

Facultad de Ingeniería
Instituto de Ingeniería Eléctrica

Notas preliminares para el
curso de Protección contra
Descargas Atmosféricas

Grupo Protección contra Descargas Atmosféricas

14 de octubre de 2016

Índice general

1. Introducción	19
2. Introducción a los Fenómenos Eléctricos en la Atmósfera.	22
2.1. La actividad eléctrica en la atmósfera en condiciones ideales y con buen tiempo	22
2.1.1. Cálculo de E y la carga total Q_T de la superficie de la tierra	22
2.1.2. Conducción en la atmósfera	24
2.2. Integración de la tormenta eléctrica al balance eléctrico general en la atmósfera	25
2.2.1. Compensación de la corriente eléctrica en buen tiempo	26
2.2.2. Variación diaria de E en el mar	27
2.3. La tormenta eléctrica	29
2.3.1. Células de tormenta	29
2.3.2. Generación de cargas en las células de tormenta	33
2.4. Frecuencia y distribución de las tormentas eléctricas. Mapa isoceráunico	41
3. La Descarga Atmosférica. Estructura y Desarrollo. Análisis Frecuencial.	48
3.1. La Descarga Atmosférica	49
3.1.1. Formación de la descarga entre nube y tierra	49
3.1.2. Otros tipos de rayos	61
3.1.3. Características del rayo.	63
3.1.4. Valores representativos.(Resumen)	68
3.2. Distancia de impacto.	68
3.2.1. Método de la esfera rodante	70
3.3. Característica frecuencial de la corriente de rayo.	73

4. Daños Provocados. Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones. Evaluación de Riesgo.	79
4.1. Daños Provocados	79
4.2. Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones	83
5. Análisis de Riesgo de Impacto Directo y Determinación del Nivel de Protección. Zonas de Protección y Formas de Onda. Cálculo de Riesgo de Sobretensiones.	91
5.1. Análisis de riesgo de impacto directo BS6651	93
5.1.1. Probabilidad de riesgo aceptable	94
5.1.2. Probabilidad de recibir impactos. Cálculo del nivel ponderado de riesgo	95
5.2. Riesgo de impacto sobre estructuras altas, de más de 50 m (Norma CP33)	100
5.3. Análisis de riesgo de sobretensiones (CP33, BS6651 y IEEE C62.41)	101
5.3.1. Caracterización de sobretensiones y sobrecorrientes de origen atmosférico para determinación de riesgo de daños	101
5.3.2. Análisis de riesgo de sobretensiones	108
5.3.3. Relación entre los niveles de exposición y la selección del nivel de protección	113
5.3.4. Aplicación del criterio en forma diferenciada para determinación de protectores para líneas de potencia y de datos	114
5.3.5. Ejemplo	114
5.4. Guía rápida para la selección de los dispositivos de protección para las líneas de alimentación.	117
6. Detección de Descargas Atmosféricas.	121
6.1. Sistemas de alerta	121
6.2. Sistemas de localización y registro	127
6.2.1. DF - Direction finder	129
6.2.2. ToA - Time of arrival	129
7. Captores (Puntos de impacto - Pararrayos).	131
7.0.3. Introducción	131
7.1. Repaso de electricidad atmosférica y principio de funcionamiento	132
7.1.1. Estructura y funcionamiento de un sistema de protección contra descargas atmosféricas	132
7.1.2. La descarga atmosférica y el funcionamiento convencional del captor	134

7.2.	Implementación del Captor o sistema de captores	141
7.2.1.	Determinación del nivel de protección.	141
7.2.2.	Determinación del tipo de protección externa según el sistema a proteger y su contenido.	142
7.2.3.	Protección externa en que la corriente del rayo no debe tener contacto con la estructura.	142
7.2.4.	Protección externa adosada a la estructura.	146
7.2.5.	Resumen.	155
7.3.	Sistemas no Convencionales. Introducción	158
7.4.	Sistemas de Disipación o de Transferencia de Carga (sistemas CTS - “Charge Transfer Systems”)	158
7.4.1.	Descargas en Puntas (Point Discharge) o Efecto Corona	159
7.4.2.	Estructura de un CTS y Acción Buscada	160
7.4.3.	Antecedentes	160
7.4.4.	Sistemas Comercializados Actualmente	162
7.4.5.	Teorías de Funcionamiento	168
7.4.6.	Resultados observados. Experimentos de Campo, Campañas de Observación y Registro de Eventos	173
7.4.7.	Funcionamiento del CTS como Protección Convencional	175
7.4.8.	Resumen sobre Dispositivos CTS	176
7.5.	Dispositivos ESE (Early Streamer Emission, Emisión Adelantada de Trazador)	176
7.5.1.	Funcionamiento de la protección basada en dispositivos ESE	177
7.5.2.	Operación de los dispositivos ESE	181
7.5.3.	Pararrayos radiactivos	181
7.5.4.	Pararrayos activos (ESE) no radiactivos	182
7.5.5.	Experimentos de campo, campañas de observación y registro de eventos	189
7.5.6.	Uso de los ESE en Estados Unidos: intentos de normatización y situación legal actual	191
7.6.	Conclusiones	192
7.7.	Agradecimientos	193
8.	Conductores de Bajada a Tierra.	194
8.1.	Cálculo de las inductancias	195
8.1.1.	Modelo de captor y bajada a tierra vertical rectilínea.	195
8.1.2.	Conductor rectilíneo	196
8.1.3.	Ejemplo numérico	201
8.2.	Calentamiento	202
8.3.	Comparación entre conductor rectilíneo y cinta	203

8.4.	Efecto de los ángulos en las bajadas	204
8.5.	Interacciones de la bajada con otros conductores	206
8.5.1.	Riesgo de descarga lateral	206
8.5.2.	Tensión inducida en un conductor	209
8.5.3.	Interacciones entre bajadas iguales	211
8.5.4.	Interacciones entre bajada natural (torre) y bajada adicional (conductor)	212
8.5.5.	Interacciones entre bajada y estructura	214
9.	Conexiones y Cableados de Tierra.	218
9.1.	Criterios de diseño del sistema de puesta a tierra	219
9.2.	Resistencia de puesta a tierra	220
9.2.1.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra	220
9.2.2.	Medición de la resistencia de puesta a tierra	221
9.3.	Resistividad del terreno	227
9.3.1.	Resistividad para varios materiales de suelo	227
9.3.2.	Variación de la resistividad con la humedad	228
9.3.3.	Medición de la resistividad del terreno	230
9.4.	Implementación de una puesta a tierra para protección contra descargas atmosféricas	232
9.4.1.	Ejemplo de comportamiento de una puesta a tierra convencional	235
9.4.2.	Tablas y fórmulas	235
9.4.3.	Jabalinas: influencia del diámetro	236
9.4.4.	Jabalinas: puestas a tierra con electrodos múltiples	237
9.4.5.	Modificación de la resistividad del suelo	240
9.4.6.	Interconexiones en sistemas de puesta a tierra	243
9.5.	Tierras tipo Ufer	245
9.6.	Puesta a tierra en cimas de cerros o en lugares rocosos de muy alta resistividad	246
9.6.1.	Tierras Ufer	246
9.6.2.	Agujeros con electrodo de material conductor	247
9.6.3.	Agujeros con fisuras causadas por explosivo	247
9.6.4.	Radiales de cinta (strap)	248
9.7.	Puesta a tierra de anclajes de riostras	250
9.8.	Respuesta dinámica de puestas a tierra	251
9.8.1.	Comportamiento dinámico del suelo	251
9.8.2.	Caracterización de las puestas a tierra para diferentes usos	253
9.9.	Interacción entre los distintos tipos de puestas a tierra. Coordinación de tierras	258

9.9.1. Propósito de cada sistema de tierra	264
9.9.2. Coordinación de tierras	269
9.9.3. Complemento de la coordinación de tierras	270
9.10. Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento	270
9.10.1. Descargas atmosféricas	271
9.10.2. Descargas atmosféricas a través de los coaxiales	273
9.10.3. Puesta a tierra del equipamiento de comunicaciones	275

**10. Propagación a tierra de una descarga en una instalación con
integración de funciones 280**

**11. Dispositivos de Supresión de Sobretensiones Transitorias. Com-
ponentes, Circuitos y Sistemas. 284**

11.1. Tipos de protección	286
11.1.1. Protección shunt	286
11.1.2. Protección serie	289
11.1.3. Tolerancias según la amplitud de la tensión de servicio	290
11.2. Componentes básicos	292
11.2.1. Tubos de gas	292
11.2.2. Varistores	293
11.2.3. MOVs y tubos de gas combinados	298
11.2.4. Dispositivos semiconductores	299
11.3. Circuitos de protección para sistemas de alimentación (CA y CC)	301
11.4. Circuitos de protección para Telefonía y Datos	303
11.4.1. Características de la protección de sistemas telefónicos	303
11.4.2. Centrales telefónicas	304
11.4.3. Protección mediante “matched” MOVs (Protección ac- tual)	306
11.4.4. Protección de tres etapas, para señal	307
11.4.5. Protección de LANs	309
11.4.6. CATV (Community Antenna TeleVision)	311
11.4.7. Cámaras de seguridad	311
11.5. Equipos de radio frecuencia (RF)	313
11.5.1. Características generales de las protecciones para RF	315
11.5.2. Otras protecciones	318
11.5.3. Protección de sistemas con alimentación de potencia a través del coaxial	319
11.6. Conexión de los descargadores de sobretensión	320
11.7. Concepto de zonas de protección - IEC 62305	329

11.7.1. Medidas de protección en cada límite de zona	331
11.8. Etapas para el diseño de una protección - IEC 62305	332
11.9. ANEXO 1 : Distribución de corriente entre varistores en paralelo.	333
11.10ANEXO 2 : guía de selección e instalación de descargadores según el sistema de conexión a tierra.	337
11.10.1.Conexión de descargadores en los diferentes sistemas de distribución según su conexión a tierra	337
11.10.2.Sobretensiones temporarias en los sistemas de distri- bución según esquema de conexión a tierra	345
11.10.3.Selección de descargadores	346
Bibliografía	350

Índice de figuras

2.1. Cálculo de Sigma.	23
2.2. La tormenta eléctrica como batería.	26
2.3. A) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en terreno plano. B) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en presencia de un conductor en punta. Adaptado de MacGorman y Rust [2].	27
2.4. Curva de <i>Carnegie</i> . Promedio de la variación diaria de E en atmósfera con buen tiempo sobre los océanos, referido a GMT.	28
2.5. Variación diaria mundial de las areas con tormenta eléctrica.	28
2.6. Dependencia de la temperatura del aire con la altura.	30
2.7. Célula de tormenta eléctrica en las primeras etapas de su desa- rrollo.	31
2.8. Célula madura de tormenta eléctrica.	32
2.9. Última fase de una célula de tormenta eléctrica.	34
2.10. Distribución de cargas eléctricas en una célula madura de tor- menta eléctrica.	35
2.11. Estructura real de mayor complejidad que el dipolo. Nube de tormenta en fase convectiva.	36
2.12. Interacción entre hidrometeoros.	36
2.13. Teoría de Wilson sobre la separación de cargas en una tormen- ta eléctrica.	37
2.14. Ilustración del mecanismo de electrificación de la nube por convección.	38
2.15. Teoría de los cristales de hielo de Mason (1953).	39
2.16. Transferencia de carga por colisión entre graupel (granizo po- roso o aguanieve) y partículas de hielo.	40
2.17. Modelo simplificado de la carga eléctrica en una nube de tor- menta.	41
2.18. Mapa isocerámico mundial.	42
2.19. Cantidad de descargas por km ² por año.	44
2.20. Sinopsis meteorológica mensual para el Uruguay.	45
2.21. Mapas cerámico de Argentina.	46

2.22. Mapa Isoceráunico de Brasil.	47
3.1. Fotografía de una descarga atmosférica nube - tierra.	48
3.2. Tipos de rayos según Mazur y Ruhnke.	50
3.3. Progreso de una guía descendente en aire virgen (sin descargas previas).	51
3.4. Formación de la descarga a tierra y de la corriente de rayo.	52
3.5. La guía escalonada y su descarga de retorno.	54
3.6. Reconstitución del canal.	55
3.7. Forma de onda de la corriente de rayo.	56
3.8. Diagrama temporal de una descarga completa.	57
3.9. Distribución del número de descargas individuales por descarga completa.	58
3.10. Descarga negativa iniciada en la nube.	58
3.11. Mecanismo de rayo y la corriente de tierra.	59
3.12. Fotografía de un rayo con las descargas superpuestas.	60
3.13. Fotografía de un rayo con 12 descargas de retorno.	60
3.14. Descarga iniciada desde tierra.	61
3.15. Influencia de la altura en el número de descargas anuales.	62
3.16. Medida de un rayo real.	63
3.17. Nomenclatura de forma de onda de impulso.	64
3.18. Distribución de la corriente de pico de la descarga.	65
3.19. Distribución del tiempo de subida.	65
3.20. Distribución del tiempo de bajada al 50 %.	66
3.21. Distribución de la duración de la corriente continua. La figura toma en cuenta solo los rayos que tienen corriente continua.	66
3.22. Otras curvas de probabilidad de la corriente de pico del rayo.	67
3.23. Otras curvas de probabilidad de la subida.	67
3.24. Distancia de impacto según distintos autores.	70
3.25. Distancias de impacto según diferentes investigadores.	71
3.26. Distancia de impacto y método de la esfera rodante.	72
3.27. Norma BS6651: Método de la esfera rodante, zonas expuestas y zonas protegidas.	73
3.28. Aproximación de la corriente de rayo y su derivada.	74
3.29. Pulso rectangular.	75
3.30. Función sinc(x).	76
3.31. Espectro del pulso rectangular.	76
3.32. Pulso triangular y su espectro.	76
3.33. Derivada del pulso triangular simétrico.	77
3.34. Ancho de banda de la radiación de un rayo.	78

4.1. Forma de onda.	80
4.2. Forma de onda de larga duración.	80
4.3. Daño a las personas.	84
4.4. Acople resistivo.	87
4.5. Sobretensión en conductores, descarga lateral y acople inductivo.	87
4.6. Acople inductivo.	88
4.7. Acople capacitivo.	88
4.8. Voltajes inducidos producido por una descarga cercana.	89
4.9. Voltajes inducidos producido por ondas viajeras acopladas.	89
5.1. Superficie equivalente de exposición de una estructura de altura H, largo L y ancho A.	96
5.2. Norma BS6651.	99
5.3. BS6651-Forma de onda de corriente en cortocircuito $8/20 \mu s$	102
5.4. BS6651-Forma de onda de voltaje en circuito abierto $1,2/50 \mu s$	102
5.5. ANSI C62.41-1991 Onda combinada.	105
5.6. ANSI C62.41-1991 $0.5 \mu s - 100 \text{ kHz}$ "Ring" Wave.	106
5.7. IEEE C62.41-1991 Categorías de Localización.	106
5.8. Diagrama del ejemplo.	115
6.1. Gradiente de campo eléctrico en la tierra sobre el líder escalonado.	122
6.2. Gradiente de campo eléctrico en la tierra sobre el líder escalonado.	123
6.3. Amplificador de carga.	124
6.4. Molino de campo.	125
6.5. Curvas de las señales eléctricas del circuito del molino de campo.	126
6.6. Circuito del molino de campo.	126
6.7. Representación de un molino de campo colocado hacia abajo.	127
6.8. Foto de un molino de campo operativo.	128
6.9. Esquema de un sistema DF.	129
6.10. Esquema de un sistema ToA.	130
7.1. A) Carga eléctrica en una nube. B) Modelo de estructura de carga de una nube. Adaptado de MacGorman y Rust [2].	135
7.2. A) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en terreno plano. B) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en presencia de un conductor en punta. Adaptado de MacGorman y Rust [2].	137
7.3. Determinación de las zonas protegidas y las superficies expuestas mediante el método de la esfera rodante.	139

7.4. Protección mediante pararrayos. En la estructura alta los pararrayos sólo protegen el extremo superior, su superficie lateral debe ser protegida de otra manera.	140
7.5. Zonas de protección por hilo de guardia.	143
7.6. Puntos y distancias críticas con longitudes a los puntos de tierra más cercanos.	144
7.7. Espesores recomendados de metales para impacto directo (Norma IEC 62305 -3).	147
7.8. Espesores recomendados de metales para impacto directo (Norma IEC 62305 -3) donde no es admisible la perforación del material.	147
7.9. Captores verticales según la norma NFPA780. La altura A es típicamente 60 cm.	149
7.10. Esfera rodante y ángulo o cono de protección. El punto de corte del segmento AE con la esfera rodante se lo señala como P en el texto.	150
7.11. Ángulo de protección en función de la altura para distintos niveles de protección. El cono es aplicable hasta donde están dibujadas las curvas.	151
7.12. Protección de techo mediante malla conductores y captores horizontales (tomado de la norma australiana AS 1768). Incluye el mismo método para protección de caras verticales expuestas.	153
7.13. Impacto lateral en una estructura alta. Se ven los arcos en la cadena de aisladores.	154
7.14. Comportamiento de metales usados en sistemas de protección (Norma IEC 62305 -3).	156
7.15. Dimensiones de elementos metálicos usados en sistemas de protección (Norma IEC 62305 -3).	157
7.16. Dibujos de Tesla tomados de su patente “Lightning Protector”, N° 1,266,175. 14 de Mayo 1918.	161
7.17. Disipador en forma de paraguas. Cortesía de Mousa [35].	163
7.18. Disipador en forma de paraguas para protección de una instalación de gas. Cortesía de Hartono [32].	164
7.19. Disipador esférico. Cortesía de Mousa [35].	165
7.20. Disipadores esféricos. Cortesía de Hartono [32].	166
7.21. Limitadores de corriente en una refinería. Cortesía de Hartono [32].	166
7.22. Funcionamiento pretendido de un CTS. Adaptado de Zipse 1994 [36].	167
7.23. Cálculo de la “zona de protección” de un ESE.	177

7.24. Construcción de la zona espacial “protegida” de un ESE. $R_p = R_p(h)$ de acuerdo a la fórmula 7.	178
7.25. Configuración de ensayo de un pararrayos tipo ESE en laboratorio.	179
7.26. Deducción del adelanto temporal Δt a partir de los resultados del ensayo según la figura 7.25.	180
7.27. Pararrayos radiactivo. Cortesía de P. Gruet [50].	182
7.28. Mecanismos de funcionamiento de distintos dispositivos ESE. Cortesía de P. Gruet [50].	183
7.29. Ejemplos de pararrayos ESE disponibles comercialmente. Dispositivos A y D: Dispositivos eléctricos. Dispositivo B: Dispositivo de perfil especial. Dispositivo C: Dispositivo de perfil especial. Dispositivo E: Dispositivo de mecanismo no informado. Dispositivo F: Dispositivo piezoeléctrico. Cortesía de P. Gruet [50] y Hartono [32].	184
7.30. Representación esquemática de distintos tipos de ESE. Cortesía de P. Gruet [50].	185
7.31. Las curvas de la figura forman, girando alrededor del eje del pararrayos ESE, el volumen presuntamente protegido por el mismo. Cortesía de P. Gruet [50].	188
7.32. Al llegar al punto S la punta de la guía escalonada se encuentra a una distancia R_s de B y a una distancia mayor a $R_s + \Delta L$ de la punta del ESE. Por lo tanto el rayo va a hacer impacto en la estructura a proteger, en el punto B que está dentro de la zona supuestamente de protección del ESE.	189
8.1. Modelo de captor y bajada a tierra vertical rectilínea.	195
8.2. Cilindro hueco metálico con corriente circulando por el exterior paralelamente a su eje.	196
8.3. Conductor con camino de retorno.	197
8.4. Corte ampliado del conductor con camino de retorno.	197
8.5. Modelo eléctrico de bajadas.	200
8.6. Cinta.	204
8.7. Efecto de ángulos en las bajadas.	205
8.8. Los campos magnéticos en conductores planos son más intensos en los bordes.	205
8.9. Forma de disminuir la inductancia agregada por ángulos - Recomendación de NFPA 780.	206
8.10. Descarga lateral.	207
8.11. Descarga lateral conductores con tierras interconectadas.	208
8.12. Descarga lateral conductores con tierras no interconectadas.	209

8.13. Tensiones entre dos conductores.	209
8.14. Tensiones mutuas.	210
8.15. Interacción entre bajadas iguales.	211
8.16. Torre.	213
8.17. Edificio.	214
8.18. Circuito equivalente.	215
8.19. Corriente de pico.	216
8.20. Reparto de corriente en edificio.	217
9.1. Electrodo semiesférico.	220
9.2. Medida de puesta a tierra.	221
9.3. Medida de la puesta a tierra.	224
9.4. Fundamento geométrico del método de tres electrodos para la puesta a tierra.	225
9.5. Método de la caída de potencial.	225
9.6. Ejemplo de dificultad de obtener una buena medida de tierra .	226
9.7. Medida de la puesta a tierra método de dos puntas	226
9.8. Ejemplo de variación de la resistividad del suelo en función del contenido de humedad ($100 \Omega cm = 1 \Omega m$).	229
9.9. Método de Wenner para medida de resistividad	231
9.10. Medida de la resistividad y estructura del terreno	232
9.11. Resistencia de puesta a tierra en función del largo del electrodo para diferentes resistividades del suelo.	234
9.12. Fórmulas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra. .	235
9.13. Fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puestas a tierra.	236
9.14. Influencia del diámetro de la jabalina.	236
9.15. Esfera de influencia vista lateral.	237
9.16. Esfera de influencia vista superior.	238
9.17. Cambio teórico de la resistencia debido al agregado de electrodos espaciados.	238
9.18. Electrodos en suelo no homogéneo con baja resistencia en la profundidad.	239
9.19. Ejemplo de electrodo con baja resistencia y alta inductancia. .	240
9.20. Efecto del tratamiento químico.	241
9.21. Variación de la resistividad.	241
9.22. Electrodo con modificación del terreno.	242
9.23. Puesta a tierra electrolítica.	242
9.24. Puesta a tierra electrolítica.	243
9.25. Comportamiento electroquímico de metales de interconexión. .	244
9.26. Tierra Ufer.	246

9.27. Cimientto de torre.	247
9.28. La roca como aislante.	247
9.29. Puesta a tierra en roca de alta resistividad.	248
9.30. Puesta a tierra en suelo rocoso utilizando radiales.	249
9.31. Instalación de cintas radiales.	250
9.32. Puesta a tierra de riostras.	250
9.33. Resistencia efectiva del electrodo en función de corrientes de impulso para distintos tipos de suelo.	251
9.34. Resistencia en función de la corriente para distintas corrientes máximas. Se observa un fenómeno de histéresis.	252
9.35. Evolución de la tensión, el impulso de corriente y la resistencia con el tiempo.	252
9.36. Evolución de la tensión, el impulso de corriente y la resistencia con el tiempo.	253
9.37. Modelo dinámico de la puesta a tierra.	254
9.38. Repuesta a transitorios electrodo clavado vertical (L alta, C baja).	255
9.39. Repuesta a transitorios electrodo enterrado horizontalmente (L alta, C alta).	256
9.40. Repuesta a transitorios malla de tierra enterrada (L baja, C alta).	256
9.41. Comportamiento dinámico de electrodos horizontales.	257
9.42. Origen de lazo (Loop) de Tierra.	258
9.43. Puesta a tierra en edificios. Tierras separadas.	259
9.44. Puesta a tierra en edificios. Tierras conectadas o tierra común.	260
9.45. Puesta a tierra en edificios. Tierra común y tierra dedicada aislada con protección.	261
9.46. Conexión de la tierra de rayos y la tierra del sistema eléctrico Tierras separadas.	262
9.47. Conexión de la tierra de rayos y la tierra del sistema eléctrico Tierras unidas.	263
9.48. Ejemplo de cableado de neutro y tierra.	266
9.49. Ejemplo de cableado de neutro y tierra.	267
9.50. Fuentes y mecanismos de interferencias por aumento de potencial de tierra.	269
9.51. Métodos de mitigación de interferencias por aumento de potencial de tierra.	269
9.52. Puesta a tierra de equipos.	271
9.53. Bajada y puesta a tierra de elementos activos expuestos (Antena).	272
9.54. Ejemplo implementación de puesta a tierra para una torre.	273

