible conservar las distancias de separación, el equipo eléctrico debe ser equipotencializado al sistema de captación aérea, a los elementos conductivos de los accesorios del techo y al apantallamiento del equipo eléctrico.

Figura 32. Protección contra rayos de una casa con antena de TV



Fuente: NTC 4552-3,2008



- Protección partes conductoras sobre el techo
 - Aquellos elementos que no cumplan con el espesor mínimo para techos metálicos, pueden ser protegidos usando un conductor aéreo y se debe aplicar el método de la esfera rodante.
 - Para estructuras cubiertas por suelo:
 - ✓ El sistema de captación debe ser enmallado ubicado sobre la superficie del suelo o a una serie de varillas conectadas a una malla enterrada.
 - ✓ Cuando es regular la presencia de personas en estructuras con capa de suelo de espesor hasta de $0,5\text{ m}$, se puede usar en el sistema de captación una malla de dimensiones $5*5$ para prevenir tensiones de paso.
 - ✓ La altura de los sistemas de captación deben tener una altura de $2,5\text{ m}$ y debe conservar distancias de separación necesarias.
 - ✓ Para estructuras con material explosivo, se debe implementar un SIPRA más aislado, que a su vez este interconectado a los sistemas de puesta a tierra.



3. SISTEMA DE CONDUCTORES BAJANTES

Para poder conducir al subsuelo la elevada magnitud de corriente como resultado de una descarga atmosférica, es necesario cumplir con altas exigencias en cuanto al diseño y disposición de los sistemas eléctricos del edificio.

Por tanto, es preciso contar con una instalación derivadora a tierra, es decir, un sistema de bajantes, que consiste en una unión galvánica entre el sistema de captación y la instalación de puesta a tierra.

3.1 BAJANTES

La función principal del sistema de bajantes es la de conducir de forma segura la corriente de rayo atraída por el sistema de captación hacia el sistema de puesta a tierra. De ahí, que el número de bajantes y su ubicación, dependa de factores como: la división de corriente del rayo, el riesgo de impacto lateral en la estructura, la reducción de perturbaciones electromagnéticas dentro del edificio a proteger y el tamaño de la estructura, por lo que se establece que el número de bajantes no debe ser menor a 2 y es recomendable espaciarlos uniformemente realizando conexiones laterales cada 10 ó 20 m de altura, principalmente en edificios con elevaciones superiores a los 30 m.

Es necesario que los bajantes sean ubicados, de tal manera que a partir del punto de impacto del rayo hasta la tierra cumpla con los siguientes requerimientos:

- Existencia de varios caminos paralelos para la corriente.
- La longitud de los caminos de corriente debe ser mínima.
- Equipotencialización a partes conductoras de la estructura.
- Ubicación a una distancia considerable de circuitos internos y partes metálicas.

3.2 TIPOS DE SISTEMA DE BAJANTES

Se consideran dos tipos de sistemas de bajantes, uno es aquel que está aislado eléctricamente de la estructura y el otro es aquel que está unido directamente a la misma.

3.2.1 Sistema aislado eléctricamente de la estructura. Este tipo de sistemas se usa para estructuras con paredes combustibles y en áreas con peligro de explosión como tanques de almacenamiento de combustible o en estructuras con consideraciones arquitectónicas en donde los bajantes no se ubican directamente sobre la fachada sino en las hendiduras del ladrillo.

Para la ubicación de los bajantes, se parte del elemento de captación empleado en la protección contra rayos como se indica a continuación:

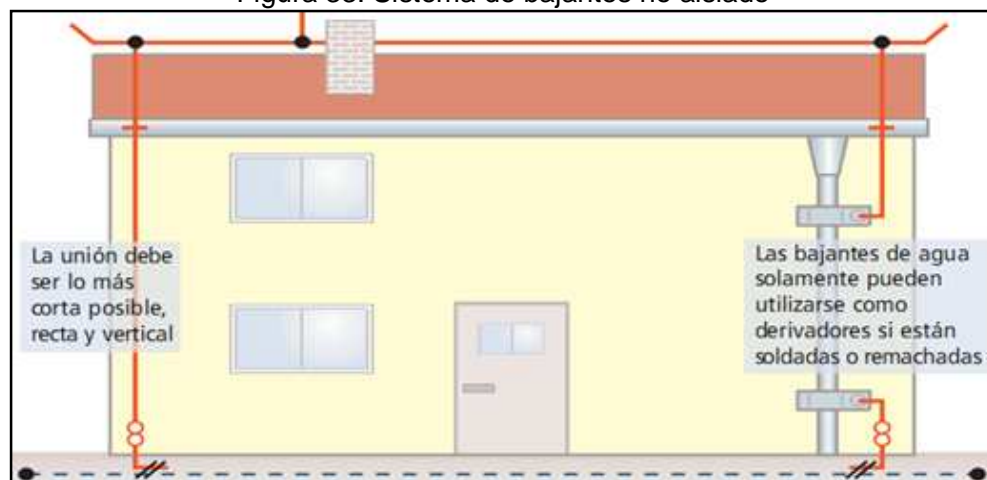
- **Varillas o puntas Franklin.** Cuando se tiene este elemento de captación, es necesario un bajante por cada poste metálico ó de material sin refuerzo de acero interconectado.
No es necesario el uso de bajantes si los postes son metálicos ó con acero interconectado siempre y cuando se garantice continuidad entre la punta de captación y el sistema de puesta a tierra.
- **Cables colgantes.** Es necesario al menos un bajante en cada soporte de cables cuando se implementa este tipo de sistema de captación.
- **Malla de conductores.** Se emplea al menos un bajante en cada soporte de terminal cuando se tiene éste sistema de captación.

Se debe tener en cuenta la siguiente recomendación cuando se trate de una construcción arquitectónica:

No es recomendable instalar sistemas de bajantes directamente en yesos, ya que éste material puede sufrir daños a causa de las altas temperaturas producto de la corriente del rayo y a las fuerzas de expansión

3.2.2 Sistema no aislado o unido eléctricamente a la estructura.

Figura 33. Sistema de bajantes no aislado



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

Para este tipo de sistemas se tiene en cuenta la distribución simétrica de los bajantes, por lo que se establecen distancias de separación que pueden verse



afectadas por objetos que interfieran en el recorrido de los conductores bajantes como son: ventanas, techos voladizos, rejillas, entre otros.

Tabla 12. Distancia de separación promedio para conductores bajantes

| NIVEL DE PROTECCIÓN | DISTANCIA TÍPICA PROMEDIO [m] |
|---------------------|-------------------------------|
| Nivel I | 10 |
| Nivel II | 10 |
| Nivel III | 15 |
| Nivel IV | 20 |

Fuente: NTC 4552-3 2008

Con base en lo expuesto anteriormente se deben tener en cuenta requerimientos existentes dentro de la instalación de bajantes en estructuras como las siguientes:

- Las distancias entre bajantes no debe ser menor a un tercio de las distancias presentadas en la tabla 12.
- Es aceptable una variación en las distancias de separación de hasta $\pm 20\%$ siempre y cuando se mantenga la media según lo establecido en la tabla 12.
- Para estructuras que dentro de su construcción cuente con patios cerrados con más de 30 m de perímetro, se hace necesaria la instalación de conductores bajantes.
- Cuando se tengan estructuras planas con dimensiones sobre 4 veces la distancia entre bajantes, se deben instalar bajantes internos extras cada 40 m según se requiera.
- Se deben instalar anillos equipotenciales para estructuras con alturas superiores a los 20 m que deben interconectar los bajantes a cada nivel; la distancia entre los anillos equipotencializadores debe ser mínimo de 10 m .

3.3 AISLAMIENTO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN

El aislamiento eléctrico¹⁴ entre los dispositivos de protección y la estructura se obtiene al establecer una distancia de separación S en la cual no pueda existir ninguna chispa peligrosa entre ellos.

$$S > k_i \frac{k_c}{k_m} l \quad (m) \quad (3.1)$$

¹⁴ Aislamiento eléctrico: está caracterizado por la capacidad dieléctrica de los materiales aislantes para no permitir corrientes de fuga provocadas por la tensión a la que está sometido el elemento.

Dónde: k_i depende del nivel de protección del sistema.
 k_c depende del flujo de corriente por los bajantes.
 k_m depende del aislamiento entre las partes.
 l longitud a lo largo del captador o bajante medido desde el punto de distancia de separación considerada y la unión equipotencial más cercana.

Cada una de las variables consideradas en la ecuación (3.1), están directamente relacionadas con la clase de SIPRA, así como con el número de bajantes y el medio o material aislante usado.

Tabla 13. Valores coeficiente k_i para aislamiento externo

| CLASE DE SIPRA | k_i |
|----------------|-------|
| I | 0,08 |
| II | 0,06 |
| III – IV | 0,04 |

Fuente: NTC 4552-3, 2008

Tabla 14. Valores coeficiente k_c para aislamiento externo

| NÚMERO DE BAJANTES (n) | k_c |
|----------------------------|-----------|
| 1 | 1 |
| 2 | 1.....0,5 |
| 4 o más | 1.....1/n |

Fuente: NTC 4552-3, 2008

Tabla 15. Valores coeficiente k_m

| MATERIAL | k_m |
|----------|-------|
| Aire | 1 |
| Concreto | 0,5 |

Cuando hay algunos materiales aislantes en serie, es practico usar el valor más bajo de k_m .
 Esta bajo consideración el uso de otros materiales aislantes.

Fuente: NTC 4552-3, 2008

- Cuando se tiene la corriente del rayo fluyendo en la totalidad del conductor, la distancia de separación en aire se da a partir de la siguiente ecuación:

$$s = s_i * k_c * l \quad (3.2)$$

- Si se tiene diferentes valores de corriente fluyendo a través de la longitud del conductor

$$s = s_i(k_{c1} * l_1 + k_{c2} * l_2 + \dots + k_{cn} * l_n) \quad (3.3)$$

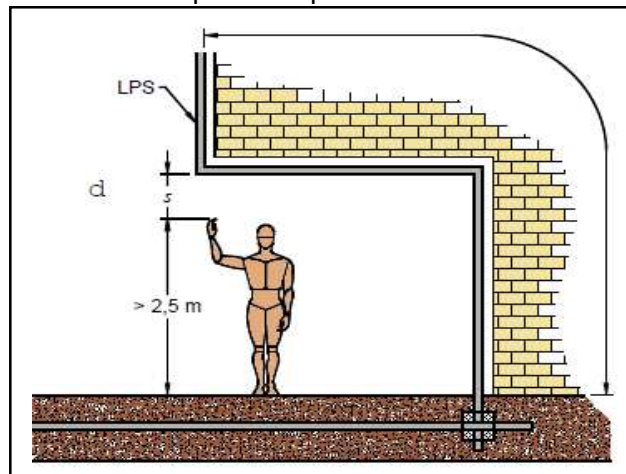
- En estructuras con vigas voladizas, la distancia de separación tiene como finalidad prevenir posibles corrientes de fuga que se puedan dar a través del conductor bajante, afectando a personas que se encuentren ubicadas en esta área convirtiéndolas en una posible ruta de corriente, es por ello que esta separación debe cumplir la siguiente condición:

$$d > 2,5 + s \quad (3.4)$$

s corresponde a la distancia de separación o aislamiento eléctrico en metros.
2,5 valor representativo de la altura de una persona (m) teniendo el brazo levantado.

l longitud para evaluación de la distancia de separación s .

Figura 34. Distancia de separación para una estructura con viga voladiza



Fuente: NTC 4552-3 anexo E, 2008

Para este tipo de estructuras, la conexión del sistema de captación y la del sistema de bajantes debe ser por medio de conductores dedicados y no por medio de componentes naturales.



3.4 DIVISIÓN DE LA CORRIENTE DEL RAYO A TRAVÉS DE LOS CONDUCTORES BAJANTES

El número de conductores bajantes (n) instalados en la estructura, determina la cantidad de corriente eléctrica que pueda circular a través de estos, de ahí que el coeficiente de división de la corriente k_c dependa no sólo de este factor sino también de la posición de los conductores, del tipo de sistema de captación, de los anillos equipotencializadores y del tipo de puesta a tierra.

La corriente que se divide a través de los bajantes, tiene aproximadamente la misma forma de onda de la corriente del rayo pero con pendiente reducida. Sin embargo, la corriente de flameo tiene una pendiente mayor que la corriente del rayo, haciendo que la tensión inducida sea más elevada en los lazos de los circuitos vecinos.

En el cuarto capítulo, sistemas de puesta a tierra se expone de manera más detallada cada uno de los conceptos empleados en este ítem; ya que el rango de valor de k_c varía dependiendo del tipo de sistema de puesta a tierra implementado ya sea tipo A o tipo B; para el primer caso, se debe cumplir que la resistencia de cada electrodo tenga un valor muy igual o equivalente, mientras que para el segundo caso, se deben valores de la tabla 16.

Tabla 16. Valores del coeficiente k_c

| TIPO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN | NÚMERO DE BAJANTES n | k_c | |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| | | ARREGLO DE PUESTA A TIERRA TIPO A | ARREGLO DE PUESTA A TIERRA TIPO B |
| Electrodo simple | 1 | 1 | 1 |
| Cable | 2 | 0,66 ^d | 0,5.....1 (figura 34) ^a |
| Malla | 4 o más | 0,44 ^d | 0,25.....0,5(figura 35) ^b |
| Malla | 4 o más, conectados por anillos de conductores horizontales | 0,44 ^d | $\frac{1}{n}$... 0,5 (figura 36) ^c |

a) Rango de los valores de $k_c=0,5$ cuando $c \ll h$; $k_c=1$ cuando $h \ll c$.

b) La ecuación de k_c de acuerdo con la figura 2 es una aproximación para estructuras cúbicas y para n_4 . Los valores de h , c_s , c_d , se asume que se encuentran en el rango de los 5 m a 20 m.

c) Si los bajantes están conectados horizontalmente por anillos conductores, la distribución de corriente es más homogénea en las partes bajas del sistema de bajantes y k_c es más reducido. Esto es válido, especialmente en estructuras altas.

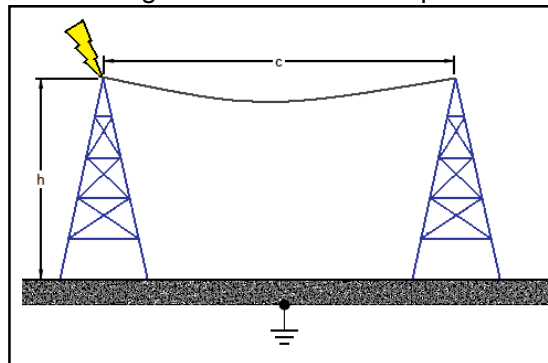
d) Estos valores son válidos para electrodos de tierra simples que tienen resistencias de puesta a tierra muy similares. Si la resistencia de puesta a tierra de los electrodos simples son evidentemente diferentes, se asume $k_c = 1$.

Fuente: NTC 4552-3 anexo C, 2008

La figura 35 muestra que cuando se tienen en el sistema de captación un cable colgante con un esquema de puesta a tierra tipo B, los valores del coeficiente k_c pueden ser hallados por medio de la siguiente fórmula:

$$k_c = \frac{h+c}{2h+c} \quad (3.5)$$

Figura 35. Cable colgante con sistema de puesta a tierra tipo B

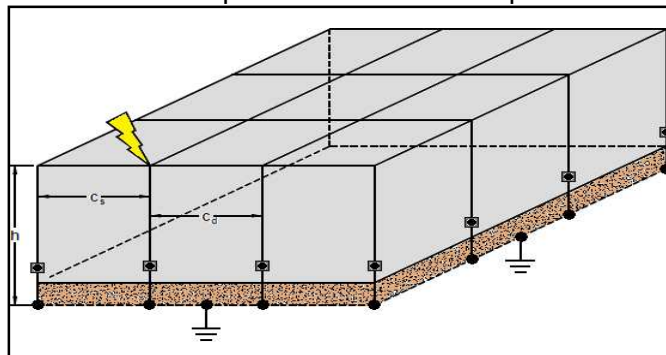


Fuente: NTC 4552-3 anexo C, 2008

Para otro tipo de sistema de captación como el enmallado, que en su diseño presenta una puesta a tierra igual que para la anterior, la fórmula de cálculo para la división de corriente k_c varía con referencia a la anterior apareciendo otro tipo de variables como se muestra:

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2 * \sqrt[3]{\frac{c_s}{h} \sqrt{\frac{c_d}{c_s}}} \quad (3.6)$$

Figura 36. Sistema de captación reticulado con puesta a tierra tipo B.



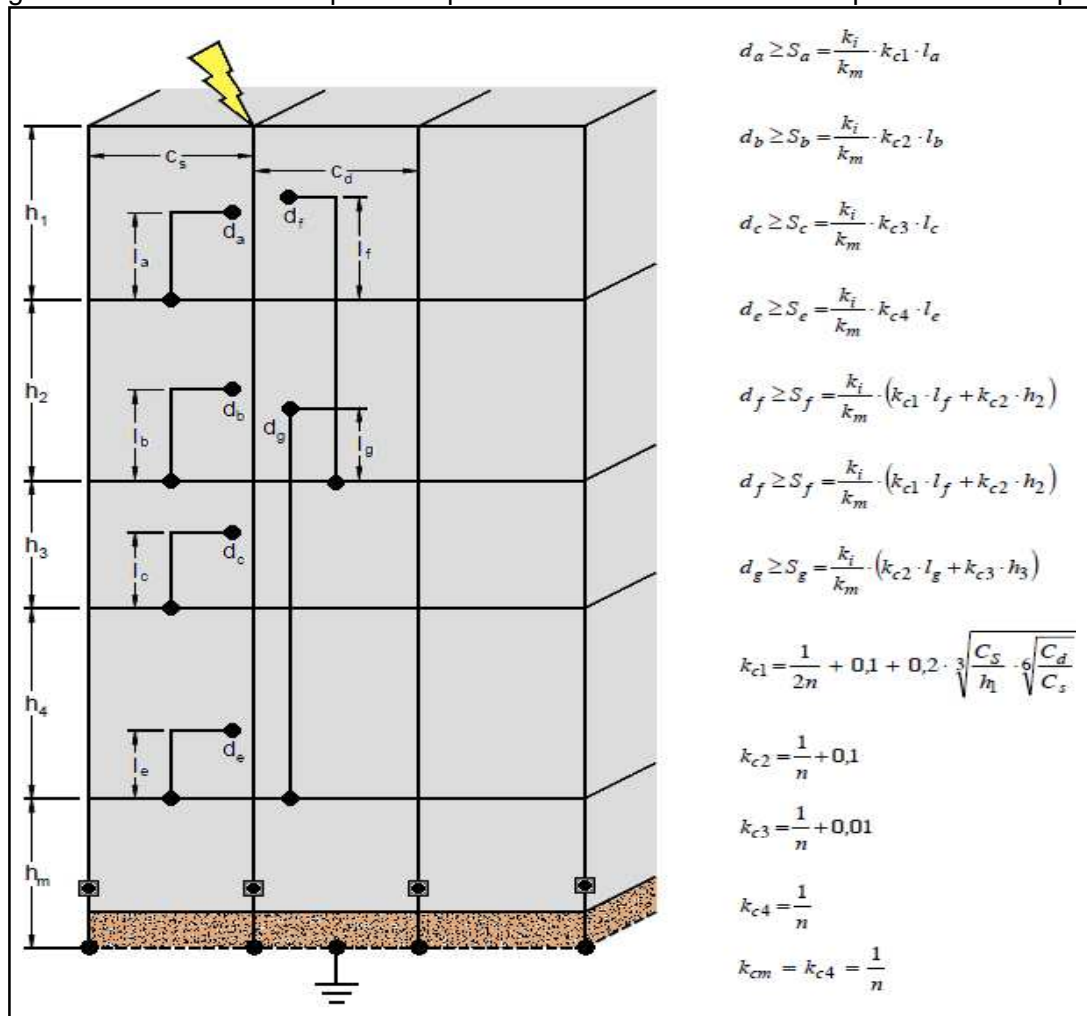
Fuente: NTC 4552-3 anexo C, 2008

Dónde: c_s distancia al bajante siguiente por uno de los lados.
 c_d distancia al bajante siguiente por otro de los lados.
 h espacio entre los anillos conductores (equipotencializadores).
 n número total de bajantes.

Cuando se cuenta con bajantes internos, éstos cuentan en la deducción de k_c .

Ahora, para valorar punto por punto la constante k_c , se tiene para una misma instalación como la presentada en el ítem anterior un anillo interconectando los bajantes a cada nivel.

Figura 37. Distancias de separación para un sistema enmallado con puesta a tierra tipo B



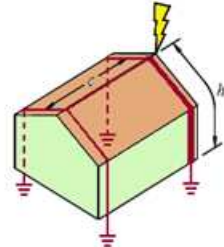
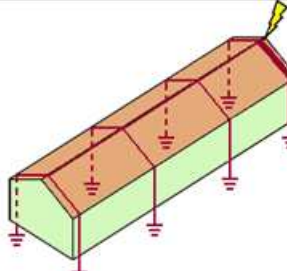
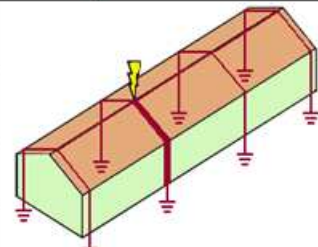
Fuente: NTC 4552-3, anexo C, 2008

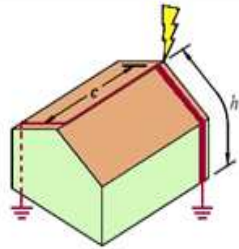
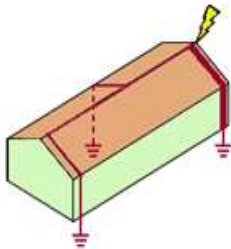
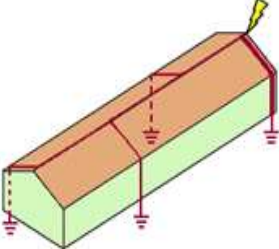
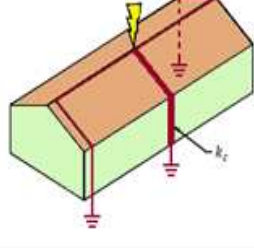
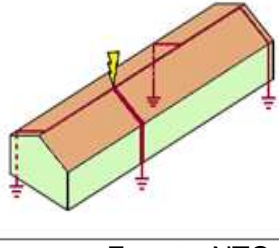
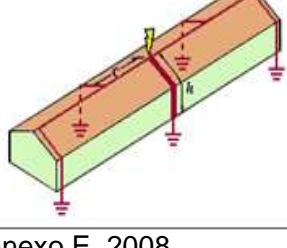
En donde además de las variables ya mencionadas se tiene:

- m número total de niveles de la estructura.
- d distancia al anillo conductor más cercano.
- s distancia de separación.
- l altura sobre el anillo conductor (equipotencialización).

En techos inclinados, se puede hallar el valor de k_c comparando la ubicación de los conductores bajantes y la figura 38, esta aplicación se da igualmente para sistemas de puesta a tierra tipo A:

Figura 38. Valores de k_c para techos inclinados, con elementos de captación en el lomo y puesta a tierra tipo A

| $\frac{c}{h} =$ | k_c | k_c | k_c |
|-----------------|---|-------|-------|
| 0,33 |  | 0,31 | 0,28 |
| 0,50 | | 0,33 | 0,33 |
| 1,00 | | 0,37 | 0,37 |
| 2,00 | | 0,41 | 0,41 |
| 0,33 |  | 0,27 | 0,23 |
| 0,50 | | 0,33 | 0,25 |
| 1,00 | | 0,37 | 0,30 |
| 2,00 | | 0,41 | 0,35 |
| 0,33 |  | 0,21 | 0,20 |
| 0,50 | | 0,24 | 0,23 |
| 1,00 | | 0,29 | 0,29 |
| 2,00 | | 0,35 | 0,35 |

| $\frac{c}{h} =$ | k_c | k_c |
|-----------------|---|-------|
| 0,33 |  | 0,57 |
| 0,50 | | 0,60 |
| 1,00 | | 0,66 |
| 2,00 | | 0,75 |
| 0,33 |  | 0,47 |
| 0,50 | | 0,52 |
| 1,00 | | 0,62 |
| 2,00 | | 0,73 |
| 0,33 |  | 0,44 |
| 0,50 | | 0,50 |
| 1,00 | | 0,62 |
| 2,00 | | 0,73 |
| 0,33 |  | 0,40 |
| 0,50 | | 0,43 |
| 1,00 | | 0,50 |
| 2,00 | | 0,60 |
| 0,33 |  | 0,35 |
| 0,50 | | 0,39 |
| 1,00 | | 0,47 |
| 2,00 | | 0,59 |
| 0,33 |  | 0,31 |
| 0,50 | | 0,35 |
| 1,00 | | 0,45 |
| 2,00 | | 0,58 |

Fuente: NTC 4552-3 anexo E, 2008

Dónde:

- c distancia desde la bajante más cercana a lo largo del lomo.
- h longitud de la bajante desde el lomo hasta el siguiente punto de unión equipotencial o el sistema de puesta a tierra.
- Los valores de k_c mostrados en la figura 38 se refieren a los conductores bajantes representados por una línea gruesa y un punto de impacto del rayo.
- La ubicación de los conductores bajantes (a ser consideradas por k_c) debe ser comparada con la respectiva figura para dicho bajante.
- La relación c/h debe ser determinada. Si dicha relación está determinada entre dos valores, en la columna k_c debe ser hallado mediante interpolación.

Nota: Bajantes adicionales con distancias mayores a las ilustradas en las figura 38, no tienen influencia negativa.

Nota: En el caso de interconectar anillos bajo el lomo, remitirse a la figura 37.

Nota: Los valores están determinados por cálculos simples de impedancias en paralelo siguiendo la figura (35).



3.5 EQUIPOTENCIALIZACIÓN DE CONDUCTORES BAJANTES Y PARTES EXTERNAS METÁLICAS.

La equipotencialización es el proceso mediante el cual se conectan partes conductoras de las instalaciones como: partes metálicas de la estructura, sistemas internos, partes conductoras externas, líneas conectadas a la estructura, equipos o sistemas entre sí, a un sistema de puesta a tierra, mediante una baja impedancia, para que la diferencia de potencial sea mínima entre los puntos interconectados [6].

3.5.1 Uniones equipotenciales contra descargas eléctricas atmosféricas.

Al igual que los sistemas de captación, los sistemas de conductores bajantes deben estar equipotencializados. Dicha equipotencialización se hace entre el SIPRA y las siguientes partes de la estructura: partes metálicas de la estructura, instalaciones metálicas y partes conductoras externas

3.5.1.1 Unión equipotencial para instalaciones metálicas. Éste tipo de unión difiere según el tipo de sistema que se esté implementando, ya sea aislado o no aislado, por lo tanto, para sistemas aislados, la unión equipotencial se hace sólo a nivel de tierra, mientras que para sistemas no aislados, se deben realizar las conexiones de equipotencialización en sótanos a nivel del suelo y en aquellas partes donde los requisitos de aislamiento eléctrico no se cumplan.

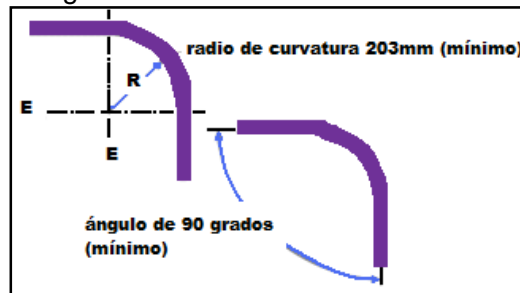
3.5.1.2 Unión equipotencial para partes conductoras externas. Los conductores equipotenciales deberán estar en capacidad de soportar la corriente parcial del rayo calculada en el Anexo A de la NTC-4552,1 para los diferentes valores del nivel de protección contra rayos.

3.6 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCTORES BAJANTES

En cuanto a la construcción del sistema de bajantes es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La longitud debe ser la menor posible, evitando lazos o curvaturas en su trayectoria, si esto es inevitable entonces su ángulo interior no debe ser menor a 90° y su radio de curvatura no menor a 200 mm , así como se presenta en la figura 39.

Figura 39. Curvatura de conductores



Fuente: NTC 4552-3,2008

- Es importante no ubicar bajantes en donde transiten o se congreguen personas frecuentemente ni en los ductos de ascensores o conductos internos de la edificación.
- Es recomendable ubicar un bajante en cada esquina expuesta de la estructura.
- Se deben instalar los bajantes de tal manera que garanticen continuidad eléctrica entre los conductores del sistema de captación aérea.
- Los bajantes no deben instalarse dentro de canaletas de agua aún si éstos están cubiertos con material aislante, ya que la humedad produce corrosión en los conductores.
- Los bajantes se deben ubicar de manera tal que permitan tener un aislamiento eléctrico ó una distancia adecuada entre puertas y escaleras metálicas.
- Para la instalación de los conductores de un sistema de protección externo no aislado se debe tener en cuenta:
 - Si las paredes de la estructura son de un material no combustible, los bajantes pueden ser ubicados sobre la superficie de esta.
 - Si el material de la estructura es combustible y se garantiza que ante un impacto directo el aumento de la temperatura en los bajantes debido al paso de corriente no es peligroso, estos se pueden ubicar en la superficie de la pared.
 - Si el material de la estructura es combustible y a la vez peligroso, los conductores deben ser ubicados a una distancia de la pared de al menos 0,1 m de lo contrario la sección transversal del conductor no debe ser menor a 100 mm^2 .

3.6.1 Estructuras en concreto reforzado. Las estructuras en concreto reforzado son consideradas en la instalación de sistemas de conductores bajantes siempre y cuando se garantice una permanente continuidad¹⁵ en este

¹⁵ Continuidad: La continuidad eléctrica de un sistema es la capacidad que tiene este para conducir la corriente eléctrica.

tipo de estructuras, de ahí que las interconexiones de las barras verticales y horizontales dentro de una estructura están soldadas de forma segura.

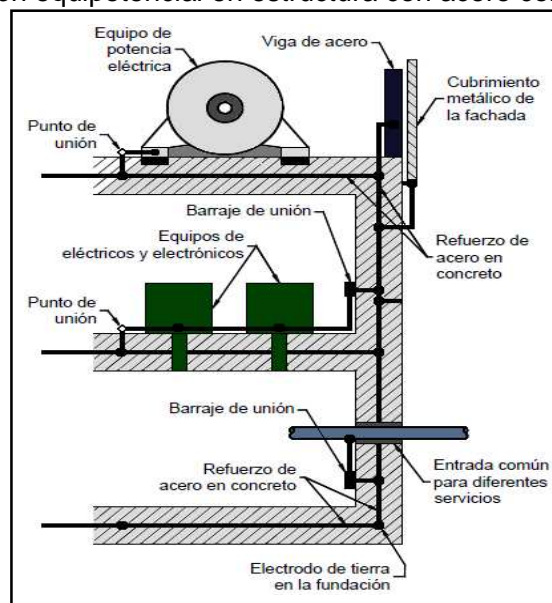
Cuando se usa el acero de los refuerzos en estructuras, se deben realizar pruebas que muestren la continuidad; dichas pruebas se hacen entre la parte superior e inferior de la estructura, midiendo una resistencia no mayor a $0,2 \Omega$; de no obtener este valor, se deben instalar bajantes externos a la estructura.