9.55. Formas de entrada de coaxiales a una caseta de equipos de RF.	275
9.56. Caminos de la corriente del rayo en el interior de la instalación.	276
9.57. Entrada con bulkhead. Persisten los lazos de tierra través del equipo.	276
9.58. Aterramiento de equipo.	277
9.59. Alimentación del equipo desde un protector aterrado en el bulkhead, único punto de tierra.	277
9.60. Panel de entrada con una única referencia de tierra.	278
9.61. Halo.	279
10.1. Propagación en Tierra de una Descarga (1).	281
10.2. Propagación en Tierra de una Descarga (2).	282
10.3. Propagación en Tierra de una Descarga (3).	283
11.1. Protección contra sobretensiones transitorias.	287
11.2. Respuesta Crowbar.	288
11.3. Respuesta Clamp.	289
11.4. Criterio de tolerancia en la alimentación del equipamiento - curva original de CBEMA.	290
11.5. Ejemplo de variaciones maximas de tensión de una red eléctrica.	291
11.6. Comparación de la tolerancia de la red con la tolerancia de los equipos.	291
11.7. Tubo de Gas.	292
11.8. Forma de onda de un tubo de gas.	293
11.9. Metal oxide varistor (MOV): Esquemático de la micro estructura.	294
11.10Características de Clamps.	294
11.11Rating de un Varistor.	295
11.12Rating de tiempo de vida de un Varistor.	296
11.13Característica de un MOV.	297
11.14Encapsulados de MOVs.	297
11.15Combinación de tubo de gas y varistor.	298
11.16Diodo de Avalancha (Silicon Avalanche Diode (SAD)).	300
11.17Aplicación de varistores: Protector simple.	301
11.18Protector alimentación CA.	302
11.19Circuito protector alimentación CA.	303
11.20Señales típicas de telefonía.	305
11.21Typical Telco T1 service entrance.	305
11.22Protector para telefonía y datos.	306
11.23Protección del cable telefónico.	307
11.24Protector combinado.	307

11.25	Protección tres etapas.	308
11.26	Protección de coaxial en LANs.	310
11.27	Protector de UTP.	310
11.28	Protector de UTP.	311
11.29	Protección de CCTV.	313
11.30	Protección de sistemas de Radio Frecuencia (RF).	314
11.31	Protector para RF: cortocircuito en $1/4$ de onda.	315
11.32	Antena con preamplificador, coaxial y receptor en la caseta.	316
11.33	Comparación de protector con bloqueo de CC y protector $1/4$ de onda.	317
11.34	Comparación de protector con bloqueo de CC y protector $1/4$ de onda.	318
11.35	Evolución de protectores para RF.	318
11.36	Protectores que combinan señal de RF con alimentación en CC a equipo activo en la antena.	319
11.37	Conexión de descargadores de sobretensión.	320
11.38	Influencia del largo de la conexión.	321
11.39	Influencia del largo de la conexión.	322
11.40	Influencia del largo de la conexión.	322
11.41	Ruta de los conductores.	323
11.42	Ruta de los conductores.	323
11.43	Conexión de descargadores de sobretensión.	324
11.44	Ubicación y conexión del descargador en el tablero.	325
11.45	Distancia entre descargador de sobretensión y equipo.	326
11.46	Coordinación de dos SPDs - Esquema eléctrico según IEC 61643-12.	327
11.47	Concepto de zona de protección contra el rayo (LPZ).	330
11.48	Zonas de protección contra rayos y compensación de potencial.	330
11.49	Medidas de protección.	331
11.50	Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Eta- pa 1.	332
11.51	Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Eta- pa 2.	332
11.52	Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Eta- pa 3.	333
11.53	Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Eta- pa 4.	333
11.54	Dos varistores de ZnO con la misma corriente nominal de des- carga.	334
11.55	Dos varistores de ZnO con diferente corriente nominal de des- carga.	336

11.56	Sistema TT aguas abajo de protección diferencial.	340
11.57	Interruptor diferencial.	341
11.58	Sistema TT aguas arriba de protección diferencial.	341
11.59	Usos de SPDs en sistemas TT.	342
11.60	Usos de SPDs en sistemas TN-C-S.	343
11.61	Usos de SPDs en sistemas TN-S.	343
11.62	Sistema de conexión TN.	344
11.63	Sistema de conexión IT.	345
11.64	Usos de SPDs en sistemas IT sin conductor neutro.	345
11.65	Valores máximos de sobretensiones temporarias dadas en la norma IEC 60364-4-44.	346

Índice de tablas

3.1. Guía escalonada. La velocidad de propagación media tiene en cuenta los tiempos de parada.	68
3.2. Descarga de retorno.	68
3.3. Guía dardo.	68
3.4. Descargas subsiguientes.	69
3.5. Descarga completa.	69
5.1. Probabilidad de muerte de un individuo por año de exposición.	94
5.2. Factor A, uso de la estructura.	96
5.3. Factor B, tipo de construcción.	97
5.4. Factor C, contenido.	97
5.5. Factor D, grado de aislamiento.	97
5.6. Factor E, terreno.	97
5.7. Relación entre nivel de protección y efectividad.	99
5.8. Límite inferior de diseño.	100
5.9. Límite superior de diseño.	100
5.10. Categoría de localización A (líneas de alimentación).	104
5.11. Categoría de localización B (líneas de alimentación).	104
5.12. Categoría de localización C (líneas de alimentación).	104
5.13. Categoría de localización C (líneas de datos).	104
5.14. C62.41-1991 0.5 μ sec - 100 kHz “Ring” Wave.	107
5.15. C62.41-1991 1,2 x 50 μ sec - 8 x 20 μ sec “Combination” Wave.	108
5.16. Área efectiva de captación de los conductores de potencia.	111
5.17. Área efectiva de captación de los conductores de datos.	111
5.18. Factor de ponderación F (efectividad de la protección primaria).	111
5.19. Factor de ponderación G (grado de aislamiento).	111
5.20. Factor de ponderación H (tipo de terreno).	112
5.21. Evaluación de pérdidas. Clasificación de estructuras y contenidos.	113
5.22. Clasificación del nivel de exposición.	113
5.23. Tensión de impulso que debe ser soportada por el equipamiento.	118

7.1. Niveles de protección establecidos en la norma CEI 62305 - 3 incluyendo dimensiones de la esfera rodante, corriente mínima de pico, dimensiones de la malla de protección de superficies planas y probabilidad de intercepción de rayos. Adaptado de [1], [13]).	141
9.1. Resistividad de varios tipos de suelo.	227
9.2. Resistividad del agua.	228

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de este material es dar una visión global del tema “Descargas atmosféricas”, con énfasis en la comprensión de la naturaleza del fenómeno y de la física del proceso de una descarga atmosférica, así como de las características particulares del mismo. De esta forma, los sistemas de protección surgen como una consecuencia de la física de los procesos, lo que permite una mejor comprensión de la eficacia y alcance de cada uno de ellos.

En los capítulos 2 a 4 se presenta una descripción del fenómeno de formación de una nube de tormenta y del proceso de descarga atmosférica, se identifican los parámetros (magnitudes físicas) que se utilizan para describir y cuantificar dichos procesos y se analiza qué incidencia tiene cada uno de ellos en la probabilidad de daño sobre las instalaciones, equipos o personas, así como el tipo de daño que podrían provocar. Una vez conocido el fenómeno de descarga atmosférica surgen las preguntas ¿Es posible prever la descarga atmosférica? y ¿con qué anticipación?, ¿es posible evitarla?, ¿cómo proteger personas e instalaciones?, ¿Cuándo es necesario instalar una protección? Como guía para responder esta última pregunta se presenta en el capítulo 5 un método de análisis de riesgo.

Otro aspecto de interés según las características de la instalación o emplazamiento en estudio, a efectos de tomar medidas de prevención de riesgo, es la predicción de descargas o estimación de la probabilidad. En el capítulo 6 se presentan algunos de los dispositivos diseñados para este fin así como algunos métodos de detección de descargas, es decir de su localización después de ocurridas.

Finalmente, en los capítulos 7 a 11 se presentan los elementos que componen un sistema de protección contra rayos, haciendo énfasis en las funciones y características de cada componente en relación a las características físicas del fenómeno, abarcando de esta forma los aspectos generales del tema.

Las funciones que debe cumplir una protección contra rayos son:

1. Diseño o previsión de los posibles puntos de impacto, naturales o artificiales (captosres).
Esto significa determinar las zonas expuestas al impacto directo.
2. Conducción de la corriente del rayo a tierra.
Esto implica tomar medidas para que la descarga que con determinada probabilidad va a caer en una zona sea conducida a tierra por un camino conocido y “seguro”.
3. Equipotencialidad y blindajes.
Aun cuando la descarga sea conducida a tierra aparecen en el suelo diferentes valores del potencial respecto al potencial de la tierra lejana (potencial de referencia), registrándose el mayor valor en el punto de impacto de la descarga. Esto hace que equipos con referencias a distintas tomas de tierra queden sometidos a sobretensiones transitorias entre los diferentes conductores y a sobretensiones respecto a la tierra local. Estas sobretensiones pueden dañar los equipos.
También pueden producirse descargas laterales entre el elemento que conduce la descarga y elementos metálicos cercanos, así como acoplamiento electromagnético entre la corriente de descarga y estructuras metálicas o conductores de los sistemas de alimentación, datos o telefonía. Por ejemplo, el campo magnético asociado a la corriente del rayo puede inducir una fuerza electromotriz (fem) en un loop conductor cercano y provocar la circulación de altas corrientes en dicho loop. La medida de equipotencialidad local tiene como función reducir las diferencias de potencial entre los distintos elementos de la instalación (estructuras y canalizaciones metálicas, conductores de los diferentes sistemas, etc.).
4. Supresión de sobretensiones transitorias.
Aunque se tomen medidas de equipotencialidad local, tendremos en la instalación cableados exteriores de alimentación o de transferencia de señales referidas a un potencial diferente del potencial local de la estructura y equipos. En estas condiciones durante el impacto de un rayo en la propia estructura o en el cableado o suelo exterior a la misma, se producirán sobretensiones transitorias entre diferentes conductores que se conectan a los equipos, con el consiguiente riesgo de daño. Las sobretensiones transitorias se deben a que las ondas o perturbaciones viajan a distinta velocidad por distintos medios, por ejemplo la tierra y un conductor, o (otro ejemplo) el conductor central y la malla de un coaxial. La supresión de estas sobretensiones transitorias puede realizarse mediante la instalación de dispositivos que limiten la tensión entre

sus bornes, siendo capaces de disipar la energía de la perturbación.

Capítulo 2

Introducción a los Fenómenos Eléctricos en la Atmósfera.

2.1. La actividad eléctrica en la atmósfera en condiciones ideales y con buen tiempo

Antes de comenzar el estudio de la formación de las tormentas eléctricas estudiaremos las características de la atmósfera con “buen tiempo”. Esta condición de “buen tiempo” se encuentra, a cada instante, en aproximadamente el 90 % de la superficie de la tierra.

La atmósfera en las proximidades de la tierra (hasta algunos km de distancia) y en buen tiempo tiene un campo eléctrico uniforme E , vertical y orientado hacia abajo, de 100 a 130 $\frac{V}{m}$. Se debe aclarar que los valores se dan a modo de referencia pero el campo no es constante en toda la superficie de la tierra y sobre todo decrece cuadráticamente (aproximadamente) con la distancia a la misma. Si en una zona acotada (por las necesidades de protección por ejemplo) consideramos la tierra como un conductor plano (suposición bastante razonable), eso sugiere que la tierra está cargada uniformemente con una densidad de carga negativa que designamos como $\sigma[\frac{Coul}{m^2}]$. 1 Coul es la carga que se transfiere cuando circula 1 A durante 1 s.

2.1.1. Cálculo de E y la carga total Q_T de la superficie de la tierra

Considerando las leyes de la electrostática, calcularemos E .
Observación: Los conductores desconectados de tierra, al cabo de un tiempo adquieren el potencial correspondiente a la altura a la que están sobre la tierra, de acuerdo al campo uniforme mencionado.

2.1 La actividad eléctrica en la atmósfera en condiciones ideales y con buen tiempo 23

Una forma experimental para calcular E (descrita por Feynman) consiste en colocar una placa horizontal de superficie S separada de la tierra, pero unida a ésta a través de un galvanómetro balístico (cuya deflexión es proporcional a la carga eléctrica que pasa por él). En estas condiciones, la carga superficial de densidad σ se acumula en la superficie S .

Luego se coloca otra placa S_1 más grande y por encima de S , se conecta a tierra a través de un interruptor que al principio se encuentra abierto.

Al cerrar el interruptor, se carga S_1 con densidad σ y se descarga S . Midiendo Q en esa descarga se obtiene:

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad (2.1)$$

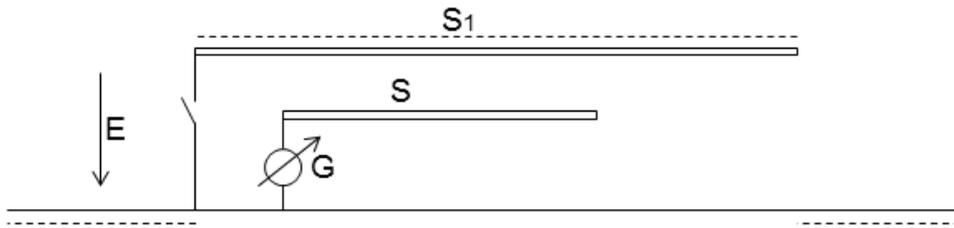


Figura 2.1: Cálculo de Sigma.

Sabemos que:

$$\sigma = \underbrace{\varepsilon_r}_{\simeq 1} \varepsilon_0 E \simeq \varepsilon_0 E \quad (2.2)$$

Con $\varepsilon_0 = 8,84 \times 10^{-12}$

De (2.1) y (2.2) obtenemos:

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 S} \quad (2.3)$$

Del la medida de Q , hallamos una estimación de E mediante (2.3).

Vamos ahora a tomar como dato conocido E para hallar la carga total de la tierra Q_T , calculamos σ mediante (2.2).

$$\begin{aligned} \sigma &= 8,84 \times 10^{-12} \frac{\text{Coul}}{\text{m}} \times -130 \frac{\text{V}}{\text{m}} \\ &= -1,15 \times 10^{-9} \frac{\text{Coul}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{Tierra} &= 4\pi R_{Tierra}^2 = 4\pi(6,3 \times 10^6 \text{ m})^2 \\ &= 5 \times 10^{14} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{Tierra} &= \sigma S_{Tierra} \\ &= -5,7 \times 10^5 \text{ Coul} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Observación: El método puede parecer complicado; se podría preguntar por qué no se mide la carga que entra (o sale) de S , la primera superficie, sin necesidad de S_1 . La respuesta es que no conocemos la carga inicial de S ni de otro objeto. Lo que hacemos es colocar S_1 de manera que S se descargue y medir una *variación* de carga a partir de una condición conocida, pues sabíamos cuánto se había cargado S (con una densidad de carga igual a la de la superficie de la tierra) y lo que medimos es su descarga.

Si la atmósfera fuera absolutamente aislante la carga de la superficie de la tierra permanecería en ella y no se produciría ningún cambio.

2.1.2. Conducción en la atmósfera

Para que exista conducción eléctrica en la atmósfera debe haber portadores de carga. A mayor densidad de portadores, mayor conducción.

En la atmósfera los portadores se clasifican en dos grupos:

Pequeños iones: Moléculas ionizadas. Al unirse a partículas de polvo, se transforman en grandes iones.

Grandes iones: Se producen cerca de la superficie de la tierra. Se generan por partículas de contaminación ambiental, bruma de las olas al romper, etc. Se trata de agrupamientos de moléculas con carga neta y su movimiento es mucho más lento que el de los pequeños iones.

Los iones, al ser sometidos al campo eléctrico atmosférico E adquieren una determinada velocidad. Los órdenes de magnitud son:

- Pequeños iones: $v = 2cm/s$
- Grandes iones: $v = 0,001cm/s$

Los iones se generan debido a distintos fenómenos, entre los cuales se encuentran los rayos cósmicos y la radioactividad natural sobre la superficie de la tierra.

El aire cerca de la tierra es menos conductor que en las capas más altas. Esto se debe a que cuando nos alejamos predominan los pequeños iones sobre los grandes iones. Los grandes iones están presentes especialmente cerca de la tierra y contribuyen de manera despreciable a la corriente producida por el campo eléctrico, esto se debe a que su gran masa hace que se aceleren de manera más lenta cuando se encuentran sometidos a una determinada fuerza,

siendo los pequeños iones los que dominan el movimiento de carga que crean las corrientes en condición de buen clima.

A partir de los 50 - 60 km de altura, la atmósfera tiene conductividad suficiente como para considerarla conductora y por lo tanto equipotencial. A esta zona que comienza a los 50 - 60 km y se extiende indefinidamente se le da el nombre de Electrósfera (fig. 2.2. No debe confundirse la electrósfera con la ionósfera; esta última está mucho más alejada, es mucho más conductora y se ioniza fundamentalmente a causa de la radiación solar, es la que refleja las emisiones de onda corta. La zona que interesa desde el punto de vista del estudio de los rayos es la comprendida entre la superficie de la tierra y la electrósfera.

La zona entre la superficie y la electrósfera es la que nos interesa; es donde se forma la tormenta.

Como se mencionó anteriormente, las partículas cargadas en presencia de un campo eléctrico E son forzadas a desplazarse, produciendo una densidad de corriente. Esta densidad de corriente en buen tiempo se ha medido experimentalmente, y se obtiene un valor de $J = 2$ a 4 pA/m^2 , valor que corresponde a aire efectivamente aislante. La corriente J resulta entrante a la tierra, con igual dirección que el campo eléctrico, si bien los portadores según su carga se moverán en distintos sentidos. Si calculamos la corriente total entre tierra y electrósfera considerando este valor de J , la corriente total puede expresarse como sigue:

$$\begin{aligned} I_{Total} &= J S_{Tierra} \\ &= 2 \times 10^{-12} \times 5 \times 10^{14} \\ &= 1000 \text{ A} \end{aligned}$$

Recordando que $Q_{Tierra} = -5,7 \times 10^5 \text{ Coul}$, entonces resulta que la tierra se descargaría completamente en 10 minutos.

Pero sabemos que esto no sucede, entonces ¿qué es lo que hace que la tierra se mantenga cargada? Como veremos, esta tarea la realizan los *rayos*.

2.2. Integración de la tormenta eléctrica al balance eléctrico general en la atmósfera

En promedio siempre hay 2000 tormentas en marcha ocupando el 10% de la superficie terrestre, y en ellas se producen promedialmente 100 a 300 descargas por segundo, de las cuales el 25% son rayos nube-tierra.

La mayoría de las descargas se producen dentro de la nube. Los rayos entre nubes y nube-tierra son globalmente menos frecuentes. Esta situación varía

con la latitud: a latitudes bajas hay más descargas y predominan fuertemente las descargas intranube; a latitudes altas los rayos son menos frecuentes y la proporción de rayos nube-tierra aumenta fuertemente.

2.2.1. Compensación de la corriente eléctrica en buen tiempo

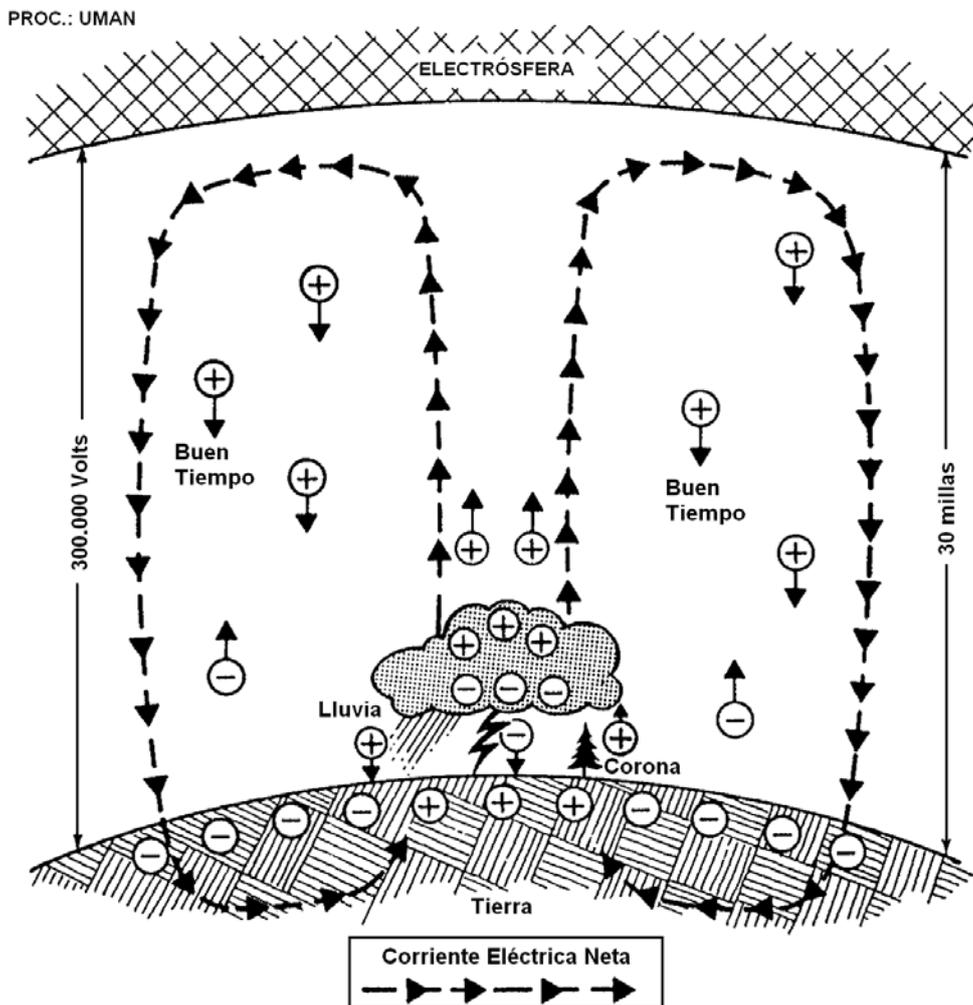


Figura 2.2: La tormenta eléctrica como batería.

Una descarga completa de nube a tierra transfiere a tierra, en promedio, aproximadamente 20 *Coul*, y la mayor parte son descargas de carga negativa

a tierra.

$$20 \text{ Coul} \times 300 \times 0,25 \frac{\text{rayos}}{\text{seg}} = 1500 \text{ A} = 1500 \frac{\text{Coul}}{\text{seg}}$$

Los rayos constituyen una parte importante de la corriente eléctrica necesaria para compensar la que circula en el área de buen tiempo.

Otra fuente de compensación la constituyen las descargas positivas de efecto corona desde cualquier elemento puntiagudo.

Bajo la nube, la dirección del campo eléctrico E es opuesta al de las regiones con buen tiempo, está orientado de tierra a nube y es mucho más intenso, alcanzando valores del orden de 10000 V/m . En los objetos puntiagudos las líneas de campo se aprietan (aumento de campo eléctrico por la curvatura de las superficies equipotenciales, ver figura 2.3) y el aire circundante se ioniza, generándose carga positiva que sube muy lentamente.

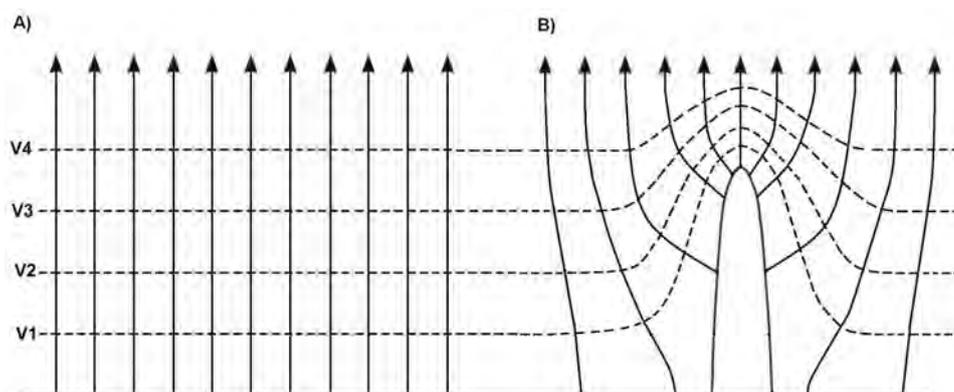


Figura 2.3: A) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en terreno plano. B) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en presencia de un conductor en punta. Adaptado de MacGorman y Rust [2].

Por último, la lluvia transfiere algo de carga positiva a tierra, contribuyendo inversamente, por lo tanto no es una fuente de compensación de carga. En la fig. 2.2 vemos los fenómenos descritos anteriormente funcionando en conjunto.

2.2.2. Variación diaria de E en el mar

En la década de 1920 se hicieron 7 viajes por parte del buque científico Carnegie, el último viaje fue entre 1928 y 1929. En estos viajes se midió en todos los océanos la magnitud del campo eléctrico en condiciones de buen tiempo.

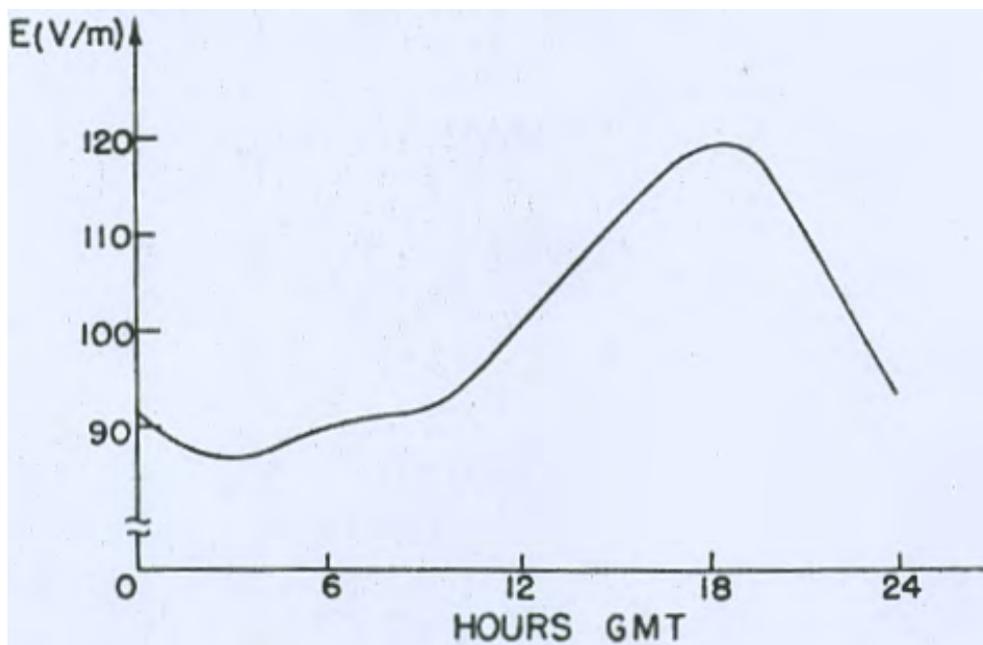


Figura 2.4: Curva de *Carnegie*. Promedio de la variación diaria de E en atmósfera con buen tiempo sobre los océanos, referido a GMT.

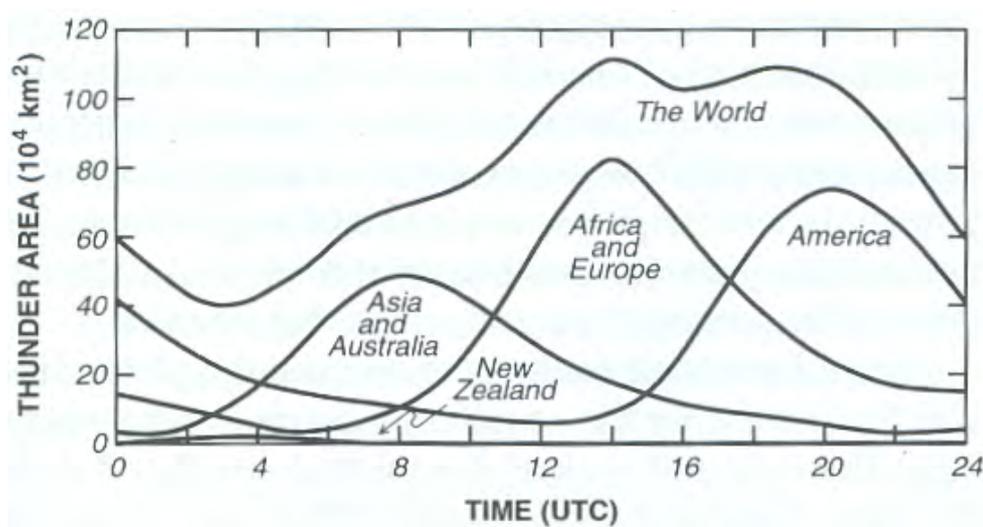


Figura 2.5: Variación diaria mundial de las áreas con tormenta eléctrica.

Como se muestra en la fig. 2.4, se constató que E en la superficie de los mares con buen tiempo tiene el mismo perfil horario en todos los puntos en que fue medido. Independientemente del lugar, el máximo siempre se registraba a las 7 pm GMT¹. Este fenómeno se relaciona con la formación de las tormentas que se van produciendo en los diferentes continentes y a diferente hora GMT; como podemos ver en la fig. 2.5 la unión de la actividad de las tormentas sigue el mismo perfil que el que describe la variación de E . Como se ha visto las tormentas se forman esencialmente sobre la tierra a causa de la mayor inestabilidad atmosférica y dadas las posiciones que ocupan los continentes en el planeta, esta "máquina eléctrica global"(tierra - electrósfera) está mas activa cuando hay mayor área de tormenta, lo que ocurre aproximadamente a las 18 hrs GMT y coincide con la variación de campo registrada.

2.3. La tormenta eléctrica

Vamos a analizar el proceso de formación de una célula de tormenta que se forma por convección; no es el único tipo de célula de tormenta pero contiene todos los elementos asociados al rayo. También analizaremos los distintos mecanismos de formación de la carga eléctrica en la nube.

2.3.1. Células de tormenta

Para ver cómo se forma una nube de tormenta por convección, tenemos que ver como se comportan los diferentes tipos de aire (aire seco y húmedo) con la altura. En la fig. 2.6 vemos cinco curvas. La curva **a** es la variación de la temperatura del aire seco con la altura en buen tiempo y en estado de equilibrio. Describe la variación estática y en reposo, ninguno de los tipos de aire que se describirán evoluciona siguiendo la curva **a**

El aire seco en la superficie terrestre, al calentarse, disminuye su densidad y comienza a subir siguiendo una curva como **b**. Este aire, al ir subiendo, se expande adiabáticamente y por lo tanto se va enfriando y a determinada altura llega a estar mas frío que el aire que lo rodea correspondiente a la curva estática, por lo que vuelve a bajar hasta el punto P.

Si consideramos una porción de aire húmedo (con un contenido de vapor de agua importante) que se calienta y sube, vemos que la curva de enfriamiento adiabático será distinta, a medida que se expande y se enfría el vapor de agua se condensa y el agua al condensarse libera calor. El aire húmedo no se enfría tanto como el aire seco, y por lo tanto sigue una curva como la **c**. Lo que sucede en realidad, es que esa masa de aire húmedo que se va expandiendo y

¹Greenwich Mean Time

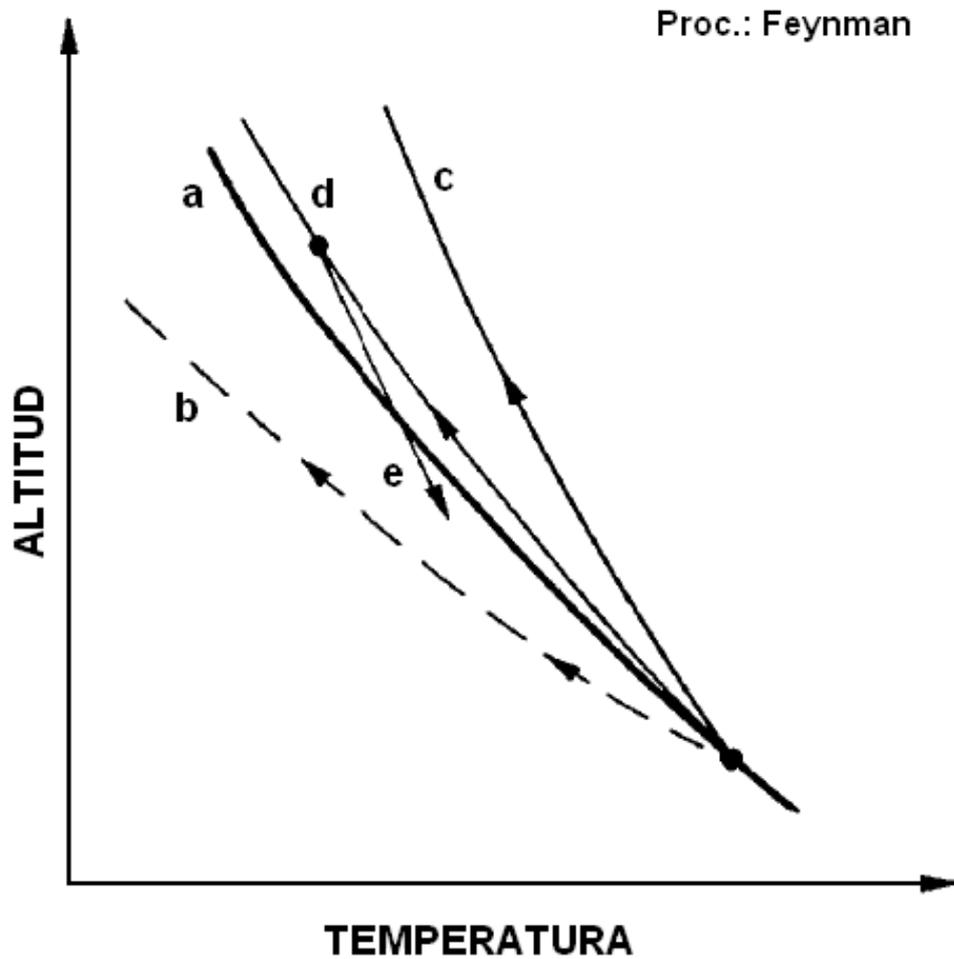


Figura 2.6: Dependencia de la temperatura del aire con la altura.

condensando, también arrastra una importante masa de aire seco, y su curva es en realidad una curva intermedia *d*. En esta etapa, la célula que se está formando se asemeja a la representada en la fig. 2.7.

Al ir avanzando el proceso, este aire húmedo que sube, lo hace con tal velocidad que genera una corriente ascendente que es del orden de 100 km/h y el aire que asciende puede llegar de 10.000 a 15.000 metros.

A medida que la humedad del aire se condensa y forma pequeñísimas gotas, éstas se enfrían rápidamente a temperaturas por debajo de cero grado, pero no se congelan sino que se sobreenfrían a falta de partículas presentes para iniciar la cristalización.

Cuando las gotas de agua sobreenfriadas entran en contacto con alguna partícula, como ser un cristal de NaCl, se forma un pequeño cristal de hielo.

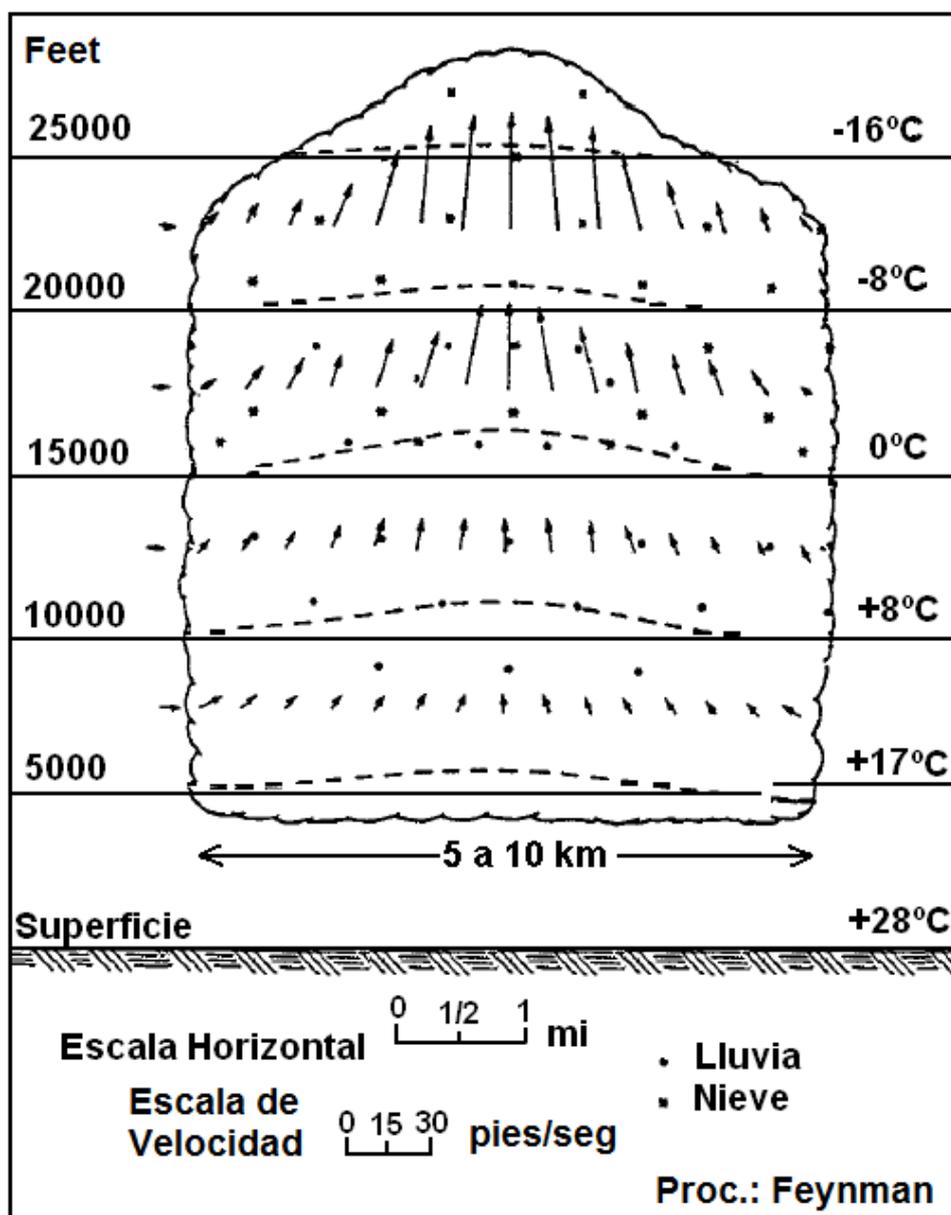


Figura 2.7: Célula de tormenta eléctrica en las primeras etapas de su desarrollo.

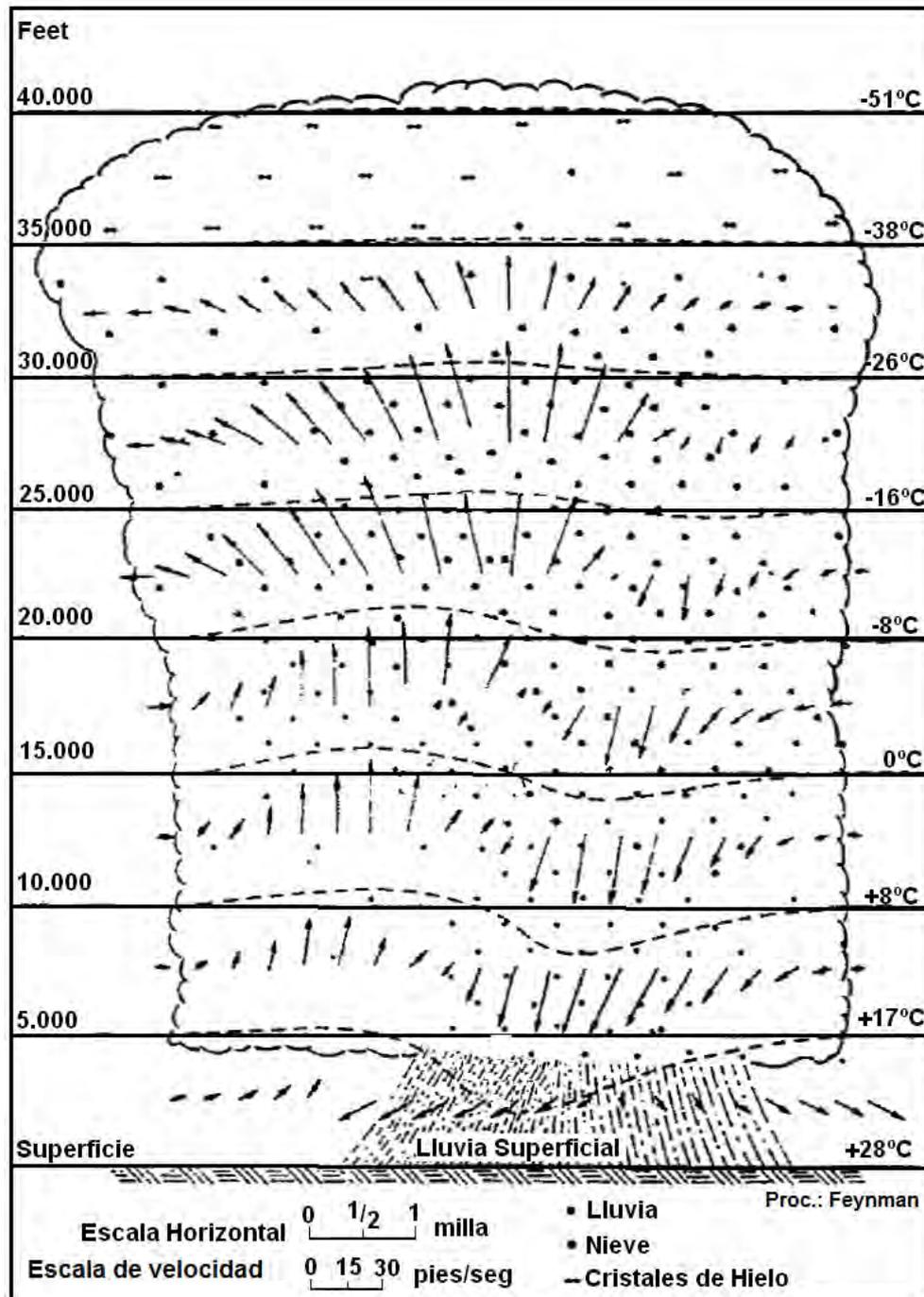


Figura 2.8: Célula madura de tormenta eléctrica.

También si entran en contacto con un cristal de hielo, se congelarán instantáneamente. Así pues, alcanzado un cierto punto en el desarrollo de la célula, hay una rápida acumulación de grandes partículas de hielo.

Se denomina Hidrometeoros a todos los diferentes estados en que se encuentra el agua en una célula de tormenta. Se muestran todos los hidrometeoros y sus cambios de fase en la figura 2.12.

Al principio, cuando los cristales de hielo y las gotas de agua sobreenfriadas son pequeñas, no caen debido a la fuerza opuesta que ejerce la corriente ascendente, pero al ir creciendo en tamaño, ya la corriente no los puede sostener y comienzan a caer arrastrando algo de aire con ellas y así se inicia una corriente descendente.

El aire que va cayendo es muy húmedo, y por lo tanto describe una curva de la misma pendiente que la curva c de la fig. 2.6 (correspondiente a aire húmedo). Esta masa de aire descendente sigue por lo tanto la curva e (paralela a c por el punto alcanzado), que, como se puede apreciar, corta a la curva a , pasando a estar a una temperatura menor que la correspondiente al estado de equilibrio, y de esta forma seguirá cayendo hasta llegar a la superficie, por ejemplo en forma de lluvia. En realidad el movimiento es mucho más complicado, lo que mostramos son los principios básicos que lo causan.

En este momento, la célula de tormenta es como en la fig. 2.8.

Al cabo de 30 a 60 minutos, la corriente ascendente se detiene, porque ya no hay suficiente aire caliente para mantenerla. Caen las últimas precipitaciones por unos instantes, y luego todo termina. A causa de los vientos a grandes alturas la nube se expande tomando la típica forma de yunque. En la fig. 2.9 se muestra a la célula de tormenta en esta última fase.

2.3.2. Generación de cargas en las células de tormenta

Como podemos observar en la fig. 2.10, una célula de tormenta eléctrica presenta diferentes regiones de carga eléctrica. Básicamente consideraremos dos regiones de carga, una negativa en la base de la nube, y otra positiva en la cima. Se trata de un modelo simplificado que en general es suficiente para el estudio de la protección contra descargas atmosféricas. En la realidad existe una complejidad mucho mayor; la fig. 2.11 muestra una nube de tormenta con una distribución de cargas real.

Los procesos de carga de la nube no se conocen con exactitud. Si bien existen varios fenómenos que se producen dentro de la nube, y hay varias teorías acerca de cómo esos fenómenos producen carga eléctrica, ninguna logra explicar por sí sola la formación de la totalidad de la carga que existe dentro de la nube. Es un tema abierto.

Lo que es seguro es que *no* es necesario que exista agua para que existan

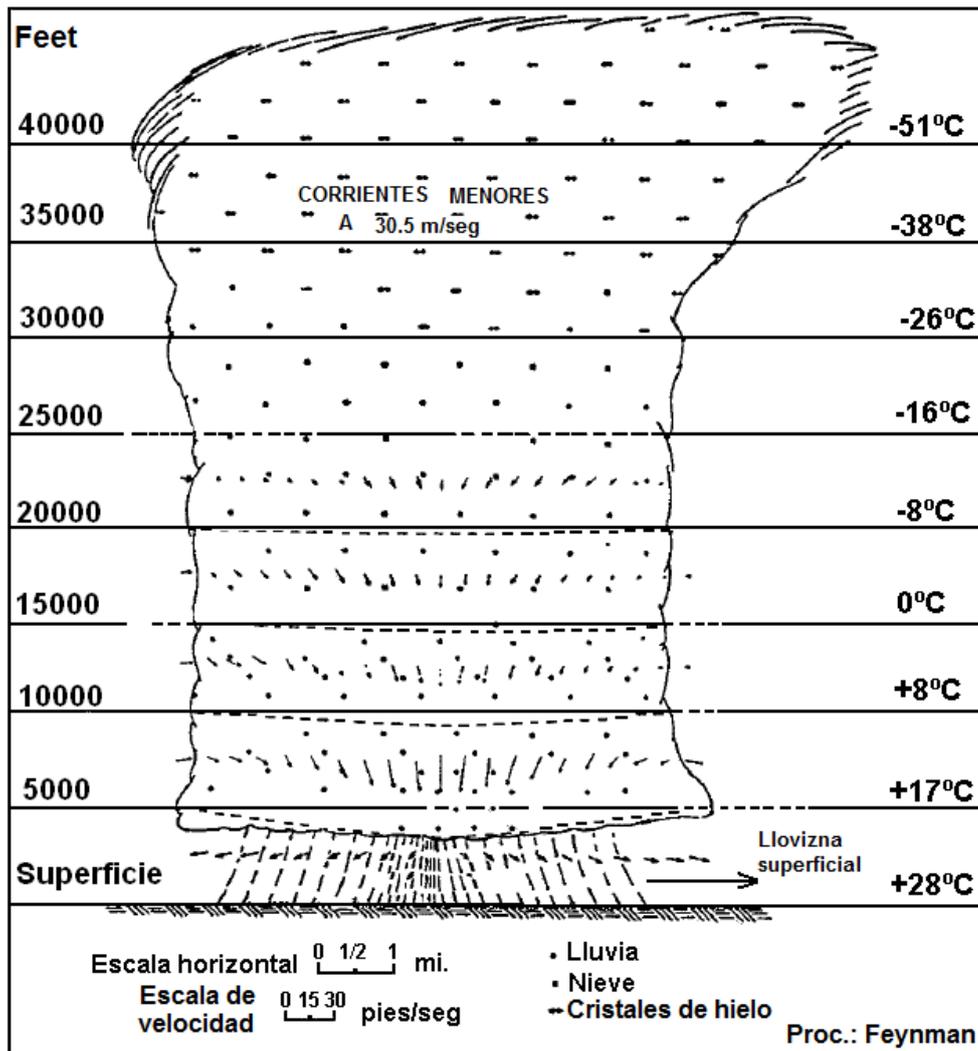


Figura 2.9: Última fase de una célula de tormenta eléctrica.

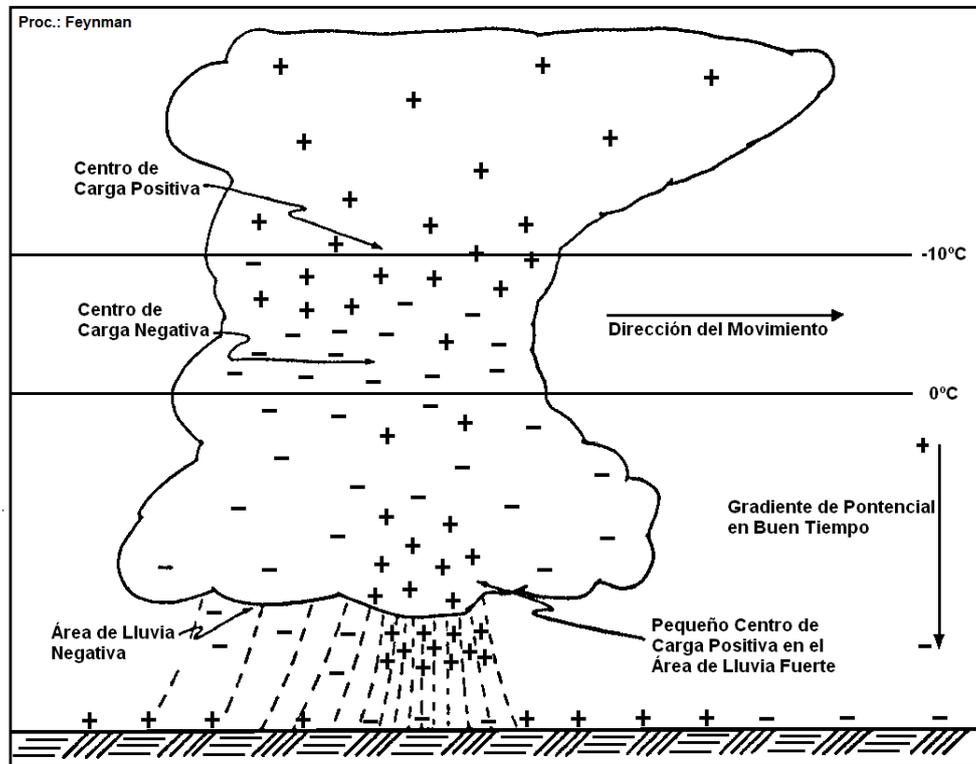


Figura 2.10: Distribución de cargas eléctricas en una célula madura de tormenta eléctrica.

cargas, hay rayos incluso en tormentas de arena y nubes de ceniza volcánica.