Al existir diversas rutas paralelas por la cual fluye la corriente del rayo, como las varillas de refuerzo, la impedancia a través de la malla es baja, por lo que la caída de tensión también lo es. Por lo tanto, el campo magnético generado por la corriente en la malla de acero de refuerzo es débil, debido a la baja densidad de corriente y las trayectorias paralelas generando campos electromagnéticos opuestos [6].

3.6.1.1 Utilización del refuerzo del concreto.

- Para una buena conexión del acero reforzado es necesario proveer a este material, conductores de unión o platinas de tierra.
- El uso de cimentación de anclaje o barras de cimentación de máquinas, o aparatos, permiten lograr una ecualización de potencial.
- Este tipo de diseño de SIPRA, debe llevarse a cabo en conjunto con la construcción de la estructura.

Figura 40. Conexión equipotencial en estructura con acero con refuerzo de acero.

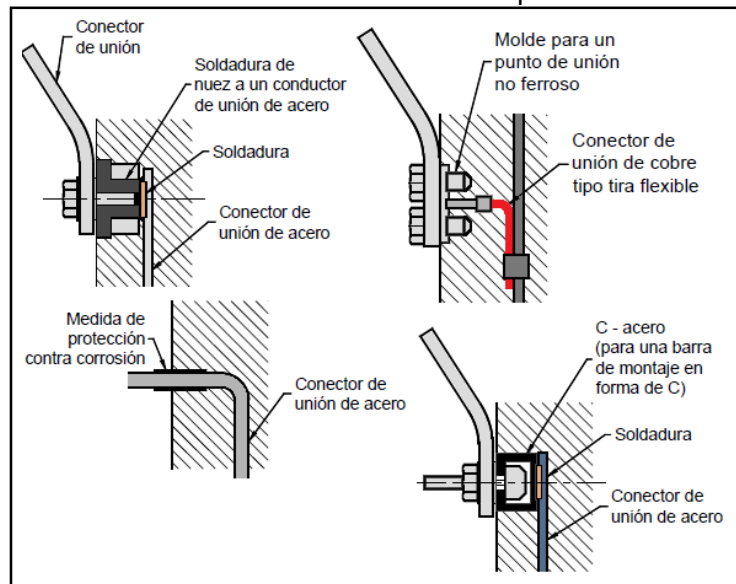


Fuente: NTC 4552-3 anexo E, 2008

3.6.1.2 Soldadura o sujeción a las varillas de acero de refuerzo.

- La continuidad de las varillas se da por medio de la soldadura o sujeción entre ellas o abrazaderas.
- La soldadura se debe hacer sobre una longitud mayor a 30 mm .
- La conexión entre las varillas de refuerzo y el sistema de captación así como la puesta a tierra debe realizarse a través de una platina de tierra que atraviese el concreto o de una varilla externa.
- Se deben usar dos conectores de unión o un conductor de unión con dos abrazaderas cuando las uniones de las varillas de refuerzo son hechas por sujeción.

Figura 41. Puntos de conexión al refuerzo en una pared de concreto reforzado



Fuente: NTC 4552-3 anexo E, 2008

3.6.1.3 Materiales.

- Acero, acero templado, acero galvanizado, acero inoxidable, cobre, son materiales conductores que pueden reforzar el concreto aumentando la protección contra rayos.
- Varillas redondas con diámetros por lo menos de 8 mm con superficie lisa pueden ser usadas como conductores adicionales.
- Varillas de acero galvanizadas que en contacto con el concreto proveen una mayor protección a la corrosión.



3.6.1.4 Corrosión. La corrosión galvánica, es un proceso electroquímico en el que un metal se corroe preferentemente cuando está en contacto eléctrico con un tipo diferente de metal y ambos metales se encuentran inmersos en un electrolito o medio húmedo [12]. Es por ello que se deben tomar medidas de prevención de la corrosión como son:

- Revestimiento de goma de silicona o acabado bituminoso en el punto de salida del muro, este puede hacerse *50 mm* o más, por fuera y dentro de la pared.
- El conductor saliente de la pared en caso en que las condiciones sean extremas debe ser de acero inoxidable.
- Los chazos tipo nuez, o piezas de acero templado, se deben proteger de la corrosión fuera de la pared, usando arandelas que hagan contacto eléctrico a través del acabado protector de la nuez.
- Los conductores de cobre sólido y de revestimiento de PVC o conductores aislados, no presentan riesgo de corrosión.

3.6.1.5 Cimentación como terminales de tierra. La cimentación es el conjunto de elementos estructurales cuyo objetivo es el de transmitir las cargas de la edificación al subsuelo, es por ello, que para grandes estructuras, esta es normalmente reforzada, permitiendo usar las varillas de refuerzo de la cimentación, las placas y hasta las mismas paredes como una gran tierra que en contacto con la superficie del piso, podría formar un excelente electrodo.

En la implementación del sistema de bajantes, es necesario unir las varillas de refuerzo de la cimentación con alambre de acero, a su vez, se debe contar con una malla metálica que unida al acero de refuerzo garantice la conductividad eléctrica de los elementos de la estructura.

3.6.1.6 Uniones de expansión. Normalmente, los materiales de las estructuras se ven expuestos a diferentes factores como la humedad, temperatura del ambiente o tensiones producto de descargas atmosféricas, produciendo en ésta contracción o expansión de los elementos que la constituyen.

Para controlar los movimientos que generan las tensiones producidas en el interior de las estructuras, se recurre a las juntas o uniones de dilatación¹⁶.

¹⁶Unión de Dilatación: elemento que permite movimientos relativos entre dos partes de una estructura.

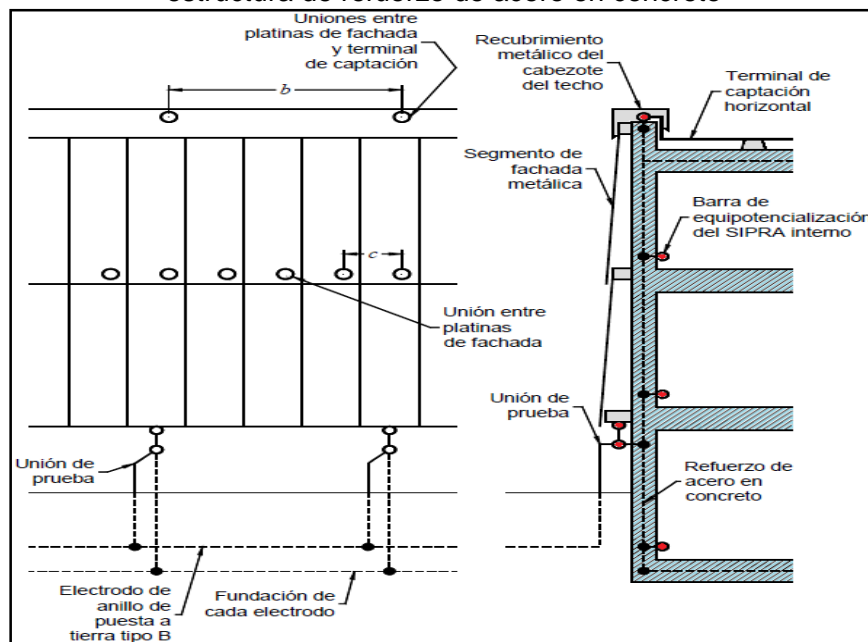
Se debe proveer de conductores de unión entre el refuerzo de las diferentes secciones estructurales a través de las uniones de expansión¹⁷ a intervalos que no excedan 1,5 veces las distancias establecidas en la tabla 12.

Ahora, para lograr una equipotencialización con baja impedancia, y un buen apantallamiento, las uniones expansivas entre las secciones de una estructura deben ser cortadas entre 1,5 m la distancia entre bajantes por conductores flexibles o conductores de unión deslizantes dependiendo del factor requerido para proteger [6].

3.7 COMPONENTES NATURALES DE LOS SISTEMAS DE CONDUCTORES BAJANTES

Así como en los sistemas de captación, se pueden considerar componentes naturales aquellos elementos de la estructura como hormigón, estructuras metálicas de acero, varillas de refuerzo de las paredes o columnas y el armazón estructural de acero siempre que avalen continuidad eléctrica.

Figura 42. Fachada con cubierta metálica con sistema de bajantes naturales en una estructura de refuerzo de acero en concreto



Fuente: NTC4552-3 anexo E, 2008

¹⁷ Juntas de expansión: son aquellas que permiten la expansión los elementos de una estructura dejando un espacio entre elementos contiguos de la estructura.



3.7.1 Elementos metálicos. Siempre y cuando cumplan:

- Continuidad garantizada y durable entre sus partes.
- Cumplimiento de las especificaciones dadas en el (Anexo 3)

3.7.2 Acero de concreto reforzado. sirve como pantalla electromagnética protegiendo los equipos dentro de la estructura y forma el armazón para la equipotencialización del SIPRA interno. Este tipo de elemento es considerado como bajante natural siempre y cuando se cumpla:

- Unión sólida entre todas las interconexiones.
- Garantizar que los esfuerzos mecánicos que se ejercen por las corrientes del rayo no provoquen la ruptura del concreto.
- Las barras verticales deben ser soldadas y sujetadas con abrazaderas o traslapadas mínimo 20 veces su diámetro.
- PREFABRICADO: debe tener una conexión conductora entre los puntos de interconexión de los elementos reforzadores.

3.7.3 Concreto pre-prensado. se debe tener en cuenta en la evaluación del riesgo, debido a conexiones hechas al sistema de protección contra rayos.

3.7.4 Marcos metálicos y/o elementos de fachada.

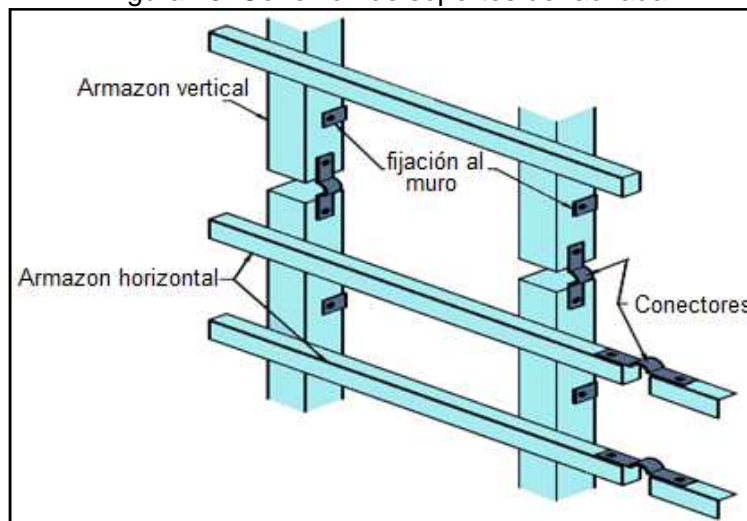
- Si el marco metálico se usa como bajante o el acero reforzado de la estructura, los conductores en anillo no son necesarios.
- Para láminas metálicas o tuberías metálicas, el espesor no debe estar por debajo de 0,5 mm.
- La continuidad eléctrica vertical debe ser firmemente fijada de forma que las fuerzas mecánicas accidentales no causen rompimiento de los conductores.
- FACHADAS METÁLICAS:
 - Las fachadas de hojas metálicas tiene una mayor distribución de corriente respecto a las de concreto reforzado, ya que las láminas, representan paneles equivalentes a 0,6 m del ancho y 1 m de la longitud de la estructura.
 - La máxima expansión térmica de la fachadas puede obtenerse haciendo la diferencia entre la longitud producida sobre ésta a pleno sol aproximadamente +80°C y un mínimo de -20°C.
 - La diferencia de temperatura de 100°C corresponde a la expansión térmica de 0,24 % para el aluminio y de 0,11 % para el acero.

3.8 ESPECIFICACIONES DE LAS CONEXIONES Y UNIONES DE LOS SISTEMAS DE BAJANTES

La técnica de amarrado en estructuras de acero puede significar riesgo, ya que al conducir corrientes de rayo, se pueden generar explosiones originando daños del concreto; sin embargo, al menos cada tercer cable de amarre en la estructura de acero reforzado puede considerarse como un enlace eléctricamente conductivo.

- Las uniones deben ser eléctricamente y mecánicamente seguras.
- Se pueden conectar uniones de prueba en las conexiones de tierra de cada bajante a excepción de los bajantes naturales.
- Cuando se unen diferentes metales se deben usar conectores bimetálicos que eviten la corrosión galvánica.
- El número de uniones a través del conductor debe ser mínima.
- Las conexiones de circuitos externos deben realizarse por medio de soldaduras o abrazaderas.
- Las soldaduras hechas dentro del concreto, deben ser de al menos *30 mm* de longitud y las varillas pasantes deben ser dobladas al menos *50 mm* en paralelo antes de soldar.
- En aquellas partes donde no se pueda usar soldadura, deben usarse grapas o conductores adicionales.
- El material de los conductores adicionales puede ser: acero, acero templado, acero galvanizado, cobre.

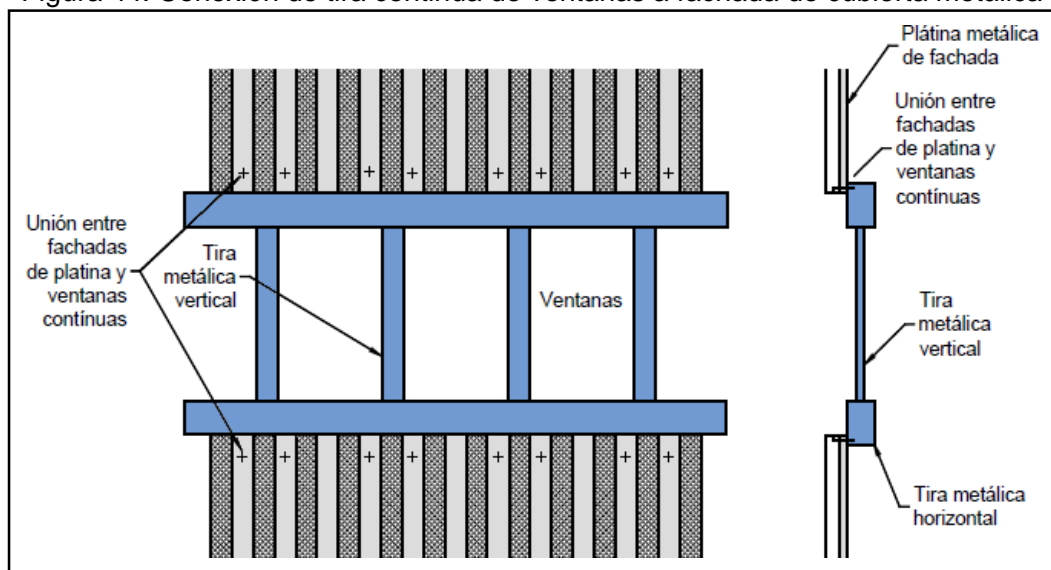
Figura 43. Conexión de soportes de fachada



Fuente: NTC4552-3 anexo E, 2008

- Las varillas de acero del refuerzo, deben ser conectadas a las varillas de refuerzo de los pisos y techo antes de éstos ser instalados.
- Cuando se tienen escaleras, pozos de ascensores, columnas, los conductores bajantes deben ser conectados por medio de varillas de refuerzo distribuyendo uniformemente la corriente del rayo.
- Cuando se tiene construcciones cuya fachada tiene ventanas continuas, se puede realizar la conexión del concreto prefabricado por medio de las columnas existentes o por medio de los tiros de la ventana.

Figura 44. Conexión de tira continua de ventanas a fachada de cubierta metálica



Fuente: NTC 4552-3 anexo E, 2008

- Las barras de acero de unión dentro del concreto reforzado, deben interconectarse por medio de conductores verticales prefabricados de acero templado.

3.8.1 Uniones de prueba. Este tipo de prueba tiene como fin facilitar la medida de la resistencia del sistema de puesta a tierra y verificar la continuidad de las conexiones, instalando puntos de inspección en la unión entre los bajantes y tierra, por lo que en ocasiones para sitios críticos se hace necesaria la utilización de conductores revestidos con chaquetas aislantes.

Las uniones de prueba pueden instalarse dentro o fuera del muro o en cajas de inspección en la tierra fuera de la estructura.



4. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

El sistema de puesta a tierra SPT, comprende toda unión de las partes conductoras de una estructura, elementos metálicos, equipos eléctricos y electrónicos y el sistema interno, mediante cables de una instalación y un conjunto de electrodos que proveen un contacto eléctrico directo con el suelo, dicha unión tiene como objeto eliminar las diferencias de potencial peligrosas producto de una descargas atmosférica permitiendo el paso a tierra de posibles corrientes de falla y aquellas producidas por el fenómeno natural.

La función principal de este sistema es la de dispersar y disipar de forma segura las corrientes de rayo que vienen a través de los conductores bajantes, limitando la formación de tensiones de paso y de toque que puedan afectar a personas y animales que se encuentran dentro o cerca de la estructura y los posibles daños físicos que se puedan producir a la misma.

A continuación se presenta una serie de términos necesarios para el manejo y diseño del sistema de puesta a tierra.

- **Tierra.** Es la parte del terreno en que el potencial eléctrico en todos los puntos es igual a cero.
- **Tierra de referencia.** Parte de la tierra especialmente de la superficie, que está fuera de la zona de influencia de una instalación de toma a tierra, en la que al tomar dos puntos cualquiera no se produzca tensiones originadas por la corriente en la toma de tierra; ésta debe ubicarse por lo menos entre 3 ó 6 veces el alcance vertical de la puesta a tierra.
- **Toma de tierra.** Conexión a tierra de uno o varios componentes conductores que se encuentran en contacto con la superficie del terreno.

Las tomas de tierra pueden ser:

- **Superficiales.** Se hacen a poca profundidad del terreno, aproximadamente hasta 1 m; se puede realizar de forma radial o en malla.
- **Profundidad.** Se introduce picas de tierra de forma vertical a mayor profundidad.
- **Cimientos FE.** Uno ó varios conductores localizados dentro del hormigón de la cimentación que están en contacto con la superficie del suelo.
- **Control CE.** Por su forma y disposición esta asignada al control de potencial, dejando un poco de lado el mantenimiento de una determinada resistencia de propagación.

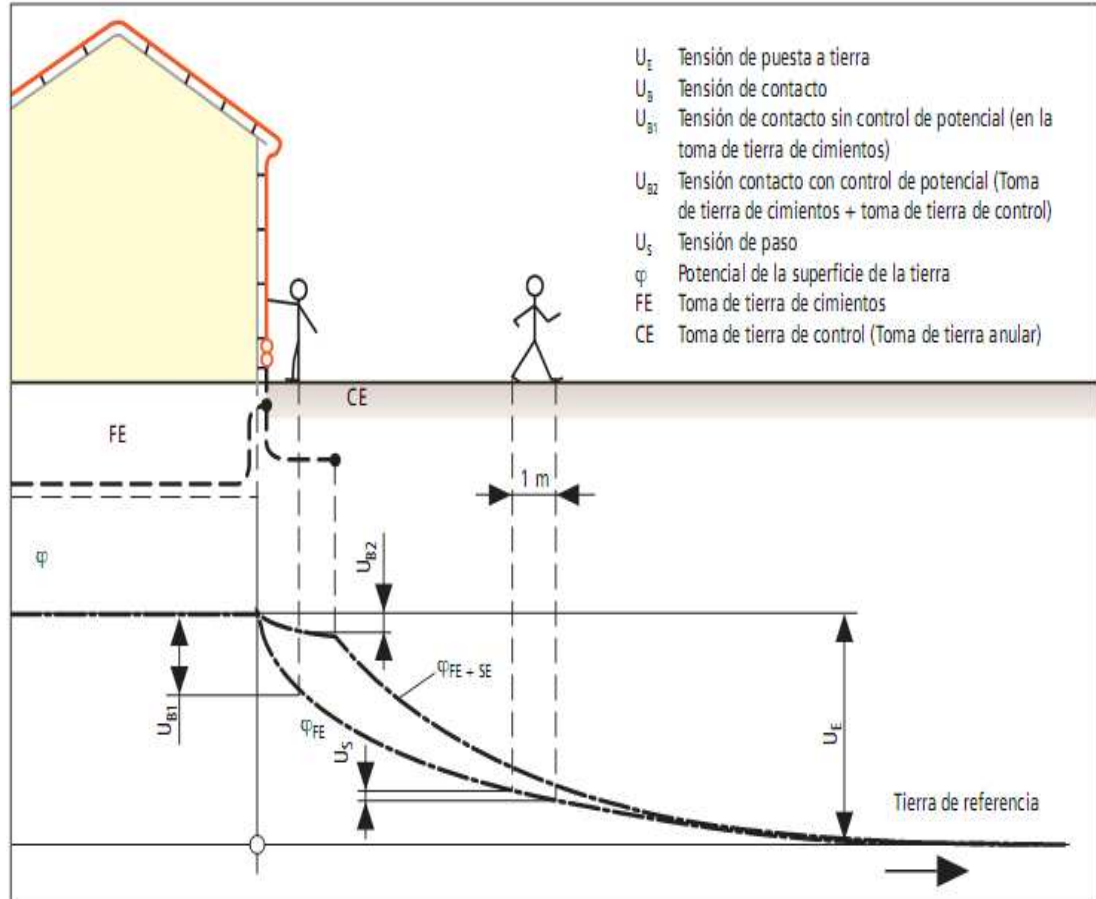


- **Circular.** Sobre o debajo de la superficie de la tierra configura un anillo cerrado alrededor del edificio a proteger.
- **Natural.** Elemento o componente metálico que actúa como componente natural del sistema de puesta de tierra (estructura metálica, tuberías).

Las tomas de tierra se pueden realizarse con conductores planos como pletinas, con conductores de perfil en cruz ó con conductores redondos como varillas.

- **Instalación de toma de tierra.** Formada por un conjunto de piezas metálicas (electrodos de tierra) enterradas en una mezcla especial de sales, unidas eléctricamente entre si y conectada a la instalación eléctrica a través de un cable.
- **Resistencia de tierra R_E** Resistencia eléctrica específica de la tierra dada en Ω que representa $1 m^3$ de tierra.
- **Resistencia de propagación R_A .** Resistencia de la tierra medida entre la toma de tierra y la tierra de referencia.
- **Resistencia de choque de toma de tierra R_{st} .** Resistencia efectiva existente entre la toma de tierra y la tierra de referencia al producirse el paso de corriente del rayo.
- **Tensión de puesta a tierra U_E .** Tensión entre una instalación de toma de tierra y una tierra de referencia.
- **Potencial de la superficie de tierra ϕ .** Tensión existente entre un punto de la superficie de la tierra y la tierra de referencia [2].
- **Tensión de contacto U_B .** Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de $1 m$. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo.
- **Tensión de paso U_S .** Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, aproximadamente $1 m$ [4].
- **Compensación de potencial.** Conexión de instalaciones metálicas y de sistemas eléctricos con el SIPRA a través de conductores.

Figura 45. Potencial en la superficie, tomas de tierra y tensiones cuando están atravesados por la corriente del rayo



Fuente: Manual de protección contra rayos, DEHN

El diseño del sistema de puesta a tierra de protección externo, se debe enfocar hacia la prevención y encause seguro de las consecuencias que deja el fenómeno del rayo; es por ello que se propone una metodología para el diseño del SIPRA basado en la teoría de compatibilidad electromagnética que se ocupa de la inmunidad electromagnética en donde los equipos deben trabajar dentro de un entorno electromagnético sin ser interferidos por otros y en la emisión electromagnética, en donde ningún equipo debe ser fuente de interferencia que afecte a otros equipos.



4.1 ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

En la implementación del sistema de puesta a tierra se debe lograr alcanzar un valor de resistencia menor a los 10Ω , una baja frecuencia y la eliminación total de bucles que produzcan tensiones inducidas en la estructura; además de ello, este debe contar con una serie de elementos como son:

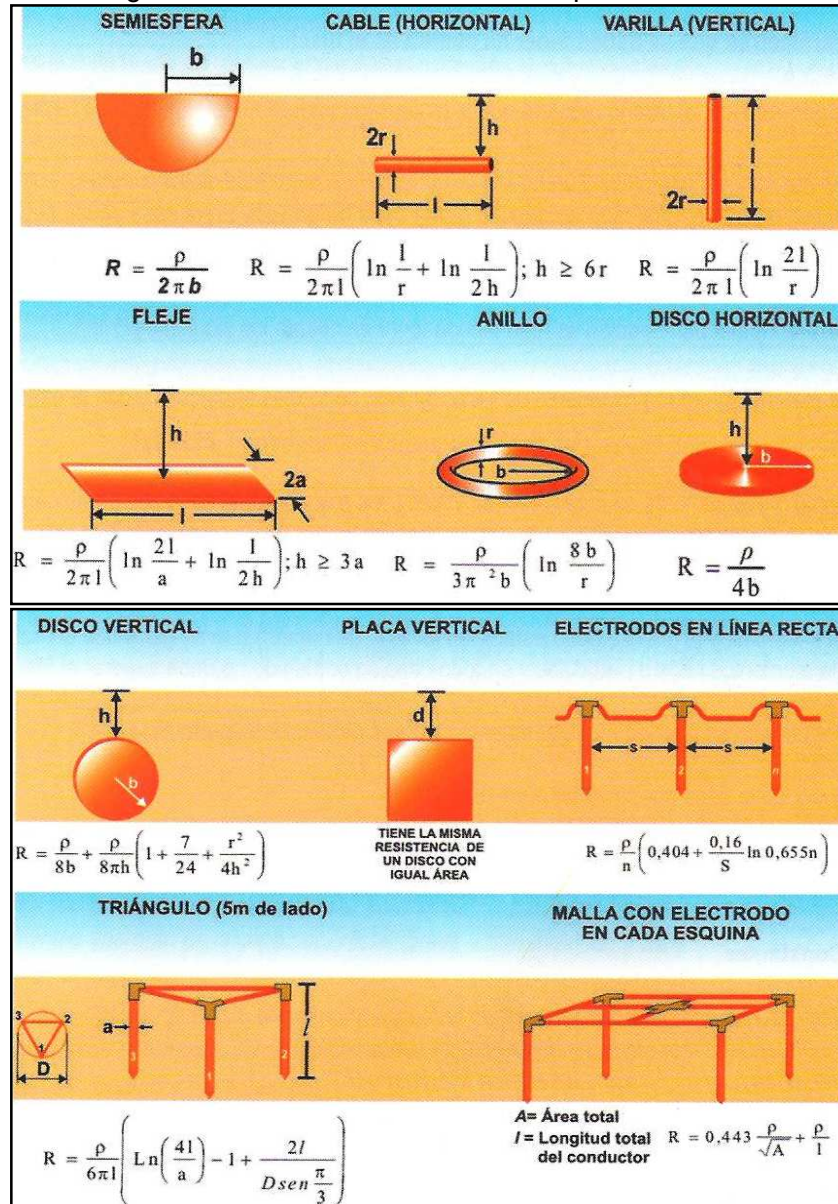
- Tomas de tierra.
- Anillos de enlace.
- Punto de puesta a tierra.
- Líneas principales de tierra.

4.1.1 Tomas de tierra. Las tomas de puesta a tierra están formadas por los siguientes elementos:

4.1.1.1 Electroodos. Los electroodos son elementos metálicos que permanecen en contacto directo con el terreno; estos elementos permiten establecer una conexión eléctrica con el suelo. Según su estructura, pueden ser varillas, tubos, placas o un cable, resistentes a la humedad y a la acción química [12].

- **Placas.** De cobre o hierro zincado, de al menos 4 mm de grosor y una superficie útil nunca inferior a $0,5 \text{ m}^2$. Se ubican de forma vertical de modo que quede enterrada su arista superior como mínimo a 50 cm bajo la superficie del terreno. Cuando se tienen varias placas, éstas se ubican con una distancia de separación de 3 m .
- **Varillas o picas.** Tubos de acero zincado de 60 mm de diámetro mínimo, o de cobre de 14 mm de diámetro, con longitudes no menores a los 2 m . Cuando se tienen varias picas, la distancia entre ellas debe ser por lo menos igual a su longitud.
- **Conductores enterrados.** Cables de cobre desnudo de al menos 35 mm^2 de sección, o cables de acero galvanizado de un mínimo de $2,5 \text{ mm}$ de diámetro. Éste tipo de conductores deben estar enterrados horizontalmente a una profundidad no inferior a los 50 cm .
- **Mallas metálicas.** Es la interconexión de varios electroodos del mismo tipo unidos entre si y ubicados bajo la superficie de la tierra.

Figura 46. Elementos del sistema de puesta a tierra



Fuente: Tierras, soporte de la seguridad eléctrica. Favio Casas Ospina

Donde:

- a* ancho de la malla.
- b* largo de la malla.
- l* dimensiones de la retícula.
- ρ resistividad del terreno.
- h* profundidad de la malla.
- d* diámetro del conductor.
- R* resistencia de la puesta a tierra.



Pueden existir distintos potenciales entre dos placas de metal enterradas debido a que la tierra no tiene la misma resistividad¹⁸ en todos los puntos. Es por ello que se pueden originar campos electromagnéticos generados por la corriente de descargas a través del dispositivo de captación y los electrodos de la toma de tierra que afectará negativamente los aparatos electrónicos que se encuentren en el edificio. De ahí la importancia de protecciones secundarias.

4.1.2 Anillos de enlace. Electrodo que forman un lazo cerrado alrededor de la estructura interconectando los bajantes para distribuir las corrientes de rayo. Suelen ser de cobre de al menos 35 mm^2 de sección.

4.1.3 Punto de puesta a tierra. Punto situado dentro de una cámara, que sirve de unión entre el anillo de enlace y las líneas principales de tierra.