Distintas teorías para explicar la electrificación de una nube

A) Modelo Inductivo

Fue el primer modelo que existió y fue sugerido por Wilson (1929), se basa en la interacción de E (campo eléctrico en buen tiempo) con los hidrometeoros y las moléculas polares de agua.

Este modelo puede explicar la primera fase de formación de carga eléctrica, cuando todavía E vale unos $100 \frac{V}{m}$ y su dirección es hacia la superficie terrestre. Cuando comienza a formarse la tormenta E toma otro valor y ya no aplica esta teoría, que por lo tanto puede dar cuenta solo de una parte menor de la carga que adquieren las nubes. En esa situación de E de buen tiempo, si tenemos una gota de agua cayendo, se tendrá un momento dipolar inducido, siendo positiva la parte inferior de la gota y negativa la superior como se aprecia en la fig. 2.13.

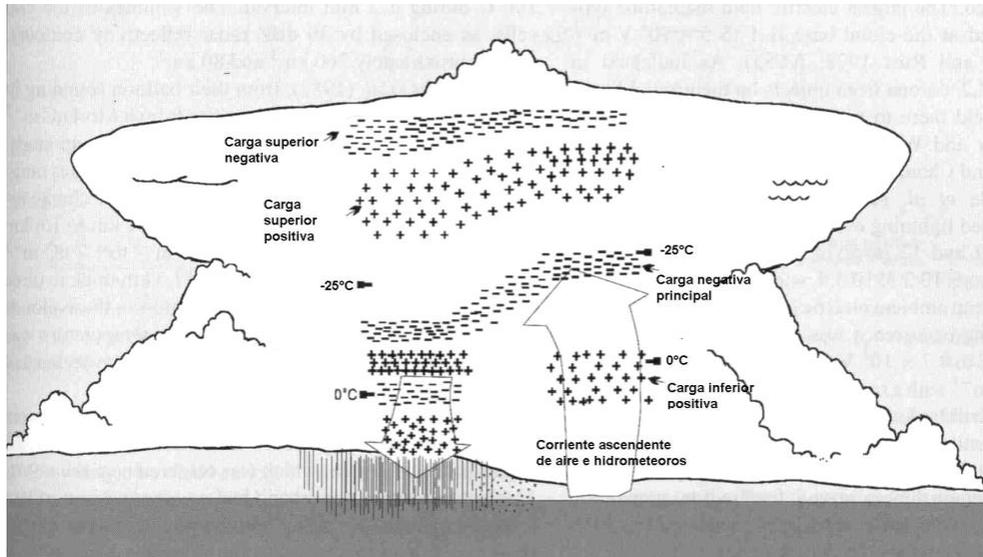


Figura 2.11: Estructura real de mayor complejidad que el dipolo. Nube de tormenta en fase convectiva.

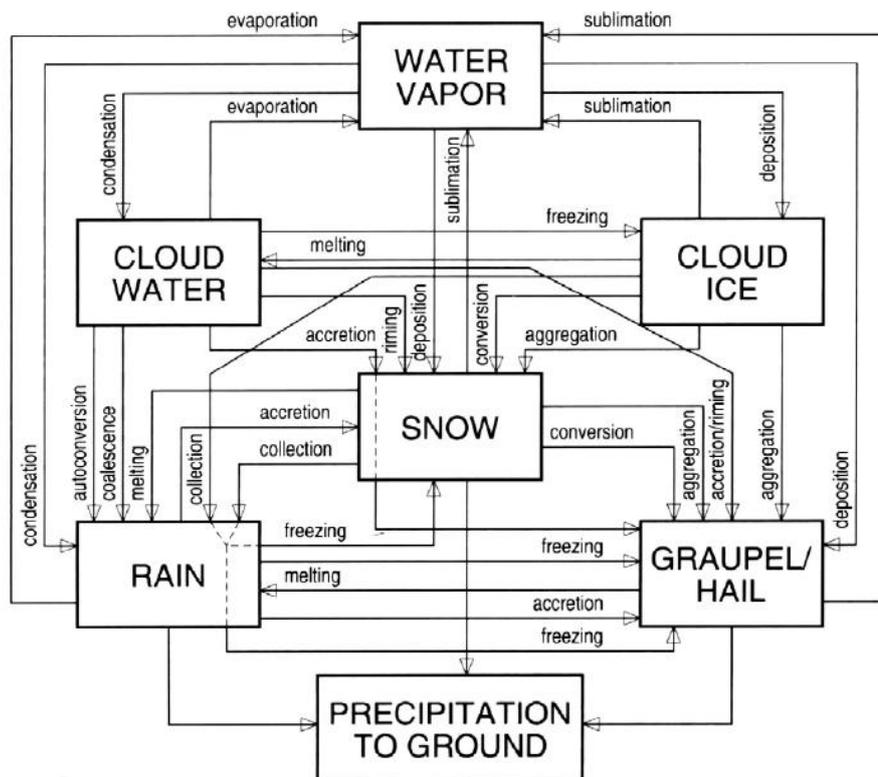


Figura 2.12: Interacción entre hidrometeoros.

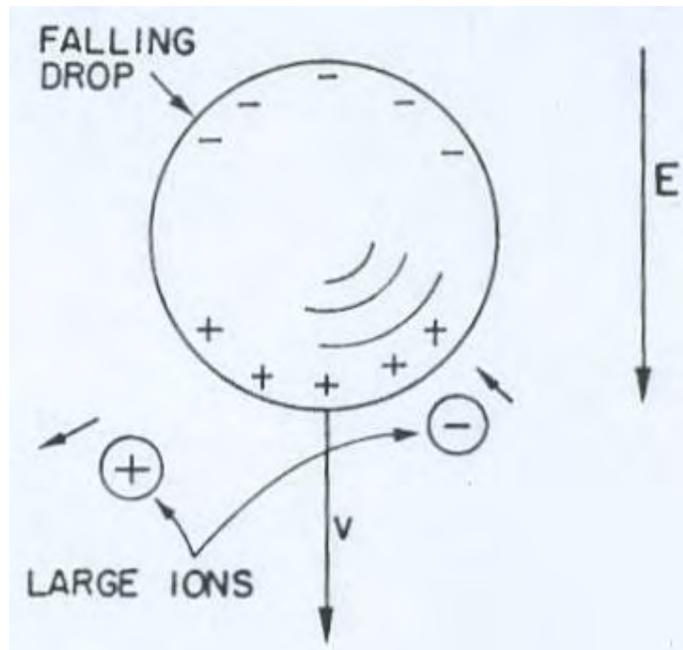


Figura 2.13: Teoría de Wilson sobre la separación de cargas en una tormenta eléctrica.

Supongamos que mientras la gota de agua está cayendo se aproxima un ion grande. Si es positivo, es repelido por la parte inferior positiva de la gota y se aleja y no se adhiere. Si es negativo, en cambio, será atraído y capturado y en este caso la gota adquiere una carga neta negativa. Por otro lado, si mientras cae, un ion se aproximara desde la parte superior, al estar la gota cayendo por el aire, hay un desplazamiento del aire hacia arriba respecto a ella. Los iones grandes no pueden pegarse porque son lentos.

Las gotas cargadas negativamente bajarán con carga negativa hasta la parte inferior de la nube y los iones cargados positivamente que quedan atrás son arrastrados hacia la parte superior de la nube por las diversas corrientes ascendentes.

Los cristales de hielo también funcionan en este modelo, y presentan una polarización en presencia del campo eléctrico E .

Este mecanismo no explica por supuesto la formación de las grandes cargas eléctricas que se encuentran dentro de la nube, ya que el campo eléctrico E de buen tiempo se modifica rápidamente al crecer la carga.

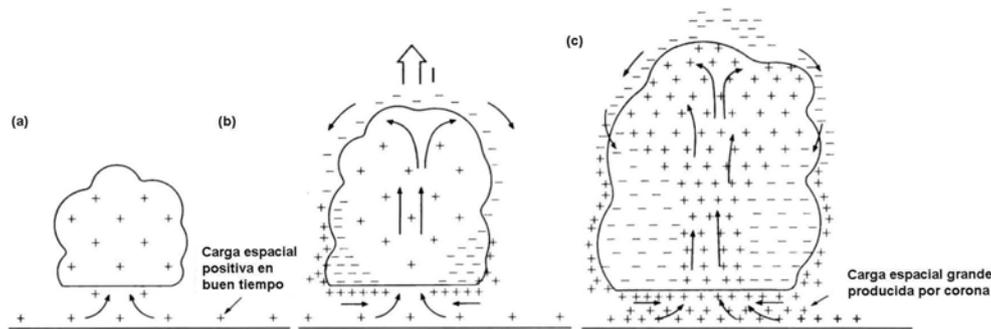


Figura 2.14: Ilustración del mecanismo de electrificación de la nube por convección.

B) Mecanismo Convectivo

Se basa en el campo eléctrico que ya está perturbado bajo una nube y explica un mecanismo de “bombeo de carga” a raíz de la corriente de convección. En la superficie de la tierra hay iones positivos que son movidos por la corriente ascendente, y llevados por el centro de la nube. Esto se aprecia en **a** de la fig. 2.14.

Como vemos en **b**, en consecuencia hay un desplazamiento de carga negativa hacia los costados y luego esta carga comienza a “rellenar” los lugares que quedaron sin carga.

El sistema se realimenta, porque al aumentar las cargas negativas en la base de la nube, hace que se aumente la carga positiva inducida en tierra, que a su vez hace que se aumente el campo eléctrico en la superficie de la tierra, lo que conlleva a que se generen más iones positivos por efecto corona, y éstos últimos son llevados por la corriente ascendente a la nube, cerrando el ciclo de realimentación. Esto se observa en **(c)** de la fig. 2.14.

Este mecanismo de “bombeo” puede generar cantidades grandes de carga, aparentemente. A diferencia del anterior, se da cuando el campo eléctrico ya no es el de buen tiempo sino el creado por la tormenta y puede ser predominante durante un lapso mayor.

C) Modelo de redistribución de carga eléctrica en un hidrometeoro (Mason - 1953)

En la fig. 2.15 se observa el proceso supuesto. Cuando tenemos una gota de agua sobreenfriada (a menos de 0°C sin congelarse) que choca con una partícula, se precipita la cristalización en su superficie. Aparece un gradiente interno de temperatura ΔT que hace que se distribuyan las cargas como en la figura 2.15b. Debido al desbalance de temperatura los iones H^{+} que tie-

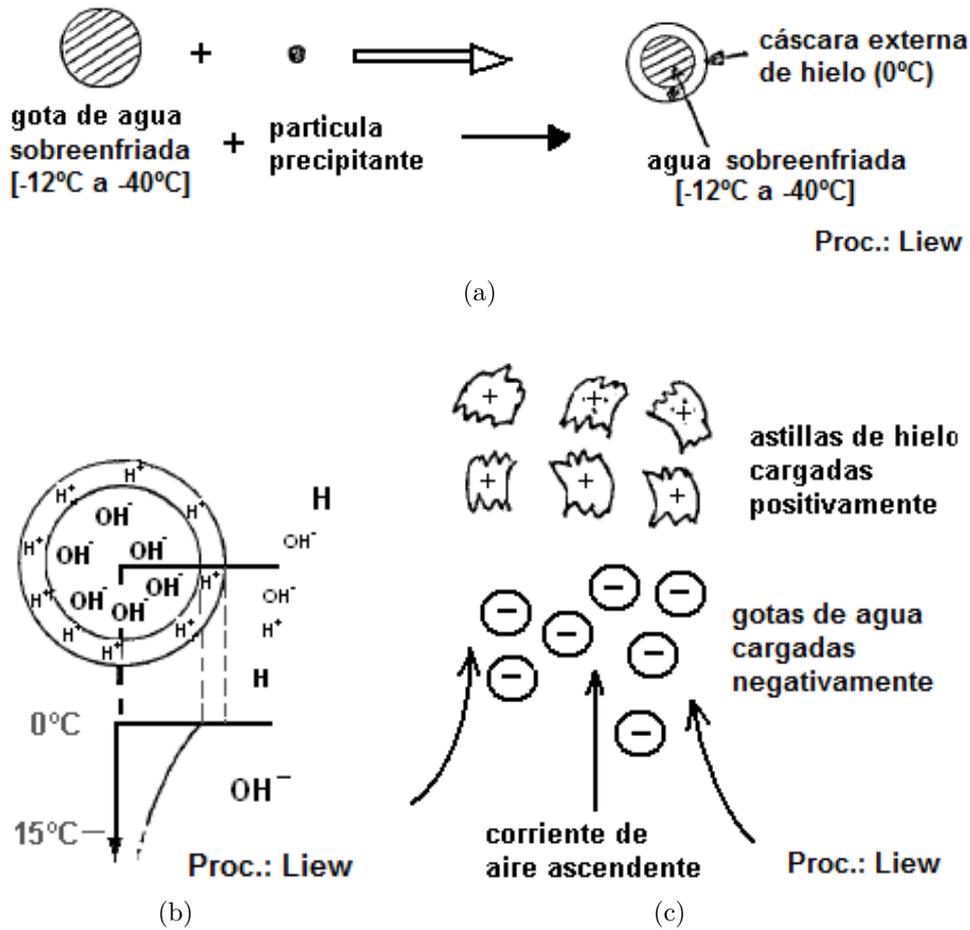


Figura 2.15: Teoría de los cristales de hielo de Mason (1953).

nen más movilidad se acumulan en la superficie exterior, la que está a mayor temperatura.

Al congelarse después la parte interna, el agua se expande y la cáscara se rompe en pequeños cristales (láminas muy finas) cargados positivamente. La corriente de aire ascendente en la nube de tormenta lleva los cristales de hielo cargados positivamente a una altura mayor dejando las gotas sobreenfriadas de agua cargadas negativamente a una altura menor debido a su peso.

D) Teorías actuales

Actualmente hay consenso en que la mayor parte de la carga se produce por colisiones de cristales de hielo con trozos de aguanieve (graupel en in-

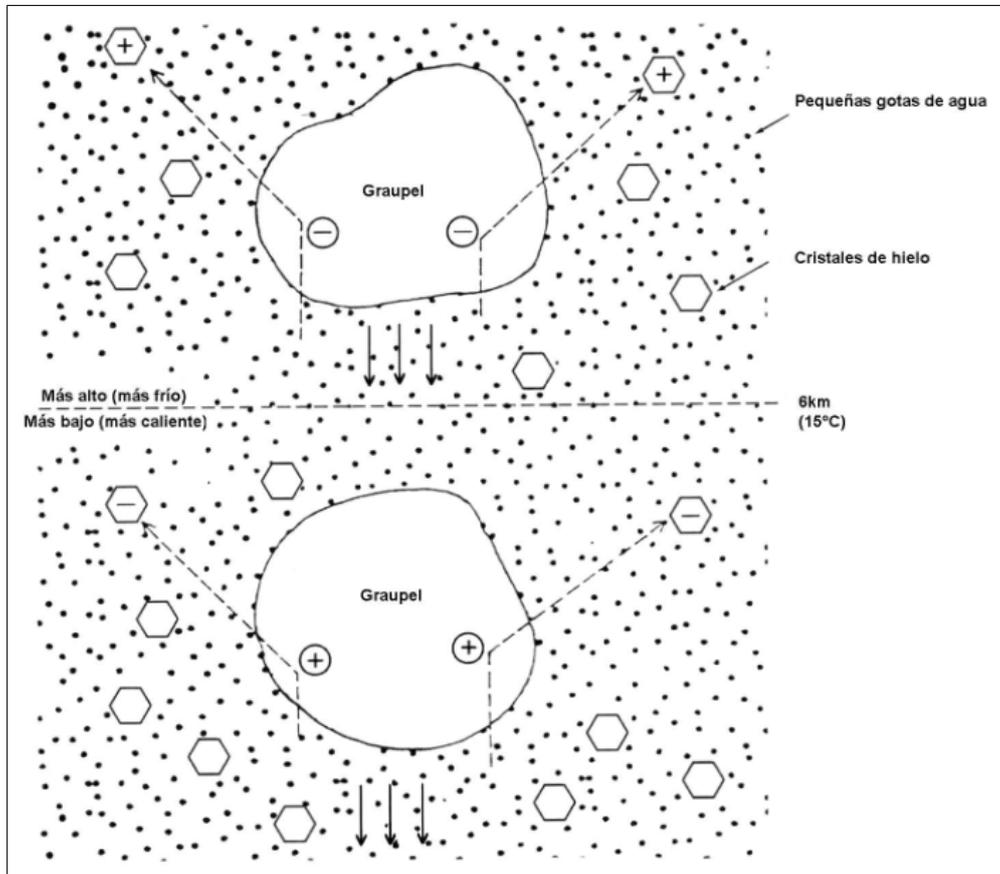


Figura 2.16: Transferencia de carga por colisión entre graupel (granizo poroso o aguanieve) y partículas de hielo.

glés). Este es un hidrometeoro de hielo esponjoso de mucho mayor tamaño que los cristales de hielo. El que las colisiones sucedan en una atmósfera con vapor de agua parece ser un hecho determinante para que se produzca la electrificación. La polaridad con que se carga el graupel y los cristales de hielo en las colisiones parece depender de la temperatura: a bajas temperaturas (zona alta de la nube) el graupel que viene bajando se carga negativamente dejando en suspensión cristales de hielo positivos y llevando carga negativa a la base de la nube. A temperaturas más altas (en la zona baja de la nube) la polaridad es inversa. Debido a su tamaño el graupel cae en forma de lluvia o granizo llevando carga positiva a tierra. También forman los bolsones de carga positiva que se observan en la base de la nube. El resultado de este proceso es que quedan partículas en suspensión cargadas positivamente en la parte superior de la nube y negativamente en la inferior. Como ya se mencionó la estructura de la nube puede ser mucho más compli-

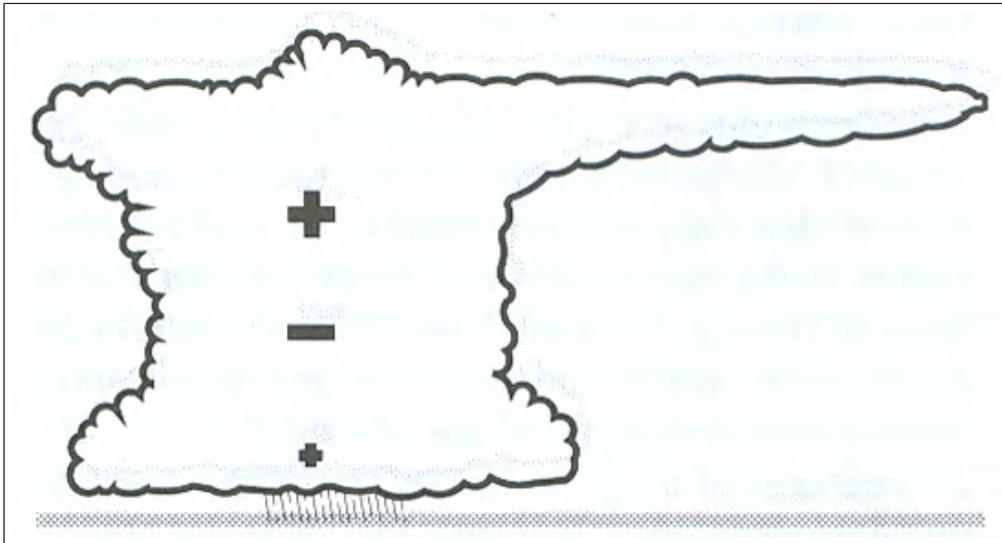


Figura 2.17: Modelo simplificado de la carga eléctrica en una nube de tormenta.

cada que un simple sistema de tres cargas (valores representativos: una carga de 40Coul arriba, otra negativa de 40Coul abajo y unos 5Coul de carga positiva en la base). De todas formas este sistema permite ilustrar los fenómenos de descarga que se producen en la nube. Este modelo simplificado se observa en la figura 2.17.

2.4. Frecuencia y distribución de las tormentas eléctricas. Mapa isoceráunico

La distribución de las tormentas eléctricas en la tierra no es en absoluto uniforme. La actividad eléctrica tiene su máxima intensidad en zonas cercanas al ecuador y sobre tierra firme. La frecuencia de descargas disminuye con latitudes crecientes y es muy escasa sobre los océanos.

La actividad eléctrica de la atmósfera en una zona se caracteriza tradicionalmente por el llamado índice ceráunico (T_D): es el número de días al año en que en algún momento se escuchó un trueno². La figura 2.18 muestra un mapa isoceráunico, las curvas delimitan zonas según niveles del índice ceráunico.

Este índice puede variar desde 0 hasta llegar a 300 en algunos lugares, y nos

²Este índice no toma en cuenta la intensidad de la tormenta, así se haya escuchado un trueno o diez, para ese día solo se computa uno solo.

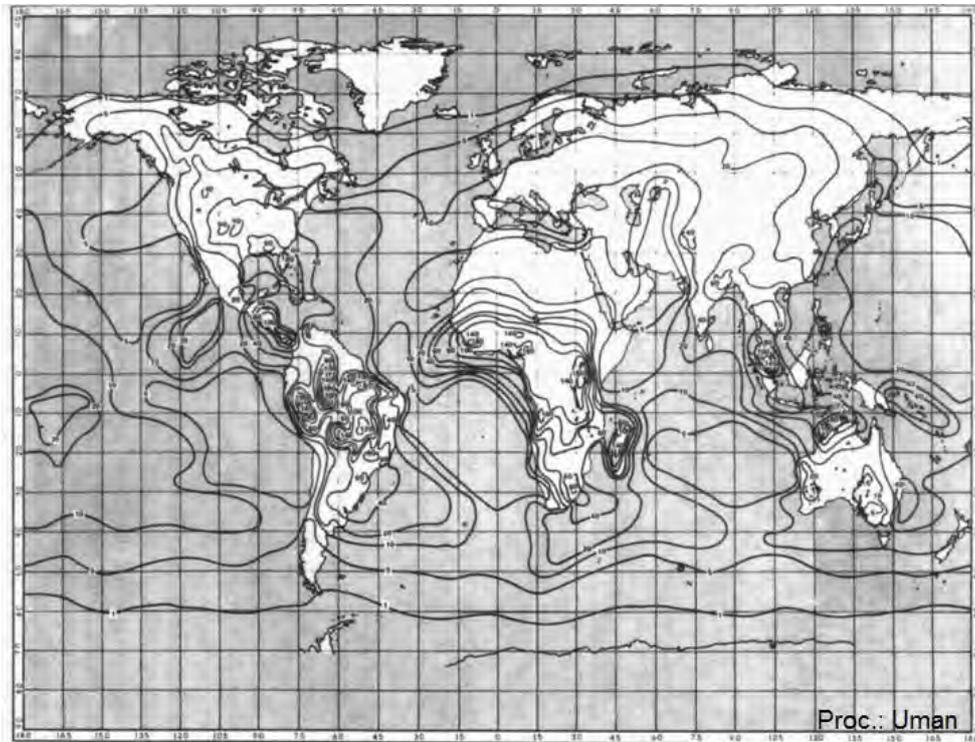


Figura 2.18: Mapa isoceráunico mundial.

indica la cantidad de días al año en que hubo actividad eléctrica en esa zona. Para nuestro estudio, en realidad nos interesa otro parámetro, y es el número de descargas a tierra por kilómetro cuadrado y por año (N_G).

Se han realizado varias mediciones y observaciones empíricas para relacionar N_G y T_D . Una expresión bastante utilizada es la ecuación 2.5, donde a y b son valores experimentales. a es del orden de 0,04 y b es ligeramente mayor que 1.

$$N_G = a (T_D)^b \quad (2.5)$$

La expresión mas usada es:

$$N_G = 0,04 (T_D)^{1,25} \quad (2.6)$$

Como se mencionó anteriormente, solo una fracción de las descargas son a tierra, pero además tenemos la siguiente variación:

$$100 \times \frac{\text{N}^\circ \text{ descargas a tierra}}{\text{N}^\circ \text{ descargas totales}} = \begin{cases} \text{Trópicos} & 10 \text{ a } 20 \% \\ \text{Zonas templadas} & 30 \% \\ \text{Zonas frías} & 50 \% \end{cases}$$

Adicionalmente se ha comenzado a registrar el valor T_H que es el índice horario, definido como la cantidad de horas totales durante las cuales se escuchó un trueno, tomando como período de registro un año. La relación con N_G es aproximadamente $N_G = 0,05 T_H$

No se dispone de un mapa isoceráunico para Uruguay. La figura 2.20 muestra un registro de Meteorología realizado en el periodo 1946 a 1980, en el que se identifican índices ceráunicos entre 15 y 48. En las figuras 2.21 y 2.22 se presentan mapas disponibles para Argentina y Brasil. Observando la fig. 2.21a, podemos extrapolar las curvas y ver que la región sur de Uruguay se encuentra en una zona de $T_D = 40$. Aplicando la relación (2.6) obtenemos que $N_G = 4$ rayos a tierra por kilómetro cuadrado y por año. En la región norte del Uruguay, parecería que tenemos un mayor índice ceráunico, y en este caso es recomendable prever que $N_G = 5$.

Se dispone de imágenes obtenidas desde satélites como la que se reproduce en la fig. 2.19. Se debe notar que esas imágenes registran todas las descargas eléctricas en la atmósfera (intranube, nube-nube y nube-tierra) mientras que el mapa isoceráunico muestra los lugares en que se escuchan truenos cierta cantidad de días por año. La observación de ambas figuras muestra que existe una natural correlación.

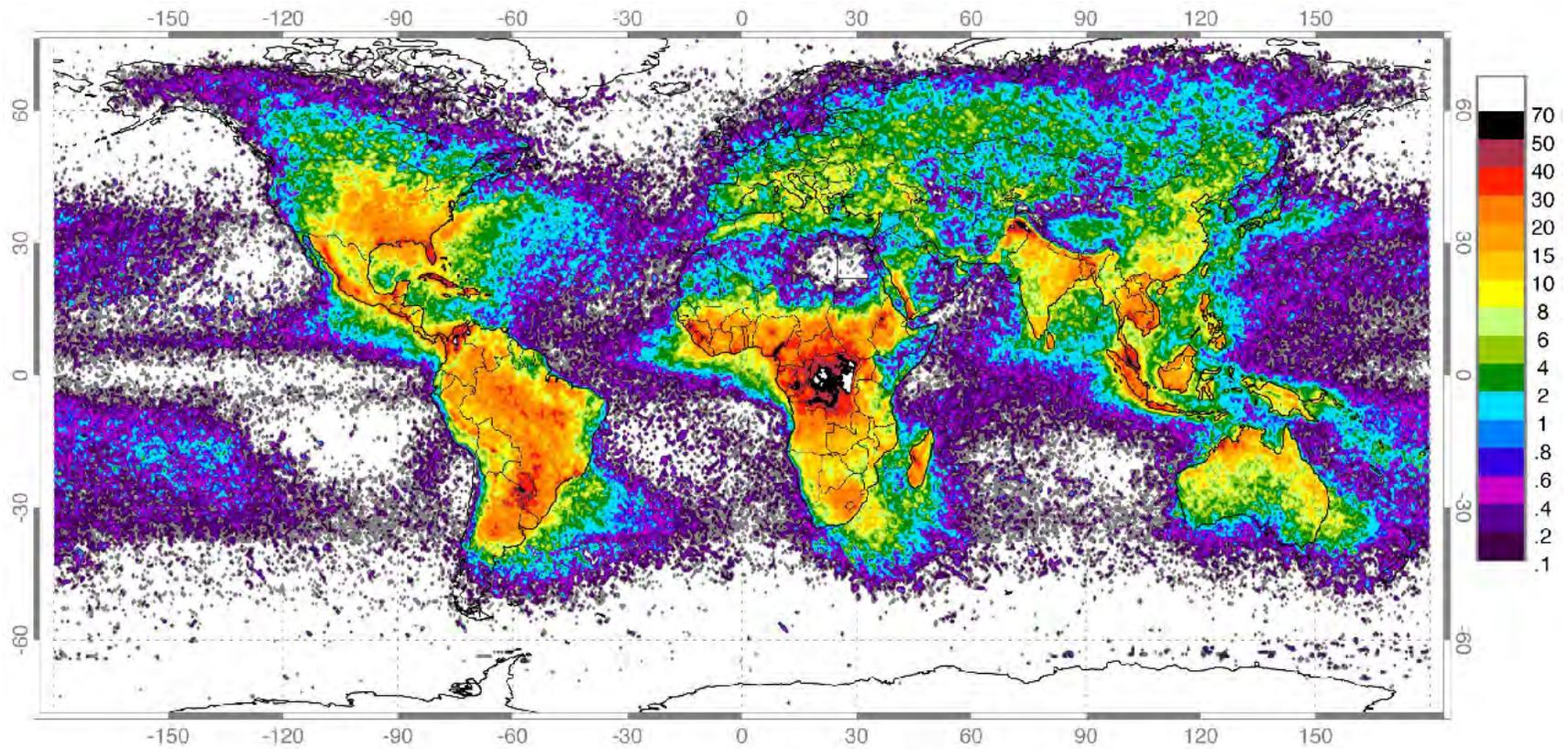


Imagen de alta resolución de la tasa anual de descargas atmosféricas

Distribución Global de Descargas Atmosféricas en el período Abril 1995 - Febrero 2003 obtenida de la combinación de observaciones de los instrumentos NASA OTD (4/95-3/00) y LIS (1/98-2/03).

Proc.: http://thunder.msfc.nasa.gov/images/HRFC_AnnualFlashRate_cap.jpg

Figura 2.19: Cantidad de descargas por km² por año.

DIRECCION GENERAL DE METEOROLOGIA DEL URUGUAY

SINOPSIS METEOROLOGICA MENSUAL DEL AÑO 19.....

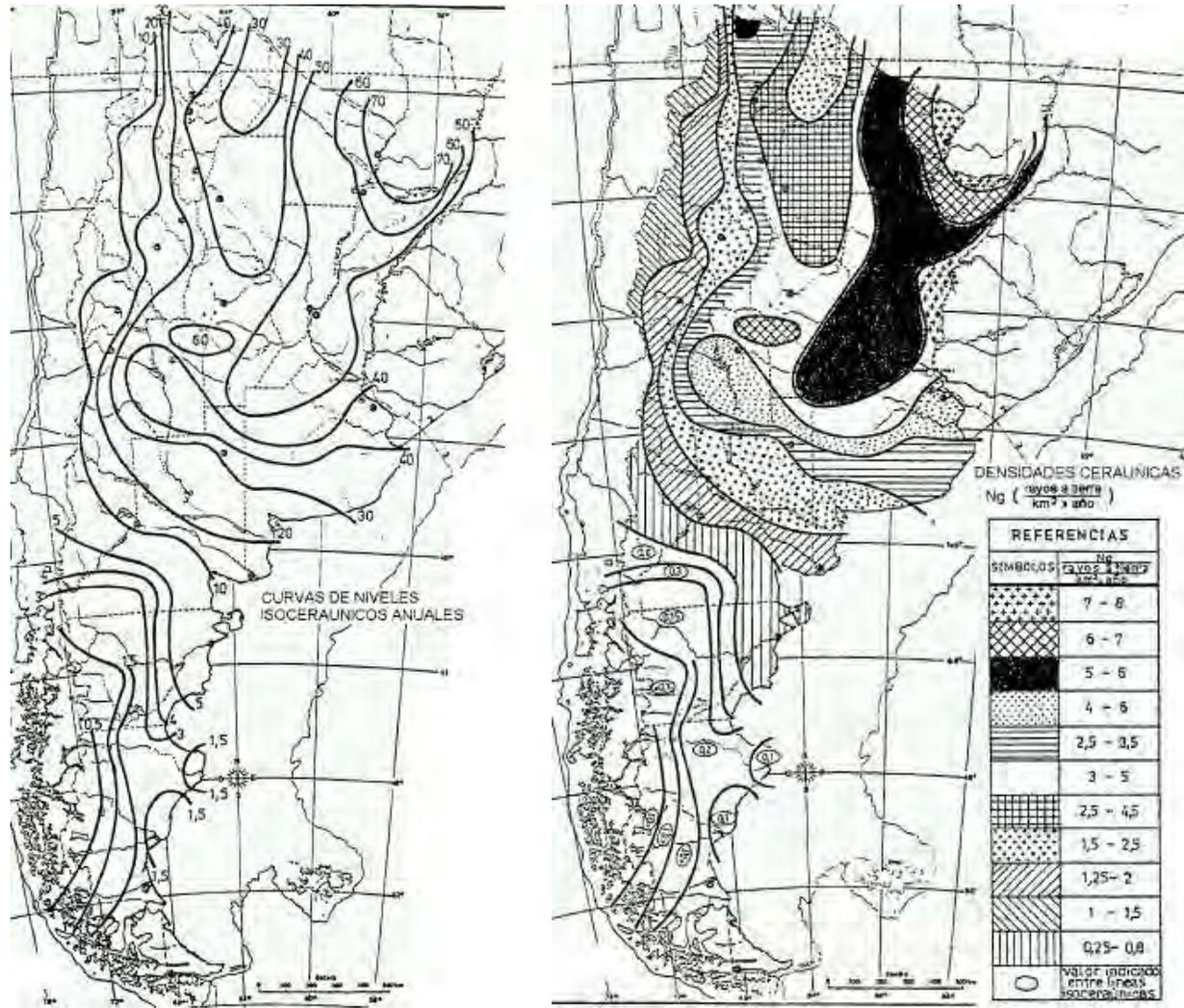


REGISTRO DE TORMENTAS ELECTRICAS Periodo 1946-1980

ESTACION	Ene	Febr	Marc	Abr	Mayo	Jun	Jul	Agost	Setiem	Octub	Noviembre	Diciembre	Año
ESTACION METEOROLOGICA "A. B. T. I. O. K. S."	2,22	2,30	1,86	2,20	1,92	1,50	2,08	1,73	2,63	2,67	2,17	2,30	23,6
" " "G. A. L. T. O."	2,20	2,37	2,71	2,20	1,46	1,60	1,77	1,97	2,43	2,16	2,31	2,22	26,9
" " "O. I. M. E. R. O."	2,48	2,44	2,20	1,87	1,29	1,54	2,09	1,47	2,34	2,84	1,78	1,84	20,2
" " "P. A. Y. S. A. R. O. U."	3,50	2,68	3,8	2,22	1,87	1,26	2,62	1,93	2,79	3,00	3,34	3,15	32,4
" " "P. C. S. R."	3,58	4,09	3,3	2,48	2,76	3,17	4,31	3,61	3,76	2,96	2,41	3,73	40,0
" " "PASO DE LOS TOROS"	4,93	4,25	3,7	2,76	2,38	2,20	2,57	2,56	3,30	4,09	3,16	4,67	43,4
" " "M. S. R. C. E. R. E. S."	5,55	5,39	4,5	4,07	3,25	2,97	2,76	2,67	3,40	4,24	4,39	4,39	48,2
" " "TRACENA Y TRES"	4,23	4,20	3,6	2,73	2,31	2,40	2,89	3,33	3,47	2,64	2,87	4,65	39,7
" " "C. S. I. E. R. I. O."	3,43	3,36	2,1	2,24	2,78	1,79	1,94	2,19	2,27	2,00	2,28	2,65	31,9
" " "M. O. C. H. O."	1,63	1,53	1,3	1,53	0,95	1,24	1,14	1,14	1,36	1,29	0,96	1,21	15,0
" " "P. H. A. D. O. Periodo 1950-1970"	4,32	1,40	1,3	2,72	2,24	2,44	2,24	2,36	2,36	2,44	3,00	3,88	35,6
" " "P. H. T. A. O. E. I. E. S. T. O."	2,14	1,77	2,4	1,78	2,11	3,00	2,57	1,97	2,28	1,82	1,71	1,91	28,0
" " "68N 105E" Periodo 1946-1970"	1,21	2,74	2,4	1,74	2,04	1,81	1,96	2,00	2,17	2,17	2,17	2,37	28,2
" " "M. I. N. A. S. Periodo 1961-1963"	1,05	0,35	1,6	1,56	1,21	1,56	1,52	1,39	1,47	1,13	1,08	1,17	15,2

LA DIRECCION DEL DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES
Equiparado a Te. 29 *Amador J. de Santanilla*

Figura 2.20: Sinopsis meteorológica mensual para el Uruguay.



(a) Mapa isocerámico. Curvas T=Constante. (b) Densidad Cerámica (Descargas a tierra). Curvas Ng=Constante.

Figura 2.21: Mapas cerámico de Argentina.

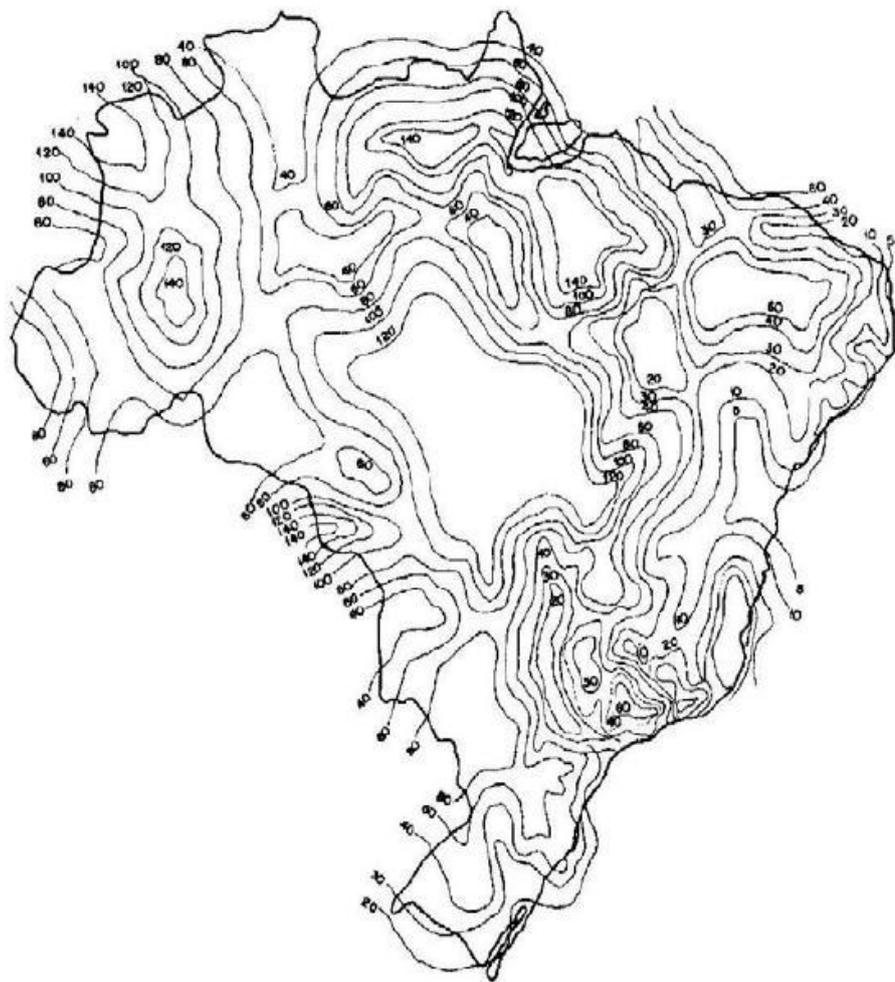


Figura 2.22: Mapa Isoceráunico de Brasil.

Capítulo 3

La Descarga Atmosférica. Estructura y Desarrollo. Análisis Frecuencial.



Figura 3.1: Fotografía de una descarga atmosférica nube - tierra.

3.1. La Descarga Atmosférica

Hay tres tipos de descargas:

- Intranube (la más frecuente).
- Entre nube y tierra.
- Entre dos nubes (menos frecuente).

Nos concentraremos fundamentalmente en las descargas entre nube y tierra, ya que es nuestro objeto de estudio para aplicar protecciones. Dentro de la descarga entre nube y tierra existen cuatro tipos de rayos, dependiendo de la dirección de propagación de la guía escalonada y de la polaridad de la carga efectivamente transferida de la nube a tierra. Se llaman ascendentes o descendentes según la dirección de propagación y positivas o negativas según la polaridad. En la figura 3.2 vemos los cuatro tipos, siendo (de izquierda a derecha):

1. Descendente negativo.
2. Ascendente negativo.
3. Descendente positivo.
4. Ascendente positivo.

Como se verá, la descarga consta de dos o tres etapas de transferencia de carga entre nube y tierra.

3.1.1. Formación de la descarga entre nube y tierra

A continuación estudiaremos en detalle los rayos nube-tierra descendentes negativos ya que representan el 90 % de los rayos totales.

1 - Ruptura preliminar

El 90 % de las descargas nube-tierra se inician en el interior de la nube y llevan carga negativa a tierra. Una descarga de este tipo se inicia en un fenómeno llamado “Ruptura Preliminar”, una descarga electrostática en el interior de la nube, en la zona de carga negativa, típicamente a una altura de unos 5 a 8 km. La ruptura preliminar es seguida por un proceso de descarga dentro de la nube que dura algunos milisegundos a partir del cual se comienza a formar la llamada “Guía Escalonada” de la nube a tierra.

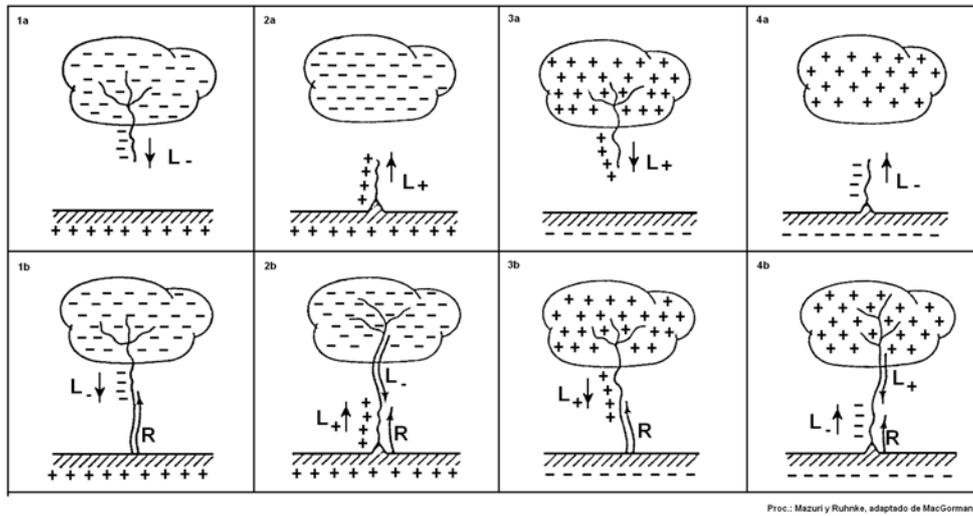


Figura 3.2: Tipos de rayos según Mazur y Ruhnke.

2 - Guía escalonada descendente

Lo más típico de la descarga atmosférica es que no se produce por ruptura dieléctrica de todo el aire que hay entre nube y tierra, lo que sería imposible. Necesitaría intensidades de campo que no existen en la naturaleza. Lo típico es que la ruptura se produce por tramos o de a saltos; es un fenómeno de propagación que se pasa a describir.

Si el campo asociado a la ruptura preliminar es suficientemente grande, se produce un fenómeno de propagación de un canal de aire ionizado cargado negativamente, llamado guía escalonada o trazador descendente. La carga es muy variable, con una media de 5 Coul. Es un “tubo” de gas altamente ionizado de algunos centímetros de diámetro, que está rodeado de una envoltura tipo “descarga corona”, el conjunto tubo y envoltura tienen un diámetro del orden de un metro, presenta cierta luminosidad y avanza de a saltos. En la figura 3.3 se aprecia una representación muy simplificada del proceso.

Desde el extremo de la guía, donde hay un determinado campo E , se produce una descarga de cierta luminosidad con una corriente de 100 a 1000 A; esta descarga se propaga a una velocidad de 10^6 a 10^7 m/s, dura $1 \mu s$ y se propaga una distancia de entre 50 a 100 m; luego se produce un tiempo de espera de unos $50 \mu s$, y a continuación otro salto cuya dirección no está relacionada con el salto anterior, pudiendo incluso ramificarse y cada rama desarrollarse independientemente de las otras, también a saltos. Este proceso no es detectado por la vista humana.

Cuando la guía se encuentra entre 100m y 300m de distancia de la superficie,

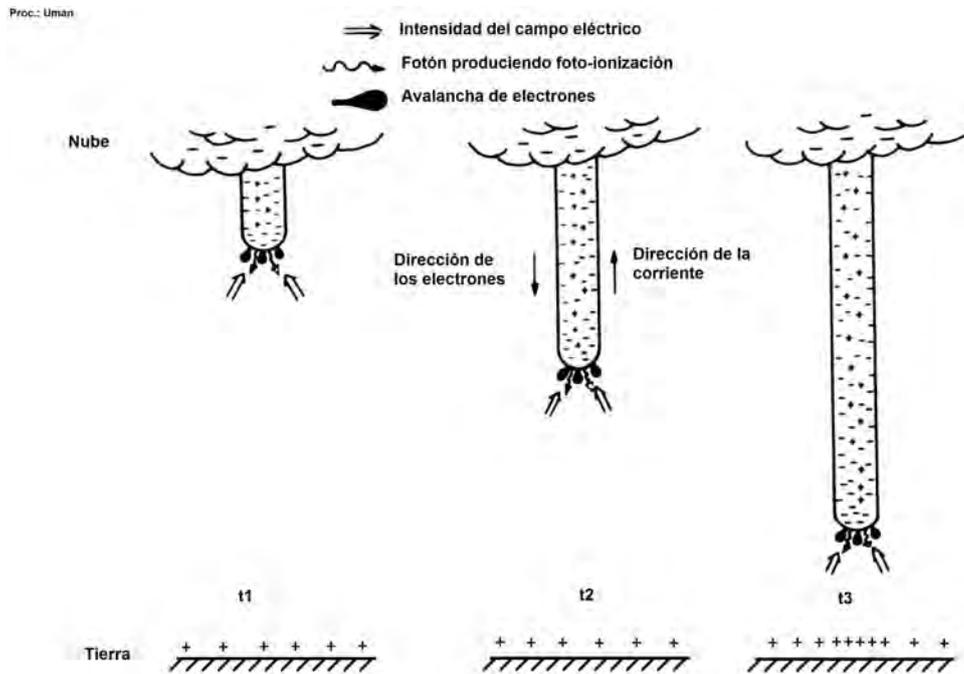


Figura 3.3: Progreso de una guía descendente en aire virgen (sin descargas previas).

comienza a hacer algún efecto sobre la tierra.

Sobre irregularidades del terreno, el campo eléctrico inducido por la nube (que en promedio es de unos 10 kV/m), aumenta localmente debido a la curvatura de las superficies equipotenciales y se produce efecto corona o descarga en punto. Se tiene efecto corona cuando por efecto del campo eléctrico intensificado, los electrones libres son acelerados y chocan con moléculas generando cargas positivas y negativas. Para valores no muy altos del campo eléctrico E , el proceso es autorregulado, ya que la carga generada tiende a bajarlo. Para que se forme el efecto corona y luego el trazador ascendente, alcanza con que la irregularidad tenga un radio de algunos centímetros, no siendo necesario que sea puntiaguda. En realidad las puntas excesivamente agudas forman a su alrededor una zona de cargada por efecto corona que apantalla la propia punta retardando levemente la emisión de un trazador ascendente. Una punta redondeada puede emitir un trazador ascendente para valores de campo algo menores, es decir mas temprano, lo que aumenta la probabilidad de que el trazador sea exitoso. Hay mediciones de campo que confirman este hecho.

3 - Trazador ascendente

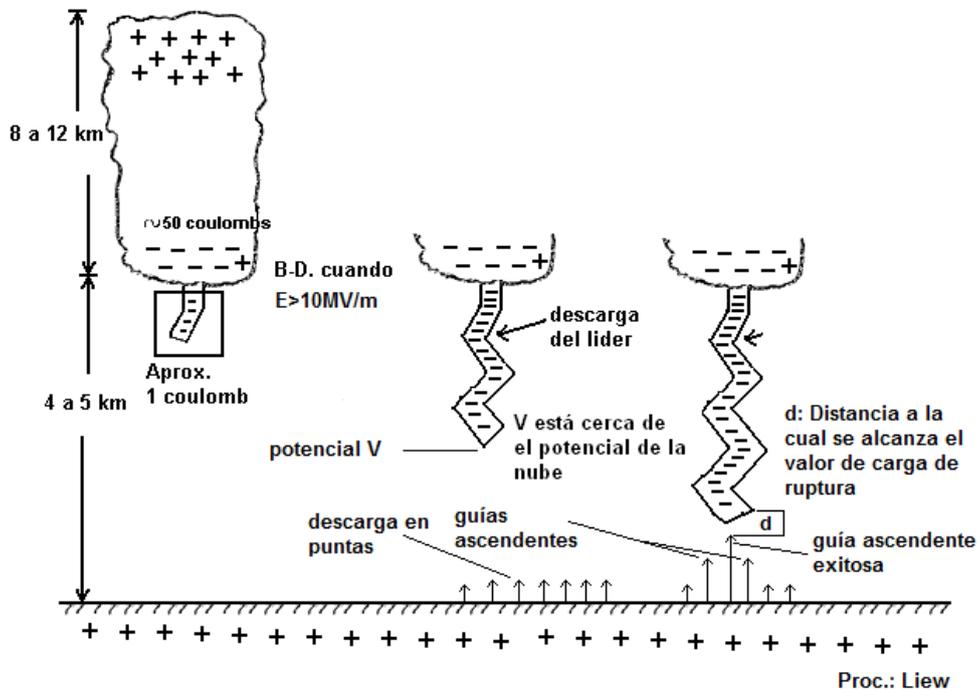


Figura 3.4: Formación de la descarga a tierra y de la corriente de rayo.