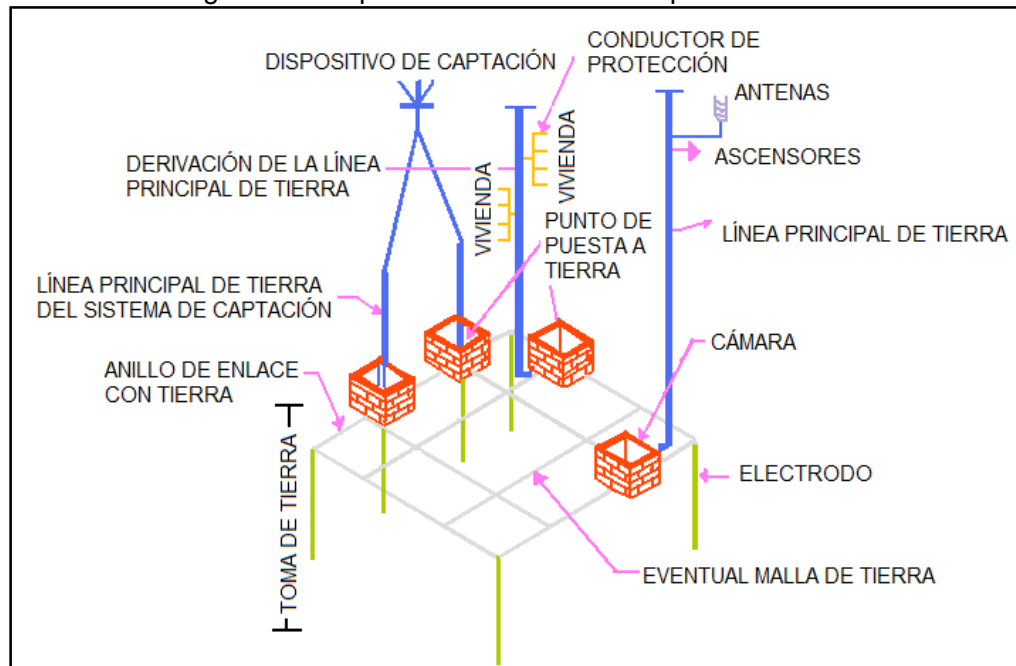
4.1.4 Líneas principales de tierra. Conductores que unen el sistema de captación con los puntos de puesta a tierra. Es necesario conectar a los puntos de toma de tierra todas las tuberías metálicas de agua y gas, así como canalones y cubiertas metálicas que pudieran ser alcanzadas por un rayo.

Para reducir los efectos inducidos, estos conductores deben tener una distancia de separación mínima de 30 m , y cualquier parte metálica del edificio no conductora de corriente estará a un mínimo de $1,8 \text{ m}$.

En el diseño del sistema de puesta a tierra, es importante una buena selección del electrodo, la profundidad de enterramiento y la ubicación de los mismos, ya que estos factores son efectivos en la estabilidad del valor de la resistencia de puesta a tierra; en cuanto a la profundidad, esta debe ser tal que reste los efectos de la corrosión por lo que en condiciones climáticas extremas, el primer metro de un electrodo vertical no es efectivo, finalmente respecto a su ubicación, éstos deben estar a una distancia segura de los conductores externos ubicados en tierra y de las salidas de la estructura. Ahora en el caso de conductores naturales en donde el metal de refuerzo también se usa como conexión a tierra, se debe considerar un gran tamaño, medidas, conexión y espesor de las varillas.

¹⁸ Resistividad: relación entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo.

Figura 47. Esquema de un sistema de puesta a tierra



Fuente: Protección contra descargas atmosféricas. Juan Ignacio Arribas

4.2 PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE LAS TIERRAS

El subsuelo o tierra posee propiedades físicas que definen el comportamiento del mismo ante la presencia de fenómenos eléctricos y magnéticos, dicho comportamiento depende de los minerales, forma, volumen y relleno de los poros o capas terrestres, de ahí que las propiedades físicas se expresen a través de magnitudes físicas como son [7]:

- Resistividad eléctrica ρ .
- Conductividad eléctrica σ .
- Constante dieléctrica ϵ .
- Permeabilidad magnética μ .

4.2.1 Resistividad del suelo. La resistividad del suelo se puede interpretar como la medida de la dificultad u oposición que la tierra hace ante el paso de la corriente eléctrica; ésta magnitud física presenta una de las mayores variaciones en cuanto a la amplitud, ejemplo de ello es la resistividad del polietileno ya que esta supera la del cobre en 23 órdenes de magnitud, en cuanto al suelo, su resistividad depende de la clase de terreno, como se indica en la tabla 17.

Tabla 17. Resistividad del suelo

| CLASE DE TERRENO | RESISTIVIDAD ρ (Ωm) |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Tierra pantanosa | 50 |
| Tierra arcillosa húmeda | 100 |
| Tierra arcillo – arenosa húmeda | 200 |
| Tierra arenosa seca | 1 000 |
| Tierra de arenisca dura | 2 000 |
| Suelo con estrato de roca | 10 000 |
| Petróleo | 10^{16} |

Fuente: Tierras, soporte de la seguridad eléctrica. Favio Casas Ospina

Ahora, la resistencia para un conductor alargado, homogéneo y de forma cilíndrica esta dado por:

$$R_c = \rho * \frac{l}{s} \quad (4.1)$$

Dónde: R_c resistencia en Ω .
 ρ resistividad del terreno $\Omega\cdot m$.
 l longitud del conductor en metros.
 s sección transversal en m^2 .

Tabla 18. Resistencia de los electrodos de puesta a tierra

| TIPO DE ELECTRODO | RESISTENCIA DE LA TIERRA (Ω) |
|--|---------------------------------------|
| Placa vertical | $R = 0,8 * \rho_a / P$ |
| Pica vertical | $R = 2 * \rho_a / L$ |
| Conductor enterrado horizontalmente | $R = 2 * \rho_a / L$ |
| ρ_a = resistividad media del terreno (Ωm) P = perímetro de la placa L = longitud de la pica o cable (m) | |

Fuente: Protección contra descargas atmosféricas. Juan Ignacio Arribas

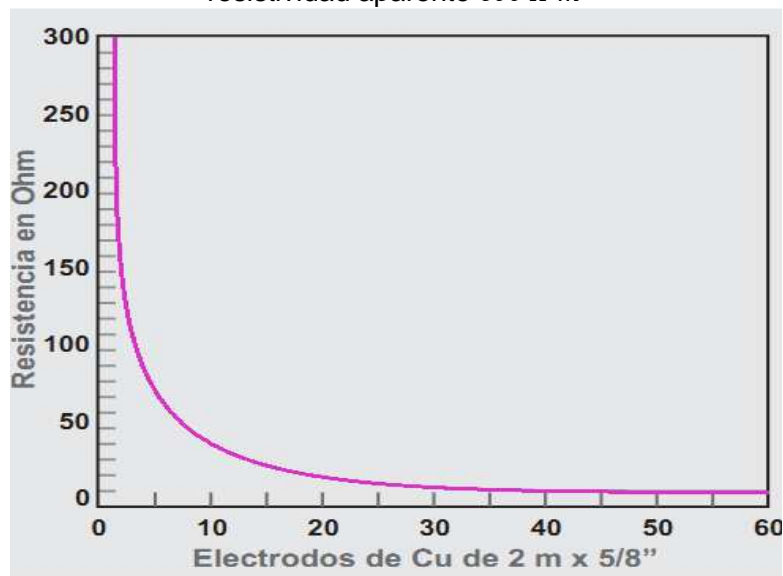
Contrario a la resistividad, la conductividad es la facilidad del paso de corriente a través de un material determinado, por lo que numéricamente es inversamente proporcional y se representa así:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.2)$$

4.2.1.1 Métodos para la reducción de la resistencia eléctrica. Existen varios métodos que ayudan a la reducción de la resistencia eléctrica, sin embargo, todos ellos presentan un punto de saturación por lo que es importante escoger el mejor, estos son:

- **Aumento de número de electrodos en paralelo.** Al tener varios electrodos en paralelo disminuye el valor de la resistencia equivalente, pero esta reducción presenta un comportamiento en forma de curva asintótica a partir del 6^{to} electrodo por lo que dicha reducción no es lineal.

Figura 48. Reducción de resistencia por aumento de número de electrodos en paralelo; resistividad aparente $600 \Omega\text{-m}$



Fuente: Manual de puestas a tierra. THOR-GEL

- **Aumento de la longitud y diámetro de los electrodos.** La longitud de los electrodos de puesta a tierra está relacionada directamente con la resistividad del suelo y por ende con la profundidad de las capas terrestres, de ahí, que se busque instalar el electrodo en la capa con menor resistividad. En cuanto al aumento del diámetro, este debe ser significativo para tener una disminución en la resistencia.
- **Aumento de la distancia entre eje de los electrodos.** Normalmente la distancia entre ejes de los electrodos es $\geq 4l$ en donde l es la longitud del electrodo, sin embargo, para obtener un valor de resistencia bajo, esta distancia puede ser mayor dependiendo del área del terreno con que se cuente.



- **Cambio del terreno.** Se puede dar parcial o totalmente, ya que se pueden suprimir terrenos de alta resistividad por unos de baja ricos en sales naturales; uno de los procedimientos que se hacen es el de zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio de terreno debe bastar para que el electrodo tenga tanto en su contorno como fondo de 0 a 0,50 m de buen terreno, asimismo, se debe realizar una buena compactación y los electrodos deben estar limpios en el momento de su ubicación.

- **Tratamiento químico del suelo.**

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del sistema de puesta a tierra (SPT). Para elegir el tratamiento químico de un SPT se deben considerar los siguientes factores:

- Facilidad para su aplicación.
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos de SPT).
- Facilidad en su reactivación.
- Estabilidad.

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características.

- Higroscopicidad¹⁹.
- Alta capacidad de gelificación²⁰.
- No ser corrosivas.
- Alta conductividad eléctrica.
- Químicamente estable en el suelo.
- No ser toxico.

Ninguna sal en estado seco es conductiva, para que los electrolitos de las sales conduzcan corriente se deben convertir en soluciones, las más usuales son:

- Cloruro de sodio + carbón vegetal.
El cloruro de sodio forma una solución muy conductiva que penetra fácilmente el terreno y el carbón se encarga de absorber humedad reteniendo junto a esta algunos de los electrolitos del cloruro de sodio.
- Bentonita sódica.
En comparación con la bentónica cálcica, la bentonita sódica mejora el contacto entre los electrodos y el terreno, posee mejores propiedades

¹⁹ capacidad de los materiales para absorber la humedad atmosférica.

²⁰ La gelificación es un proceso donde los componentes se estabilizan a temperatura ambiente mediante la adición de diversos agentes

eléctricas, tiene una mayor capacidad de absorción de agua y un valor de PH mayor que favorece la formación de un ambiente suficientemente alcalino que evita la corrosión de los elementos de un SPT.

4.3 CONFIGURACIONES DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

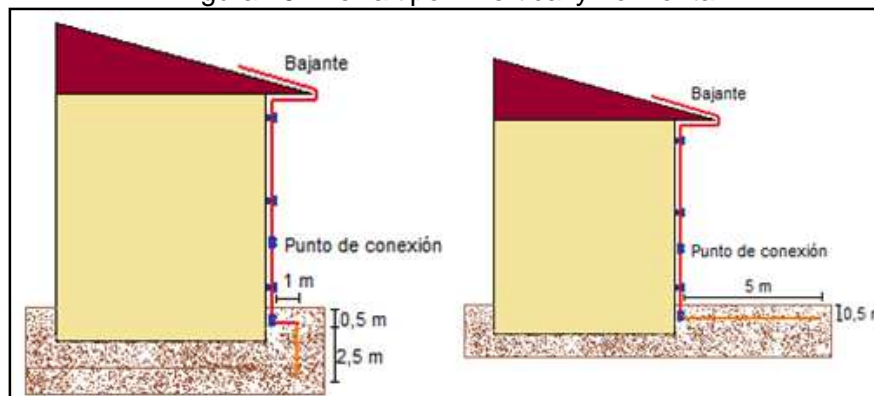
La norma NTC 4552-3, 2008 presenta dos tipos de configuraciones del sistema de puesta a tierra los cuales se rigen por el tipo de instalación y el tipo de estructura a proteger.

Haciendo referencia a los dos tipos de configuraciones, la configuración tipo A tiene como función principal la de conducir la corriente del rayo dentro de la tierra, mientras que la configuración tipo B además de conducir la corriente del rayo dentro de la tierra, crea una unión equipotencial entre los bajantes y ejerce control de potencial en la vecindad de los muros conductivos del edificio.

4.3.1 Configuración tipo A ó radial. Este tipo de configuración es implementado para estructuras de poca altura como casas familiares ó aquellas en las que después de su construcción se le desea implementar protección externa contra rayos, además de aplicarse en SIPRA aislados con varillas o cables extendidos dispuestos en forma horizontal.

Para su instalación de toma de tierra se usan electrodos verticales (varillas) y horizontales (contrapesos) externos a la estructura y conectados a cada conductor bajante, su número no debe ser inferior a 2; además de ello, si se tiene un anillo conductor en contacto con el suelo por lo menos en un 80% de su longitud, éste puede ser clasificado como tipo A.

Figura 49 .Tierra tipo A vertical y horizontal

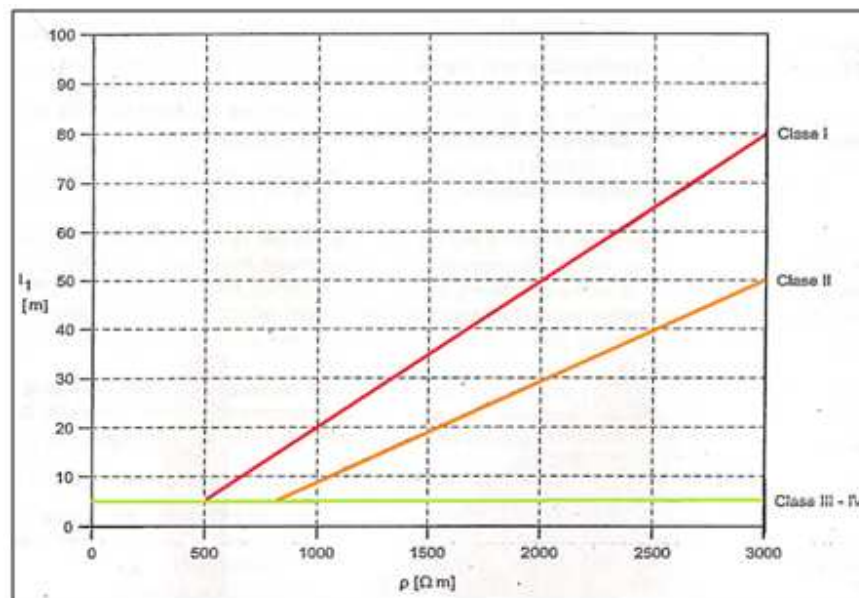


Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

La longitud mínima de los electrodos está estrechamente relacionada con el nivel de protección de la estructura y con la resistividad del terreno como se indica en la figura 50; ahora, cuando se tiene electrodos horizontales, la longitud mínima de éstos es de l_1 , mientras que para electrodos verticales o inclinados su longitud mínima es de $0,5 l_1$; en una combinación de electrodos tanto verticales como horizontales se debe conservar la longitud total de cada uno de estos.

Cuando se logra una resistencia de puesta a tierra menor a 10Ω a una frecuencia diferente a la industrial, se puede hacer caso omiso de las longitudes mínimas de los electrodos.

Figura 50. Longitud mínima de cada electrodo de acuerdo con la clase del NPR

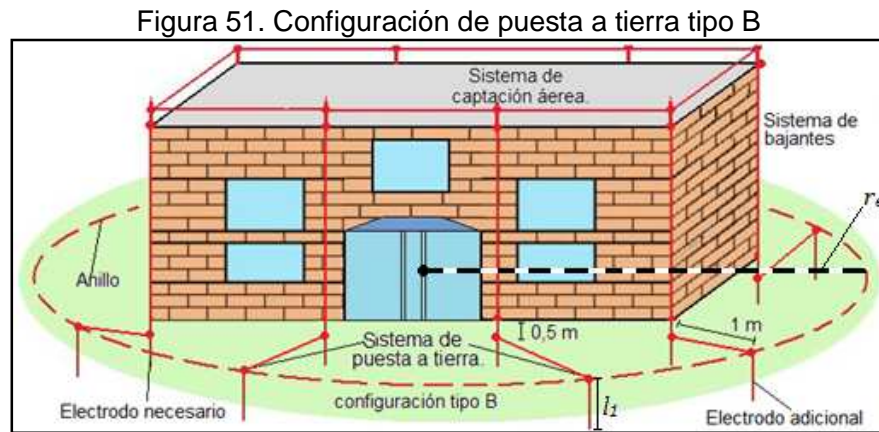


Fuente: NTC 4552-3, 2008

4.3.2 Configuración tipo B ó anillo. Este tipo de configuración se usa en estructuras con material aislante como madera ó ladrillo sin cimentación de acero reforzado, SIPRA con diferentes bajantes, sistemas de captación enmallados y cuando se tienen terrenos como roca sólida.

Consiste en un anillo de puesta a tierra externo a la estructura en contacto con el suelo en un 80% de su longitud total ó en electrodos de cimentación enmallados dispuestos alrededor de la estructura. Dicho anillo debe tener un radio r_e no menor a l_1 ($r_e \geq l_1$); cuando esta condición no se cumple, es necesario conectar al anillo de tierra electrodos horizontales de longitud l_r ó electrodos verticales con longitud l_v , para ello es necesario tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$l_r = l_1 - r_e \quad (4.3) \quad l_v = \frac{(l_1 - r_e)}{2} \quad (4.4)$$



Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

4.4 SOBRETENSIONES DEBIDAS A IMPACTOS DIRECTOS DEL RAYO EN LA ESTRUCTURA

El fenómeno natural del rayo, desencadena una serie de eventos los cuales se deben saber interpretar y posteriormente a ello controlar, uno de estos eventos, es la circulación de corriente de rayo en partes conductoras externas y acometidas de servicio; la cual se debe conducir a tierra de forma directa ó a través de DPS.

Ésta corriente parcial de rayo se define como:

$$I_f = k_e * I \quad (4.5)$$

Dónde: k_e Proporción de la corriente del rayo por partes conductoras externas ó acometidas de servicio conectadas a la estructura.
 I corriente del rayo.

De igual forma, la proporción de corriente del rayo k_e depende de factores como son [6]:

- Número de acometidas o partes conductoras externas equipotencializadas.
- Resistencia de puesta a tierra.
- Puesta a tierra del sistema de protección contra rayos.

Ahora, cuando se tiene acometidas o partes conductoras subterráneas, k_e será igual a:



$$k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z * (n_1 + n_2 * \frac{Z_1}{Z_2})} \quad (4.6)$$

Para acometidas aéreas k_e será igual a:

$$k_e = \frac{Z}{Z_1 + Z * (n_2 + n_1 * \frac{Z_1}{Z_2})} \quad (4.7)$$

Donde: Z Impedancia convencional a tierra del sistema de protección contra rayos.
 Z_1 Impedancia convencional a tierra de las partes externas o líneas enrutadas bajo tierra.
 Z_2 Resistencia de puesta a tierra del arreglo de líneas aérea.
 n_1 Número global de partes externas o acometidas subterráneas.
 n_2 Número global de partes externas o acometidas aéreas.

- La Impedancia convencional a tierra del sistema de protección contra rayos Z , es considerada en la tabla 19.

Tabla 19. Valores convencionales de puesta a tierra Z y Z_1 en función de la resistividad del suelo

| ρ (Ωm) | Z_1 (Ω) | IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA CONVENCIONAL EN RELACIÓN CON EL TIPO DE SIPRA $Z(\Omega)$ | | |
|-----------------------|--------------------|---|----|----------|
| | | I | II | III - IV |
| ≤ 100 | 8 | 4 | 4 | 4 |
| 200 | 13 | 6 | 6 | 6 |
| 500 | 16 | 10 | 10 | 10 |
| 1 000 | 22 | 10 | 15 | 20 |
| 2 000 | 28 | 10 | 15 | 40 |
| 3 000 | 35 | 10 | 15 | 60 |

NOTA: Los valores reportados en esta tabla, están referidos a la impedancia de puesta a tierra convencional de un conductor enterrado bajo condiciones de impulso (10/350 μs)

Fuente: NTC4552-3 anexo A, 2 008

- En cuanto al valor de la existencia de puesta a tierra del arreglo de líneas aéreas Z_2 , si no es conocido su valor, se puede tomar los valores de resistividad del punto de puesta a tierra presentes en la tabla 19.



- De no ser posible el cálculo de la proporción de la corriente del rayo por partes conductoras externas ó acometidas de servicio conectadas a la estructura k_e se presenta a continuación una forma simplificada del cálculo de dicha variable.

$$k_e = \frac{0,5}{(n_1+n_2)} \quad (4.8)$$

- Cuando no hay apantallamiento de las líneas que entran a la estructura a proteger, o no se encuentran enrutadas en tuberías metálicas, cada uno de los conductores llevarán una proporción de corriente del rayo k_e igual a:

$$k_e' = \frac{k_e}{n'} \quad (4.9)$$

- Para líneas apantalladas, y que previamente han sido equipotencializadas, el cálculo de k_e se remite a la siguiente ecuación:

$$k_e' = \frac{k_e * R_s}{n' R_s + R_c} \quad (4.10)$$

Donde: R_s Resistencia por unidad de longitud del apantallamiento.
 R_c Resistencia por unidad de longitud del conductor interno.
 n' Número de conductores de una línea apantallada.

- **Factores que influyen el comportamiento de la corriente parcial de rayo en redes eléctricas:** Diferentes factores pueden influir en la distribución y forma de onda de corrientes parciales de rayo en los conductores de la acometida eléctrica
- La longitud del conductor
 - La diferencia en la impedancia del neutro y los conductores de fase.
 - Las diferentes impedancias de los transformadores, factor que no es tenido en cuenta cuando éstos están protegidos por DPS en los bornes.
 - La relación entre la resistencia de puesta a tierra convencional del transformador y la de los consumidores, ya que una menor impedancia en el transformador hace que fluya mayor corriente hacia este.
 - Si un conductor n está múltiplemente aterrizado, éste tendrá una baja impedancia en comparación con los demás conductores.

4.5 SECCIÓN TRANSVERSAL MÍNIMA DE LA PANTALLA DEL CABLE DE ENTRADA PARA EVITAR CHISPAS PELIGROSAS

Las chispas peligrosas son consecuencia directa de sobretensiones entre conductores de fase y la pantalla del cable debido a corrientes de tipo descarga

atmosférica; es por ello, que factores como material, longitud, posición del cable y dimensiones de la pantalla son importantes a la hora del diseño.

En cuanto a la sección transversal mínima de la pantalla del cable, esta puede calcularse a través de la ecuación (4.11).

$$S_{\text{mín}} = \frac{I_f * \rho_c * L_c * 10^6}{U_c} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4.11)$$

Dónde: I_f Corriente que fluye por la pantalla en (kA)
 ρ_c Resistividad de la pantalla en (m).
 L_c Longitud del cable en (m).
 U_c Soportabilidad al impulso de tensión del sistema eléctrico, electrónico alimentado por el cable en (kV).

Siendo I_f la corriente que fluye a través de la pantalla, presenta límites partiendo de la premisa si el cable está apantallado o no lo está, como se indica a continuación:

- Cables apantallados, $I_f = 8S$
- Cables no apantallados, $I_f = 8n'S'$

Dónde: n' número de conductores.
 S sección transversal de la pantalla en mm^2 .
 S' sección transversal de cada conducto en mm^2 .

La longitud del cable L_c es considerada a través de la tabla 20:

Tabla 20. Longitud del cable que debe ser considerada de acuerdo con la disposición de la pantalla.

| DISPOSICIÓN DE LA PANTALLA | L_c |
|--|--|
| En contacto con un suelo de resistividad | $L_c \leq 8\sqrt{\rho}$ |
| Aislada del suelo ó en el aire | Distancia L_c entre la estructura y los puntos más cercanos de conexión a tierra ó a la pantalla |

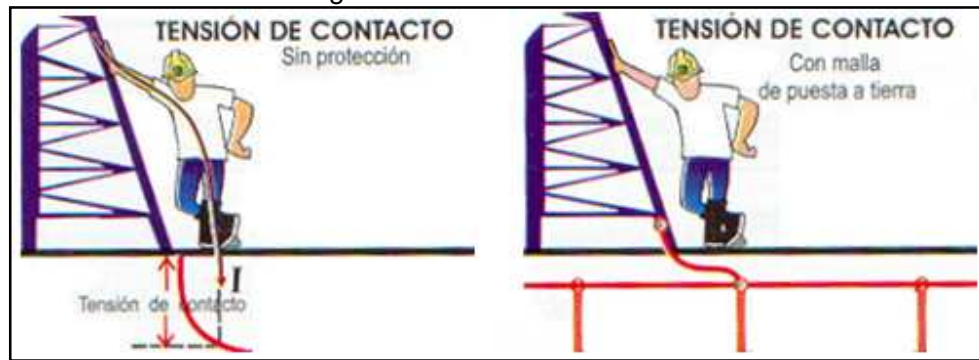
Fuente: NTC 4552-3, anexo B, 2008

4.6 MEDIDAS DE PROTECCIÓN CONTRA TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO

Las tensiones de paso y de contacto dentro de la estructura a proteger y en las proximidades de los derivadores, generan un peligro inminente para las personas, aún cuando se haya hecho un diseño acorde a lo estipulado en la NTC 4552-3. Es por ello que se hace necesario tomar medidas especiales como son controles de potencial y aislamiento de los emplazamientos para limitar dichas tensiones.

➤ **Tensión de contacto.**

Figura 52. Tensión de contacto



Fuente: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. RETIE 2009

Tensión que actúa sobre una persona al tener contacto con una superficie conductora; la vía de corriente va desde la mano, a través del cuerpo hasta pasar por los pies.

Para estructuras de acero o de hormigón armado y en el caso de fachadas metálicas, no existe riesgo de un elevado valor de tensión de contacto siempre y cuando el armado esté interconectado entre sí, al igual si las fachadas se utilizan como componentes naturales del sistema de bajantes y está conectada a la toma de tierra de cimiento actuando como controlador de potencial.

Sin embargo, para otro tipo de estructuras es importante tomar las siguientes medidas:

- Aislamiento del conductor bajante garantizado mediante una prueba de impulso de 100 kV a $1,2/50\mu\text{s}$. Por ejemplo polietileno reticulado de 3 mm de espesor.
- Ubicación de los conductores bajantes en zonas de poca concurrencia de personas.

- c. Señalización, restricción, o bloqueo que indique que no debe haber ningún contacto por parte de las personas con los derivadores
- d. Lograr que la resistencia de la capa del suelo a una distancia de 3 m alrededor del bajante no sea menor de $5\ 000\ \Omega\text{m}$; esto es posible si se coloca una capa de de asfalto de 5 cm de espesor o una capa de grava con un grosor de 15 cm sobre la superficie del suelo.
- e. Reducir el reticulado de la malla de puesta a tierra, mediante el control de potencial [2].

➤ **Tensión de paso.**

Figura 53. Tensión de paso



Fuente: Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. RETIE 2009

Esta tensión puede aparecer en un cuerpo humano al dar un paso de 1 m de longitud y la vía de corriente fluye a través del cuerpo desde un pie hasta otro pie. La tensión de paso decrece al aumentar la distancia de separación entre las personas y el edificio, sin embargo, al igual que en la tensión de contacto, aquí se hace necesario adoptar medidas que reduzcan los riesgos latentes producto de este tipo de tensión, dichas medidas son las descritas anteriormente en los incisos c, d, e.

En cuanto al manejo del control de potencial, la disposición de anillos concéntricos de equipotencialización permiten alcanzar una caída de tensión sobre la superficie a proteger de $1\ \Omega/\text{m}$, evitando así daños a seres vivos debido a tensiones de paso y contacto.

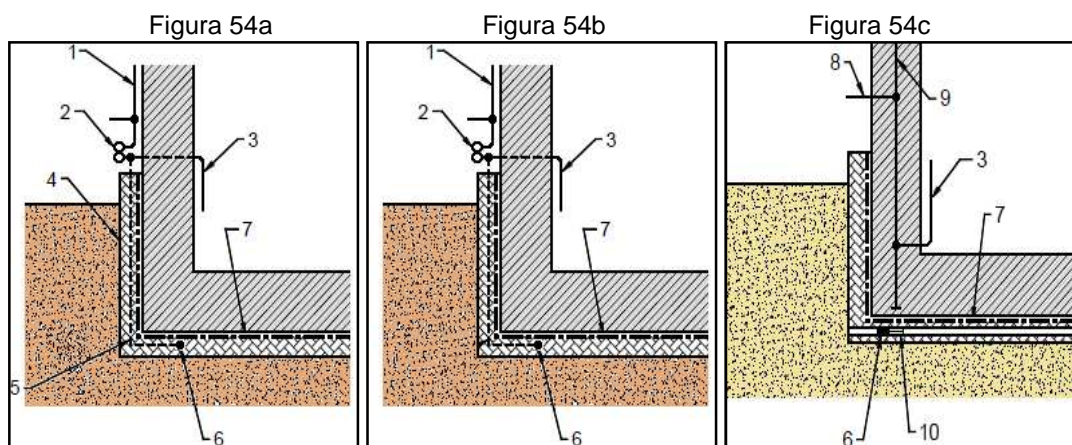
4.7 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

4.7.1 Electrodo de puesta a tierra de cimentación. Consiste en una malla de tamaño no superior a los 10 m, que consta de conductores instalados en la cimentación de la estructura bajo tierra; estos electrodos son puestos dentro del concreto lo que permite tener una protección contra la corrosión, sin embargo, debido a una tensión galvánica de aproximadamente 1 V, se genera una corrosión electroquímica que disuelve el acero en el suelo al producirse el paso de corriente a través de éste y el concreto húmedo; es por ello que se hace necesario utilizar electrodos de puesta a tierra de cobre o conductores limpios de acero en los puntos de conexión con el acero del concreto.

Los conductores conectados a los bajantes son ubicados dentro de la pared y unidos a los electrodos de cimentación, éstos deben estar aislados del agua del subsuelo (nivel freático²¹) y además de ello se debe aplicar una capa impermeabilizante al exterior de la superficie de la cimentación para dar un mayor aislamiento eléctrico.

En la práctica, en la parte más profunda del pozo de cimentación, se vierte una capa de concreto de 10 cm a 15 cm de espesor, luego se vierte una capa de impermeabilización y finalmente el concreto de la cimentación; se instala los electrodos y finalmente éstos son conectados al sistema de puesta a tierra, a los electrodos del anillo de puesta a tierra y a las bajantes externas.

Figura 54. Construcción del anillo de puesta a tierra para estructuras de diferente diseño de cimentación



Fuente: NTC 4552-3, 2008

²¹ Nivel freático: lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En éste nivel la presión del agua del acuífero es igual a la presión atmosférica.



- Figura 54a. Cimentación aislada con electrodo de puesta a tierra de fundición con capa de concreto no reforzada bajo capa de aislamiento bituminoso.
- Figura 54b. Cimentación aislada con conductor de puesta a tierra pasando parcialmente a través del suelo.
- Figura 54c. Conductor conectado desde el electrodo de puesta a tierra de cimentación hasta el barraje de unión pasando a través de una capa aislante bituminosa.

Dónde cada una de las numeraciones que aparecen en las gráficas corresponde:

1. Bajantes.
2. Punto de prueba.
3. Conductor unido al SIPRA interno.
4. Capa de concreto no reforzada.
5. Conductor conectado al SIPRA.
6. Electrodo de puesta a tierra de cimentación.
7. Aislamiento bituminoso, capa aislante de agua estancada.
8. Conductor conectado entre acero de refuerzo y punto de prueba.
9. Acero de refuerzo en el concreto.
10. Perforación de la capa bituminosa.

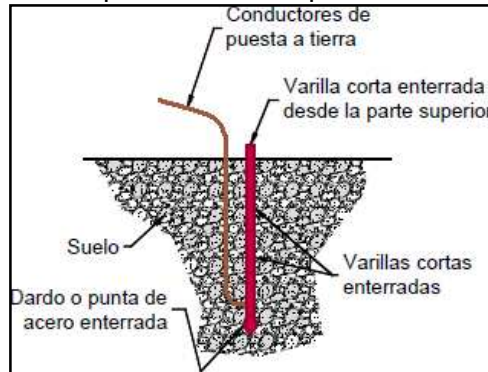
4.7.2 Electrodo de puesta a tierra radial y vertical. Este tipo de disposición corresponde a la configuración de puesta a tierra tipo A, para la cual se hace necesaria la equipotencialización de todos los electrodos por medio de conductores o barras de equipotencialización externas a la estructura.

Los electrodos radiales son conectados a la parte más baja, finalizando los bajantes por medio de uniones de prueba ó en electrodos verticales. Éstos son enterrados a una profundidad de $0,5\ m$ de su parte superior y distribuidos uniformemente minimizando así los efectos por acople eléctrico en la tierra; sin embargo, si esta profundidad de enterramiento es mayor, se reduce considerablemente los potenciales superficiales, es decir, las tensiones de paso.

Para su instalación, ésta se puede realizar enterrando un conductor dentro del suelo por medio de una varilla corta evitando el uso de abrazaderas; o clavando electrodos de puesta a tierra inclinados o verticales.

Para el primer caso, y, el conductor drena la corriente al suelo aprovechando el espacio de las varillas enterradas como se muestra en la figura 55.

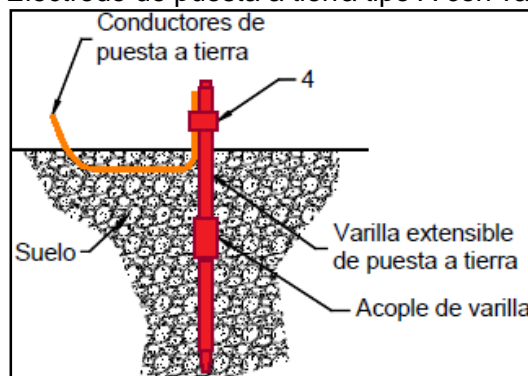
Figura 55. Electrodo de puesta a tierra tipo A con conductor tipo vertical



Fuente: NTC 4552-3, 2008

Para el segundo caso, el conductor de puesta a tierra se conecta a una distancia considerable con el electrodo de puesta a tierra, dicha distancia depende de 3 factores que son: la energía del impulso eléctrico, la resistividad del suelo y la corriente en el electrodo.

Figura 56. Electrodo de puesta a tierra tipo A con varilla vertical



Fuente: NTC 4552-3, 2008

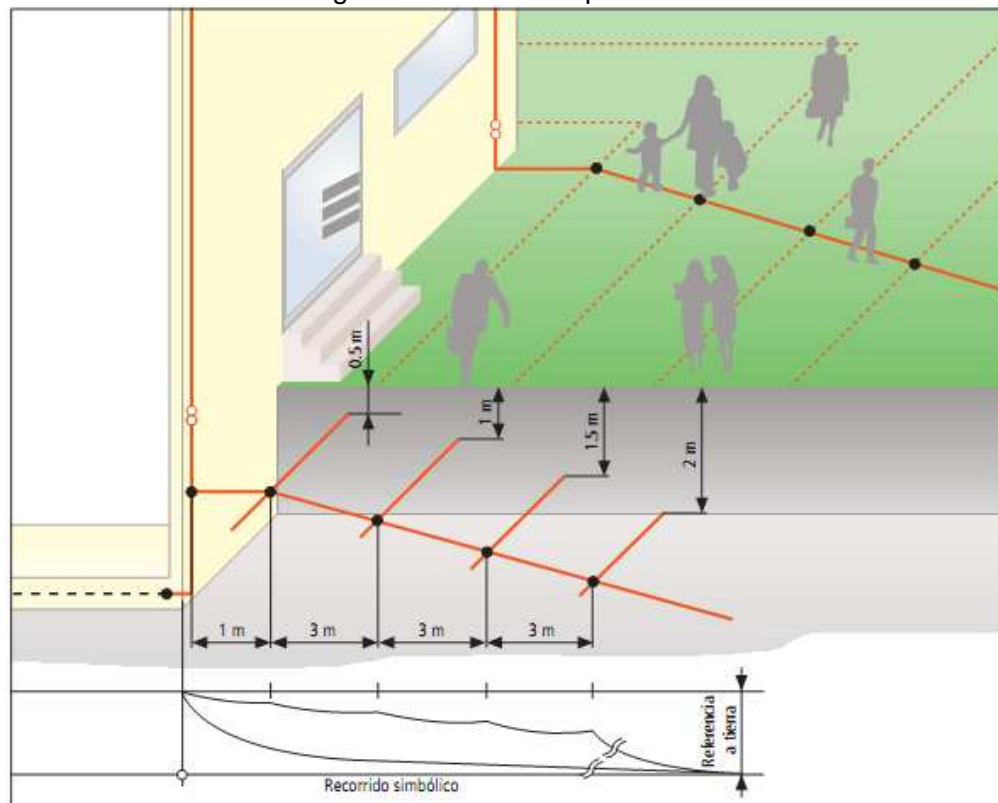
En lugares como el sótano, o una bodega, se hace necesario instalar electrodos dentro de la estructura.

4.7.3 Electrodo de puesta a tierra en anillos. Este tipo de disposición corresponde a la configuración de puesta a tierra tipo B y es recomendado para suelos con roca descubierta así como para estructuras con alto riesgo de incendio o grandes sistemas electrónicos.

El anillo conductor actúa como un electrodo tipo, en parte como un electrodo de puesta a tierra de cimentación y en parte como conductor de unión equipotencial ya que al existir unión entre los bajantes y los electrodos se genera diferentes potenciales debido a que por los conductores bajantes circula diferentes valores de corriente del rayo, por lo tanto el anillo reduce el potencial máximo haciendo que el sistema de unión equipotencial tenga el mismo valor de tensión.

En cuanto a su instalación, el primer anillo se ubica a partir de la toma de tierra de cimientos a una distancia de separación de 1 m y una profundidad de enterramiento de $0,5\text{ m}$ y adicional a ello, se sitúan tres anillos más con distancia de separación entre ellos de 3 m y una profundidad en aumento de $0,5\text{ m}$.

Figura 57. Control de potencial



Fuente: Manual de protección contra rayos. DEHN

Se pueden usar conductores redondos ó varillas de 10 mm de diámetro para su instalación, ó platinas de $30\text{ mm} \times 3,5\text{ mm}$; de igual forma, los bajantes deben ir conectadas a los anillos concéntricos de equipotencialización y estos a su vez deben tener como mínimo dos puntos de conexión entre ellos.



Tabla 21. Distancia de los anillos y profundidades de los controles de potencial

| | DISTANCIA A LA EDIFICIO | PROFUNDIDAD |
|----------------|-------------------------|-------------|
| Primer anillo | 1 m | 0,5 m |
| Segundo anillo | 4 m | 1 m |
| Tercer anillo | 7 m | 1,5 m |
| Cuarto anillo | 10 m | 2 m |

Fuente: Manual de protección contra rayos. DEHN

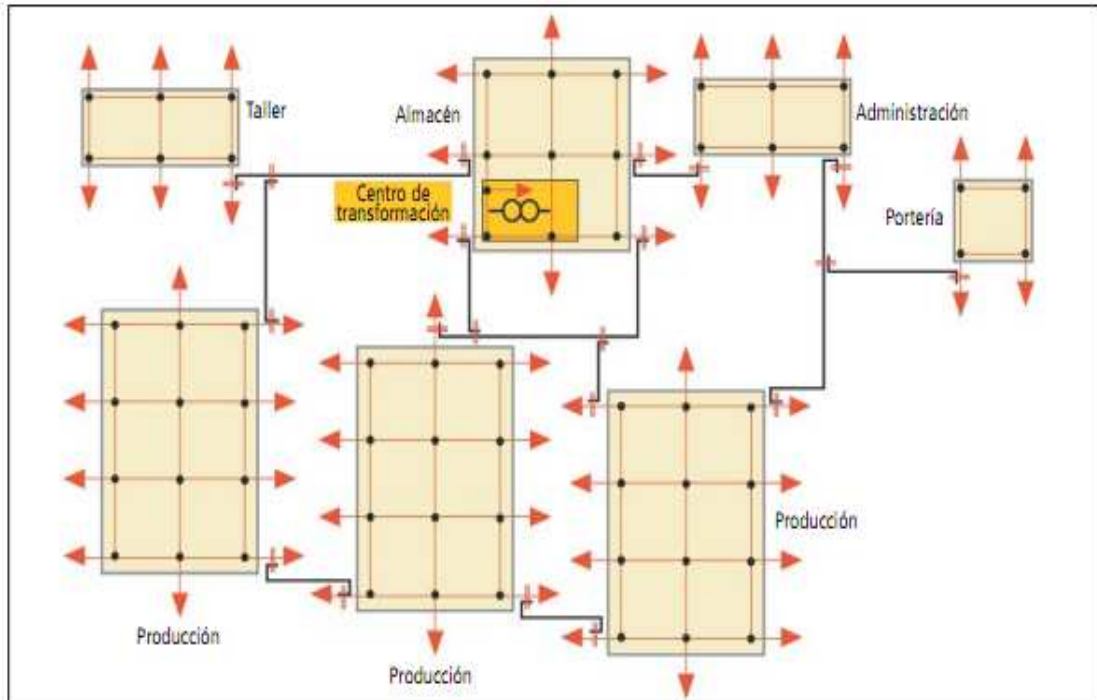
4.7.4 Electrodo de puesta a tierra en suelo rocoso. El electrodo de puesta a tierra tipo cimentación debe ser construido dentro de la cimentación del concreto, mientras que los electrodos adicionales se conectan a los bajantes para posteriormente unirse todos entre sí. De no contar con los electrodos de puesta a tierra de cimentación, se debe instalar electrodos de puesta a tierra en anillos. Si los electrodos han sido instalados sobre la superficie del terreno, estos se deben proteger contra daños mecánicos colocando piedras sobre ellos, ahora, si éstos se encuentran ubicados a un costado de una carretera, en lo posible se debe tratar de instalar un anillo conductor bajo la superficie de esta para crear así un control equipotencial.

4.7.5 Sistemas de puesta a tierra en grandes áreas. En zonas de grandes áreas como industrias, la instalación del sistema de puesta a tierra se ve influenciado por el número de estructuras que allí se encuentran por lo que se hace necesario alcanzar un valor de baja impedancia en el terreno para lo cual se debe instalar electrodos de puesta a tierra de cimentación y configuraciones de tierra tipo B con adicionales tipo A.

Las partes internas que se usan como bajantes se deben conectar al electrodo de puesta a tierra, y al acero de refuerzo del piso con el objeto de evitar tensiones de paso y contacto; de igual forma, se deben ubicar puntos de inspección en las bajantes, en los electrodos de puesta a tierra de cimentación y en cada una de las interconexiones de los electrodos.

Para este tipo de zonas, es útil emplear una red enmallada de electrodos de puesta a tierra ya que este tipo de sistema tiene ventaja en cuanto a la protección contra impulsos atmosféricos, y es necesario aislar las partes bajas de los conductores bajantes empleando tubos de PVC cuyo espesor sea de por lo menos 3 mm.

Figura 58. Sistema de enmallado de puesta a tierra de una instalación industrial



Fuente: Manual de protección contra rayos. DEHN

4.8 MATERIALES, DIMENSIONES Y CONEXIONES

Tanto los materiales como las conexiones deben ser capaces de soportar las fuerzas electrodinámicas del rayo, permitiendo la expansión y contracción de los conductores debido a la alta temperatura.

En cuanto a los materiales empleados en el diseño del SIPRA y las condiciones de uso de los mismos, están dados en la tabla 22; las dimensiones de los conductores tanto para el sistema de captación como para los bajantes están dadas en el (Anexo 3) y el sistema de puesta a tierra dadas en la tabla 23, mientras que el espesor mínimo para láminas de metal y tuberías usadas como componentes naturales del sistema de captación son dadas en la tabla 10; finalmente lo que respecta a las conexiones, los materiales empleados deben ser compatibles y tener un área de contacto superficial de 50 mm^2 .

Tabla 22. Materiales y condiciones de uso en un SIPRA.

| MATERIAL | USO | | | CORROSIÓN | | |
|-------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| | AL AIRE LIBRE | ENTERRADO | EN CONCRETO | RESISTENCIA | ACELERADA POR | DESTRUIDA POR REACCIÓN GALVÁNICO CON: |
| Cobre | Sólido trenzado | Sólido Trenzado como cubierta | Sólido Trenzado como cubierta | Bueno en muchos ambientes | Componentes sulfúricos Materiales orgánicos | — |
| Acero galvanizado en caliente | Sólido trenzado | Sólido | Sólido Trenzado | Aceptable en aire, en concreto y en suelos benignos | Altas concentraciones de cloruro | Cobre |
| Acero inoxidable | Sólido trenzado | Sólido Trenzado | Sólido Trenzado | Bueno en muchos ambientes | Altas concentraciones de cloruro | — |
| Aluminio | Sólido | Inadecuado | Inadecuado | Bueno en atmósferas con bajas concentraciones de cloruro y sulfuros | Soluciones alcalinas | Cobre |
| Plomo | Sólido como cubierta | Sólido como cubierta | Inadecuado | Bueno en atmósferas con altas concentraciones de sulfatos | Sólidos ácidos | Cobre y acero inoxidable |

NOTAS:

- Esta tabla es una guía general únicamente. En circunstancias especiales se debe realizar más cuidadosamente la inmunidad corrosiva de los materiales a usar.
- Conductores trenzados son más vulnerables a la corrosión que aquellos sólidos. Los conductores trenzados son también vulnerables en el momento en que ellos entran o salen de posiciones con concreto y tierra. Esta es la razón principal para no recomendar que los conductores trenzados de acero galvanizado no sean recomendados para tierra.
- El acero galvanizado puede ser corroído en suelos arcillosos o húmedos.
- El acero galvanizado en concreto no debe ser extendido al suelo con el fin de evitar la corrosión en el extremo saliente del concreto.
- Acero galvanizado en contacto con el acero del concreto reforzado puede en algunas circunstancias causar daño al concreto.
- Uso de plomo en el suelo es evitado o prohibido debido a problemas ambientales.

Fuente: NTC 4552-3, 2008

Tabla 23. Materiales, configuraciones y dimensiones mínimas de los electrodos de tierra.

| MATERIAL | CONFIGURACIÓN | DIMENSIONES MÍNIMAS | | | COMENTARIOS |
|-------------------------------|---|----------------------|------------------------------------|-------------|---|
| | | VARILLA [Φ mm] | CONDUCTOR | PLACA [mm] | |
| Cobre | Trenzado ³ | | 50 mm ² | | 1,7 mm diám mín de cada trenza |
| | Redondo sólido ³ | | 50 mm ² | | 8 mm de diám |
| | Cinta sólida ³ | | 50 mm ² | | 2 mm espesor mín |
| | Redondo sólido | 15 ⁸ | | | |
| | Tubería | 20 | | | |
| | Placa sólida | | | 500*500 | 2 mm espesor mín del muro |
| | Placa cuadriculada | | | 600*600 | 2 mm espesor mín. 25 mm * 2 mm de sección Longitud mín de la config cuadriculada: 4,8 m |
| Acero | Redondo sólido galvanizado ^{1,2} | 16 ⁹ | 10 mm diám. | | |
| | Tubería galvanizada ^{1,2} | 25 | | | 2 mm espesor mín del muro |
| | Cinta sólida galvanizada ¹ | | 90 mm ² | | 3 mm espesor mín |
| | Placa sólida galvanizada ¹ | | | 500*500 | 3 mm espesor mín |
| | Placa cuadriculada galvanizada ¹ | | | 600*600 | 30 mm*3 mm de sección |
| | Redondo sólido recubierto en cobre ⁴ | 14 | | | 250 μ m long mín radial |
| | Redondo desnudo ⁵ | | 10 mm diám. | | Recubrimiento de cobre 99,9 % |
| | Cinta sólida galvanizada o desnuda ^{5,6} | | 75 mm ² | | Contenido de cobre |
| | Trenzado galvanizado ^{5,6} | | 70 mm ² | | 3 mm de espesor mín |
| | Perfil cruzado galvanizado ¹ | 50*50*3 | | | Diámetro mín de cada trenza: 1,7 mm. |
| Acero inoxidable ⁷ | Lazo cerrado sólido Cinta sólida | 15 | 10 mm diám. 100 mm ² | | 3 mm de espesor mín |

1) El recubrimiento debe ser fino, continuo y libre de impurezas, con un espesor mínimo de 50 μ m para una forma redonda y 70 μ m para material plano.
2) Los hilos deben ser elaborados a máquina antes de la galvanización.
3) Puede además ser recubierto por estaño.
4) El cobre debería ser unido intrínsecamente al acero.
5) Únicamente permitido cuando está completamente embebido en concreto.
6) Únicamente permitido cuando está correctamente conectado al menos cada 5 m con el reforzamiento de acero de los cimientos.
7) Cromo \geq 16 %, níquel \geq 5 %, molibdeno \geq 2 %, carbón \leq 0,08 %.
8) En algunos países es permitido 12 mm.
9) La puesta a tierra en punta es usada en algunos países para conectar la bajante al punto donde entra el terreno.

Fuente: NTC 4552-3, 2008

4.8.1 Protección contra la corrosión. Los materiales usados en el SIPRA como cobre, aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado, deben ser resistentes y estar sometidos con anterioridad a pruebas que permitan verificar y certificar la capacidad y calidad de los mismos y su resistencia a la corrosión y humedad.

De igual forma, los materiales usados en las varillas de captación y cables deben ser electroquímicamente compatibles con los elementos de conexión de lo contrario, estas deben ser protegidas. Las partes de cobre nunca deben ser instaladas sobre partes de aluminio o galvanizadas así como los conductores de aluminio no se deben fijar directamente sobre superficies calcáreas como concreto caliza y yeso, ni dentro del suelo.

4.8.1.1 Metales en el suelo y aire. Factores ambientales presentes en la estructura y en el suelo como la humedad, las sales disueltas, ventilación, temperatura y la misma naturaleza del metal así como uniones electrolíticas son los responsables de la corrosión; es por ello que a continuación se presentan diferentes acciones basadas en experiencias obtenidas a partir de procesos realizados con este tipo de materiales que mitigan y prevén el fenómeno corrosivo.

Tabla 24. Acciones mitigantes del efecto corrosivo

| ELEMENTO | ACCIONES |
|---|---|
| Metales diferentes. | Evitar el uso de éstos debido a su diferencia electroquímica |
| Conductores, abrazaderas, láminas de unión. | Uso de una sección transversal adecuada |
| Metales sensibles a humos corrosivos | Proporcionar aislamiento a este tipo de materiales |
| Productos de corrosión natural (cobre) | Evitar el uso de este metal catódico sobre materiales anódicos(aluminio) |
| UNIONES ENTRE CONDUCTORES ENTERRADOS | |
| Uniones no soldadas | Llenado de material aislante que impida la humedad |
| Aluminio | Nunca debe ser usado como electrodo de puesta a tierra, ni debe ser enterrado directamente en el concreto |
| Conductores de acero con cubierta | No se deben usar como electrodos de puesta a tierra |
| Conductores de cobre con cubierta | No se deben usar en suelo o concreto con altos niveles de calcio |
| Cobre | No es posible usarlo como electrodo de puesta a tierra en terrenos ácidos con alto contenido amoniacal y sulfuroso. |

Fuente: Autores

Tabla 25. Acciones preventivas ante el fenómeno corrosivo

| ACCIONES PREVENTIVAS ANTE EL FENÓMENO CORROSIVO | |
|---|--|
| ELEMENTO | ACCIÓN |
| Cables de acero, aluminio, cobre, aleaciones (níquel, cromo, acero), aleación cuprosa | Deben tener un diámetro mínimo del cable igual a $1,5\text{ mm}$. |
| Conductores de acero no protegidos | Deben ser galvanizados al fuego con $50\ \mu\text{m}$ de espesor |
| Unión Cobre/aluminio | Evitar este tipo de uniones, de no ser así, se debe usar una lamina intermedia de AlCu |
| Techos conductores y bajantes expuestos a gases agresivos | Usar grandes aleaciones de acero $>16,5\% \text{ Cr}$, $>0,2\% \text{ Ti}$, $>0,22\% \text{ N}$ |
| Uniones en el aire entre: acero, cobre, aleaciones de cobre | Deben ser estañadas completamente o cubiertas con una capa resistente a la humedad |
| Conductores de acero provenientes del concreto o de la tierra | Deben ser protegidos en el punto de contacto con el aire en una longitud de $0,3\text{ m}$ por medio de una envoltura anticorrosiva. |

Fuente: autores

En cuanto a las conexiones, es importante tener en cuenta:

- Los electrodos en acero galvanizado se deben conectar en el suelo al refuerzo del concreto por vías de chispa cuyas características en cuanto a los niveles de protección sean U_p de $2,5\text{ kV}$ e I_{imp} de 50 kA .
- Las tuberías metálicas puestas en tierra, se deben conectar al sistema equipotencial y al sistema de puesta a tierra, todos los elementos a unir deben ser del mismo material, caso contrario a ello, el sistema de tuberías debe ser aislado desde las secciones de la planta conectadas al sistema equipotencial.



4.8.1.2 Metales en concreto.

Tabla 26. Acción y efecto de metales en concreto

| ELEMENTO EN CONCRETO | ACCIÓN Y EFECTO |
|--|---|
| Acero o acero galvanizado | Causa estabilidad del potencial natural del metal debido a la uniformidad del concreto |
| Barras de refuerzo | Son más resistentes a la corrosión al estar inmersas en el concreto |
| Acero de refuerzo como bajantes | Minimiza los problemas de corrosión, siempre y cuando los puntos de acceso estén encapsuladas por masilla epóxica de buen espesor |
| Láminas de acero galvanizado | Pueden ser instaladas dentro del concreto como electrodos de puesta a tierra y a su vez conectadas a las varillas de acero de refuerzo |
| Cobre y acero inoxidable | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Como electrodos de puesta a tierra pueden ser conectados directamente al refuerzo del concreto. ▪ Este tipo de metal es usado en electrodos adicionales de puesta a tierra fuera del concreto. |
| Acero en concreto reforzado con fibra de acero | No se permite el uso de este metal para electrodos de puesta a tierra ya que en el proceso de construcción, este puede sufrir daños. |

Fuente: Autores

5. APLICACIÓN EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN

Se seleccionó el edificio Álvaro Beltrán Pinzón para realizar el diseño del sistema de protección externa; este edificio se encuentra ubicado dentro de las instalaciones de la universidad industrial de Santander y cuenta con laboratorios para pruebas de caracterización de materiales para lo cual se usa maquinaria y equipos digitales, aulas de clase y oficinas, por lo que además de los daños causados a la estructura ante una descarga atmosférica se debe evaluar los daños que se puedan causar a sus ocupantes y a su contenido incluyendo los sistemas internos.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EDIFICIO.

Figura 59. Fachada Edificio Álvaro Beltrán Pinzón.



Fuente: Autores

El edificio Álvaro Beltrán Pinzón es una estructura nueva en la cual se usaron materiales como concreto y concreto reforzado para su construcción, el uso que se le da a esta es de tipo académico por lo que su función es la de escuela, oficina y planta industrial, en cuanto a sus ocupantes y contenido, son personas y hay presencia de materiales combustibles e incombustibles, así como de sistemas eléctricos y electrónicos, finalmente, se cuenta con acometidas entrantes de energía, comunicaciones y tuberías tanto de agua como de gas. Descripción general (Anexo 4).



5.2 EVALUACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO AL SIPRA EXISTENTE EN EL EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN.

La evaluación del nivel de riesgo es el primer paso a seguir dentro del diseño de un sistema de protección contra rayos, esta evaluación me permite analizar los diferentes efectos del rayo en la estructura, las probabilidades de lesiones a seres vivos, daños a sistemas internos, a equipos de servicio y a la misma estructura.

Es a través de los resultados obtenidos que se justifica la implementación de un SIPRA para la edificación, ya que si el riesgo en pérdidas humanas R_1 , servicio público R_2 , patrimoniales R_3 es mayor al riesgo tolerable R_T .

$$R_1 + R_2 + R_3 > R_T \quad (5.1)$$

Y si además de ello el costo de pérdida residual con medidas de protección C_{RL} más el costo de medidas de protección contra rayos C_{PM} es menor que el costo total sin medidas de protección C_L .

$$C_{RL} + C_{PM} < C_L \quad (5.2)$$

Es necesaria la protección contra rayos.

Partiendo de esta premisa, y teniendo en cuenta lo establecido en el artículo 18 del reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, el cual contempla que en instalaciones de uso final donde se tenga alta concentración de personas, tales como, viviendas multifamiliares, edificios de oficinas, hoteles, centros de atención médica, lugares de culto, centros educativos, centros comerciales, industrias, supermercados, parques de diversión, prisiones, aeropuertos, cuarteles, debe hacerse una evaluación del nivel de riesgo por exposición al rayo; se procede a inspeccionar las instalaciones del edificio, en donde se toman registros fotográficos, mediciones, datos sobre equipos y además de ello se corrobora la información suministrada por los ingenieros de planta física de la Universidad Industrial de Santander en cuanto a planos eléctricos y especificaciones técnicas de diseño.

A continuación se discriminan los equipos de laboratorio, tableros eléctricos, subestación eléctrica, y demás materiales manipulados dentro de las instalaciones del edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Ver (Anexos 5, 6, 7, 8, 9, 10).

La evaluación del nivel de riesgo se hizo con base en lo establecido en la norma técnica Colombiana NTC 4552-1,-2 2008 e implementando el software interfaz gráfica compuesta por medio de GUIs (interfaz gráfica de usuario) en GUIDE de Matlab” desarrollado en el trabajo de grado de los ingenieros electricistas Ángel Eusebio Guarín y Néstor Villa, en donde a partir de datos proporcionados a cerca de la estructura se evalúa el nivel de riesgo al que ésta se ve sometida.

A partir de los datos registrados luego de hecha la inspección, se genera una matriz de riesgo, que permita identificar los tipos de daño según impactos de rayo sobre o cerca de la estructura, de esta forma se contextualiza el diseñador del SIPRA antes de ejecutar la interfaz de evaluación, ejemplo de ello se muestra en el (Anexo 11).

En las memorias de cálculo y los planos que fueron suministrados para la realización del diseño de protección externa, se encontró que esta edificación cuenta con un sistema integral de protección contra rayos, por lo que inicialmente se procede a comprobar según las especificaciones dadas si se cumple o no con los niveles de riesgo, para lo cual se introducen los datos en el software, lo que arrojó los siguientes resultados.

Figura 60. Evaluación del número anual de eventos peligrosos

Resultados de la evaluación de número anual N de eventos peligrosos

| | |
|-----------|------------|
| C_z | 0.5 |
| A_z | 17932.7 |
| N_D | 0.00896637 |
| C_t | 0.2 |
| $A_{z/2}$ | 0 |
| N_{Dz} | 0 |
| A_m | 235200 |
| N_M | 0.226233 |
| C_e | 0.1 |

| | |
|-------|---|
| N_l | 0 |
| N_i | 0 |

| | |
|-------|-------------|
| N_l | 0.000272943 |
| N_i | 0.00136472 |

| | |
|-------|---|
| N_l | 0 |
| N_i | 0 |

| | |
|-------|-------------|
| N_l | 0.000494975 |
| N_i | 0.00247487 |

Fuente: Proyecto de grado, evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Figura 61. Evaluación de probabilidades de lesiones a seres vivos, daños a sistemas y al edificio por impactos cercanos o directos en la estructura.

PROBABILIDAD_PX

Evaluación de las probabilidades PA, PB, Pc, Pm, P'B, P'c, P'v, P'w y P'z

Evaluación de PA, PB y Pc

Medidas de protección: Sin medidas de protección. PA=1.

Protección contra rayos: Nivel III. PB=0.1.

Nivel de protección de DPS: Nivel III-IV. Pc=0.03.

Probabilidad de daño de sistemas internos. PM

Con cableado en conduit metálico aterrizado en sus extremos al barraje equipotencial.

Uw en kV w en metros

1 3.5 Cables sin pantalla. Sin precaución de evitar lazos en la ruta. Ks3=1.

Sistemas internos sin equipos con niveles de soportabilidad al impulso inferiores a los estándar.

No es provisto un sistema coordinado de protección y reducción de fallas de sistemas internos. PM=PMS.

Evaluación de P'B, P'c, P'v y P'w

Acometidas de servicios con conductores metálicos no apartallados.

n acometidas: 2 Rs: Resistencia del apartallamiento en Ohm/km: 5

Con pantalla en contacto con el suelo. Kd=1.

Sin medidas de protección. Kp=1.

Aparato eléctrico para usuario (Un ≤ 1kV). Uw=2.5kV.

P'v para líneas de telecomunicaciones

Líneas de telecomunicaciones con apartallamiento de aluminio. Ia=20kA.

Evaluación de P'z

Apartallamiento y equipo unido a barra equipotencial. 1<Rs≤5 Ohm/km. PL1 de P'z

No se implementan DPSs conforme a la normatividad nacional vigente. P'z

Resultados de la evaluación de las probabilidades de daño Px

| | |
|----------------|--------|
| PA | 1 |
| PB | 0.1 |
| Pc | 0.03 |
| Ks3 | 1 |
| Ks3E | 0.2646 |
| P'vE | 0.9 |
| PM | 0.9 |
| P'z | 0.04 |
| Kc | 1 |
| Kz | 1 |
| Uw | 2.5 |
| Iz: P'B, Pc | 25 |
| Iz: P'v, P'w | 12.5 |
| P'g, P'c de Iz | 0.6 |
| P'v, P'w de Iz | 0.8 |
| P'B | 0.6 |
| P'c | 0.6 |
| P'v | 0.8 |
| P'w | 0.8 |
| P'z | 0.04 |

Evaluar probabilidades de daño **Ir al menú**

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

P_A = Probabilidad de lesiones a seres vivos a causa de tensiones de paso y contacto por descargas directas a la estructura.

P_B = Probabilidad de daño a la estructura por descargas directas a la estructura.

P_C = Probabilidad de daño de sistemas internos por impacto directo a la estructura.

P_M = Probabilidad de daño de sistemas internos por impactos cercanos a la estructura.