En esta fase se debe considerar que la tierra y los objetos sobre ella son conductores, ya que las cargas pueden moverse rápidamente y generalmente están mojados, por lo que importará más la geometría que los materiales que los constituyen. Al acercarse la guía escalonada a tierra, cuando el campo promedio entre la punta de la guía y los puntos salientes de tierra (que son múltiples en cualquier entorno normal) llega a unos 500 kV/m , las corrientes corona de dichos puntos aumentan y se transforman en canales ionizados que se propagan hacia arriba de manera análoga a la propagación de la guía escalonada, impulsados por el propio campo eléctrico. Esos canales se llaman “guías o trazadores ascendentes” (upward leaders, a veces también streamers).

La velocidad de los streamers es de 10^4 a $3 \times 10^5 \text{ m/s}$, y generalmente se forman varios de ellos en diferentes puntos donde se alcanza el campo eléctrico crítico (E crítico).

4 - Proceso de enlace

Cuando el campo entre la punta de uno de esos trazadores ascendentes y la punta de la guía descendente llega a un valor suficientemente alto, del orden de $3 \times 10^6 \frac{V}{m}$, se completa el canal conductor entre la tierra y la nube y se produce la primera descarga de retorno entre la nube y el objeto que emitió el trazador ascendente. En esta fase sí hay ruptura dieléctrica del aire entre las dos puntas de las guías. El objeto se convierte entonces en el punto de impacto. El trazador ascendente exitoso, que es, de los múltiples trazadores generados por una guía, el que logra establecer la conexión, proviene generalmente de uno de los primeros objetos cuya distancia a la punta de la guía descendente llega a un valor tal que el campo medio a través de esa distancia adquiere el valor crítico.

5 - Primera descarga de retorno

Al formarse el canal, los electrones en la guía se transfieren a tierra, produciéndose lo que se llama primera descarga de retorno. Esta descarga se propaga a lo largo del canal formado por la guía escalonada a una velocidad aproximada de $10^8 m/s$. En el canal, la presión asciende a $10 atm$ y la temperatura asciende a $30.000 ^\circ K$, lo cual produce una expansión muy violenta en el aire, que se traduce en la onda sonora que conocemos como trueno.

En esta primera descarga de retorno se neutraliza la carga de todas las ramificaciones de la guía escalonada descendente que no llegaron a enlazarse con un trazador ascendente. A veces ocurre que más de una ramificación llegue a enlazarse con un trazador ascendente. En este caso, se produce descarga retorno por todas las que se enlazaron. El proceso de neutralización completa es en este caso mas complejo.

La figura 3.4 esquematiza todo el proceso de descarga.

La figura 3.5 se obtiene mediante una exposición fotográfica especial. La cámara desliza la película con el obturador abierto. De esta forma se capturan las diferentes fases. En esta exposición se aprecia el camino de la guía escalonada y el primer retorno (las intensidades están alteradas para poder apreciar ambos fenómenos ya que la intensidad luminosa de la descarga de retorno es muy superior). Se puede apreciar los pasos de la guía escalonada porque ésta emite luz justamente cuando salta y se transfieren cargas. Permanece oscura cuando está detenida; entonces los episodios de salto quedan separados en la película. Obsérvese que la forma se mantiene y es la misma de la descarga de retorno.

Actualmente existen cámaras digitales especiales que permiten registros de fenómenos de estas características.



Figura 3.5: La guía escalonada y su descarga de retorno.

6 - Proceso de reconstitución de la carga de la nube

Después de la primera descarga, tenemos dentro de la nube una zona sin carga, pero con una conductividad mayor que el aire circundante (puede ser $\sigma = 0,01 S/m$), y se produce la sexta etapa de la descarga que consiste en procesos de reconstitución de la carga. Esta etapa tiene una duración media aproximada de 50 ms.

7 - Guía dardo

En el caso de que la carga se haya reconstituido a un nivel suficientemente alto, se produce otra transferencia de carga en forma continua por el canal original. Como el canal ya formado queda débilmente ionizado, la nueva descarga se propagará por el mismo. Por lo tanto su carga tiene características diferentes a la de la guía escalonada. Se observa una zona del canal, débilmente luminosa, de algunos metros de largo, que se desplaza a una velocidad de $10^7 m/s$ por el camino establecido por la primera descarga. Esta guía recorre solamente el canal principal, porque las ramificaciones ya fueron neutralizadas. Cuando esta guía llega a tierra, queda establecido un canal conductor ionizado entre nube y tierra y su carga se transfiere a tierra formando una segunda descarga de retorno. La guía descrita se llama guía dardo (o dart leader en inglés).

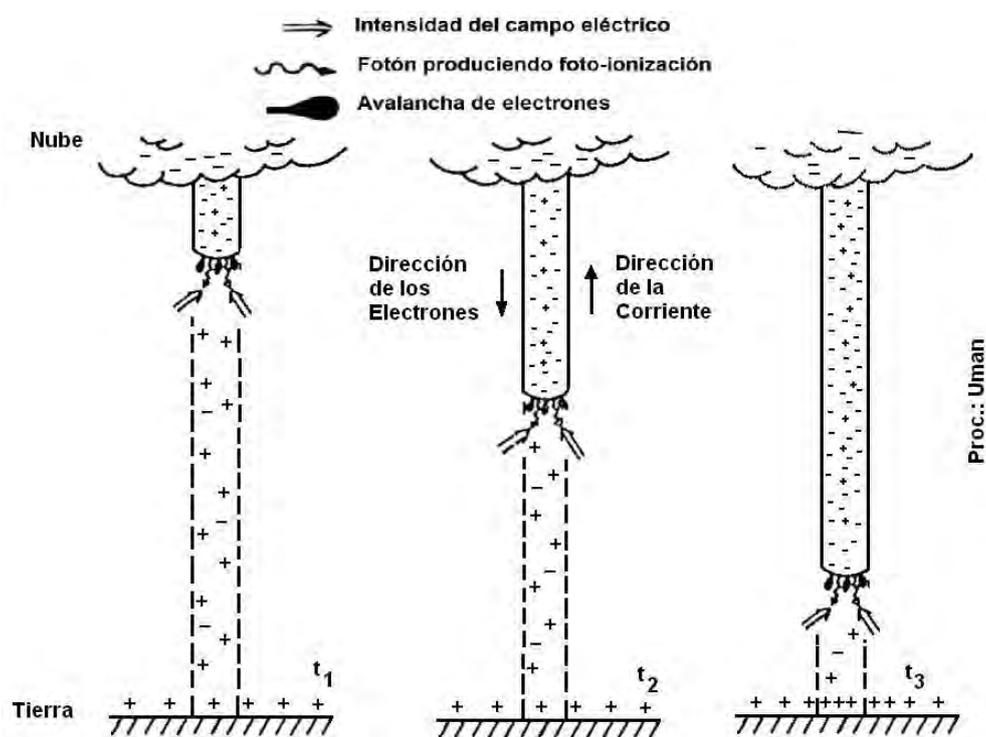


Figura 3.6: Reconstitución del canal.

8 - Segunda descarga de retorno y descargas subsiguientes

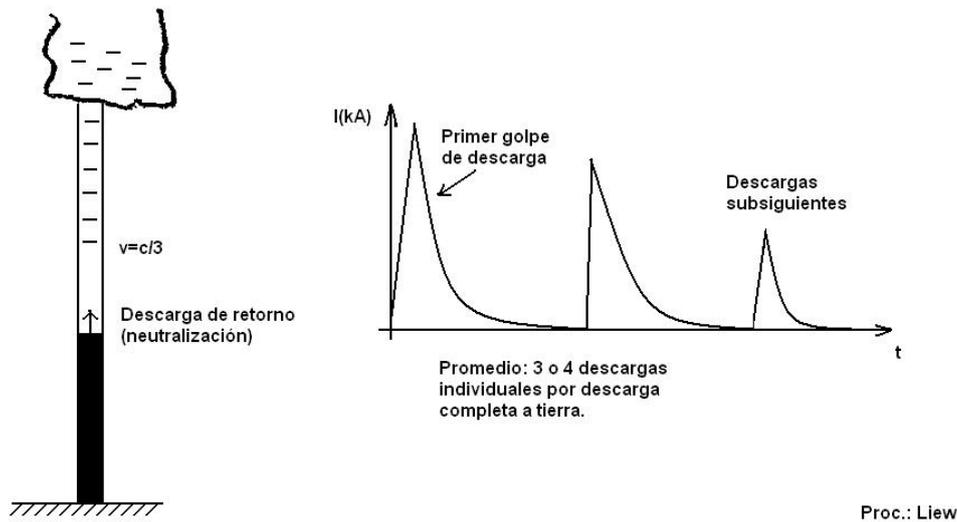


Figura 3.7: Forma de onda de la corriente de rayo.

La transferencia de carga correspondiente a la segunda descarga de retorno se produce sobre el mismo punto del impacto principal. En este segundo retorno, si bien la corriente es, en general, de menor valor de pico, la pendiente de la corriente de subida, $\frac{dI}{dt}$ es mayor que la del primer retorno. En la mayor parte de los rayos ocurren más de dos descargas de retorno. La segunda y las subsiguientes tienen características similares. Se han registrado rayos con decenas de descargas que siguen al primer retorno, todas recorriendo solamente el canal principal. Si uno observa un rayo a simple vista constata frecuentemente que el rayo principal es de gran luminosidad y pulsante mientras que las ramificaciones son fijas y más débiles. Tanto la descarga principal como las subsiguientes tienen una duración del orden de decenas de micro segundos a algunos mili segundos.

9 - Corriente continua

A veces, luego de una descarga de retorno, se observa la circulación de una corriente continua de un valor promedio de algunas centenas de Ampere durante decenas a centenas de ms . Estas descargas son las que producen los incendios, ya que si bien la intensidad de corriente no es alta, sí lo es la duración, por lo que la energía suministrada es mucho mayor. En la figura 3.8 se observa un diagrama temporal incluyendo una descarga con corriente continua. En la figura 3.13 se aprecia una fotografía en la cual la

película se va desplazando con el obturador abierto, y claramente se observa que la penúltima descarga de retorno (que presenta en la fotografía una estela) tiene una componente de corriente continua. Otro aspecto a destacar es que las formas de onda de las descargas de retorno son similares. En la figura

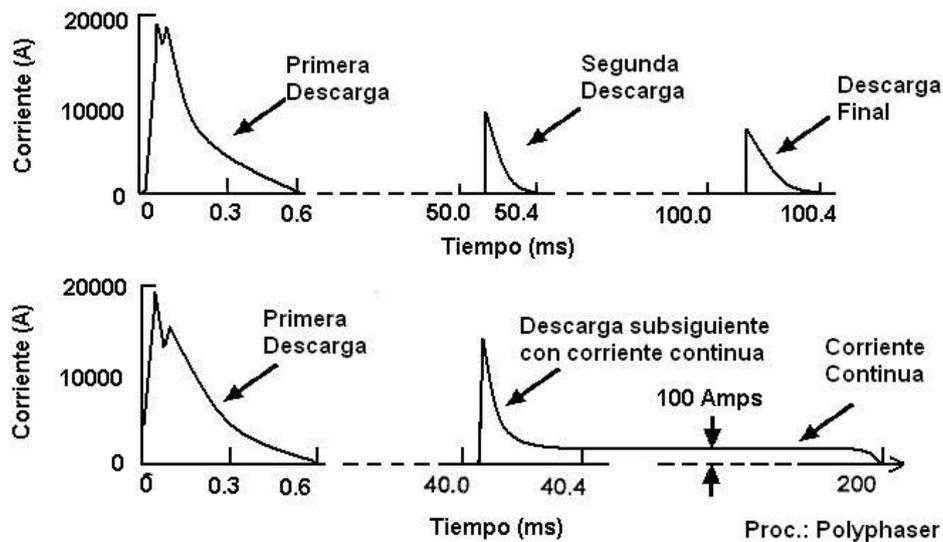


Figura 3.8: Diagrama temporal de una descarga completa.

3.12 se aprecia un rayo completo, con una serie de descargas superpuestas. El camino principal se ve con una intensidad luminosa muy superior a las ramas secundarias por lo mencionado anteriormente en el sentido de que la carga de las ramificaciones se neutraliza en la primera descarga de retorno, y no se vuelve a llenar con carga en las guías dardo posteriores. Se observa además una guía ascendente no exitosa.

El rayo deja de formarse cuando la reconstitución de carga en la nube no alcanza para formar una nueva guía dardo. En la figura 3.9 se ve la probabilidad de ocurrencia de múltiples descargas individuales que se tienen por cada rayo completo.

La figura 3.10 resume el proceso de la guía escalonada, retorno, guía dardo y sucesivas descargas para un rayo con nube negativa y tierra positiva, que es el caso más frecuente.

La figura 3.11 muestra el diagrama temporal junto con las formas de onda de las corrientes.

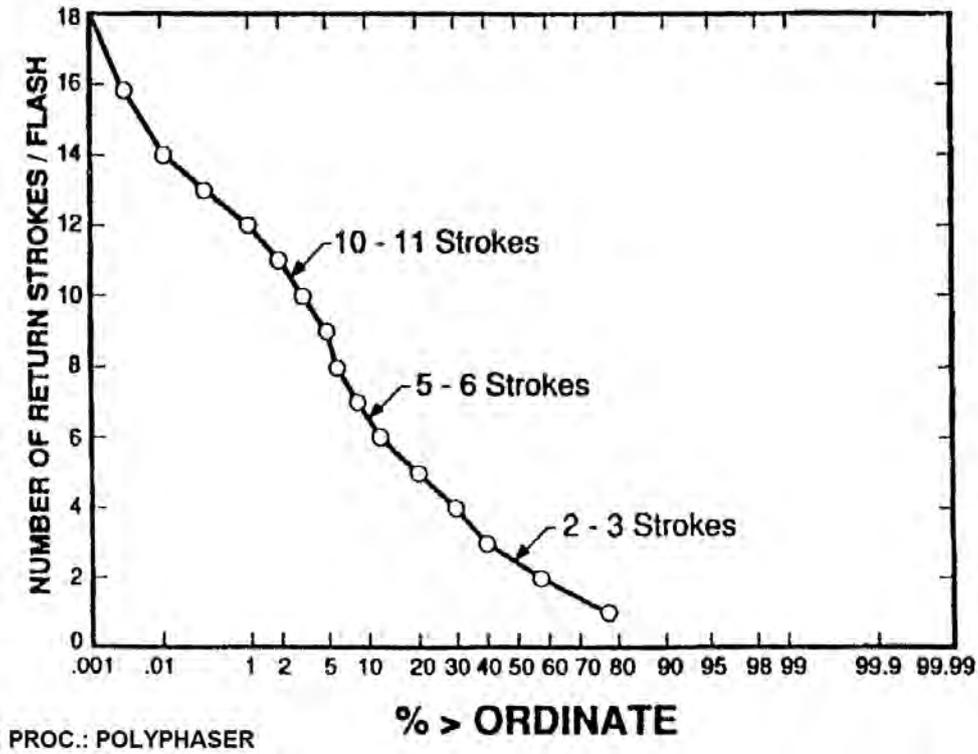


Figura 3.9: Distribución del número de descargas individuales por descarga completa.

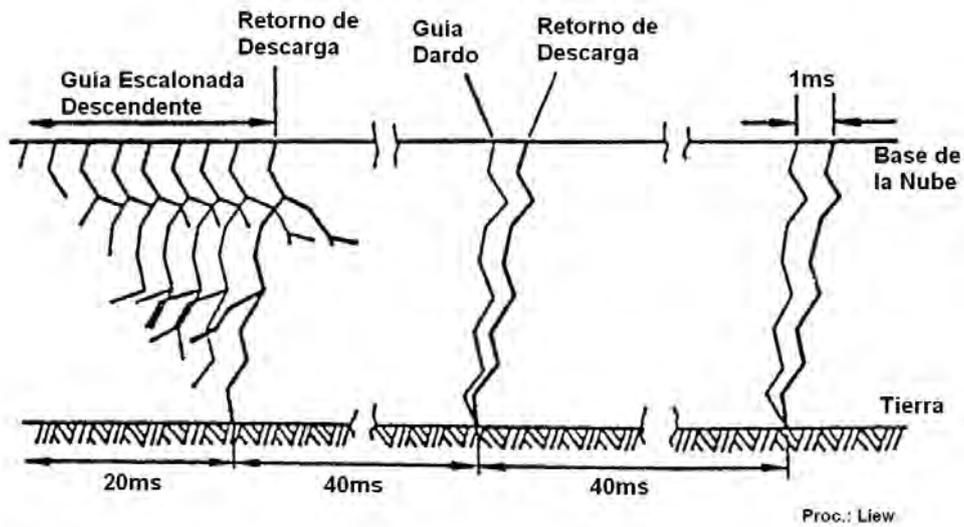


Figura 3.10: Descarga negativa iniciada en la nube.

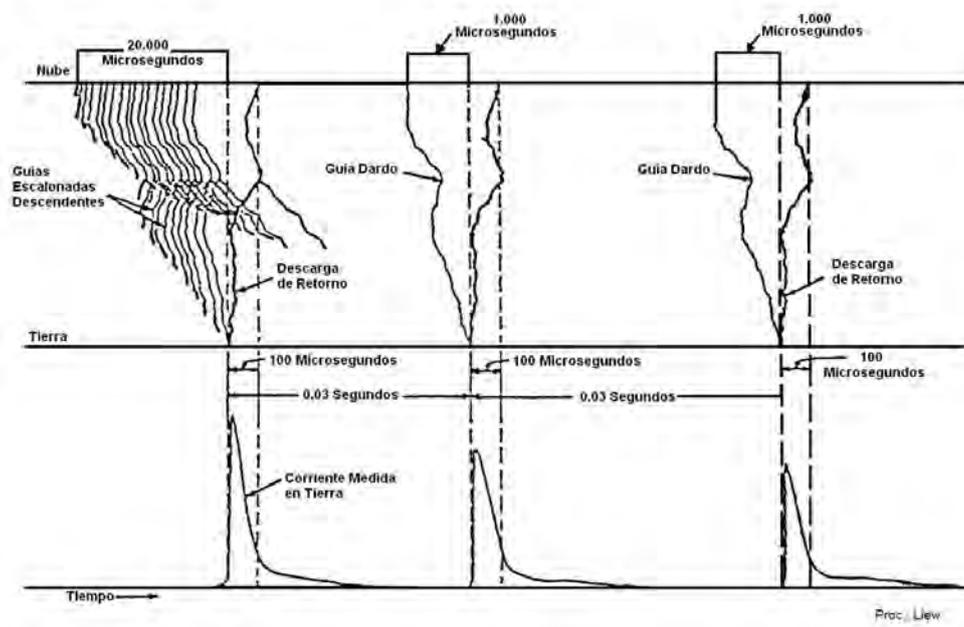


Figura 3.11: Mecanismo de rayo y la corriente de tierra.



Figura 3.12: Fotografía de un rayo con las descargas superpuestas.



Figura 3.13: Fotografía de un rayo con 12 descargas de retorno.

3.1.2. Otros tipos de rayos

Descendente positivo

Se producen al final de la tormenta cuando la nube toma forma de yunque (y por lo tanto la carga positiva en la parte superior de la nube queda “sobre” la tierra) induciendo carga negativa en la tierra, como se ve en la figura 2.10. Estos tipos de rayos se producen generalmente al final de tormentas en invierno, cuando son muy severas. También se pueden producir en incendios forestales que contaminan la nube con humo y cargas positivas.

Características:

- Líder descendente continuo sin ramificaciones.
- Tienen una sola descarga de retorno (stroke).
- Subida más lenta (de 10 a 20 μs).
- Formación lenta, hasta en 1000 μs .
- Intensidad alta, pueden llegar a 400 kA de corriente de pico.

Ascendente negativo

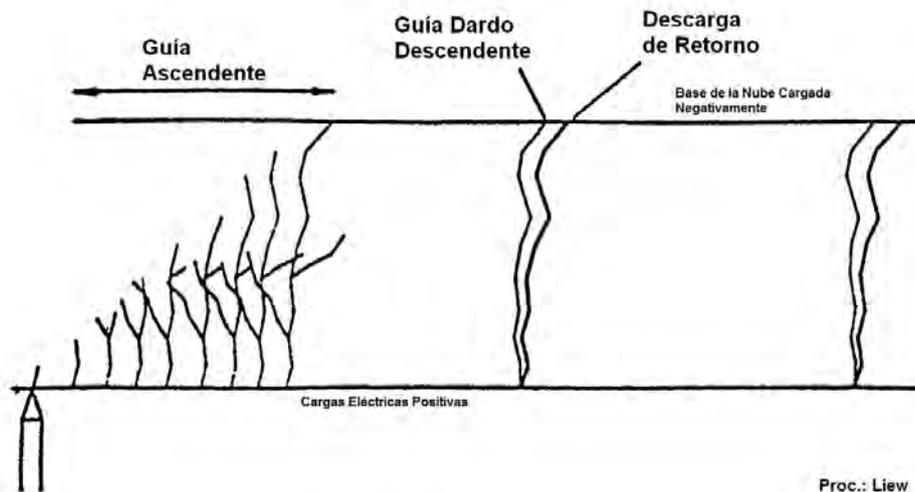


Figura 3.14: Descarga iniciada desde tierra.

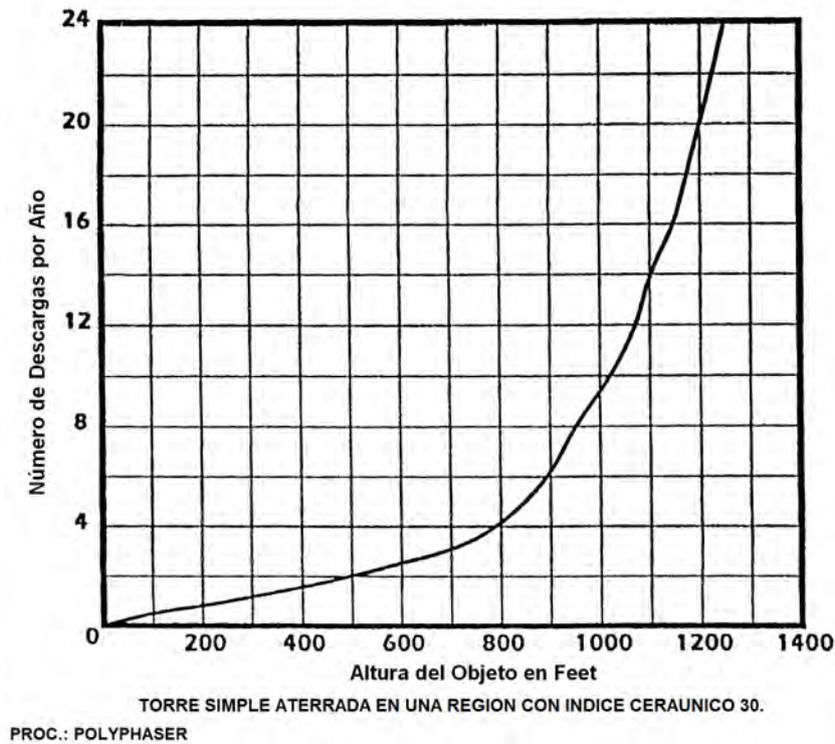


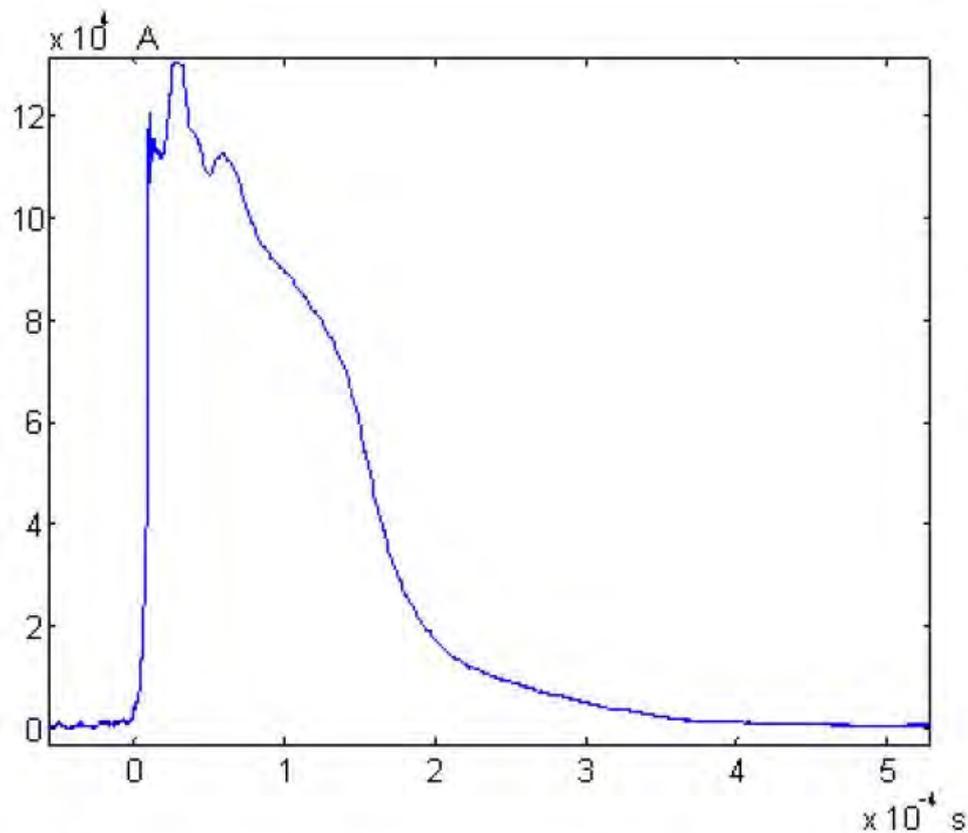
Figura 3.15: Influencia de la altura en el número de descargas anuales.