U_W = Tensión soportada al impulso tipo rayo.

w = Ancho cuadrícula

$P'c$ = Probabilidad de daños físicos a equipos del servicio, por impacto a la estructura.

$P'v$ = Probabilidad de daños físicos al servicio, por impactos al servicio.

$P'w$ = Probabilidad de daños físicos a equipos del servicio, por impactos al servicio.

$P'z$ = Probabilidad de falla en los equipos del servicio, por impactos cerca de la acometida.

Figura 62. Evaluación de probabilidad de daños a sistemas internos por descarga cerca o directa en las acometidas de servicio

EVAL_PU_PV_PW_PZ

Evaluación de las probabilidades P_u , P_v , P_w y P_z

Evaluación de P_u , P_v , P_w y P_z , en la sección aérea de la acometida de potencia. NO EVALUAR

U_w en kV

Evaluación de P_u , P_v , P_w y P_z , en la sección subterránea de la acometida de potencia. EVALUAR

Cable no apantallado. U_w en kV

Los DPS no cumplen los requerimientos de equipotencialización. $P_u=PLD$. 1

No existe coordinación de DPSs para protección y reducción de fallas de sistemas internos. $P_w=PLD$. $P_z=PL1$.

Sin pantalla.

Evaluación de P_u , P_v , P_w y P_z , en la sección aérea de la acometida de telecomunicaciones. NO EVALUAR

U_w en kV

Evaluación de P_u , P_v , P_w y P_z , en la sección subterránea de la acometida de telecomunicaciones. EVALUAR

Cable no apantallado. U_w en kV

Los DPS cumplen los requerimientos de equipotencialización. 0.6

No existe coordinación de DPSs para protección y reducción de fallas de sistemas internos. $P_w=PLD$. $P_z=PL1$.

Apantallamiento y equipo unido a barra equipotencial. $1 < R_s \leq 5 \text{ Ohm/km}$.

Evaluar P_u , P_v , P_w y P_z **Ir a menú**

| | |
|----------|--|
| P_u | |
| P_v | |
| P_w | |
| P_{L1} | |
| P_z | |

| | |
|----------|---|
| P_u | 1 |
| P_v | 1 |
| P_w | 1 |
| P_{L1} | 1 |
| P_z | 1 |

| | |
|----------|--|
| P_u | |
| P_v | |
| P_w | |
| P_{L1} | |
| P_z | |

| | |
|----------|------|
| P_u | 1 |
| P_v | 1 |
| P_w | 1 |
| P_{L1} | 0.04 |
| P_z | 0.04 |

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

- P_u = Probabilidad de lesiones a seres vivos a causa de tensiones de toque por descargas sobre las acometidas de servicio.
- P_v = Probabilidad de daños físicos a causa de descargas directas en las acometidas de servicio.
- P_w = Probabilidad de daño de sistemas internos a causa de descargas directas en las acometidas de servicio.
- P_z = Probabilidad de daño de sistemas internos a causa de descargas cercanas en las acometidas de servicio.
- U_w = Tensión soportada al impulso tipo rayo

Figura 63. Evaluación cantidad de pérdidas de vida humana, de servicio público, de valor cultural y económicas

PERDIDAS_LX

Evaluación de la cantidad de pérdidas Lx

Lt de L1: Todos los tipos estructura: Personas dentro de la estructura. Lt=1e-4 de L1.

Lf de L1: Industrial, comercial y escuelas. Lf=0.05 de L1.

Lo de L1: Riesgo de explosión. Lo=0.1 de L1.

ra y ru: Agricultura, concreto. ra=ru=0.01.

rp: Extintores manuales, alarmas manuales, hidrantes, compartimientos contra el fuego, rutas de evacuación. rp=0.5.

rf: Explosión. rf=1.

hz: Nivel bajo de pánico: Edificaciones de dos pisos y no más de 100 personas. hz=2.

Lf y Lo para L2: Gas, acueducto. Lf=0.1. Lo=0.01. De L2.

Lf de L4: Hoteles, escuelas, oficinas, centros comerciales, iglesias, bancos. Lf...

Lo de L4: Riesgo de explosión. Lo=0.1 de L4.

| Pérdidas de vidas humanas | | Pérdidas del servicio público | | Pérdidas de valor cultural | | Pérdidas económicas | |
|---------------------------|--------|-------------------------------|------|----------------------------|------|---------------------|--------|
| L_E | 1e-006 | L_E | 0.05 | L_E | 0.05 | L_E | 1e-006 |
| L_U | 0.05 | L_V | 0.05 | L_V | 0.05 | L_U | 1e-006 |
| L_U | 1e-006 | L_C | 0.01 | | | L_E | 0.2 |
| L_V | 0.05 | L_M | 0.01 | | | L_V | 0.2 |
| L_C | 0.1 | L_W | 0.01 | | | L_C | 0.1 |
| L_M | 0.1 | L_Z | 0.01 | | | L_M | 0.1 |
| L_W | 0.1 | L'_E | 0.1 | | | L_W | 0.1 |
| L_Z | 0.1 | L'_C | 0.01 | | | L_Z | 0.1 |
| | | L'_V | 0.1 | | | L'_E | 0.2 |
| | | L'_M | 0.01 | | | L'_V | 0.2 |
| | | L'_W | 0.01 | | | L'_C | 0.1 |
| | | L'_Z | 0.01 | | | L'_W | 0.1 |
| | | | | | | L'_Z | 0.1 |

Evaluar cantidad de pérdidas Ir a menú

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

L1 = Pérdida de vida humana.

Lt = Pérdidas por lesiones a seres vivos por tensiones de paso y contacto.

Lf = Pérdidas por daños físicos.

Lo = Pérdidas por fallas en sistemas internos.

ra = Factor reductor de pérdida de vidas por características de suelo o terreno.

ru = Factor reductor de pérdida de vidas por características constructivas del piso.

rp = Factor reductor de pérdida debido a daños físicos el cual depende de medidas de protección tomadas para reducir las consecuencias de incendio.

rf = Factor reductor de pérdida debido a daños físicos el cual depende del riesgo de fuego de la estructura.

hz = Factor de incremento de pérdida debido a daños físicos por presencia de condiciones especiales peligrosas.

L2 = Pérdida de servicios públicos.

L4 = Pérdida económica (estructura y contenido, lucro cesante).

Figura 64. Evaluación componentes de riesgo

Evaluación de componentes de riesgo

Estructura con riesgo de explosión, hospital u otra estructura donde la falla de sistemas internos ponga en peligro la vida humana

Propiedad dode pueda haber pérdida de animales

Se calcula para exteriores

Existe equipo sensible

Ir al menú

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Figura 65. Resultado evaluación de riesgo.

Resultados de la evaluación de riesgo y sus componentes

| Riesgo de pérdida de vida humana. R_1 | | Riesgo de pérdida del servicio público. R_2 | | Riesgo de pérdida de patrimonio cultural. R_3 | | Riesgo de pérdida de valor económico. R_4 | |
|---|--------------------------------|---|------------------------------|---|----------------------------|---|-------------------|
| R_A | 0 | R_B | 4.48318e-006 | R_B | 4.48318e-006 | R_A | 0 |
| R_B | 4.48318e-006 | R_C | 8.96637e-005 | R_C | 0.000153616 | R_B | 1.79327e-005 |
| R_C | 0.000896637 | R_M | 2.26233e-005 | R_3 | 0.0001581 CUMPLE | R_C | 0.000896637 |
| R_M | 0.000226233 | R_V | 0.000153616 | | | R_M | 0.000226233 |
| R_U | 3.07233e-009 | R_W | 3.07233e-005 | R_U | 0 | R_U | 0 |
| R_V | 0.000153616 | R_Z | 1.25039e-005 | R_V | 0.000614466 | R_V | 0.000614466 |
| R_W | 0.000307233 | R_2 | 0.000313614 CUMPLE | R_W | 0.000307233 | R_W | 0.000307233 |
| R_Z | 0.000125039 | | | R_Z | 0.000125039 | R_Z | 0.000125039 |
| R_1 | 0.00171324 NO CUMPLE | Riesgo de pérdida de servicio público. R'_2 | | Riesgo de pérdida de valor económico. R'_4 | | R_4 | 0.00218754 |
| | | R'_B | 0.000896637 | R'_B | 0.00179327 | | |
| | | R'_C | 8.96637e-005 | R'_C | 0.000896637 | | |
| | | R'_V | 6.15183e-005 | R'_V | 0.000123037 | | |
| | | R'_W | 6.15183e-006 | R'_W | 6.15183e-005 | | |
| | | R'_Z | 1.28976e-006 | R'_Z | 1.28976e-005 | | |
| | | R'_2 | 0.00105526 | R'_4 | 0.00288736 | | |

Generar informe de la evaluación en RESULTADOS.txt

Ir a menú

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010



Se puede concluir que el diseño implementado en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón no cumple con lo implementado por la norma NTC 4552-1,-2 debido a que los datos arrojados en el cálculo muestran que los riesgos en pérdidas humanas R1, servicio público R2, patrimoniales R3 es mayor al riesgo tolerable R_T , ya que los valores representativos de riesgo tolerable R_T según lo establecido por la norma son:

Tabla 27. Riesgos tolerables en la evaluación de riesgo.

| TIPO DE PÉRDIDA | $R_T (y^{-1})$ NTC 4552-2 |
|-----------------------|---------------------------|
| Pérdidas humanas | $\leq 1 * 10^{-5}$ |
| Pérdidas de servicios | $\leq 1 * 10^{-3}$ |
| Pérdidas culturales | $\leq 1 * 10^{-3}$ |
| Pérdidas económicas | $\leq 1 * 10^{-3}$ |

Fuente: Norma técnica Colombiana NTC4552-2, 2008

Mientras que los obtenidos son:

Tabla 28. Riesgos obtenidos en la evaluación de riesgo edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

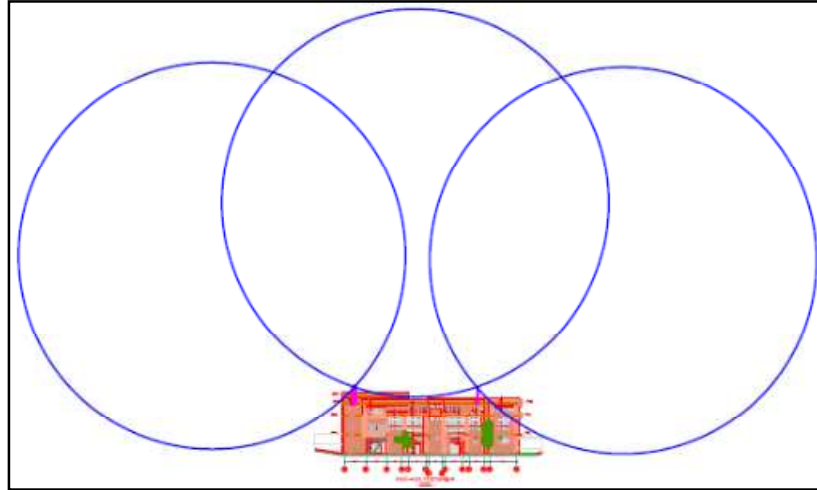
| TIPO DE PÉRDIDA | R_T CALCULADOS |
|-----------------------|----------------------|
| Pérdidas humanas | 0,00171324 NO CUMPLE |
| Pérdidas de servicios | 0,00013614 CUMPLE |
| Pérdidas culturales | 0,0001581 CUMPLE |
| Pérdidas económicas | 0,00218754 NO CUMPLE |

Fuente: Autores

Por lo tanto, se justifica el rediseño de un sistema de protección contra rayos SIPRA para este edificio, debido a que no sólo se comprometen los equipos que allí se encuentran sino que también se ve amenazada la integridad física de las personas que residen.

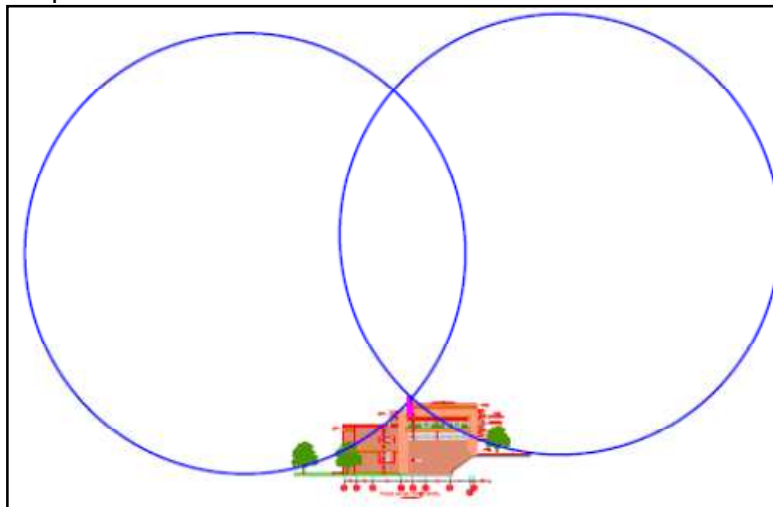
En cuanto al diseño del sistema de captación, se observa la instalación de 2 puntas captadoras cuya altura es de 4 m, se procedió a tomar las medidas de ubicación de las mismas sobre la terraza piso superior y posterior a ello se simuló en AutoCAD el método de la esfera rodante comprobando que al rodar las esferas desde el nivel del suelo hasta las varillas de captación, en las esquinas y techos voladizos éstas tienen contacto con la superficie del edificio, además de dejar desprotegida la terraza del segundo piso, lo que corrobora el concepto dado luego de realizada la evaluación de riesgo.

Figura 66. MEG para SIPRA existente edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Fachada principal



Fuente: Autores

Figura 67. MEG para SIPRA existente edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Fachada principal



Fuente: Autores

xx

5.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNA

El diseño del sistema de protección contra rayos consta de los siguientes pasos:

1. Evaluación nivel de riesgos para la estructura
2. Diseño del sistema de captación.
3. Diseño sistema de bajantes
4. Diseño de la malla de puesta a tierra.

5.3.1 Evaluación del nivel de riesgo. En una correcta práctica de ingeniería, el nivel de protección contra rayos va de la mano con la obra civil y por lo tanto con el diseño eléctrico de la edificación, sin embargo, esta nueva evaluación de riesgo está sujeta a variables ya establecidas debido a que el nivel de protección externa contra rayos se debe adaptar a la estructura ya construida, por lo tanto, los cambios que se pueden realizar en el SIPRA se da en el apantallamiento de los conductores, en la coordinación de protección es decir el uso de los DPS y en la implementación de un nuevo nivel de protección contra rayo .

- **Nivel de riesgo.** El nivel de riesgo esta asociado a una serie de parámetros referentes a la corriente del rayo que definen los valores máximos y mínimos a tener en cuenta en el diseño; sin embargo, éste también se define por el tipo de estructura y el uso final de la misma, así como la cantidad de personas que la habitan ya que la norma es muy estricta en cuanto a la preservación de la vida , y posterior a ello, los servicios, bienes económicos y culturales. De igual forma, la ubicación geográfica proporciona información en cuanto a el nivel cerámico así como la densidad de descargas a tierra DDT; todo esto permite que el diseñador seleccione el nivel de riesgo a aplicar, por lo tanto para efectos de este proyecto se usa el *nivel IV de protección*, en concordancia con lo especificado en la tabla 5.
- **Medidas de protección.** Según los datos obtenidos en la evaluación de riesgos del SIPRA existente en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón, este no cumple con el riesgo mínimo tolerable, por lo tanto, para el nuevo diseño se adoptan las siguientes medidas.

Figura 68. Medidas de protección a implementar para la reducción de riesgos, edificio Álvaro Beltrán Pinzón



Fuente: Autores

- **Implementación software.** Se ejecuta el software [13] como se muestra a continuación:

Figura 69. Evaluación del número anual de eventos peligrosos edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

Evaluación del número anual N de eventos peligrosos

Introducir DDT: 1 Tabla DDT Mapa DDT

Evaluación del promedio anual de descargas sobre la estructura
 Selecionar localización relativa de la estructura. Cd
 Rodeado de objetos o árboles de igual altura o menor. Cd=0.5.
 Dimensiones de la estructura en metros.
 Largo L Ancho W Alto H
 33.2 44.5 17.25

Selecionar factor de corrección del tipo de transformador. Ct
 Con devanado primario y secundario desacoplados. Ct=0.2.

Dimensiones de la estructura adyacente en metros.
 Largo L Ancho W Alto H
 0 0 0

Selecionar factor ambiental Ce
 Urbano: Edificaciones entre 10m y 20m. Ce=0.1.

Resistividad p en Ohm-m para secciones subterráneas 200

Acometida de potencia

| Sección aérea | | | | Sección subterránea | | |
|----------------------------------|---------------------------------|----|----|---|---------------------------------|----|
| <input type="checkbox"/> Evaluar | Introducir longitudes en metros | | | <input checked="" type="checkbox"/> Evaluar | Introducir longitudes en metros | |
| Lc | Ha | Hb | Hc | Lc | Ha | Hb |
| | | | | 193 | 0 | 0 |

Acometida de telecomunicaciones

| Sección aérea | | | | Sección subterránea | | |
|----------------------------------|---------------------------------|----|----|---|---------------------------------|----|
| <input type="checkbox"/> Evaluar | Introducir longitudes en metros | | | <input checked="" type="checkbox"/> Evaluar | Introducir longitudes en metros | |
| Lc | Ha | Hb | Hc | Lc | Ha | Hb |
| | | | | 350 | 0 | 0 |

Resultados de la evaluación de número anual N de eventos peligrosos

| | |
|------------------|------------|
| C _d | 0.5 |
| A _d | 17932.7 |
| N ₀ | 0.00896637 |
| C _t | 0.2 |
| A _{d/2} | 0 |
| N _{0.2} | 0 |
| A _m | 235200 |
| N _M | 0.226233 |
| C _e | 0.1 |

NOTA

| | |
|----------------|---|
| N ₁ | 0 |
| N ₂ | 0 |

| | |
|----------------|-------------|
| N ₁ | 0.000272943 |
| N ₂ | 0.00136472 |

| | |
|----------------|---|
| N ₁ | 0 |
| N ₂ | 0 |

| | |
|----------------|-------------|
| N ₁ | 0.000494975 |
| N ₂ | 0.00247487 |

Evaluar número anual de eventos peligrosos Ir al menú

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Luego de evaluado el número de eventos peligrosos, se procede a evaluar las probabilidades de pérdidas de vidas y servicios ante impactos de rayo cercanos o directos a la estructura y los daños a los sistemas internos debido a impactos cercanos o sobre las acometidas de servicio, partiendo de un nuevo criterio de diseño, del nivel de protección IV, de la implementación de protecciones como DPS y del apantallamiento de los conductores.

Figura 70. Evaluación de probabilidades de lesiones a seres vivos y daños a sistemas, edificio Álvaro Beltrán Pinzón

PROBABILIDAD_PX
Evaluación de las probabilidades PA, PB, Pc, Pm, P'B, P'c, P'v, P'w y P'z

Evaluación de PA, PB y Pc
Medidas de protección: Aislamiento, equipotencialización y avisos. PA=0.00001.
Protección contra rayos: Nivel IV. PB=0.2.
Nivel de protección de DPS: Nivel III-IV. Pc=0.03.

Probabilidad de daño de sistemas internos. PM
 Con cableado en conduct metálico aterrizado en sus extremos al barraje equipotencial.
Uw en kV w en metros: 1 3.5 Cable apantallado con resistencia de pantalla 5<Rs<=20 Ohm/km. Ks3=0.001.
Sistemas internos con equipos a niveles de soportabilidad al impulso inferiores a los estándar. PMS=1.
Es provisto un sistema coordinado de protección y reducción de fallas de sistemas internos.

Evaluación de P'B, P'c, P'v y P'w
 Acometidas de servicios con conductores metálicos no apantallados.
n acometidas: 2 Rs: Resistencia del apantallamiento en Ohm/km: 5
Con pantalla en contacto con el suelo. Kd=1.
Cables adicionales apantallados-un conductor. Kp=0.4.
Cable de telecomunicaciones - Aislado en PVC. Uw5=kV.

P'v para líneas de telecomunicaciones
Líneas de telecomunicaciones con apantallamiento de aluminio. Ia=20kA.

Evaluación de P'z
Apantallamiento y equipo unido a barra equipotencial. 1<Rs<=5 Ohm/km. PL1 de P'z
Se implementan DPSs conforme a la normatividad nacional vigente. P'z

Resultados de la evaluación de las probabilidades de daño Px

| | |
|----------------|-----------|
| Pa | 1e-005 |
| Pb | 0.2 |
| Pc | 0.03 |
| Ks3 | 0.001 |
| Ks3 | 0.0002646 |
| Pms | 1 |
| Pm | 0.03 |
| Pll | 0.04 |
| Kd | 1 |
| Kc | 0.4 |
| Uw | 5 |
| Ia: P'a, P'c | 125 |
| Ia: P'v, P'w | 62.5 |
| P'a, P'c de Ia | 0.05 |
| P'v, P'w de Ia | 0.1 |
| P'b | 0.05 |
| P'c | 0.05 |
| P'v | 0.8 |
| P'w | 0.1 |
| P'z | 0.03 |

Evaluar probabilidades de daño **Ir al menú**

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Figura 71. Evaluación de probabilidad de daños a sistemas internos por descarga cerca o directa en las acometidas de servicio

EVAL_PU_PV_PW_PZ
Evaluación de las probabilidades Pu, Pv, Pw y Pz

Evaluación de Pu, Pv, Pw y Pz, en la sección aérea de la acometida de potencia. **NO EVALUAR**

Evaluación de Pu, Pv, Pw y Pz, en la sección subterránea de la acometida de potencia. **EVALUAR**
Cable apantallado con resistencia de pantalla 5<Rs<=20 Ohm/km. Uw en kV: 1.5
Los DPS cumplen los requerimientos de equipotencialización.
Existe coordinación de DPSs para protección y reducción de fallas de sistemas internos.
Apantallamiento y equipo unido a barra equipotencial. 5<Rs<=20 Ohm/km.

Evaluación de Pu, Pv, Pw y Pz, en la sección aérea de la acometida de telecomunicaciones. **NO EVALUAR**

Evaluación de Pu, Pv, Pw y Pz, en la sección subterránea de la acometida de telecomunicaciones. **EVALUAR**
Cable apantallado con resistencia de pantalla 1<Rs<=5 Ohm/km. Uw en kV: 0.6
Los DPS cumplen los requerimientos de equipotencialización.
Existe coordinación de DPSs para protección y reducción de fallas de sistemas internos.
Apantallamiento y equipo unido a barra equipotencial. 1<Rs<=5 Ohm/km.

Resultados

| | |
|-----|--|
| Pu | |
| Pv | |
| Pw | |
| Pll | |
| Pz | |

Resultados

| | |
|-----|--------|
| Pu | 1 |
| Pv | 3e-007 |
| Pw | 0.03 |
| Pll | 0.15 |
| Pz | 0.03 |

Resultados

| | |
|-----|--|
| Pu | |
| Pv | |
| Pw | |
| Pll | |
| Pz | |

Resultados

| | |
|-----|--------|
| Pu | 0.8 |
| Pv | 3e-007 |
| Pw | 0.03 |
| Pll | 0.03 |
| Pz | 0.04 |

Evaluar Pu, Pv, Pw y Pz **Ir al menú**

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Figura 72. Evaluación cantidad de pérdidas de vida humana, de servicio público, de valor cultural y económicas

PERDIDAS_LX

Evaluación de la cantidad de pérdidas Lx

Lt de L1: Todos los tipos estructura. Personas dentro de la estructura. Lt=1e-4 de L1.

Lf de L1: Industrial, comercial y escuelas. Lf=0.05 de L1.

Lo de L1: Sin riesgo de explosión.

ra y ru: Agricultura, concreto. ra=ru=0.01.

rp: Extintores manuales, alarmas manuales, hidrantes, compartimientos contra el fuego, rutas de evacuación. rp=0.5.

rf: Bajo. rf=0.001.

hz: Nivel bajo de pánico: Edificaciones de dos pisos y no más de 100 personas. hz=2.

Lf y Lo para L2: TV, TLC, suministro de potencia. Lf=0.01. Lo=0.001. De L2.

Lf de L4: Hoteles, escuelas, oficinas, centros comerciales, iglesias, bancos. Lf...

Lo de L4: Museos, uso agrícola, escuelas, iglesias, centros comerciales. Lo=0.001 de L4.

| Pérdidas de vidas humanas | | Pérdidas del servicio público | | Pérdidas de valor cultural | | Pérdidas económicas | |
|---------------------------|--------|-------------------------------|--------|----------------------------|--------|---------------------|--------|
| L _a | 1e-006 | L _B | 5e-006 | L _B | 5e-005 | L _a | 1e-006 |
| L _B | 5e-005 | L _V | 5e-006 | L _V | 5e-005 | L _V | 1e-006 |
| L _C | 1e-006 | L _C | 0.001 | | | L _B | 0.0002 |
| L _V | 5e-005 | L _M | 0.001 | | | L _V | 0.0002 |
| L _Z | 0 | L _W | 0.001 | | | L _C | 0.001 |
| L _M | 0 | L _Z | 0.001 | | | L _M | 0.001 |
| L _W | 0 | L _B ' | 0.01 | | | L _W | 0.001 |
| L _Z | 0 | L _C ' | 0.001 | | | L _Z | 0.001 |
| | | L _V ' | 0.01 | | | L _B ' | 0.2 |
| | | L _W ' | 0.001 | | | L _V ' | 0.2 |
| | | L _Z ' | 0.001 | | | L _C ' | 0.001 |
| | | | | | | L _W ' | 0.001 |
| | | | | | | L _Z ' | 0.001 |

Evaluar cantidad de pérdidas **Ir a menú**

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Figura 73. Evaluación componentes de riesgo

SELECCION_COMPONENTES

Evaluación de componentes de riesgo

Estructura con riesgo de explosión, hospital u otra estructura donde la falla de sistemas internos ponga en peligro la vida humana

Propiedad dode pueda haber pérdida de animales

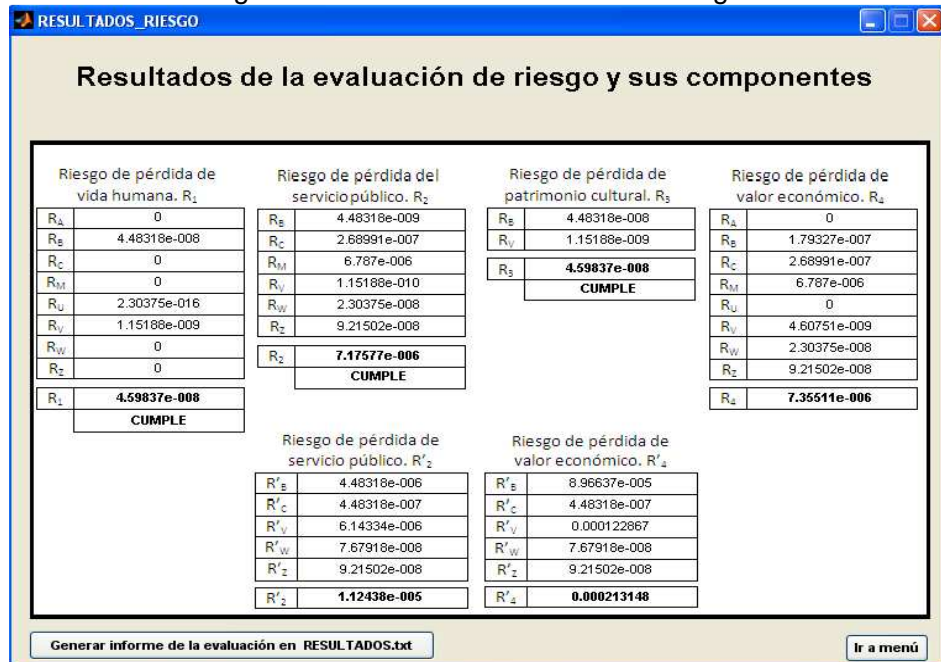
Se calcula para exteriores

Existe equipo sensible

Ir al menú

Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Figura 74. Resultado evaluación de riesgo



Fuente: Proyecto de grado evaluación de riesgo para edificaciones de uso final, Néstor Villa, Ángel Guarín, 2010

Los resultados obtenidos permiten concluir que la evaluación no sólo cumple con los niveles de riesgo tolerables, (ver tabla 29), sino que también propone un diseño más económico del SIPRA, puesto que acorde a la ubicación geográfica de la estructura, la ciudad de Bucaramanga presenta niveles bajos de DDT y de nivel cerámico, es decir, que en su gran mayoría las lluvias no van acompañadas de tormentas eléctricas lo que justifica un nivel de riesgo IV en el diseño; por lo tanto, el radio de la esfera rodante es de 55 m, lo que proporciona una mayor cobertura de la superficie a proteger e indica un menor número de puntas captadoras así como de conductores bajantes.

Tabla 29. Cuadro comparativo riesgos tolerables según la NTC 4552-2 y calculados.

| TIPO DE PÉRDIDA | $R_T (y^{-1})$ NTC 4552-2 | R_T CALCULADOS AL SIPRA EXISTENTE | R_T CALCULADOS NUEVO DISEÑO |
|-----------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| Pérdidas humanas | $\leq 1 * 10^{-5}$ | 0.00171324 NO CUMPLE | 4.59837 e-008 CUMPLE |
| Pérdidas de servicios | $\leq 1 * 10^{-3}$ | 0.00013614 CUMPLE | 7.17577 e-006 CUMPLE |
| Pérdidas culturales | $\leq 1 * 10^{-3}$ | 0.0001581 CUMPLE | 4.59837 e-008 CUMPLE |
| Pérdidas económicas | $\leq 1 * 10^{-3}$ | 0.00218754 NO CUMPLE | 7.35511 e-006 CUMPLE |

Fuente: Autores

5.3.2 Diseño del sistema de captación.

Para efectos de este proyecto se selecciona el método de la esfera rodante puesto que este se considera como el método de mayor efectividad en cuanto a la protección de la estructura debido a que la esfera hace un completo barrido en todas las direcciones sobre la superficie expuesta, evitando posible impactos del rayo en esquinas, bordes, techos o estructuras salientes, siendo estos lugares más críticos; además de ello, este método se ajusta para estructuras con alturas menores a los 55 m y cuya geometría es compleja, por lo que el punto más alto del edificio Álvaro Beltrán Pinzón es de 17,25 m, presenta salientes en la fachada y terraza debido a un techo en acrílico y exposición de aires acondicionados, además de presentar dos terraza de diferente nivel, una de ellas con acceso de personas como zona de esparcimiento o descanso.

➤ PARÁMETROS DE DISEÑO:

- Nivel de protección contra rayos: IV
- Corriente pico mínima del rayo I_p : 30 kA
- Radio de la esfera rodante para I_p dada: 55 m
- Geometría de la estructura: compleja

Figura 75. Terraza nivel superior edificio Álvaro Beltrán Pinzón



Fuente: Autores

Figura 76. Fotografía terraza nivel segundo piso edificio Álvaro Beltrán Pinzón



Fuente: Autores

Seleccionado el nivel de protección IV y el método de captación, se calcula la profundidad de penetración de la esfera rodante usando las distancias de separación de las varillas a criterio del diseñador luego de haber simulado el rodamiento de la esfera sobre los planos arquitectónicos usando el programa de AutoCAD. Ver (Anexo 12).

5.3.2.1 Cálculos de la esfera rodante.

$$p = r - \left[r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Dónde: p profundidad de penetración de la esfera rodante.
 r Radio de la esfera rodante para NPR IV.
 d Distancia de separación entre varillas.



- La distancia de separación horizontal entre las dos varillas de captación ubicadas en la terraza del segundo piso, cerca de la fachada posterior del edificio es de 15,26 m, por lo tanto la profundidad de penetración de la esfera es:

$$p = 55 - \left[55^2 - \left(\frac{15,26}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,53 \text{ m}$$

- Para la terraza del piso superior, en la zona correspondiente a la fachada oriental, la distancia de separación corresponde a la diagonal del rectángulo formado por las puntas captadoras, esta es igual a 19,13 m, por lo tanto, la profundidad de penetración de la esfera es:

$$p = 55 - \left[55^2 - \left(\frac{19,13}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,83 \text{ m}$$

La profundidad de penetración de la esfera rodante se da entre puntas de 0,6 m y 3 m ubicadas en la zona media de la terraza.

- Las puntas captadoras ubicadas en el medio de la terraza superior forman rectángulos cuya diagonal d corresponde a la distancia de separación, siendo esta de 13,74 m, por lo tanto, la profundidad de penetración de la esfera es:

$$p = 55 - \left[55^2 - \left(\frac{13,74}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,43 \text{ m}$$

- Finalmente, el rectángulo formado por las 4 varillas captadoras ubicadas en el techo del hangar zona de la fachada occidental tiene una diagonal de 14,65 m por lo tanto, la profundidad de penetración de la esfera es:

$$p = 55 - \left[55^2 - \left(\frac{14,65}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0,49 \text{ m}$$

La altura de las puntas captadoras debe ser superior a la profundidad de penetración p y por tanto mayor que la penetración de la esfera de rayo la cual permite tener una referencia de la distancia existente entre el punto más bajo de la esfera y la superficie a proteger, de esta forma, se garantiza que la esfera rodante no llegue a tocar la estructura, premisa que se cumple al observar los cálculos realizados, ya que la altura de las puntas captadoras es de 0,6 m en el perímetro del edificio de la terraza superior, de 3 m para la punta captadora de la mitad y de 1,5 m de las dos puntas captadoras ubicadas en la terraza del segundo piso.

5.3.2.2 Instalación del sistema de captación. Luego de diseñado el sistema de captación, se procede a la instalación del mismo sobre la estructura, para lo cual son necesarios los elementos dados en la tabla 30.

Tabla 30. Elementos necesarios para la instalación del sistema de captación

| Elementos |
|---------------------------|
| Puntas captadoras. |
| Anclaje. |
| Mástil. |
| Soporte para conductores. |
| Pieza de adaptación. |
| Conductor redondo. |
| Grapa. |
| Abrazaderas para tubo. |
| Conductores. |
| Fijaciones. |

Fuente: Autores

- **Procedimiento.** Se ubican las puntas captadoras de 0,6 m por el perímetro de la terraza superior a una distancia de separación establecida según el rodamiento de la esfera rodante, luego para compensar los dos niveles presentes en la terraza debido al techo del hangar, se ubica una punta captadora de 3 m en la mitad de la terraza superior la cual soporta las dos puntas captadoras de 1,5 m instaladas en la terraza del segundo piso. Finalmente las puntas son conectadas por un anillo equipotencial y unidas a este las partes metálicas conductoras, techos, barandas, equipo de refrigeración que se encuentren dentro de la distancia de seguridad mediante vías de chispa.

Figura 77. Instalación sistema de captación



Fuente: Manual de protección contra rayos DEHN

Para la instalación de la punta captadora:

- Fijar el eje central del captador a la pieza de adaptación del pararrayos al mástil.
- Pasar el cable conductor de bajada por el interior del mástil y conectarlo a la base de la pieza de adaptación, fijándolo mediante dos tornillos.
- Acoplar la pieza de adaptación dentro del mástil, fijarla con su tornillo.

En cuanto a los materiales y sección mínima transversal de los conductores estos se especifican en la NTC 4552-3, 2008, (Anexo 3) y las longitudes para los conductores se especifican en la tabla 9.

Tabla 31. Datos correspondientes al sistema de captación

| PARÁMETROS PARA NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS NPR IV | | ESPECIFICACIONES |
|--|-----------------------|--|
| Corriente pico mínima de polaridad negativa en zona tropical (NTC 4552-1, 2008) [kA] | | 30 |
| Tipo de sistema de captación | | No aislado |
| Radio esfera rodante según NTC 4552-3, 2008 | | $r_{sc} = 3,9 * I_p^{0,78} (m) = 3,9 * 30^{0,78} \cong 55$ |
| Cantidad de varillas captadoras | | 17 |
| LONGITUD VARILLAS CAPTADORAS | TERRAZA SEGUNDO PISO | ➤ 2 puntas de captación de 1,5 m. |
| | TERRAZA PISO SUPERIOR | <ul style="list-style-type: none"> ➤ 9 puntas de captación de 0,6 m ubicadas en el perímetro del techo del hangar. ➤ 5 puntas de 0,6 m ubicadas en el perímetro del nivel bajo de la terraza superior. ➤ Punta captadora de 3 m ubicada en la zona media del nivel bajo de la terraza superior. |

| | | |
|----------------------------------|--------------------------|--|
| PROFUNDIDAD ESFERA RODANTE | TERRAZA SEGUNDO PISO | ➤ $p = 0,53 \text{ m}$ |
| | TERRAZA PISO SUPERIOR | ➤ fachada oriental $p = 0,83 \text{ m}$ ➤ Zona media terraza superior $p = 0,43 \text{ m}$ ➤ Techo del hangar zona occidental $p = 0,49 \text{ m}$ |

Fuente: Autores

5.3.3 Diseño del sistema de conductores bajantes. Los conductores bajantes son el puente de unión entre el sistema de captación y el sistema de puesta a tierra, su función principal es la de llevar la corriente del rayo de forma segura a un medio donde pueda disiparla. En cuanto a su implementación, existe un número mínimo de conductores bajantes (2) por punta captadora éstos deben estar distribuidos uniformemente y es aconsejable ubicarlos en lados opuestos de la estructura con el fin de no concentrar la corriente del rayo en un único punto de la malla de tierra, ahora, para un nivel de protección IV, la distancia promedio de separación entre bajantes es de 20 m según la NTC 4552-3, 2008, esta distancia puede ser modificada, sin embargo, no debe ser menor a 1/3 de lo establecido por la norma es decir, 6,66 m.

5.3.3.1 Aislamiento eléctrico.

Figura 78. Fachadas edificio Álvaro Beltrán Pinzón



Fuente: Autores

El aislamiento eléctrico hace referencia a la distancia de separación S (ecuación 3.1) existente entre conductores bajantes y elementos metálicos del edificio en la cual no puede existir ninguna chispa peligrosa.

Tabla 32. Especificaciones diseño sistema de conductores bajantes.

| PARÁMETROS PARA NIVEL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS NPR IV | | ESPECIFICACIONES |
|---|-----------------------|---|
| Distancia de separación promedio entre conductores bajantes | | 20 m |
| Número de conductores bajantes | | 7 |
| LONGITUD CONDUCTORES BAJANTES | TERRAZA SEGUNDO PISO | <ul style="list-style-type: none"> ➤ $L_c=10,70\text{ m.}$ ➤ $l=9,2\text{ m.}$ |
| | TERRAZA PISO SUPERIOR | <p>Para los bajantes ubicados en el nivel más bajo de la terraza superior:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ $L_c=9,60\text{ m.}$ ➤ $l=8,10\text{ m.}$ <p>Bajantes ubicados desde el techo del hangar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ $L_c=11,06\text{ m.}$ ➤ $l=9,56\text{ m.}$ |

Fuente: Autores

Tabla 33. Variables presentes en el cálculo del aislamiento eléctrico.

| NÚMERO DE CONDUCTORES BAJANTES n | NIVEL DE PROTECCIÓN III k_i | SEGÚN AISLAMIENTO ENTRE PARTES k_m | C_s (m) | C_d (m) | h (m) | CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL MÁS CERCANA |
|---|----------------------------------|---|--------------|--------------|------------|------------------------------------|
| 10 | 0,04 | Concreto 0,5 | 14,46 | 12,80 | 10,20 | 1,3 m del nivel del suelo |
| <p>C_s: distancia al bajante siguiente por uno de los lados. C_d: distancia al bajante siguiente por otro de los lados. h: espacio entre los anillos conductores (equipotencializadores)</p> | | | | | | |

Fuente: Autores

El valor del coeficiente de división de la corriente de la descarga eléctrica a través de los conductores bajantes del rayo k_c además de tomar un valor fijo para las puntas captadoras, depende del número de bajantes instalados y del tipo de configuración de puesta a tierra como se muestra a continuación:



- **Cálculos para puntas captadoras.** El valor que toma el coeficiente de división de corriente del rayo k_c para las puntas captadoras es de 1, por lo que el cálculo tipo de la distancia de aislamiento S para los bajantes es:

$$S > k_i \frac{k_c}{k_m} l \rightarrow S = 0,04 \frac{1}{0,5} 9,2 \rightarrow S = 0,73 \cong 0,8 \text{ (m)}$$

De la misma forma para los demás bajantes.

- **Cálculos para puesta a tierra tipo A.** El valor que toma el coeficiente de división de corriente del rayo k_c para este tipo de configuración de puesta a tierra según la tabla 16 es de 0,44, por lo que el cálculo tipo de la distancia de aislamiento S es:

$$S > k_i \frac{k_c}{k_m} l \rightarrow S = 0,04 \frac{0,44}{0,5} 9,2 \rightarrow S = 0,32 \cong 0,4 \text{ (m)}$$

De la misma forma para los demás bajantes.

- **Cálculos para puesta a tierra tipo B.** Para este tipo de configuración de puesta a tierra, el coeficiente de distribución de la corriente del rayo k_c se calcula a través de la ecuación (3.6)

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2 \sqrt[3]{\frac{C_s}{h} \sqrt[6]{\frac{C_d}{C_s}}} \rightarrow k_c = \frac{1}{2*7} + 0,1 + 0,2 * \sqrt[3]{\frac{14,46}{10,20} \sqrt[6]{\frac{12,80}{14,46}}}$$

$$k_c = 0,39 \cong 0,40$$

El cálculo tipo de la distancia de aislamiento S es:

$$S > k_i \frac{k_c}{k_m} l \rightarrow S > 0,04 \frac{0,4}{0,5} 9,2$$

$$S > 0,29 \cong 0,3 \text{ (m)}$$

De la misma forma para los demás bajantes.

Tabla 34. Cuadro comparativo entre coeficiente k_c y distancias de aislamiento

| <i>COEFICIENTE K_c PARA PUNTAS CAPTADORAS</i> | | |
|--|---|---------------------------------------|
| <i>$k_c = 1$</i> | | |
| <i>DISTANCIAS DE AISLAMIENTO S (m)</i> | | |
| <i>Terraza segundo piso</i> | <i>Terraza piso superior (Nivel bajo)</i> | <i>Terraza piso superior (Hangar)</i> |
| <i>0,8 m</i> | <i>0,7 m</i> | <i>0,8</i> |
| <i>COEFICIENTE K_c PARA BAJANTES CONFIGURACIÓN DE SPT TIPO A</i> | | |
| <i>$k_c = 0,44$</i> | | |
| <i>DISTANCIAS DE AISLAMIENTO S PARA BAJANTES S (m)</i> | | |
| <i>Terraza segundo piso</i> | <i>Terraza piso superior (Nivel bajo)</i> | <i>Terraza piso superior (Hangar)</i> |
| <i>0,4</i> | <i>0,3</i> | <i>0,4</i> |
| <i>COEFICIENTE K_c PARA BAJANTES CONFIGURACIÓN DE SPT TIPO B</i> | | |
| <i>$k_c = 0,39$</i> | | |
| <i>DISTANCIAS DE AISLAMIENTO S PARA BAJANTES S (m)</i> | | |
| <i>Terraza segundo piso</i> | <i>Terraza piso superior (Nivel bajo)</i> | <i>Terraza piso superior (Hangar)</i> |
| <i>0,3</i> | <i>0,3</i> | <i>0,4</i> |

Fuente: Autores

La distancia de separación necesaria depende de la caída de potencial en la ruta más corta (l), rutas consideradas en la tabla 32 para cada uno de los bajantes, ahora, como estas longitudes varían, las distancias de aislamiento a ser consideradas serán diferentes como se puede observar en los resultados tabulados en la tabla 34.

En el caso puntual del edificio Álvaro Beltrán Pinzón, la evidencia fotográfica muestra que además de encontrar aires acondicionados en las terrazas tanto del piso superior como del segundo piso, en las fachadas oriental, posterior y occidental se encuentran expuestas tuberías y unidades de refrigeración lo que dificulta no solo el diseño de los conductores bajantes sino también la instalación de los mismos, por lo que las distancias de aislamiento calculadas anteriormente son de gran utilidad para evitar chispas peligrosas entre partes conductoras y los bajantes producto de la corriente del rayo. De igual forma, es necesario tener en cuenta la geometría de la estructura ya que además de los cálculos que se realizan, el diseño termina ajustándose a este concepto debido a la presencia de techos voladizos, ventanas, balcones, espacios vacíos entre otros.

5.3.3.2 Instalación del sistema de conductores bajantes. Los materiales necesarios para la instalación del sistema de conductores bajantes son:

Tabla 35. Elementos necesarios para la instalación del sistema de conductores bajantes

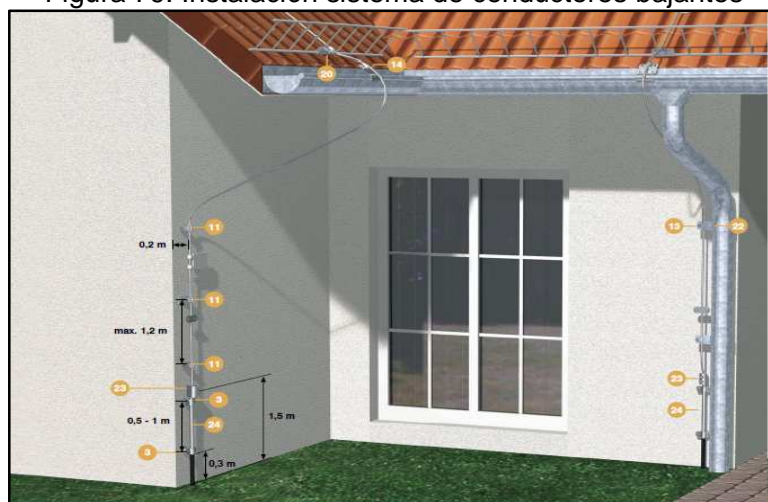
| Elementos |
|---------------------------------------|
| Grapas. |
| Soporte de tejas. |
| Soporte de tubería. |
| Manguito. |
| Vía de chispas para mástil de antena. |
| Contador de rayos. |
| Tubo de protección. |
| Conductores. |

Fuente: Autores

➤ **Procedimiento.**

En el proceso de diseño y construcción del sistema de bajantes se busca concebir un sistema económico, seguro y de calidad, para ello es necesario tener en cuenta las trayectorias que presenten menos obstáculos, cumplir las distancias de aislamiento y usar los materiales adecuados y de calidad.

Figura 79. Instalación sistema de conductores bajantes



Fuente: Aplicaciones tecnológicas, Guías de diseño de instalación de captadores

- Anclar el mástil a la estructura mediante el soporte más adecuado, si fuera necesario, fijar el mástil a la cubierta.
- Fijar el cable de la bajante mediante abrazaderas de fijación, procurando que quede bien tensado.
- Instalar el contador de rayos en la parte inferior del bajante, dos o tres metros por encima del suelo

En cuanto a los materiales y sección mínima transversal de los conductores estos se especifican en la NTC 4552-3, 2008, (Anexo 3) y las longitudes para los conductores se especifican en la tabla 9. Estos materiales cumplen con los requerimientos necesarios en cuanto a comportamiento térmico, eléctrico y la impedancia en función de la frecuencia.

En la tabla 36 se muestra La elevación máxima de la temperatura “ ΔT ” en K de los distintos conductores para cada nivel de protección

Tabla 36. Elevación máxima de la temperatura en grados K, de diferentes materiales conductores.

| q mm ² | Ø | Clase de protección | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------|---------------------|-----|----|----------|----|-----|----------|-----|-----|------------------|-----|-----|
| | | Aluminio | | | Hierro | | | Cobre | | | Acero inoxidable | | |
| | | III + IV | II | I | III + IV | II | I | III + IV | II | I | III + IV | II | I |
| 16 | | 146 | 454 | * | 1120 | * | * | 56 | 143 | 309 | * | * | * |
| 50 | 8 mm | 12 | 28 | 52 | 37 | 96 | 211 | 5 | 12 | 22 | 190 | 460 | 940 |
| 78 | 10 mm | 4 | 9 | 17 | 15 | 34 | 66 | 3 | 5 | 9 | 78 | 174 | 310 |
| * se funden/evaporan | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Manual de protección contra rayos DEHN

5.3.4 Diseño del sistema de puesta a tierra. La última etapa del diseño de protección externa contra rayos del edificio Álvaro Beltrán Pinzón consiste en unir las partes conductoras de la estructura, elementos metálicos, equipos eléctricos y electrónicos y el sistema interno, mediante cables de una instalación y un conjunto de electrodos que proveen un contacto eléctrico directo con el suelo. Para ello se pueden implementar dos tipos de configuración de puesta a tierra (A o B) o la combinación de los mismos.

5.3.4.1 Configuración tipo A o radial. Este tipo de configuración de puesta a tierra se aplica a estructuras con poca altura y aquellas que luego de ser



construidas le desean implementar un sistema de protección contra rayos, por lo que el edificio Álvaro Beltrán Pinzón se ajusta perfectamente a esta descripción.

Para su instalación de toma de tierra se usan electrodos verticales (varillas) y horizontales (contrapesos) externos a la estructura y conectados a cada conductor bajante, estos electrodos tienen una longitud mínima acorde a la figura 50 en donde para NPR IV para electrodos horizontales se fija una longitud $l_1 = 5 m$ y para electrodos verticales $0,5l_1 = 2,5 m$; estos se equipotencializan a través de un conductor y son enterrados en el suelo a una profundidad de $0,5 m$ de la superficie.

La instalación de los electrodos se puede hacer de dos formas, la primera es enterrando un conductor dentro del suelo por medio de una varilla corta evitando el uso de abrazaderas; o clavando electrodos de puesta a tierra inclinados o verticales y la segunda el conductor de puesta a tierra se conecta a una distancia considerable con el electrodo de puesta a tierra.

Con el objetivo de presentar diferentes alternativas en el diseño, se propone los 2 tipos de configuraciones, sin embargo, y a criterio del diseñador, existe una mayor preferencia por la configuración tipo anillo.

5.3.4.2 Configuración tipo anillo o tipo B. Para este diseño se propone la combinación de las 2 configuraciones de puesta a tierra en aras de una mejor protección. Sin embargo, hay mayor inclinación por la configuración tipo B ya que el anillo conductor además de actuar como un electrodo tipo, actúa en parte como un electrodo de puesta a tierra de cimentación y en parte como conductor de unión equipotencial ejerciendo un control de potencial en la vecindad, por lo tanto el esquema tipo A reforzará este diseño en cuanto a electrodos horizontales o contrapesos externos a la estructura.

Se instalará un anillo perimetral alrededor del edificio a aproximadamente $1 m$ de distancia de las fachadas, este anillo de forma rectangular tiene dimensiones de $46*35 m$ y contará con electrodos conectados a cada uno de los conductores bajantes.

El radio del anillo es de aproximadamente $29 m$ radio superior a la longitud de los electrodos establecida en la figura 50 del capítulo de sistemas de puesta a tierra en donde se establece las longitudes mínimas de los electrodos según el nivel de protección y la resistividad del terreno, por lo que para un nivel IV $l_1 = 5 m$ cumpliendo con $(r_e \geq l_1)$. Luego se procede a medir la resistencia de puesta a tierra del rayo ya que esta debe ser menor a 10Ω , si esto no cumple, se presentan dos opciones:



- Se instalan electrodos de puesta a tierra como los presentado en la configuración tipo A, ahí es donde se combinan los dos métodos ya que estos nuevos electrodos harían las veces de contrapeso, es decir, unidos al anillo perimetral pero a una distancia y profundidad de enterramiento mayor a la de los del anillo.
- Instalar un segundo anillo como lo indica la configuración tipo B a 3 m del primer anillo y los electrodos a una profundidad de enterramiento de 1 m.

La opción que se asume para el diseño es la opción 1 debido a la ubicación del edificio ya que este se encuentra rodeado por un muro que impide la instalación de un segundo anillo.

5.3.4.3 Corriente parcial de rayo (I_f). Cuando ocurre el fenómeno del rayo, la corriente se divide a través de los conductores bajantes y de las partes conductoras externas, por lo tanto y teniendo en cuenta que la corriente de impacto de rayo I para un nivel de protección IV es de 100 kA, y que la constante k_e corresponde a una proporción de esta corriente, I_f se calcula reemplazando:

$$I_f = k_e \times I \quad (5.4)$$

k_e para acometidas subterráneas:

$$k_e = \frac{z}{z_1 + z * (n_1 + n_2 * \frac{z_1}{z_2})} \quad (5.5)$$

Los valores tomados de la tabla 22, para una resistividad del terreno de 200 ($\Omega.m$) son:

Tabla 37. Variables presentes en el cálculo de k_e

| z | z_1 | z_2 | n_1 | n_2 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 6 | 13 | 0 | 2 | 0 |

Fuente: Autores

Reemplazando:

$$k_e = 0,24$$

$$I_f = 0,24 \times 100 = 24 \text{ kA}$$

Tabla 38. Parámetros de la malla de puesta a tierra.

| DATOS MALLA DE TIERRA | |
|--|----------|
| Largo de la malla (m) | 35 |
| Ancho de la malla (m) | 46 |
| Corriente (kA) | 24 |
| Resistividad del terreno (ρ) Ω -m | 200 |
| Resistividad capa superficial (ρ_s) Ω -m | 800 |
| Tiempo duración falla (t) | 2 ms |
| Profundidad de la malla (h) m | 0,7 |
| Tipo de material capa superficial | Concreto |
| Espesor capa superficial (h_s) m | 0,2 |
| Longitud de de los electrodos de tierra L_θ (m) | 2,4 |
| Max long de la malla en dirección del eje x (m) L_x | 46 |
| Max long de la malla en dirección del eje y (m) L_y | 35 |
| Área de la malla $A(m^2)$ | 1610 |
| Perímetro de la malla $L_p(m)$ | 162 |

Fuente: Autores

5.3.4.4 Cálculo del calibre del conductor de la malla.

$$A = I_f * \frac{197,4}{\sqrt{\alpha_r * \rho_r * t_c} * \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \quad (\text{mm}^2) \quad (5.6)$$

Tabla 39. Constantes de los materiales

| Descripción | α_r a 20 [°C] | K_{0a} 0 [°C] | T_m | ρ_r a 20°C | TCAP |
|---------------------------------------|----------------------|-----------------|-------|-----------------|------|
| Cobre puro | 0.00393 | 234 | 1083 | 1.72 | 3.42 |
| Cobre comercial | 0.00381 | 242 | 1084 | 1.78 | 3.42 |
| Cable de cobre recubierto de acero | 0.00378 | 245 | 1084 | 4.40 | 3.85 |
| Varilla de cobre recubierto de acero | 0.00378 | 245 | 1084 | 8.62 | 3.85 |
| Aluminio grado EC | 0.00403 | 228 | 657 | 2.86 | 2.56 |
| Aleación de aluminio 5005 | 0.00353 | 263 | 652 | 3.22 | 2.60 |
| Aleación de aluminio 6201 | 0.00347 | 268 | 654 | 3.28 | 2.60 |
| Cable de aluminio recubierto de acero | 0.00360 | 258 | 657 | 8.48 | 3.58 |
| Acero 1020 | 0.00160 | 605 | 1510 | 15.90 | 3.28 |
| Varillas de acero inoxidable | 0.00160 | 605 | 1400 | 17.50 | 4.44 |
| Varilla de zinc cubierta de acero | 0.00320 | 293 | 419 | 20.10 | 3.93 |
| Acero inoxidable 304 | 0.00130 | 749 | 1400 | 72.00 | 4.03 |
| Cable de cobre recubierto de acero | 0.00378 | 245 | 1084 | 5.86 | 3.85 |

Fuente: Norma IEEE80

T_m=temperatura máxima permisible.
T_a=temperatura ambiente para la región según ubicación geográfica
α_r= coeficiente térmico de resistividad.
K_o=factor dependiente de α_r.
t_c=duración de la corriente en segundos.
TCAP=capacidad térmica por unidad de volumen.

$$A = 24 * \frac{197,4}{\sqrt{\frac{3,42}{0,00393 * 1,72 * 0,2} * \ln\left(\frac{234+1083}{234+30}\right)}} = 58,396 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Con este valor escoge el tipo de calibre con el cual se elaborará la malla, para este caso es 2/0 AWG.

Tabla 40. Cables de cobre desnudo, tipo THW

| CALIBRE AWG | DIÁMETRO NOMINAL mm | | SECCIÓN TRANSVERSAL | | PESO Kg/Km | DURO | |
|-------------|---------------------|---------|---------------------|---------|------------|---------------------------|---|
| | mm | pulgada | mm ² | MCM | | Resistencia en ΩKm a 20°C | Carga de ruptura a la tensión en Kg. mínima |
| 3/0 | 10.404 | 0.4096 | 85.03 | 167.800 | 756.0 | 0.20870 | 3049.099 |
| 2/0 | 9.266 | 0.3648 | 67.43 | 133.100 | 599.0 | 0.26317 | 2503.418 |
| 1/0 | 8.251 | 0.3249 | 53.48 | 105.900 | 475.0 | 0.33171 | 2048.911 |

Fuente: Normas internacionales

- **Separación entre electrodos paralelos.** Como la malla de puesta a tierra de protección externa se hace luego de construido el edificio, el diseño solo permite colocar electrodos alrededor del perímetro, por lo tanto, el espaciamiento máximo entre ellos es de 35m y 46 m respectivamente.
- **Longitud total de los conductores utilizados (Lc).**

$$L_c = N * L_x + M * L_y \text{ (m)} \quad (5.7)$$

$$L_c = 2 * 35 + 2 * 46 \rightarrow L_c = 162 \text{ (m)}$$

- **Resistencia de la malla (Rg).**

$$R_g = \rho * \left[\frac{1}{L_c} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} * \left(1 + \frac{1}{1+h * \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] [\Omega] \quad (5.8)$$



$$R_g = 200 * \left[\frac{1}{162} + \frac{1}{\sqrt{20 * 1610}} * \left(1 + \frac{1}{1 + 0,7 * \sqrt{\frac{20}{1610}}} \right) \right] = 3,3830 [\Omega]$$



CONCLUSIONES

Las varillas del sistema de captación tiene la función principal de captar el rayo para posteriormente conducir la corriente a tierra, estas varillas al tener gran longitud ionizan el aire por lo que atrae más rápido el rayo hacia ella, sin embargo, al tener las puntas captadoras muy largas atraerían la mayoría de los rayos hacia la estructura lo que puede ser contra productivo, basados en ese principio y en cumplimiento con el método electrogeométrico, se instalaron por la periferia de la estructura varillas de 0,6 m uniformemente distribuidas en el diseño realizado para el Álvaro Beltrán Pinzón conservando la arquitectura y la estética del edificio.

Antes de realizar el diseño del sistema de protección externa en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón, se inspeccionaron las instalaciones del mismo y se encontró que este contaba con una instalación de 2 puntas captadoras de 4 m, por lo que inicialmente se parte de comprobar si este diseño cumple o no con lo estipulado en la norma técnica colombiana NTC 4552, usando el software de evaluación de riesgo desarrollado en el trabajo de grado de Néstor Villa y Ángel Guarín, posterior a ello en el programa de AutoCAD sobre los planos se visualiza el rodamiento de la esfera rodante sobre la superficie de la estructura lo que permite concluir que el diseño no cumple con los riesgos tolerables y deja expuesta gran parte de la estructura como esquinas y parte de la terraza del segundo piso.

Es importante dentro de la buena práctica de la ingeniería realizar de la mano de la obra civil y eléctrica el diseño del sistema de protección externa contra rayos, hecho que no se cumple en este proyecto ya que este es un rediseño hecho para el edificio Álvaro Beltrán Pinzón, por lo tanto la geometría del edificio definió variables, como la longitud de las varillas captadoras, longitud de los conductores bajantes y la disposición del anillo de puesta a tierra ya que la estructura en presenta techos salientes, voladizos, diferentes niveles de terraza y se encuentra cercado por un muro que impide la instalación de otro anillo equipotencial de tierra si fuese necesario.

Se definieron distancias de aislamiento eléctrico entre conductores bajantes y partes externas conductoras con el fin de evitar chispas peligrosas que conlleven a incendio, sin embargo, cuando estas distancias no se cumplen y por seguridad, estas partes expuestas son equipotencializadas debido a que al producirse el impacto del rayo este puede inducir tensiones en puertas y ventanas que estén cerca de los bajantes poniendo en riesgo la vida de personas que se encuentran cerca de esta zona.