Es un tipo de rayo iniciado en objetos altos (más de 150 m). En la figura 3.15 se ve la influencia de la altura. Pueden ser iniciados a partir de una descarga intranube que produce un impulso de campo que hace que se produzca una guía escalonada ascendente desde el objeto terrestre. El proceso es similar al descrito para rayos negativos. Cuando esta guía llega a la nube se produce un retorno de 100 A del tipo corriente continua. Luego se produce un dart leader y luego el retorno, que es la descarga violenta. En la figura 3.14 se observa un diagrama temporal de este tipo de rayo. En Uruguay las estructuras de mayor altura son Canal 4: 175 y 205 m s n m, Palacio Salvo: 95 m sin considerar la antena, Antel: 160 m, Hospital de Clínicas 97 m sin considerar la antena, Canales 10 y 12 : 136 m, antena CX6 Sodre: 245 m.

Ascendente positivo

Es análogo al ascendente negativo, sólo que la nube es positiva, la tierra negativa y el sentido de la propagación de electrones es de tierra a nube.

3.1.3. Características del rayo.



Proc.: "Puntas Franklin y Dispositivos no Convencionales de Protección Contra Rayos"
Horacio Torres-Sánchez

Figura 3.16: Medida de un rayo real.

Para poder protegernos de los diferentes daños que ocasiona un rayo debemos caracterizar la forma de onda de la corriente que produce, de manera de poder diseñar las protecciones. La figura 3.16 muestra una medición real de la corriente de un rayo. Se observan tres características que son de nuestro interés:

- Un rápido crecimiento inicial.
- Una corriente de pico máxima.
- Un descenso mucho más lento.

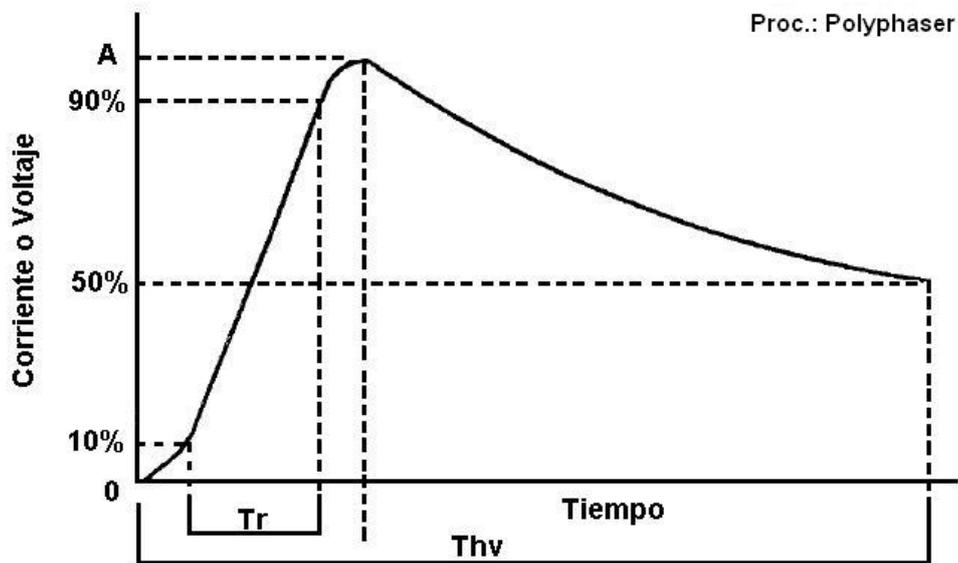


Figura 3.17: Nomenclatura de forma de onda de impulso.

En la figura 3.17 tenemos una caracterización de la forma de onda junto a la nomenclatura. El tiempo de subida está directamente relacionado con $\frac{dI}{dt}$, la derivada inicial de la corriente. Como veremos más adelante, existe una importante autoinductancia en los cables de bajada a tierra de los pararrayos, así como inductancias mutuas con el resto de los metales, por lo cual este valor va a determinar las tensiones desarrolladas entre y a lo largo de esos conductores. La corriente de pico máxima nos va a interesar para la ubicación de los pararrayos y el dimensionamiento de las protecciones, así como para evaluar las tensiones debidas a la componente resistiva de los conductores. Por último el tiempo de bajada al 50% influye directamente en la cantidad de energía total que se disipa en los objetos y conductores por los que circula el rayo. A continuación vemos tres gráficas donde se aprecia la distribución de estos parámetros: figuras 3.18, 3.19 y 3.20.

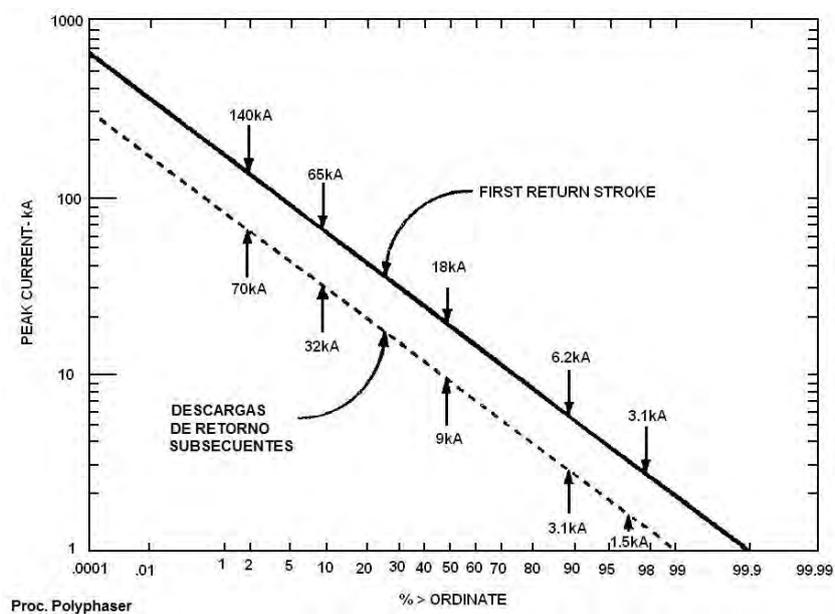


Figura 3.18: Distribución de la corriente de pico de la descarga.

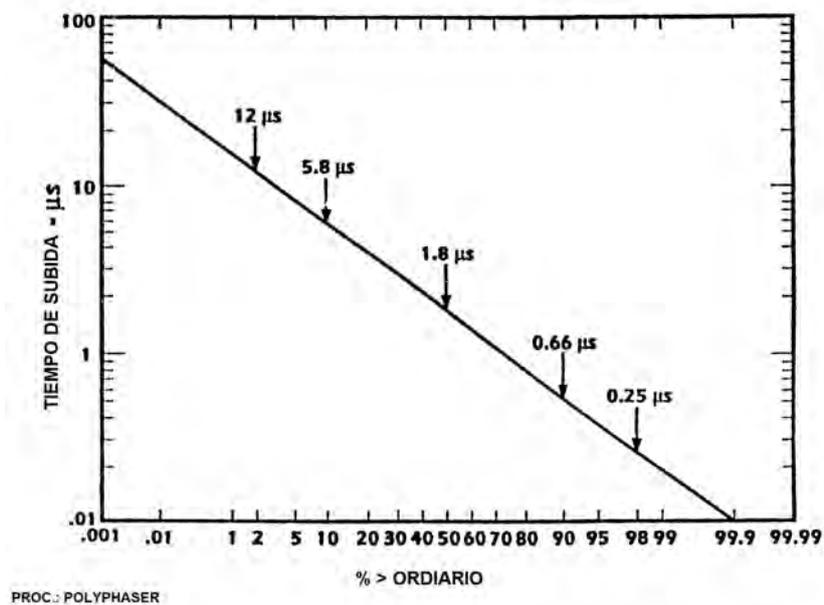


Figura 3.19: Distribución del tiempo de subida.

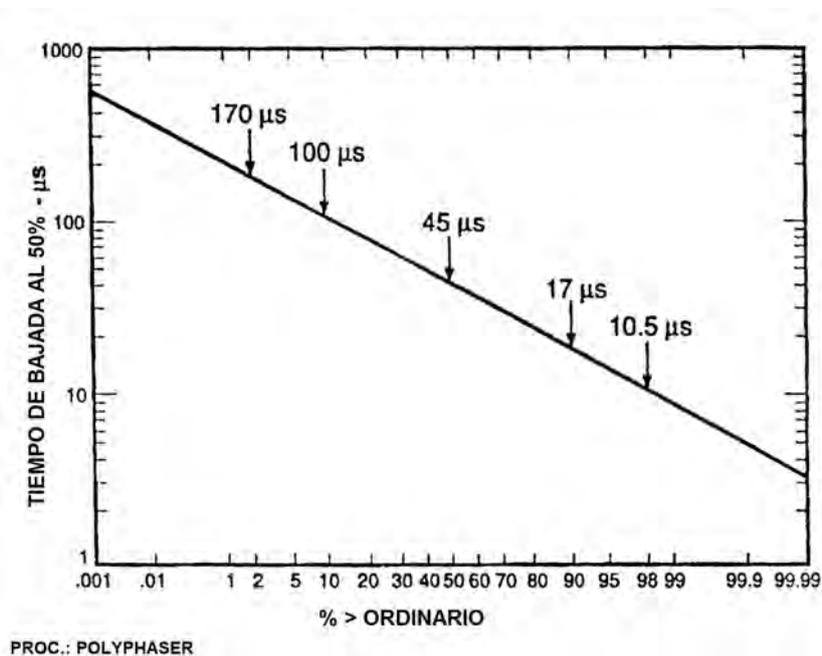


Figura 3.20: Distribución del tiempo de bajada al 50 %.

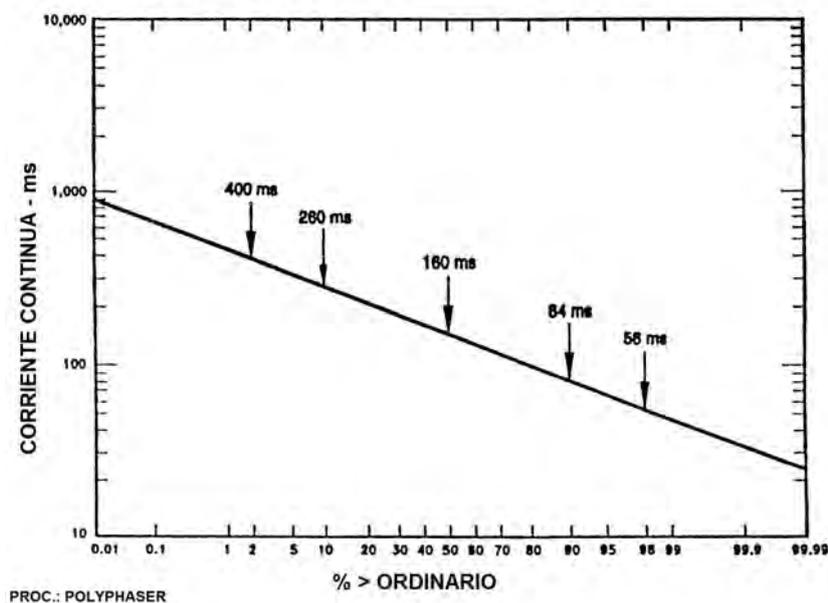


Figura 3.21: Distribución de la duración de la corriente continua. La figura toma en cuenta solo los rayos que tienen corriente continua.

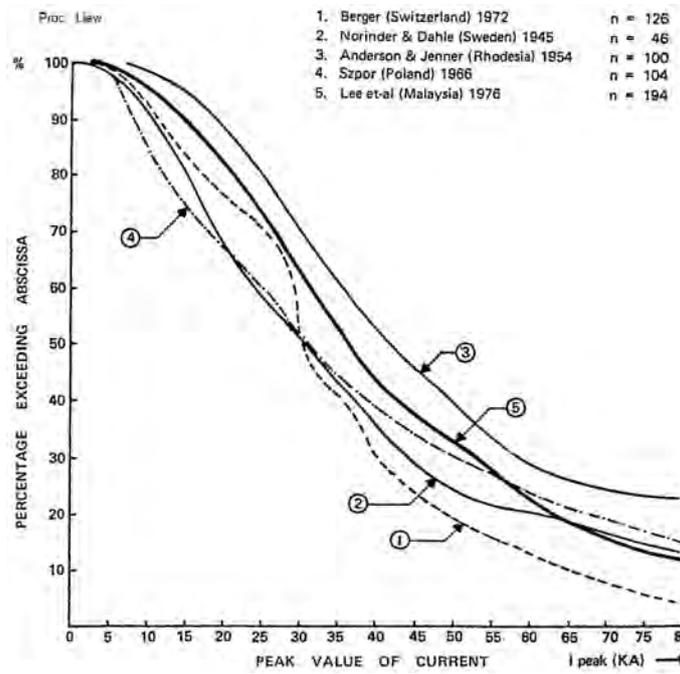


Figura 3.22: Otras curvas de probabilidad de la corriente de pico del rayo.

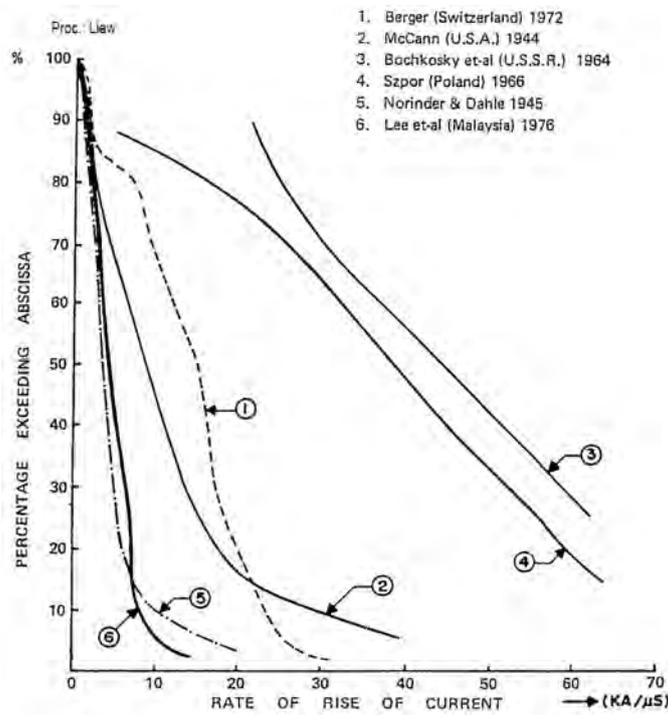


Figura 3.23: Otras curvas de probabilidad de la subida.

3.1.4. Valores representativos.(Resumen)

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Longitud de cada escalón o paso (m)	3	50	200
Tiempo de espera entre pasos (μs)	30	50	125
Velocidad de propagación media (m/s)	$1,0 \times 10^5$	$1,5 \times 10^5$	$2,6 \times 10^5$
Carga distribuida (Coul)	3	5	20

Cuadro 3.1: Guía escalonada. La velocidad de propagación media tiene en cuenta los tiempos de parada.

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Velocidad de propagación (m/s)	$2,0 \times 10^7$	$8,0 \times 10^7$	$1,6 \times 10^8$
Derivada de la corriente ($kA/\mu s$)	<1	10	>80
Tiempo de subida (μs)	<1	2	30
Corriente de pico (kA)	—	10 - 20	110
Tiempo de bajada a la mitad de la corriente de pico (μs)	10	40	250
Transferencia de carga sin considerar la corriente continua (Coul)	0,2	2,5	20
Longitud del canal (km)	2	5	14

Cuadro 3.2: Descarga de retorno.

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Velocidad de propagación (m/s)	$1,0 \times 10^6$	$2,0 \times 10^6$	$2,1 \times 10^7$
Carga distribuida en el canal de la guía dardo (Coul)	0,2	1	6

Cuadro 3.3: Guía dardo.

3.2. Distancia de impacto.

Resumiendo la sección anterior, si tuviéramos el líder descendente con carga negativa y el terreno cargado positivamente (todo lo que está en tierra

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Velocidad de propagación (m/s)	$2,0 \times 10^7$	$8,0 \times 10^7$	$1,6 \times 10^8$
Velocidad de subida ($kA/\mu s$)	—	40	>100
Tiempo de subida (μs)	>0,2	1	>4,5
Corriente de pico (kA)	—	5-10	50

Cuadro 3.4: Descargas subsiguientes.

Magnitud	Mínimo	Representativo	Máximo
Número de descargas	1	3-4	26
Intervalo de tiempo entre descargas individuales en ausencia de corriente continua (ms)	3	40	100
Duración de una descarga completa (s)	10^{-2}	0,2	2
Carga transferida incluyendo la corriente continua (Coul)	3	25	90

Cuadro 3.5: Descarga completa.

tiene conductividad suficiente para ser considerado como conductor), considerando un campo E uniforme (aunque no lo es), se da origen a curvas equipotenciales que se “aprietan” en las irregularidades de los objetos y se origina el efecto corona. Si E es suficientemente grande, alguno de los streamers puede transformarse en líder ascendente cargado positivamente. Esto se inicia en diferentes lugares con distintas intensidades, y alguno de ellos avanza hasta que llega a la distancia de impacto, es decir alcanza el campo crítico entre su punta y el líder descendente.

Llamamos *distancia de impacto* (R_S) a la distancia entre la punta del líder descendente y el punto donde se inició el streamer exitoso, tal que entre ambos se establece el $E_{crítico}$ de aproximadamente $500 \frac{kV}{m}$. R_S depende de la carga almacenada en la guía descendente, al igual que la corriente de pico de la descarga que ocurre después. Experimentalmente se llegó a la siguiente relación:

$$R_S = a \cdot I^b \quad (3.1)$$

En la ecuación 3.1 la unidad de R_S es m y la de I es kA . Los valores de a y b varían según distintos resultados de investigaciones. Los valores tomados por la IEC¹ son $a = 10$ y $b = 0,65$. En las figuras 3.24 y 3.25 hay curvas con

¹International Electrotechnical Commission

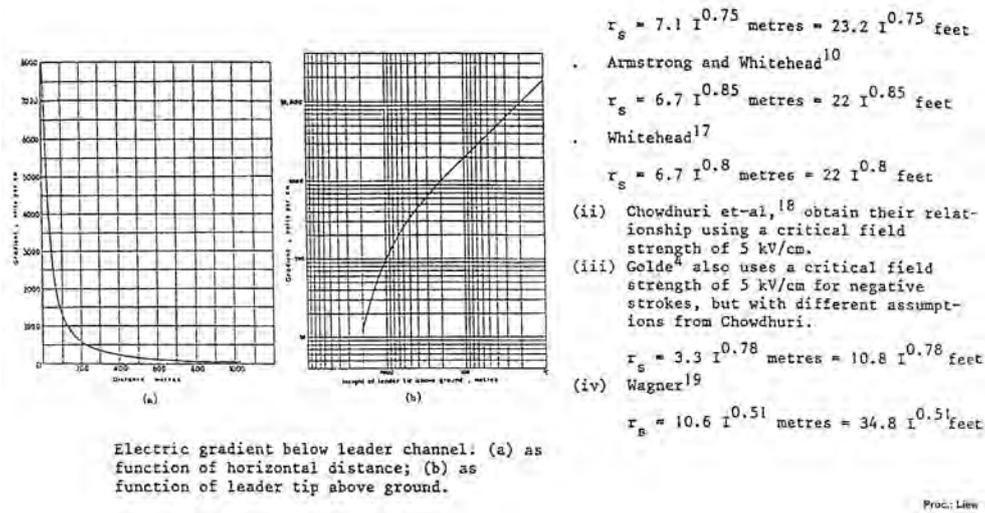


Figura 3.24: Distancia de impacto según distintos autores.

diferentes valores. A partir de R_S se desarrolla el modelo electrogeométrico para las zonas expuestas y protegidas.

Al elegir una corriente de pico cualquiera \hat{I}_{p0} , se halla el R_{S0} , y cualquier otra corriente mayor a \hat{I}_{p0} tendrá una distancia de impacto mayor a R_{S0} . Esto implica que al ubicar las protecciones usando \hat{I}_{p0} se estará protegiendo también para cualquier corriente mayor, pero sin embargo no necesariamente para corriente menores a \hat{I}_{p0} .

3.2.1. Método de la esfera rodante

La distancia de impacto es un parámetro útil para determinar los puntos de una estructura desde los cuales puede propagarse un trazador ascendente exitoso y por lo tanto permite ubicar los posibles puntos donde puede impactar un rayo. Considerando que dicha distancia está relacionada con la corriente \hat{I}_{p0} , su elección para el diseño de protecciones está asociada a determinadas intensidades del rayo.

Es necesario establecer un riesgo aceptable, para ello a continuación se citan algunas probabilidades de la corriente de pico de la primera descarga:

- 1 % de los rayos tienen una intensidad mayor que $200kA$.
- 10 % de los rayos tienen una intensidad mayor que $80kA$.
- 50 % de los rayos tienen una intensidad mayor que $28kA$.

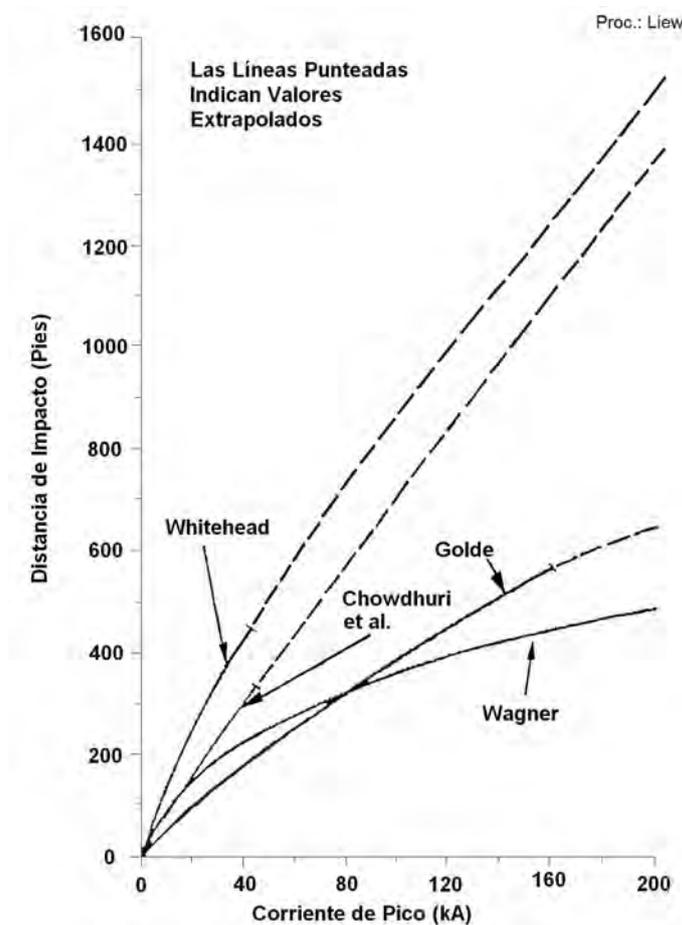


Figura 3.25: Distancias de impacto según diferentes investigadores.

- 90 % de los rayos tienen una intensidad mayor que $8kA$.
- 99 % de los rayos tienen una intensidad mayor que $3kA$.

Esto significa que solo el 1 % de los rayos tienen una corriente de pico en la primera descarga superior a $200kA$, sin embargo el 99 % son mayores a $3kA$. Entonces lo primero es fijar un nivel de riesgo aceptable (esto se verá en detalle en el capítulo 5); por ejemplo digamos que queremos protegernos del 90 % de los rayos, entonces tendríamos que la corriente de pico será mayor o igual a $8kA$ y se fija $\hat{I}_{p0} = 8kA$. Aplicando la ecuación 3.1 con los valores de referencia de la IEC, tenemos que $R_{S0} = 40m$.

El método de la esfera rodante consiste en hacer “rodar” una esfera de radio R_{S0} por la superficie a proteger como muestra la figura 3.26. Las zonas que están en contacto directo con la esfera son los puntos de atracción desde los

que se puede generar un streamer exitoso, y por lo tanto puede impactar en ellos un rayo. Los puntos de las zonas que no entran en contacto con la esfera quedan protegidos de rayos de corriente de pico mayor o igual que \hat{I}_{p0} . Notar que rayos más débiles corresponden a esferas más pequeñas, que tocan en zonas más extensas, y asegurarse contra ellos requerirá un sistema de captación más denso.