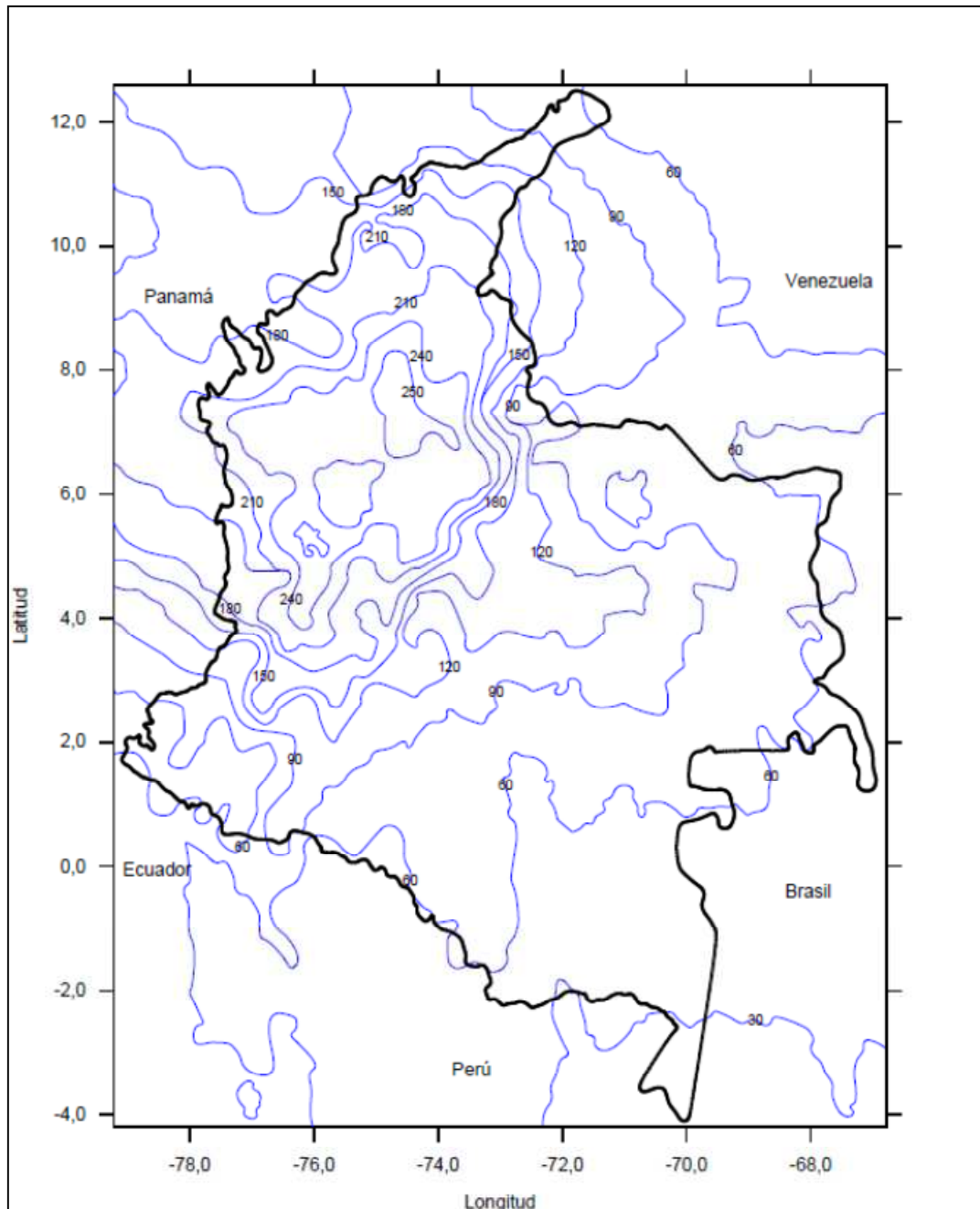


BIBLIOGRAFÍA

- [1] Torres-Sánchez, H. El Rayo, Mito, Leyendas, Ciencias y Tecnología, Ed. Unibiblos, Bogotá, 2002.
- [2] MANUAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS, Madrid: Dehn + Sohne, 2007.
- [3] Torres- Sánchez, H. Protección contra rayos, universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2008.
- [4] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, Protección contra rayos, Bogotá: ICONTEC, 2008. 77p.:il (NTC 4552-1).
- [5] PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES CAUSADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, CODENSA, 2003.
- [6] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, Protección contra rayos, Bogotá: ICONTEC, 2008. 63p.:il (NTC 4552-3)
- [7] MANUAL DE PUESTAS A TIERRA .THOR-GEL. 2011.
- [8] MARTÍNEZ, Juan Fernando y PULIDO, Sandra Patricia. Protección contra rayos. Sistemas de protección interna para edificaciones de uso final. Bucaramanga, 2011, 176p. Trabajo de grado (Ingenieros Electricistas). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
- [9] NFC 17-102, Estándar para la protección contra descargas atmosféricas francés.
- [10] PROTECCIÓN CONTRA EL RAYO, Gama Pararrayos, HELITA.
- [11] SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES Y CONTRA EL RAYO, OBO Bettermann, 2010.
- [12] CASAS OSPINA, Favio. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. Bogotá: ICONTEC, 2008.
- [13] VILLA, Néstor y GUARÍN, Ángel Eusebio. Evaluación de riesgo para edificaciones de uso final. Bucaramanga, 2010, 205p. Trabajo de grado (Ingenieros Electricistas). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

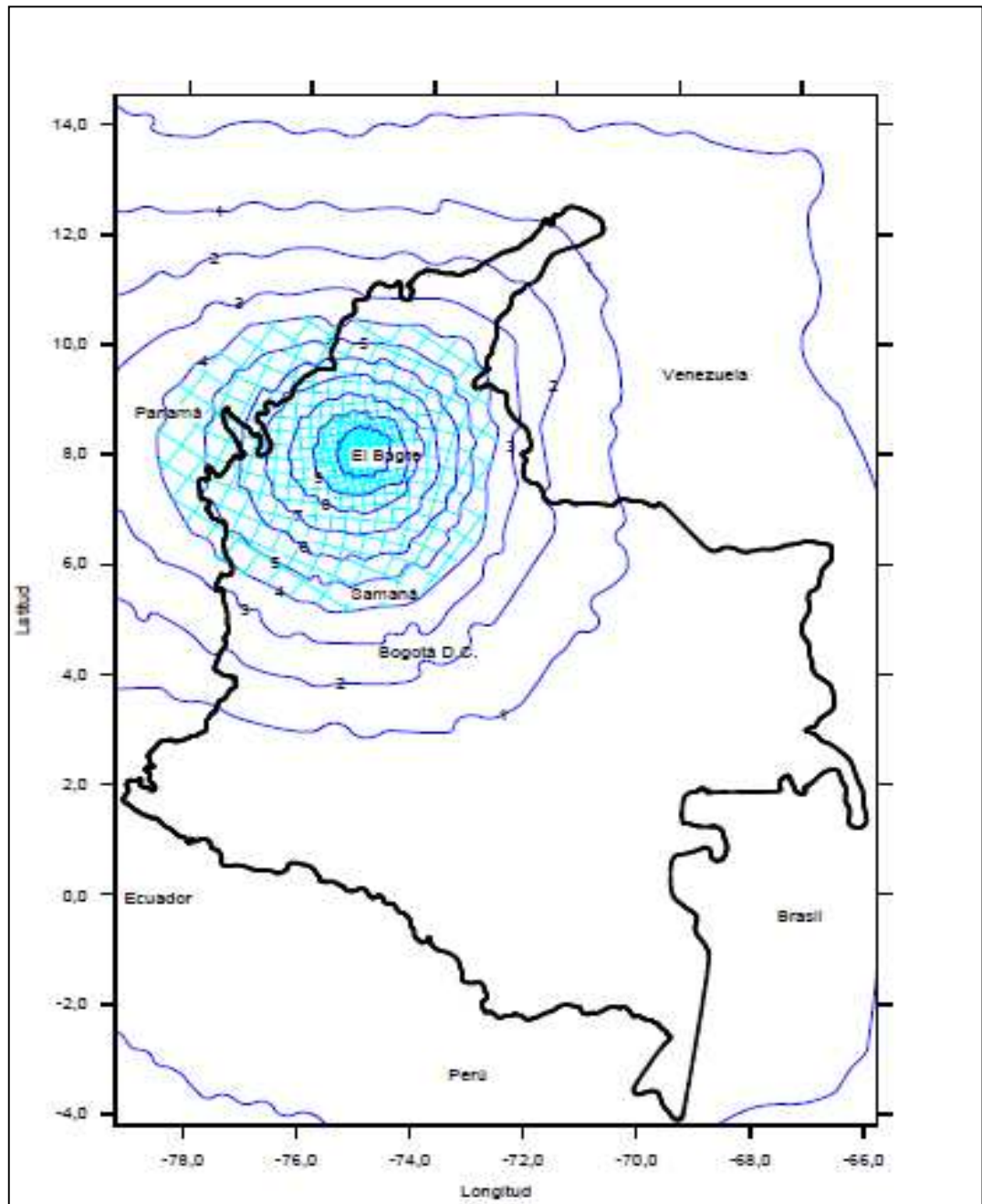
ANEXOS

ANEXO 1. Mapa de ISO-Niveles cerámicos para Colombia.



Fuente: NTC 4552-1, 2008

ANEXO 2. Mapa de DDT para Colombia 1999



Fuente: NTC 4552-1, 2008

ANEXO 3. Material, configuración y mínima área de la sección transversal para cables o varillas del sistema de captación y los conductores bajantes.

| Material | Configuración | Mínima área cuadrículada ⁸⁾ (mm ²) | Comentarios |
|---|----------------------------|---|----------------------------------|
| Cobre | Cinta sólida | 50 | 2 mm min de espesor |
| | Alambre ⁷⁾ | 50 | 8 mm de diámetro |
| | Trenzado | 50 | 1,7 mm min. de diámetro por hilo |
| | Alambre ^{3), 4)} | 200 | 16 mm de diámetro |
| Cobre recubierto de plata ¹⁾ | Cinta sólida | 50 | 3 mm min de espesor |
| | Alambre | 50 | 8 mm de diámetro |
| | Trenzado | 50 | 1,7 mm min. de diámetro por hilo |
| Aluminio | Cinta sólida | 70 | 3 mm min de espesor |
| | Alambre | 50 | 8 mm de diámetro |
| | Trenzado | 50 | 1,7 mm min. de diámetro por hilo |
| Aleación de aluminio | Cinta sólida | 50 | 2,5 mm min de espesor |
| | Alambre | 50 | 8 mm de diámetro |
| | Trenzado | 50 | 1,7 mm min de diámetro por hilo |
| | Alambre ³⁾ | 200 | 16 mm de diámetro |
| Acero galvanizado en caliente ²⁾ | Cinta sólida | 50 | 2,5 mm min de espesor |
| | Alambre | 50 | 8 mm de diámetro |
| | Trenzado | 50 | 1,7 mm min de diámetro por hilo |
| | Alambre ^{3), 4)} | 200 | 1,6 mm de diámetro |
| Acero inoxidable ⁵⁾ | Cinta sólida ⁶⁾ | 50 | 2,5 mm min de espesor |
| | Alambre ⁵⁾ | 50 | 8 mm de diámetro |
| | Trenzado | 70 | 1,7 mm min de diámetro por hilo |
| | Alambre ^{3), 4)} | 200 | 16 mm de diámetro |

¹⁾ Recubrimiento en caliente o galvanizado, espesor mínimo de la capa de 1 μm .
²⁾ El recubrimiento debería ser liso, continuo y libre de impurezas, espesor mínimo de la capa de 50 μm .
³⁾ Aplicable sólo para varillas tipo bayoneta. Para aplicaciones donde la tensión mecánica como la carga del viento no son determinantes, un diámetro de 10 mm, una varilla tipo bayoneta de 1 m de longitud máxima con una fijación adicional se puede utilizar.
⁴⁾ Aplicable sólo a varillas de tierra con alma de plomo.
⁵⁾ Cromo $\geq 16\%$, níquel $\geq 8\%$, carbón $\leq 0,07\%$.
⁶⁾ Para acero inoxidable incrustado en concreto, y/o en contacto directo con material inflamable, los tamaños mínimos deberían ser aumentados a 78 mm² (10 mm de diámetro) para alambre y 75 mm² (espesor mínimo de 3 mm) para cinta sólida.
⁷⁾ 50 mm² (8 mm de diámetro) se puede reducir a 28 mm² (6 mm de diámetro) en ciertos usos donde la fuerza mecánica no es un requisito esencial. Se debería considerar, en este caso, reducir el espacio entre los aseguradores.
⁸⁾ Si aspectos térmicos y mecánicos son importantes, estas dimensiones se pueden aumentar a 60 mm² para cinta sólida y a 78 mm² para alambre.
⁹⁾ La sección transversal mínima para evitar que se derrita es 16 mm² (cobre), 25 mm² (aluminio), 50 m² (acero) y 50 mm² (acero inoxidable) para una energía específica de 10 000 kJ/ Ω
¹⁰⁾ El espesor, el ancho y el diámetro son definidos en $\pm 10\%$.

Fuente: NTC 4552-3 2008

ANEXO 4. Descripción general edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

| UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER SISTEMA INTEGRAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS (SIPRA) DISEÑO DE PROTECCIÓN EXTERNA CONTRA RAYOS EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN | | | | | | |
|--|--------------------------------|---|---|--|---|--|
| EVALUACIÓN NIVEL DE RIESGO SEGÚN LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC4552-1-2-3 | | | | | | |
| Para dar cumplimiento al RETIE y de acuerdo con la norma NTC 4552-2, antes de diseñar el apantallamiento de una estructura o de una instalación, debe evaluarse el nivel de riesgo para el sitio en particular donde se ubicará el proyecto. El nivel de riesgo se evaluará a partir de la corriente del rayo, la cual es la fuente primaria de daños, de las características de la estructura, de los servicios que llegan a ella y de las estructuras que la rodean. | | | | | | |
| NORMATIVA APLICABLE | | | | | | |
| Para la evaluación del sistema de protección contra rayos seguimos los lineamientos de las siguientes normas: <ul style="list-style-type: none"> • Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE • Norma colombiana NTC 4552-2 Considerando los parámetros del rayo de la zona tropical donde está ubicada Colombia, y las fórmulas matemáticas desarrolladas y aprobadas para Colombia. | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER | | | | | | |
| El edificio ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN se encuentra ubicado en la carrera 27 con calle 9 dentro de las instalaciones del campus universitario de la Universidad Industrial de Santander, en la ciudad de Bucaramanga departamento de Santander. El tipo de instalación es la de edificación de uso final y el estado de la instalación es nuevo. Este edificio tiene un área total de 1477,4 m ² , cuenta con laboratorios de ingeniería civil, aulas de clase, centros de cómputo, oficinas, zonas comunes como cafetería, entre otros. | | | | | | |
| DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA (DDT) | | | | | | |
| LOCALIZACIÓN | LATITUD | LONGITUD | NIVEL CERÁUNICO | DDT AÑO | FACTOR DE LOCALIZACIÓN N C _d | CORRIENTE PICO ABSOLUTA PROMEDIA [I _{abs}] |
| Bucaramanga | 7°8'0" N, | 73°8'0" W | 90 | 1 rayo/km ² | 0,5 | > 43 kA, para Colombia. |
| CARACTERÍSTICAS EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN | | | | | | |
| DIMENSIONES DEL EDIFICIO | | | CARACTERÍSTICAS DEL SUELO | | | UBICACIÓN |
| LONGITUD m | ANCHO M | PUNTO MÁS ALTO (m) | TIPO SUELO INTERIOR | TIPO DE SUELO EXTERIOR | RESISTIVIDAD DEL TERRENO Ω.m | Árboles de igual o mayor altura en su vecindad |
| 33,2 | 44,5 | 17,25 | Concreto | Prado, concreto | 200 | |
| SERVICIOS DE LA ESTRUCTURA | | | | | | |
| TIPO DE SERVICIO | TIPO DE CABLEADO | TRAFO DE AISLAMIENTO | NÚMERO DE SERVICIOS | ACOMETIDAS | | |
| Subterráneo | No apantallado | No tiene | 4 | Acometida de energía | Acometida telefónica | Acometida de datos |
| MEDIDAS PREVENTIVAS CON QUE CUENTA LA ESTRUCTURA FRENTE A UN POSIBLE IMPACTO DE RAYO | | | | | | |
| PROTECCIÓN EXTERNA SPE | PROTECCIÓN INTERNA SPI | MEDIDAS FRENTE A TENSIONES DE PASO Y CONTACTO | PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS | SITUACIÓN ESPECIAL DE PELIGRO | | |
| Tiene | Cuenta con muy pocos elementos | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipotencialización a nivel del suelo ▪ Refuerzos estructurales como bajantes | Rutas de evacuación, extintores, manuales, hidrantes, cortafuego... | Nivel bajo de pánico (Edificación para cantidad de personas menores a 100) | | |

Fuente: Autores

ANEXO 5. Descripción exteriores edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

| DESCRIPCIÓN EXTERIORES DEL EDIFICIO | | | | |
|--|--|--|--|--|
| VISTA SUPERIOR⁽¹⁾ | VISTA FRONTAL | VISTA POSTERIOR | VISTA FACHADA OCCIDENTAL | VISTA FACHADA ORIENTAL |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 Puntas Franklin ▪ Unidades de aire acondicionado ▪ Tubería expuesta de energía eléctrica ▪ Tubería de aire acondicionado ▪ Luminarias externas ▪ Domo acrílico con esqueleto metálico ▪ Cajas eléctricas | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hidratante ▪ Reflectores externos en los muros ▪ Luminaria alumbrado público | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Unidad de refrigeración de aire acondicionado ▪ Tubería de aire acondicionado ▪ Reflectores de muro ▪ Unidad de aire acondicionado en cerca metálica ▪ Unidad de aire acondicionado LG ubicada en saliente de primer piso ▪ Tubo de aire acondicionado que desciende de la azotea | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reflector de muro ▪ Portón metálico ▪ Tuberías expuestas de aire acondicionado | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Torre de enfriamiento ▪ Reflector externo en muro |
| <p>⁽¹⁾ Al hacer la inspección en la terraza se observa cableado desde las puntas de Franklin para la conexión posterior de los bajantes. Se observan cajas eléctricas, conexiones eléctricas de aire acondicionado, además del difícil acceso que tienen algunos de estos para su mantenimiento.</p> | | | | |

Fuente: Autores

ANEXO 6. Descripción general edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Planta sub-sótano.

| DESCRIPCIÓN ELEMENTOS DEL EDIFICIO | | | | | | |
|--|--|--|---|---|---|---|
| SUB-SÓTANO | | | | | | |
| FABRICACIÓN DE PROBETAS Y SERVICIOS ⁽¹⁾ | ACONDICIONAMIENTO DE PROBETAS ⁽²⁾ | COMPRESOR ⁽³⁾ | CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ⁽⁴⁾ | CUARTO ELÉCTRICO ⁽⁵⁾ | ALMACÉN DE MUESTRAS ⁽⁶⁾ | ALMACENAMIENTO ⁽⁷⁾ |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Horno digital de precisión ▪ Tamizadora eléctrica ▪ Cámara extractora de vapores ▪ Material de construcción ▪ Balanzas electrónicas ▪ Baño de maría | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Máquina universal de ensayos ▪ Máquina de ensayo corte directo ▪ Máquina triaxial y compresor ▪ Máquina consolidación ▪ Máquina universal de madera ▪ Máquina para ensayo de dureza ▪ Máquina universal de impacto ▪ Máquina para ensayo de marcha ▪ Máquina de ensayo de compresión simple ▪ Máquina de ductilidad de asfalto ▪ Tanque de agua ▪ Cilindro gas propano ▪ Horno ▪ Computador | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Compresor trifásico 220/440 con motor de 5,5 HP ▪ Circuito guarda motor | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Horno para extracción de asfalto ▪ Nevera ▪ Batidora industrial ▪ Computadores ▪ Máquina universal dinámica ▪ Máquina INSTRON serie 1125 ▪ Máquina de fluido hidráulico tipo premium ▪ Máquina de corte directo ▪ Máquina de compresión de cilindro | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Control de aire acondicionado ▪ Tablero de red regulada sub-sótano TRO | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hornos ▪ Cocinas ▪ Máquinas tamizadoras | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Muestras de materiales de construcción como: ▪ Grava ▪ Arena ▪ Otros |
| <p>(1) Tubería externa de agua y gas, tomas de energía de 120v con polo de puesta a tierra, elementos de trabajo aire comprimido, agua, electricidad y materiales inflamables.</p> <p>(2) Elementos de trabajo aire, electricidad y gas, tomas de energía trifásicas, especiales y comunes de 120 V.</p> <p>(3) Circuito independiente para el compresor.</p> <p>(4) Tubería externa de agua y gas, tomas de energía trifásicas, especiales y comunes de 120 V.</p> <p>(5) Tablero de difícil acceso por uso dado al cuarto</p> <p>(6) Falta de mantenimiento de los equipos</p> <p>(7) Existen oficinas del personal de mantenimiento de los equipos provista de computadores, teléfonos y aire acondicionado dentro del lugar de almacenamiento de materiales.</p> | | | | | | |

Fuente: Tesis de grado .Protección contra rayos. Sistema de protección interna. Sandra Paola Pulido, Juan Fernando Martínez 2011.

ANEXO 7. Descripción general edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Planta primer piso, segundo piso.

| DESCRIPCIÓN ELEMENTOS DEL EDIFICIO | | | | | | |
|--|---|---|---|--|---|--|
| PLANTA PRIMER PISO | | | | | | |
| ADMINISTRACIÓN ⁽¹⁾ | LABORATORIO DE PROTOTIPO ⁽²⁾ | LABORATORIO DE ENSAYO ⁽³⁾ | LABORATORIO DE TOPOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA ⁽⁴⁾ | LABORATORIO DE MODELADO DE ESTRUCTURAS, SÍSMICA Y ACÚSTICA ⁽⁵⁾ | LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ⁽⁶⁾ | OFICINAS LABORATORIO DE ESTRUCTURAS ⁽⁷⁾ |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gabinete de comunicaciones ▪ Computadores ▪ Aire acondicionado | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Computadores y un servidor ▪ Impresora multifuncional ▪ Unidad telefónica | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Horno ▪ Compresor ▪ Peso ▪ Balanzas ▪ Batidora ▪ Concreto, arena | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Material de medición de profundidad ▪ Papelería ▪ Máquina topoflex | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Televisor ▪ Máquinas mecánicas ▪ Aire acondicionado ▪ Escritorios | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grava ▪ Concreto ▪ Computador ▪ Mallas en alambre ▪ Puente grúa ▪ Servo actuador hidráulico ▪ Tubos en concreto | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Computador ▪ Escritorio ▪ Sillas |
| PLANTA SEGUNDO PISO | | | | | | |
| SALÓN DE INVESTIGACIÓN ⁽⁸⁾ | SALA DE REUNIONES ⁽⁹⁾ | OFICINA PROFESORES | ZONA DE ESPARCIMIENTO TERRAZA | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Elementos de oficina ▪ Computadores | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero digital ▪ Video beam ▪ Aire acondicionado | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Elementos de oficina ▪ Computadores ▪ Instalaciones sanitarias | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sillas y mesas metálicas ▪ Unidades de aire acondicionado ▪ Barómetros de precisión | | | |
| <p>(1) Acometida de fibra óptica multi modo, canaleta no equipotencializada según la división proporcionada por servicios generales. (2) Conexiones poco seguras debido al uso de multitomas. (3) Cantidad de materiales no identificados. (4) Toma de energía trifásicas y comunes de 120 V. (5) Almacenamiento de material como icopor, presencia de trabajos de grado realizado por estudiantes. (6) Se encuentra la unidad de control hidráulico, tomas de energía especiales y trifásicos. (7) Tomas comunes de 120 V. (8) Tomas de energía comunes de 120 V, flujo de gran cantidad de personas, papelería. (9) Tomas de energía comunes de 120 V.</p> | | | | | | |

Fuente: Tesis de grado .Protección contra rayos. Sistema de protección interna. Sandra Paola Pulido, Juan Fernando Martínez 2011.

ANEXO 8. Características de las acometidas de servicio edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

| CARACTERÍSTICAS DE LAS ACOMETIDAS DE SERVICIO | | | | | | | | |
|--|----------------------|--|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------|--|--|
| ACOMETIDA DE POTENCIA | | | | | | | | |
| TIPO DE ACOMETIDA | LONGITUD DE LA LÍNEA | TIPO DE CABLE DE MEDIA TENSIÓN | TIPO DE CABLEADO INTERNO | TRANSFORMADOR AT/BT EN LA ACOMETIDA | NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS | CABLEADO INTERNO | APANTALLAMIENTO DE LA LÍNEA | LOCALIZACIÓN DE LA ACOMETIDA DE SERVICIO |
| Subterránea | 193 m | Cable Cu XLPE 15 kV | Alambre Cu aislamiento THWN | Acometida con transformador | 1,5 kV | Sin formar lazos | No tiene | Aislada, sin objetos en la vecindad |
| ACOMETIDA DE COMUNICACIONES | | | | | | | | |
| TIPO DE ACOMETIDA | LONGITUD DE LA LÍNEA | TIPO DE CABLE DE TELÉFONO | TIPO DE CANALIZACIÓN | NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS | APANTALLAMIENTO DE LA LÍNEA | CABLEADO INTERNO | LOCALIZACIÓN DE LA ACOMETIDA DE TELÉFONO | |
| Subterránea | 350 m | Cable UTP categoría 6 | No metálica | 1 kV | No tiene | Sin formar lazos | Aislada, sin objetos en la vecindad | |
| ACOMETIDA DE DATOS | | | | | | | | |
| TIPO DE ACOMETIDA | LONGITUD DE LA LÍNEA | TIPO DE CABLE DE DATOS | TIPO DE CANALIZACIÓN | NIVEL DE AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS | APANTALLAMIENTO DE LA LÍNEA | CABLEADO INTERNO | LOCALIZACIÓN DE LA ACOMETIDA DE DATOS | |
| Subterránea | 350 m | Fibra óptica multimodo 12 hilos 50/125 μm | No metálica | 0,6 kV | Fibra óptica | Sin formar lazos | Aislada, sin objetos en la vecindad | |

Fuente: Tesis de grado .Protección contra rayos. Sistema de protección interna. Sandra Paola Pulido, Juan Fernando Martínez 2011

ANEXO 9. Descripción elementos y equipos eléctricos edificio Álvaro Beltrán Pinzón. Subestación eléctrica

| DESCRIPCIÓN ELEMENTOS Y EQUIPOS ELÉCTRICOS | | | | | |
|--|-----------|----------------------|--|---|--|
| SUBESTACIÓN ELÉCTRICA | | | | | |
| TIPO | CAPACIDAD | NIVEL DE TENSIÓN (V) | ELEMENTOS | PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN | TABLERO GENERAL DE BAJA TENSIÓN |
| Jardín | 225 kVA | 13200 - 3*220/127 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pararrayos tipo codo y fusibles de respaldo ELSP ▪ Puerta cortafuego de 2*2 m | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Varillas Cu 5/8" * 2 m ▪ Cable Cu desnudo calibre 3/0 ▪ Tratamiento químico ▪ Soldaduras exotérmicas ▪ Accesorios de conexión para puntos a aterrizar | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gabinete metálico ▪ Medidor electrónico multitarifa ▪ Bornera de conexiones ▪ 3 transformadores de corriente 600/5 A, clase 0,2 ▪ 3 pilotos de señalización a 220 v, incluye bombillos ▪ Barraje Cu electrolítico de 2"*1/4" ▪ 1 Interruptor automático tripolar 220 V, 50 kA, 630 A regulable ▪ 2 Interruptor automático tripolar 220 V, 50 kA, 150 A ▪ 1 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 100 A ▪ 1 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 80 A ▪ 3 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 50 A ▪ 4 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 40 A ▪ 2 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 30 A ▪ 1 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 20 A ▪ 4 Interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 15 A ▪ Puesta a tierra en conductor calibre 3/0 ▪ Accesorios de montaje y conexión |

Fuente: Tesis de grado. Protección contra rayos. Sistema de protección interna. Sandra Paola Pulido, Juan Fernando Martínez 2011.

ANEXO 10. Descripción Tableros eléctricos edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

| TABLEROS | | | | | |
|--|--|--|---|---|---|
| TABLERO TA0 PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ALUMBRADO EN SUBSÓTANO Y EXTERIORES | TABLERO TTO PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE SALIDAS DE TOMACORRIENTES EN LABORATORIO DEL SUBSÓTANO | TABLERO TA1 PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ALUMBRADO DEL PRIMER PISO | TABLERO TA2 PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ALUMBRADO DEL SEGUNDO PISO | INSTALACIONES INTERNAS RED REGULADA | |
| | | | | TABLERO TRO PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE TOMACORRIENTES | TABLERO TR2 PROTECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE TOMACORRIENTES |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero trifásico de 24 circuitos con puerta, chapa y espacio para totalizador ▪ 1 interruptor automático tripolar 220 V, 10 kA, 80 A tipo industrial ▪ 4 interruptores enchufables 1x15 A, 240 V, 10 kA ▪ 5 interruptores enchufables 1x20 A, 240 V, 10 kA ▪ 5 interruptores enchufables 2x20 A, 240 V, 10 kA ▪ Accesorios de montaje, identificación y conexionado. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero trifásico de 42 circuitos con puerta, chapa y espacio para totalizador ▪ 1 interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 150 A tipo industrial ▪ 7 interruptores enchufables 1x20 A, 240 V, 10 kA ▪ 12 interruptores enchufables 2x15 A, 240 V, 10 kA ▪ Accesorios de montaje, identificación y conexionado. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero trifásico de 42 circuitos con puerta, chapa y espacio para totalizador ▪ 1 interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 150 A tipo industrial ▪ 12 interruptores enchufables 1x15 A, 240 V, 10 kA ▪ 3 interruptores enchufables 1x20 A, 240 V, 10 kA ▪ 11 interruptores enchufables 2x15 A, 240 V, 10 kA ▪ Accesorios de montaje, identificación y conexionado | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero trifásico de 18 circuitos con puerta, chapa y espacio para totalizador ▪ 1 interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 40 A tipo industrial ▪ 8 interruptores enchufables 1x15 A, 240 V, 10 kA ▪ 2 interruptores enchufables 1x20 A, 240 V, 10 kA ▪ 1 interruptor enchufable 2x15 A, 240 V, 10 kA ▪ Accesorios de montaje, identificación y conexionado. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero trifásico de 12 circuitos con puerta, chapa y espacio para totalizador ▪ 1 interruptor automático tripolar 220 V, 25 kA, 30 A tipo industrial ▪ 8 interruptores enchufables 1x15 A, 240 V, 10 kA ▪ 1 supresor de transientes 80 kA, 3F+N+T ▪ Caja metálica 30x30x15cm ▪ Accesorios de montaje, identificación y conexionado. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tablero trifásico de 12 circuitos con puerta y chapa ▪ 7 interruptores enchufables 1x15 A, 240 V, 10 kA ▪ 1 supresor de transientes 80 kA, 3F+N+T ▪ Caja metálica 30x30x15cm ▪ Accesorios de montaje, identificación y conexionado. |

Fuente: Autores

ANEXO 11. Componentes de riesgo, pérdidas y daños causados al edificio Álvaro Beltrán Pinzón ante una descarga atmosférica.

| COMPONENTES DE RIESGO, PÉRDIDAS Y POSIBLES DAÑOS CAUSADOS AL EDIFICIO ÁLVARO BELTRÁN PINZÓN ANTE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|-------------------------------------|---|---|--|--|---|-------------------------------------|--|---|---|
| PUNTO DE IMPACTO DEL RAYO | IMPACTO A LA ESTRUCTURA S1 | | | | IMPACTO CERCA A LA ESTRUCTURA S2 | | IMPACTO AL SERVICIO ENTRANDO A LA ESTRUCTURA S3 | | | IMPACTO CERCA AL SERVICIO ENTRANDO A LA ESTRUCTURA S4 | | |
| TIPO DE DAÑO CAUSADO | LESIONES SERES VIVOS D1 | DAÑOS ESTRUCTURA D2 | FALLA SISTEMAS INTERNOS D3 | | FALLA SISTEMAS INTERNOS D3 | | LESIONES SERES VIVOS D1 | DAÑOS ESTRUCTURA D2 | FALLA SISTEMAS INTERNOS D3 | | FALLA SISTEMAS INTERNOS D3 | |
| | X | X | X | | X | | ----- | ----- | X | | ----- | |
| PÉRDIDAS SEGÚN DAÑO CAUSADO | VIDAS HUMANAS L1 | SERVICIOS PÚBLICOS L2 | BIENES CULTURALES L3 | ECONÓMICA L4 | SERVICIOS PÚBLICOS L2 | ECONÓMICA L4 | VIDAS HUMANAS L1 | SERVICIOS PÚBLICOS L2 | BIENES CULTURALES L3 | ECONÓMICA L4 | SERVICIOS PÚBLICOS L2 | ECONÓMICA L4 |
| | <ul style="list-style-type: none"> Por fuego. Sobre-tensión. Tensiones de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Por fuego. Sobre-tensión. | No existe tal pérdida | <ul style="list-style-type: none"> Por fuego. Sobre-tensión. Tensiones de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Pérdida de servicio por sobre-tensión | <ul style="list-style-type: none"> Sobre-tensión | <ul style="list-style-type: none"> Sobre-tensión Tensión de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Pérdida de servicio por sobre-tensión | No existe tal pérdida | <ul style="list-style-type: none"> Sobre-tensión Tensión de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Pérdida de servicio por sobre-tensión | <ul style="list-style-type: none"> Nivel de pérdida muy bajo |
| RIESGO SEGÚN EL TIPO DE PÉRDIDA | RIESGO PÉRDIDA VIDA HUMANA R1 | RIESGO PÉRDIDA SERVICIO PÚBLICO R2 | RIESGO PÉRDIDA BIENES CULTURALES R3 | RIESGO PÉRDIDA ECONÓMICA R4 | RIESGO PÉRDIDA SERVICIO PÚBLICO R2 | RIESGO PÉRDIDA ECONÓMICA R4 | RIESGO PÉRDIDA VIDA HUMANA R1 | RIESGO PÉRDIDA SERVICIO PÚBLICO R2 | RIESGO PÉRDIDA BIENES CULTURALES R3 | RIESGO PÉRDIDA ECONÓMICA R4 | RIESGO PÉRDIDA SERVICIO PÚBLICO R2 | RIESGO PÉRDIDA ECONÓMICA R4 |
| | <ul style="list-style-type: none"> Por fuego. Sobre-tensión. Tensiones de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Por fuego. Sobre-tensión | No existe tal riesgo | <ul style="list-style-type: none"> Por fuego. Sobre-tensión Tensiones de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Por sobre-tensión | <ul style="list-style-type: none"> Por sobre-tensión. | <ul style="list-style-type: none"> Sobre-tensión Tensión de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Por sobre-tensión. | No existe tal riesgo | <ul style="list-style-type: none"> Sobre-tensión Tensión de paso y de contacto | <ul style="list-style-type: none"> Por sobre-tensión | <ul style="list-style-type: none"> Nivel de riesgo muy bajo |

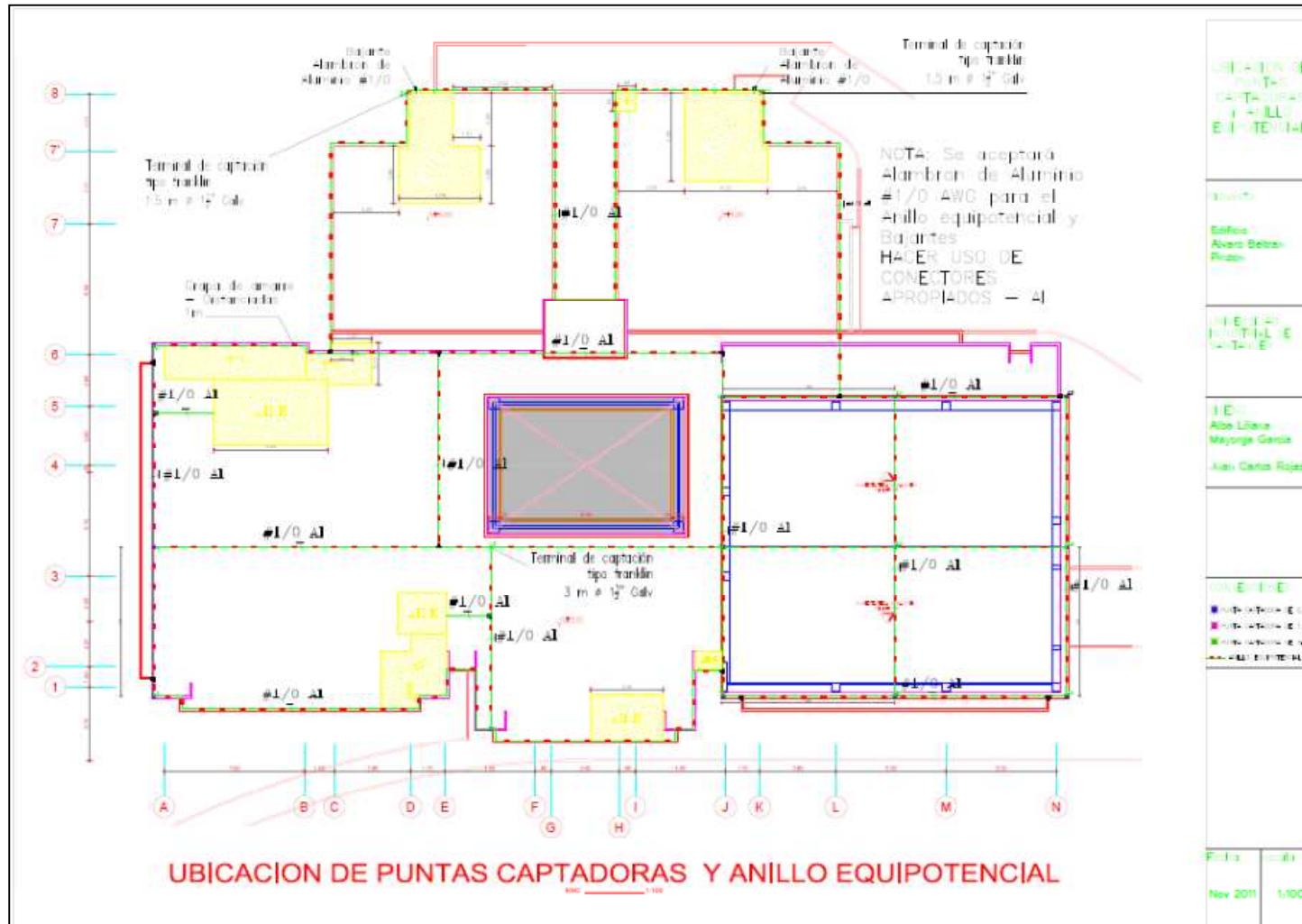
Fuente: Autores

ANEXO 12. MEG para nuevo diseño de protección externa contra rayos edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

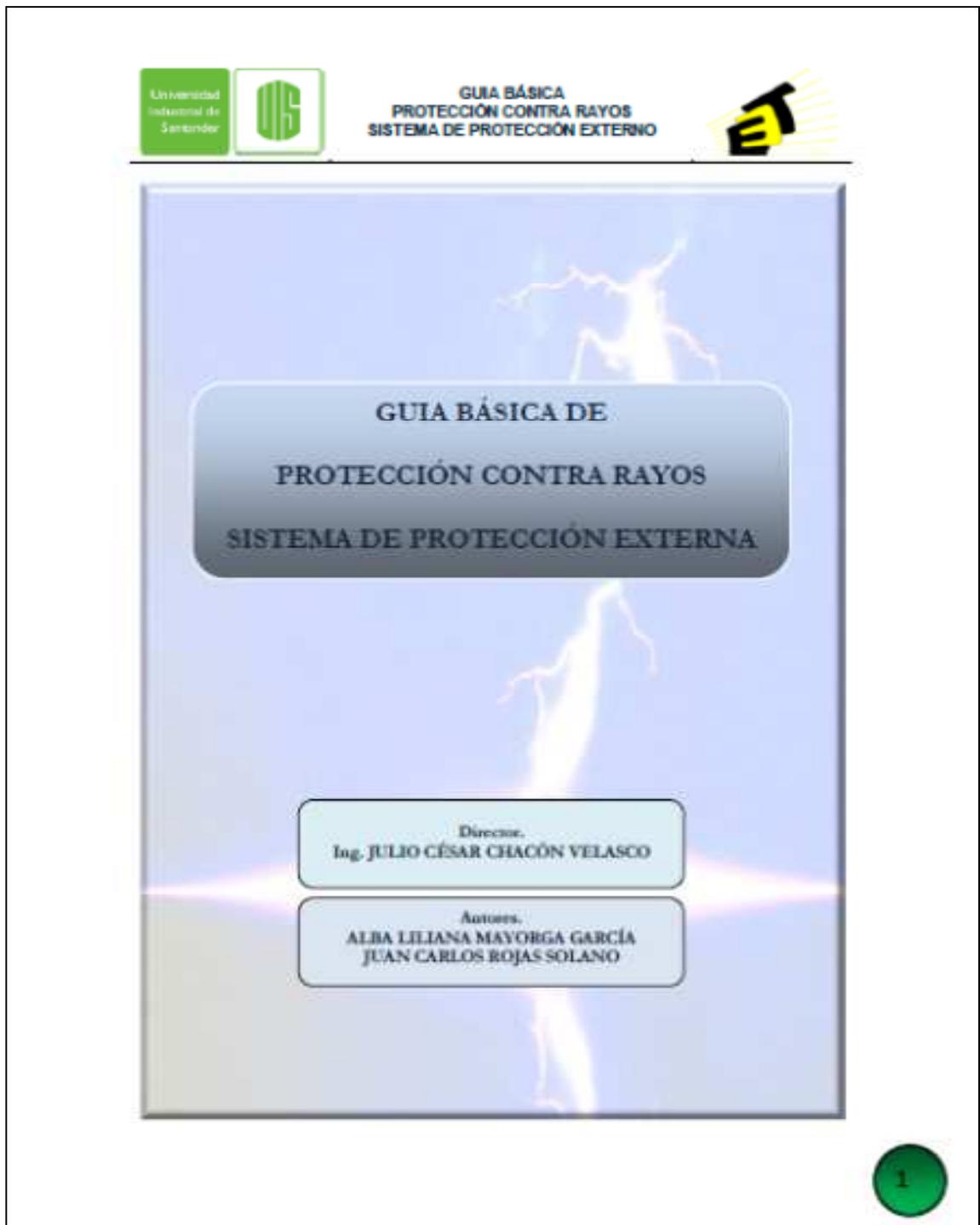



Fuente: Autores

ANEXO 13. Planos diseño de protección externo contra rayos. Edificio Álvaro Beltrán Pinzón.



ANEXO 14. Guía básica de protección contra rayos. Sistema de protección externo.






UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

GUIA BÁSICA
PROTECCIÓN CONTRA RAYOS
SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

CONTENIDO

| | <i>Pag.</i> |
|---|-------------|
| SISTEMA DE PROTECCION EXTERNO (SPE) | 3 |
| SISTEMA DE CAPTACIÓN | 4 |
| SISTEMA DE BAJANTES | 8 |
| SISTEMA DE PUESTA A TIERRA | 11 |



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

GUIA BÁSICA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO (SPE)



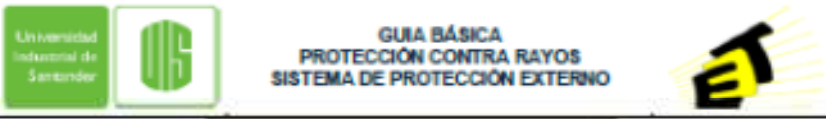
Figura 1. Sistema de protección externo Fuente: Autores

¿Qué es y que función cumple un SPE?

Un SPE es un conjunto de dispositivos situados en o sobre el objeto a proteger con el objetivo de interceptar las descargas que se dirigen hacia él, conduciendo y dispersando de manera segura las corrientes de rayo, desde el punto de impacto a tierra, sin causar daños térmicos o mecánicos ni producir chispas peligrosas.



Figura 2. Componentes de un sistema de protección externo Fuente: Autores



GUIA BÁSICA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

SISTEMA DE CAPTACIÓN

Sistema encargado de interceptar los rayos que vayan a impactar directamente sobre la estructura para luego derivar la corriente de forma segura al subsuelo.

Los sistemas de captación pueden resultar producto de la combinación de los siguientes elementos:

1. Varillas tipo Franklin.

Se encargan de atraer los rayos hacia un zona de influencia; por su geometría, este tipo de varillas y su nivel de extensión son el punto más alto sobre la superficie de la estructura aumentando la probabilidad de que el rayo caiga en ella.
2. Cables colgantes.


Consiste en uno o varios cables que se sitúan sobre la estructura con sus extremos conectados a tierra.
3. Malla de conductores.

Consiste en una serie de varillas o puntas captadoras conectadas entre sí por medio de un cable conductor formando un enmallado, el cual permite dividir la corriente del rayo mitigando perturbaciones o posibles daños a la estructura.



CABLES COLGANTES
 MALLA DE CONDUCTORES
 VARELLAS TIPO FRANKLIN

Figura 3. Elementos de un sistema de captación
Fuente: Autores



Planificación de un sistema de captación

Métodos desarrollados para implementar de forma independiente o combinada cada uno de los elementos de captación.

Figura 4. Método de la esfera rodante
Fuente: Autores

MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE (MER)

Aplicado a estructuras con alturas menores a 55 m cuya geometría presenta vértices, azistás y techos voladizos.

consiste en colocar una esfera imaginaria de radio igual al radio de impacto del rayo r_{sc} sobre el plano de referencia de la estructura, luego, ésta se desplaza a través de la periferia marcando los puntos de contacto como sitios de posibles descargas atmosféricas ubicando allí los dispositivos de captación.

$$r_{sc} = 3,9 \cdot I_p^{0,75} \text{ (m)}$$

Teniendo en cuenta:

| PARÁMETRO | Nivel de protección contra rayos | | | | Características del MER |
|---|----------------------------------|------|------|------|---|
| | I | II | III | IV | |
| Corriente pico mínima I_p de polaridad negativa en zona tropical (NTC 4552-1, 2008) (A-D) | 17 | 21 | 26 | 30 | <ul style="list-style-type: none"> • Existe incertidumbre sobre el valor apropiado del radio de impacto. • Utiliza el mismo radio para cualquier tipo de geometría, sin considerar diferencias entre una superficie plana, puntos o bordes. |
| Probabilidad de que la corriente pico sea mayor al mínimo | 0,99 | 0,97 | 0,91 | 0,84 | |
| Radio esfera rodante r_{sc} (m) | 35 | 40 | 50 | 55 | |



Figura 5. Protección mediante el MAP para un nivel de protección II
 Fuente: NTC 4552 - 3, 2008

MÉTODO DEL ÁNGULO DE PROTECCIÓN (MAP)

Aplicado a estructuras pequeñas como casas y edificios con alturas menores a los 20 m, de geometría no tan compleja y para proteger chimeneas, antenas y techos salientes.

Es una simplificación del MER, en donde para una altura relativa dada existe un ángulo de protección de la punta captadora o cable aéreo de protección el cual se determina mediante la figura 6.

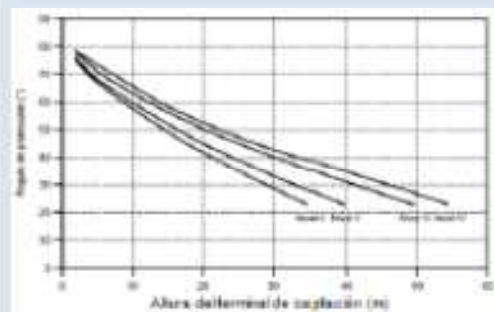


Figura 6. Ángulo de protección dependiendo de la altura relativa y el nivel de protección
 Fuente: NTC 4552 - 3, 2008

¿Cómo se determina la altura del elemento captador?

La altura se escoge a partir de la altura relativa que tiene el elemento captador con la superficie a proteger como se muestra en la Figura 5, y a partir de ahí se colocan las puntas captadoras de tal manera que la estructura quede siempre dentro de la zona de protección de la punta.

Características del MAP

- De manera tridimensional la varilla captadora y el ángulo de protección generan un cono, por lo tanto los captadores ya sean varillas, mástiles y alambres deben estar ubicados de manera que todas las partes de la estructura a proteger estén dentro de la superficie envolvente.
- Existe dificultad al aplicarlo a techos planos.
- Presenta limitaciones geométricas y no puede ser aplicado si la altura h es mayor que el radio de la esfera rodante.

MÉTODO DEL ENMALLADO (ME)

Consiste en colocar una malla conductora sobre la superficie de la estructura que intercepte cualquier tipo de descarga atmosférica directa, permitiendo que la corriente de rayo sea evacuada por más de dos caminos aminorando los posibles daños a la estructura.

Se usa en estructuras de superficie plana y no depende de la altura de esta.

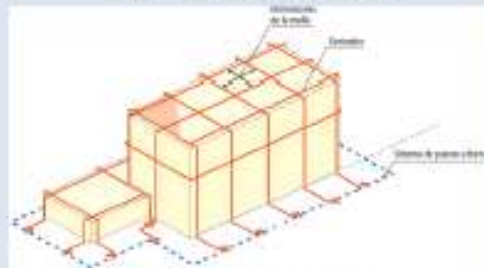


Figura 7. Método del enmallado
 Fuente: Catálogo protección contra rayos. DEHN

¿Como determinar las dimensiones del enmallado?

| Se determinan en función del nivel de protección : | NIVEL DE PROTECCIÓN | MALLA [m] |
|--|---------------------|-----------|
| | Nivel I | 5 x 5 |
| | Nivel II | 10 x 10 |
| | Nivel III | 15 x 15 |
| | Nivel IV | 20 x 20 |

Características generales del enmallado

| Según su ubicación | Según sus dimensiones | Según las rutas de evacuación de la corriente |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Para este caso las terminales de captación son colocadas sobre techos, los bordes del techo y salientes. | <ul style="list-style-type: none"> No deben ser superiores a las especificada anteriormente. No deben sobresalir instalaciones del volumen protegido. | <ul style="list-style-type: none"> Deben existir más de dos caminos de evacuación de la corriente del rayo a tierra. Las rutas deben ser cortas, rectas y directas. |

Recomendaciones

- Escoger los conductores de manera que no excedan su temperatura máxima en caso de una descarga atmosférica.
- Si el enmallado se construye sobre material combustible hay que aumentar la sección transversal de los conductores, la distancia de separación entre los conductores y el material combustible.
- Las estructuras con altura superior a los 120 m, deben tener dispositivos de captación en las superficies laterales correspondientes al 20% más alto de la edificación.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

GUIA BÁSICA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO

SISTEMA DE BAJANTES

Sistema encargado de formar una unión galvánica entre el sistema de captación y la instalación de puesta a tierra conduciendo de forma segura la corriente de rayo entre estos dos sistemas.

requerimientos de los bajantes en su recorrido desde el punto de impacto hasta la puesta a tierra:

1. Existencia de varios caminos paralelos para la corriente.



Figura 8. Bajantes correctos Fuente: Autores

Figura 9. Bajantes incorrecto Fuente: Autores

2. La longitud de los caminos de corriente debe ser la misma.



Figura 10. Longitud correcta en las bajantes Fuente: Autores

Figura 11. Longitud incorrecta en las bajantes Fuente: Autores

3. Equipotencialización a partes conductoras de la estructura.



Figura 12. Parte metálica equipotencializada Fuente: Autores

Figura 13. Parte metálica sin equipotencializar Fuente: Autores



Tipos de sistemas bajantes

¿Como decidir que tipo de sistema utilizar?

La decisión de cual tipo de sistema utilizar depende del riesgo presente de efectos térmicos ó explosivos en el punto de impacto del rayo y del tipo de elementos almacenados en la estructura.

a. Sistema aislado electricamente de la estructura



Figura 14. Sistema aislado, usando mástiles. Fuente: NTC 4552-3, 2008



Figura 15. Sistema aislado, usando mástiles interconectados por alambres horizontales con catenaria. Fuente: NTC 4552-3, 2008

Sistema usado para paredes combustibles y áreas con peligro de explosión como tanques de almacenamiento de combustible o en estructuras con consideraciones arquitectónicas en donde los bajantes no se ubican directamente sobre la fachada sino en las hendiduras del ladrillo.

| Ubicación y número de bajantes según el sistema de captación usado | |
|--|--|
| Sistema de captación | Bajantes |
| Captadores montados en mástiles no metálicos. | Un bajante por mástil. |
| Captadores montados en mástiles metálicos. | No es necesario el uso de bajantes. |
| Cables colgantes | Un bajante en cada soporte del cable. |
| Red de conductores. | Mínimo un bajante en cada soporte de un terminal de captación. |

Recomendación: No es recomendable instalar bajantes directamente en yesos, ya que este material puede sufrir daños causa de las altas temperaturas producto de la corriente del rayo y a las fuerzas de expansión.



b. Sistema no aislado eléctricamente a la estructura

Sistema que tiene en cuenta la distribución simétrica de los bajantes alrededor de la estructura, por lo que se deben establecer distancias de separación entre ellos.

Este recorrido de los bajantes puede verse afectado por objetos como son: ventanas, techos voladizos, rejillas, entre otros.



| DISTANCIA DE SEPARACIÓN PROMEDIO PARA CONDUCTORES BAJANTES (NTC 4552-3, 2008) | |
|---|---------------|
| Nivel de protección | Distancia (m) |
| Nivel I | 10 |
| Nivel II | 10 |
| Nivel III | 15 |
| Nivel IV | 20 |

Cada estructura debe poseer por lo menos dos bajantes alrededor de ella y distribuidos lo mas simetricamente posible



Recomendaciones:

- Si la estructura a proteger posee partes conductoras amplias en el exterior de los muros, estas partes deben ser conectadas al sistema de captación y al sistema de puesta a tierra, convirtiéndose en bajantes naturales.
- Para estructuras con patios dentro de ellas con mas de 30 m de perímetro es necesario la instalación de conductores bajantes.
- Para estructuras planas con dimensiones de mas de cuatro veces la distancia entre bajantes, se deben instalar bajantes internos extras cada 40 m según se requiera.
- La distancia entre bajantes no debe ser menor a un tercio de las distancias promedio de cada uno de los niveles de protección.



GUIA BÁSICA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO



SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

¿QUE ES UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA?

Es un sistema conformado por una red equipotencial, que es un conjunto de conductores que conectan varias partes del sistema eléctrico y las estructuras de una instalación a un mismo potencial y la puesta a tierra, que es un conjunto de elementos conductores que proveen un contacto eléctrico con el suelo.

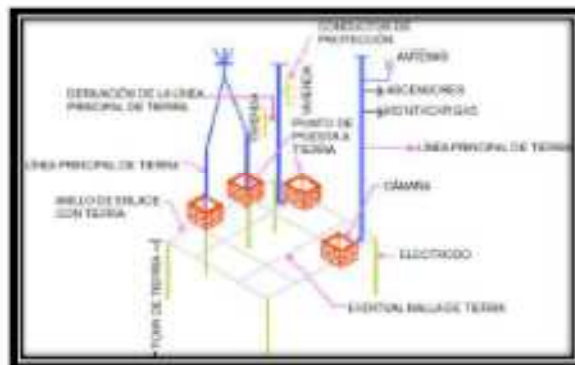
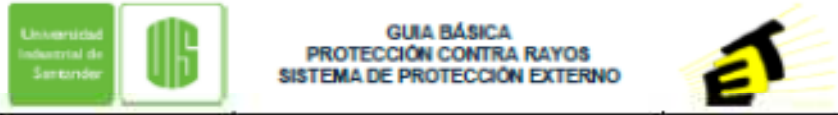


Figura 18. Esquema de un sistema de puesta a tierra Fuente: Protección contra descargas atmosféricas, Juan Ignacio Anibas

¿Cual es su función?

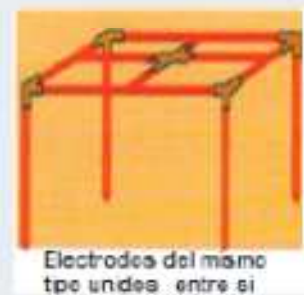
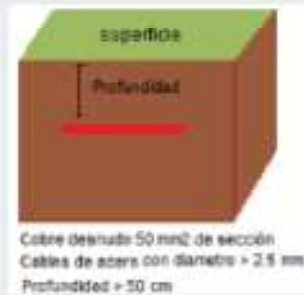
- Conducir la corriente de rayo dentro del terreno o suelo.
- Proveer unión equipotencial entre las bajantes.
- Controlar potenciales (tensiones de paso y de contacto).



Elementos que conforman un sistema de puesta a tierra

1. Tomas de tierra
 Conjunto de piezas metálicas (electrodos de tierra) enterradas en el terreno y unidas eléctricamente entre si y a la instalación eléctrica a través de un cable.

Electrodos de tierra





GUIA BÁSICA
PROTECCIÓN CONTRA RAYOS
SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO



2. Anillos de enlace

Electrodos que forman un lazo cerrado alrededor de la estructura, interconectando los bajantes para distribuir las corrientes de rayo, suelen ser de cobre de al menos 35 mm^2 de sección transversal.
Ver figura 18.

3. Punto de puesta a tierra

Punto situado dentro de una cámara, que sirve de unión entre el anillo de enlace y las líneas principales de tierra.
Ver figura 18.

4. Líneas principales de tierra

Conductores que unen el sistema de captación con los puntos de puesta a tierra.
Para reducir los efectos inducidos estos conductores deben tener una distancia de separación mínima de 30 cm.
Ver figura 18.

Notas:

- En el diseño de un sistema de puesta a tierra es importante una buena selección del electrodo, la profundidad de enterramiento y la ubicación de los mismos, ya que estos factores son efectivos en la estabilidad del valor de la resistencia de puesta a tierra.
- En cuanto a la profundidad, esta debe ser tal que reste los efectos de la corrosión por lo que en condiciones climáticas extremas, el primer metro de un electrodo vertical no es efectivo.
- Respecto a su ubicación, éstos deben estar a una distancia mínima de 1 m de los conductores bajantes ubicados en la estructura.



Configuraciones del sistema de puesta a tierra

Configuración tipo A ó radial

Configuración conveniente para estructuras bajas como casas familiares, estructuras existentes, en un SIPRA¹ con varillas y cables estendidos o para un SIPRA aislado.

Este tipo de configuración comprende electrodos de puesta a tierra verticales (varillas) y horizontales (contrapesos) instalados fuera de la estructura a proteger y conectados a las bajantes.

El número mínimo de electrodos debe ser de dos.

La longitud mínima de cada electrodo de tierra en la base de cada bajante es:

l_1 para electrodos horizontales.
 $0,5 l_1$ para electrodos verticales o inclinados.

Dónde:

l_1 es la longitud mínima para electrodos horizontales de acuerdo a la siguiente figura.

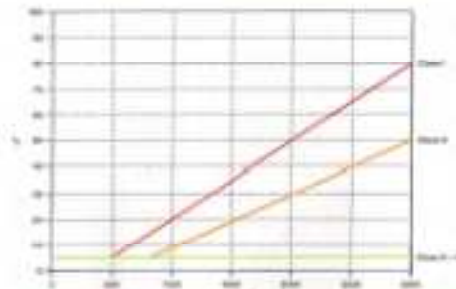


Figura 28. Longitud mínima l_1 de cada electrodo de acuerdo con la clase del NPR²
 Fuente: NTC 4552-3, 2008



Figura 23. Tierra tipo A horizontal
 Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

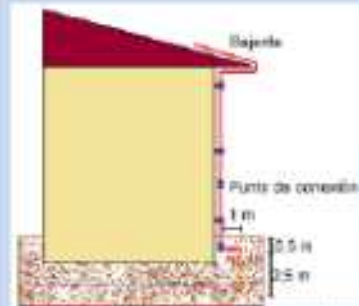


Figura 24. Tierra tipo A vertical
 Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

¹ Sistema Integral de Protección Contra Rayos.
² Nivel de protección contra rayos.



GUIA BÁSICA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS SISTEMA DE PROTECCIÓN EXTERNO



Configuración tipo B ó anillo

Esta configuración consiste en un anillo conductor externo a la estructura y en contacto con el suelo en por lo menos un 80% de su longitud total o por los electrodos de puesta a tierra de la cimentación, los cuales deben estar enmallados.

Esta configuración es usada en estructuras con material aislante como madera ó ladrillo sin cimentación de acero reforzado, SIPRA con diferente bajantes, sistemas de captación enmallados y cuando se tienen terrenos como roca sólida.

Dicho anillo debe tener un radio r , no menor a l_1 ($r \geq l_1$); cuando esta condición no se cumple, es necesario conectar al anillo de tierra electrodos horizontales de longitud l_h ó electrodos verticales con longitud l_v , para ello es necesario tener en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$l_v = l_1 - r_s \quad l_h = \frac{(l_1 - r_s)}{2}$$

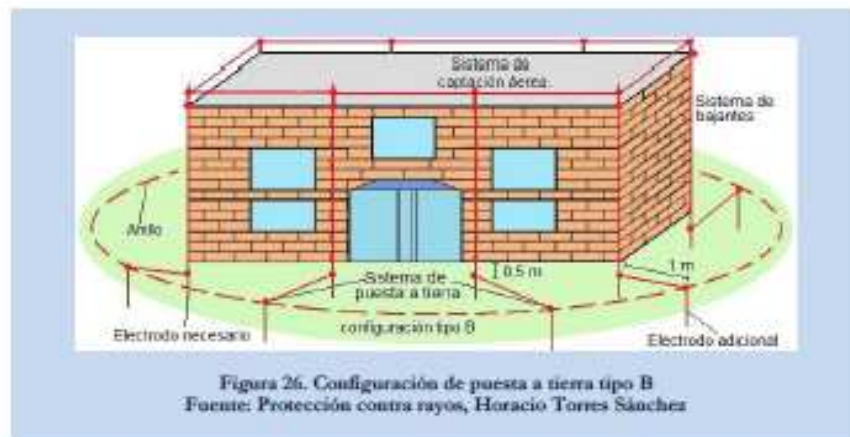


Figura 26. Configuración de puesta a tierra tipo B Fuente: Protección contra rayos, Horacio Torres Sánchez

Bibliografía

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, Protección contra rayos, Bogotá: ICONTEC, 2008. 63p.4 (NTC 4552-3).
- MANUAL DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS, Madrid: Debs + Solme, 2007.
- PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS, Juan Ignacio Arribas.
- Torres-Sánchez, H. El Rayo, Mito, Leyendas, Ciencias y Tecnología, Ed. Unibiblos, Bogotá, 2002.