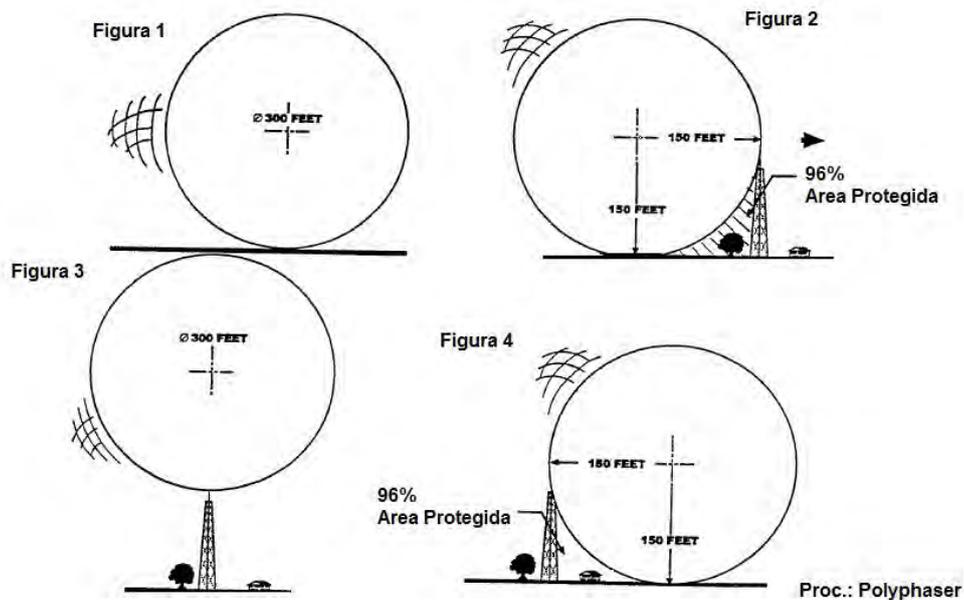


Figura 3.26: Distancia de impacto y método de la esfera rodante.

En normas más antiguas se habla de un *cono de protección* por debajo de un captor. En algunas normas actuales se usa ese concepto como aproximación simplificadora con respecto a la esfera, válida cuando los elementos a proteger son pequeños (en altura y extensión) comparados con la esfera. ¿Qué sucede con el modelo del cono? Cada nivel de protección determina un cierto radio de la esfera. De acuerdo a la teoría de la distancia de impacto del cono, a partir de determinado valor de alturas, da como protegida un área mayor que la real. En general el criterio del cono se considera válido hasta unos 10 o 20 metros. La IEC da una serie de ángulos que acompaña la teoría de la esfera.

El método de la esfera rodante falla cuando la altura de la estructura a proteger aumenta al punto que las descargas iniciadas en la estructura son más numerosas que las iniciadas desde nube.

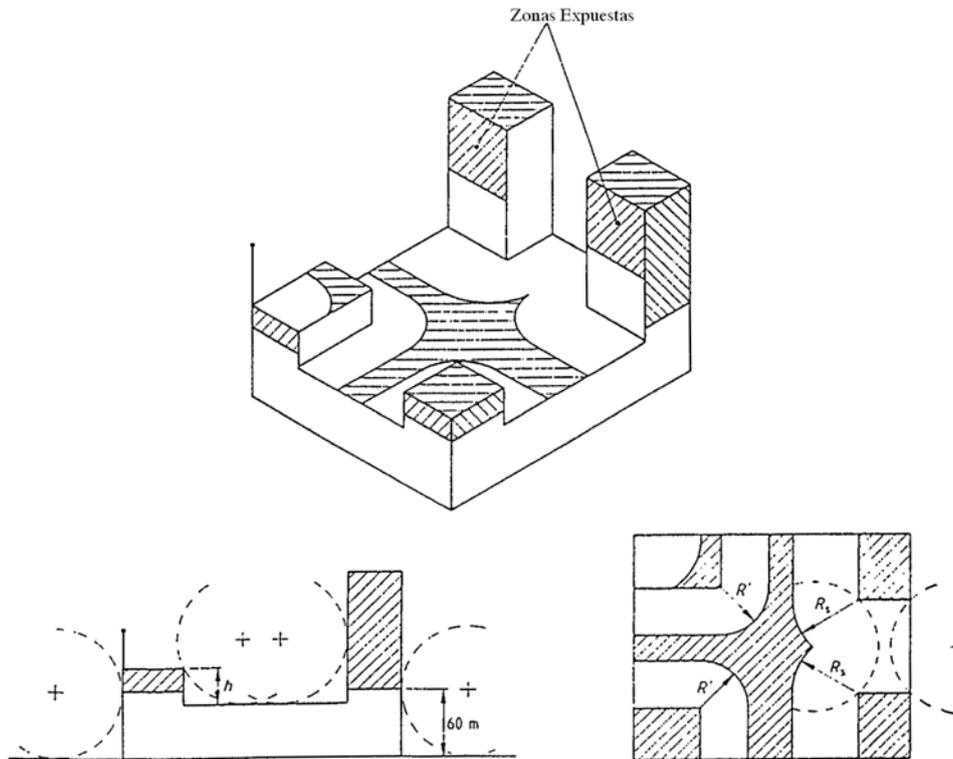


Figura 3.27: Norma BS6651: Método de la esfera rodante, zonas expuestas y zonas protegidas.

3.3. Característica frecuencial de la corriente de rayo.

En este apartado se analizará el contenido espectral o de frecuencias de la corriente de descarga. No se analizan de la misma manera otros fenómenos, como la guía escalonada porque se trata de corrientes o en general señales varios órdenes de magnitud menores, que por lo tanto no causan los efectos y los eventuales daños que el estudio que sigue pretende explicar y dar guías para prevenir.

¿Porqué es necesario hacer un análisis frecuencial de la corriente de rayo?

- Para saber si se produce resonancia con estructuras metálicas que funcionen como antenas o circuitos, como por ejemplo es el caso de las puestas a tierra en suelos rocosos.

- Para determinar la inducción de campos magnéticos.
- Para analizar si se producen ondas viajeras que dependan de la frecuencia. Este fenómeno ocurre típicamente en líneas de transmisión y por las frecuencias involucradas puede propagarse a través de los transformadores a las redes de media o baja tensión.
- Para determinar las interferencias con los sistemas de comunicación.
- Como base de los métodos de detección y registro de impactos.

El modelo de la onda a analizar es un pulso triangular de pendientes bien diferentes en la subida y en la bajada, pues es la corriente de la descarga, como se representa en 3.28.

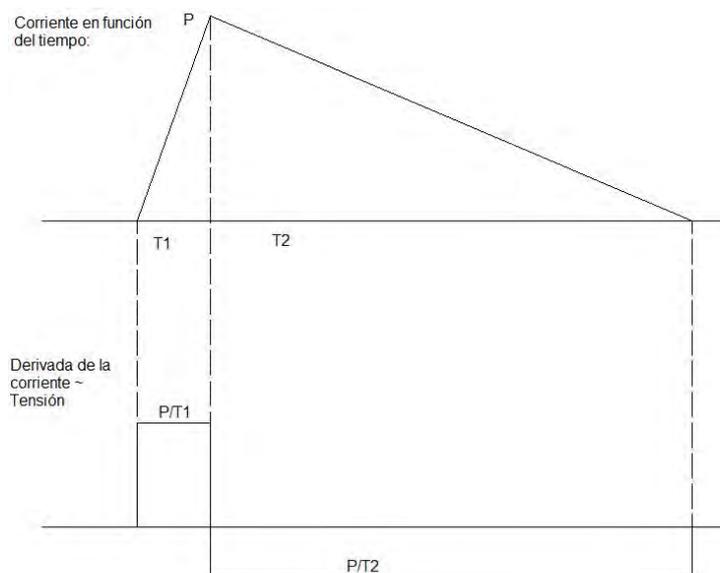


Figura 3.28: Aproximación de la corriente de rayo y su derivada.

Lo hacemos mediante la transformada de Fourier porque no es una señal periódica y lo haremos en pasos sucesivos para simplificar el cálculo, usando propiedades conocidas de la transformada.

Paso 1

Consideremos primero un pulso cuadrado de amplitud A y duración T , que llamaremos $v(t)$, como el de la figura 3.29. Su transformada de Fourier

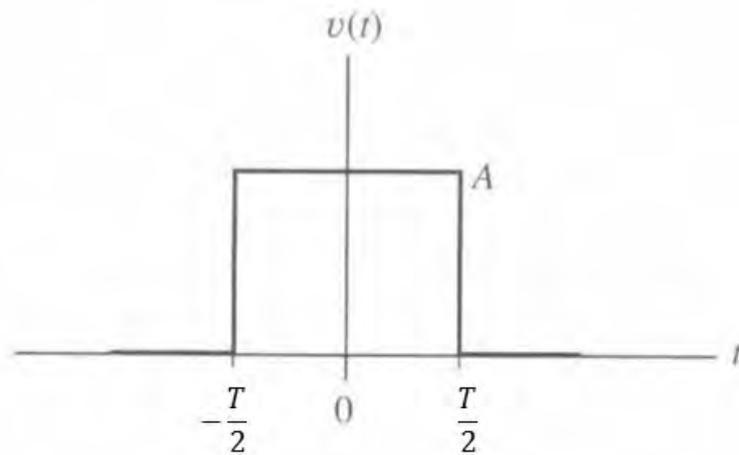


Figura 3.29: Pulso rectangular.

es:

$$\begin{aligned}
 V(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} v(t) e^{j2\pi ft} dt \\
 &= \frac{2A}{2\pi f} \cdot \text{sen}(\pi fT) \\
 &= A \cdot \text{sinc}(fT)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

La función *sinc* se define como:

$$\text{sinc}(x) = \frac{\text{sen}(\pi x)}{\pi x}
 \tag{3.3}$$

Tiene una discontinuidad evitable en 0, donde vale 1, y raíces en todos los enteros. Es par por ser cociente de funciones impares. La función *sinc* se representa en la figura 3.30.

En nuestro caso, $V(f) = AT \text{sinc}(fT)$ tendrá raíces en los múltiplos de $\frac{1}{T}$. $|V(f)|$ está representado en la figura 3.31. Notar que cuando el pulso es más fino (menor T o señal más rápida), y entonces las frecuencias son más altas, su espectro es más ancho, como corresponde. Si el pulso es más ancho (mayor T o señal más lenta) su espectro se aprieta alrededor de la continua o frecuencia 0.

Paso 2

Consideramos ahora un pulso triangular simétrico como el de la figura 3.32, que llamamos $P \wedge \left(\frac{t}{T}\right)$.

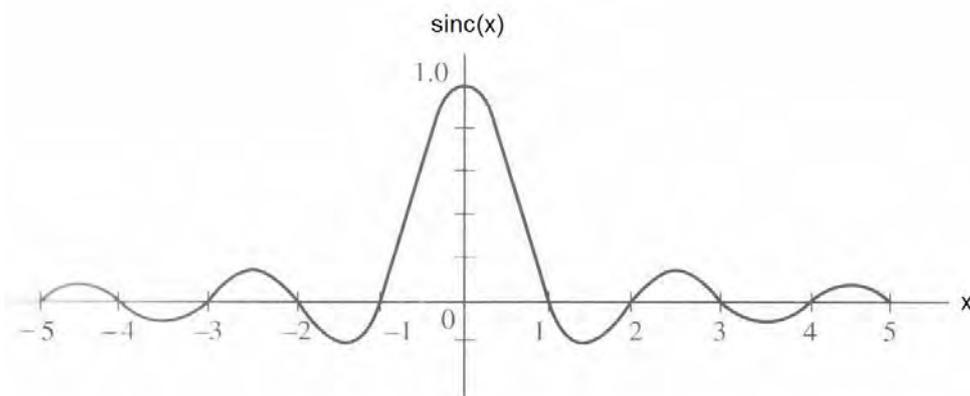


Figura 3.30: Función sinc(x).

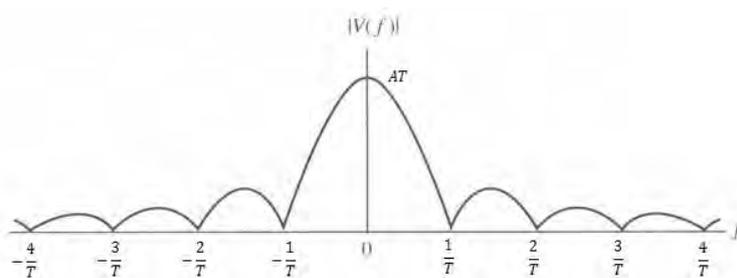


Figura 3.31: Espectro del pulso rectangular.

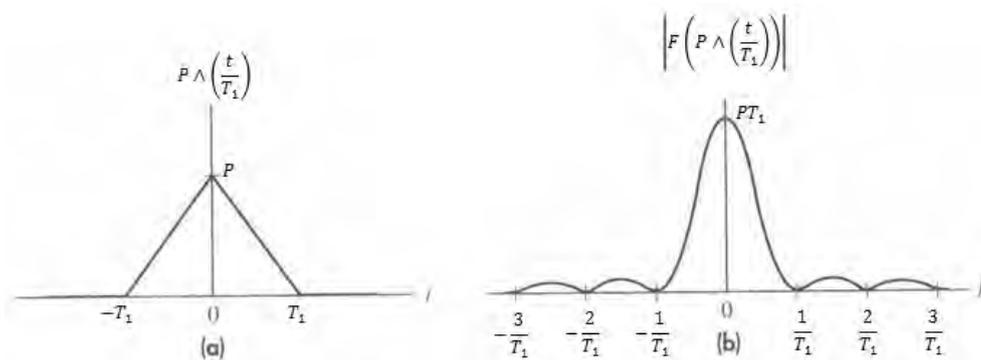


Figura 3.32: Pulso triangular y su espectro.

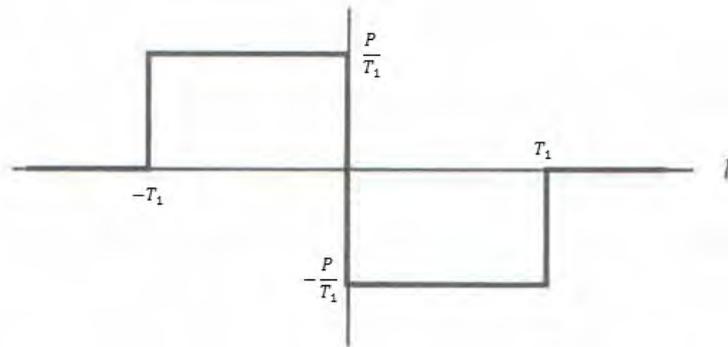


Figura 3.33: Derivada del pulso triangular simétrico.

Consideremos la derivada del pulso triangular simétrico mostrada en la figura 3.33.

Podemos deducir la transformada del pulso triangular a partir de dos propiedades, dado que su derivada está constituida por dos pulsos rectangulares de ancho T_1 desplazados $\frac{T_1}{2}$ con respecto al pulso centrado en 0 que ya vimos.

1. Propiedad de traslación.

$$\text{Si } \mathfrak{F}(v(t)) = V(f)$$

$$\text{entonces } \mathfrak{F}(v(t - t_0)) = e^{-j2\pi ft_0} V(f)$$

Es decir que una traslación añade una fase lineal.

2. Propiedad de integración o derivación.

$$\text{Si } \mathfrak{F}(v(t)) = V(f), \text{ entonces}$$

$$\mathfrak{F}(v'(t)) = j2\pi f V(f)$$

$$\mathfrak{F}\left[\int_{-\infty}^t (v(z) dz)\right] = \frac{1}{j2\pi f} V(f)$$

Hacemos la transformada de cada pulso trasladado, lo que es fácil a partir de la del pulso rectangular, y luego la integral.

Eso da:

$$\mathfrak{F}\left[P \wedge \left(\frac{t}{T_1}\right)\right] = PT_1 \text{sinc}^2(fT_1) \quad (3.4)$$

Otra vez hay raíces en los enteros salvo en 0, ya no hay puntos angulosos en los cortes por 0 y la amortiguación es más rápida. De hecho, aproximadamente el 92% de la energía está en el primer lóbulo.

Está claro que un pulso triangular simétrico con tiempo de bajada igual al de subida será un caso peor, en cuanto a ancho de banda, que la onda triangular de bajada más lenta.

Como primera estimación gruesa, si la subida de la descarga es de $1 \mu s$, el

ancho de banda aproximado es de 1 MHz. Es entonces natural que en la radio de AM interfieran las descargas pues las frecuencias son del orden. En cambio, comparado con las microondas la frecuencia es muy baja, lo que se retomará cuando se trate los dispositivos protectores para alta frecuencia que pueden separar señal de perturbación producida por la descarga.

La onda triangular asimétrica y su derivada se ven en la figura 3.28

$$F(f) = \frac{P}{j2\pi f} [\text{sinc}(fT_1)e^{\frac{j2\pi fT_1}{2}} - \text{sinc}(fT_2)e^{\frac{j2\pi fT_2}{2}}] \quad (3.5)$$

Se ve que a los efectos de estimar el ancho de banda predomina el componente $\text{sinc}(fT_1)$, que es más ancho por corresponder a la subida, que es más rápida y por lo tanto tiene más altas frecuencias.

Como $T_2 \gg T_1$ entonces el ancho de banda de $\text{sinc}(fT_1)$ es mucho mayor que el ancho de banda de $\text{sinc}(fT_2)$. Por lo tanto casi toda la energía está en un ancho de banda $\frac{1}{T_1} \approx \frac{1}{1\mu s} = 1\text{MHz}$. Igualmente la energía que queda fuera de esta banda puede excitar circuitos resonantes. $1\mu s$ es un valor representativo del tiempo de subida de por ejemplo una segunda descarga de retorno.

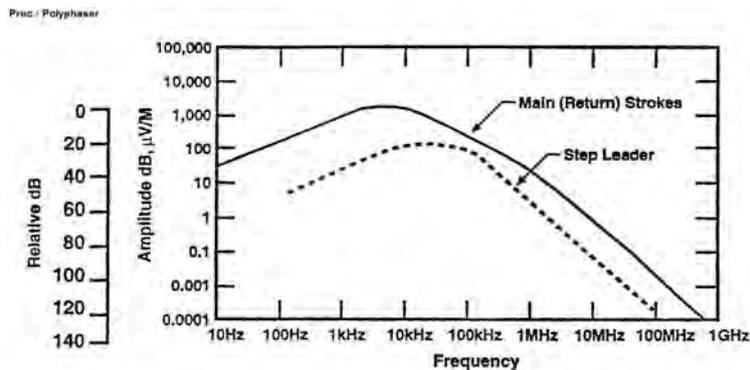


Figura 3.34: Ancho de banda de la radiación de un rayo.

En la figura 3.34 se muestra una distribución media empírica de frecuencias, y se observa que tiene componente DC, pico en 10 kHz y energía concentrada entre la componente DC y aproximadamente los 100kHz.

Se verán aplicaciones en el aterramiento de antenas, sobre todo en suelo rocoso, en que se debe prevenir la resonancia de la corriente del rayo con los radiales de puesta a tierra.

También en protectores de alta frecuencia, en que la señal, del orden de 1 a 2 GHz, se puede separar perfectamente del rayo.

Si hay equipo activo en la antena, como preamplificadores, la alimentación de continua debe separarse, proteger el circuito de otra manera que la RF y luego reinsertarse.

Capítulo 4

Daños Provocados. Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones. Evaluación de Riesgo.

4.1. Daños Provocados

En la presente sección veremos los diferentes mecanismos de daño y con qué parámetros de la corriente de descarga están relacionados.

El rayo se modelará como una fuente de corriente, dado que como se vio la carga es determinada por la capacidad de acumulación de la nube y la dispersión por la conductividad de la tierra. Otras magnitudes como la tensión serán derivadas de la corriente según los circuitos de conducción a tierra. En la figura 4.1 se muestra una forma de onda normalizada de la corriente de una descarga de retorno. En la misma se identifican los parámetros relevantes.

En la figura 4.2 se muestra una descarga de retorno con componente de corriente continua. La carga total transferida a tierra en este tipo de descargas es mucho mayor que en el caso de un retorno sin componente continua. Como se vio, una descarga completa típica se compone de varias descargas de retorno con componente continua siguiendo a alguna de las descargas.

Daños asociados a \hat{I}_p

La corriente de pico produce daños asociados a la resistencia óhmica del camino que recorre el rayo en el objeto en el cual impacta. Contribuye a la tensión desarrollada en los conductores, sobre todo en la fase lenta de la onda y determina la elevación del potencial de tierra y las diferencias de potencial

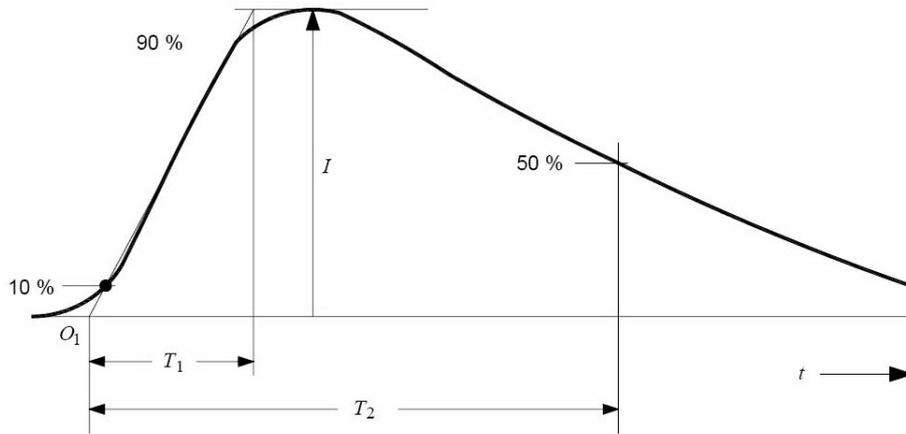


Figura 4.1: Forma de onda.

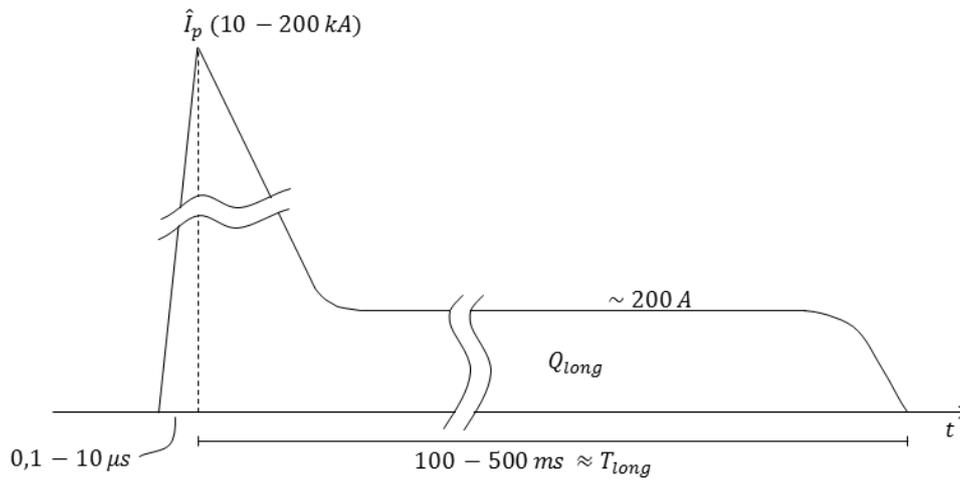


Figura 4.2: Forma de onda de larga duración.

que por lo tanto aparecen en el terreno circundante al punto de impacto (potencial de paso).

Como se verá enseguida cuando cae un rayo en un punto del terreno la dispersión de la corriente produce una tensión que cae con la distancia radial r , como $\frac{1}{r}$. En los árboles, que son elementos muy resistivos, se producen roturas debido a que la mayor parte de la energía es disipada en forma de calor en el propio árbol. La savia se evapora, lo que produce un incremento brusco de la presión interna.

Daños asociados a la pendiente $\frac{dI}{dt}$ inicial

La corriente inicial de la descarga tiene una elevada pendiente caracterizada por su derivada $\frac{dI}{dt}$. Este valor puede variar entre $10 \frac{kA}{\mu s}$ y $200 \frac{kA}{\mu s}$. Los daños asociados a este parámetro se deben a la inductancia (L) de los conductores recorridos por el rayo y las inductancias mutuas con otros conductores. La caída de tensión a lo largo de un conductor U_L está dada por la ecuación 4.1. $\frac{dI}{dt}$ es mayor en las demás descargas de retornos que en la primera.

$$U_L = L \times \frac{dI}{dt} \quad (4.1)$$

Daños asociados a la carga Q

$$Q = \int i(t)dt \quad (4.2)$$

La transferencia de carga produce calentamiento localizado en el punto de impacto del rayo, cuando impacta por ejemplo en una superficie metálica. El proceso se puede describir simplificada de la siguiente forma. Cuando una corriente circula por la interfaz entre dos metales (que en este caso podrían ser el metal sólido y el plasma) se produce una caída de tensión aproximadamente independiente de la corriente, que está relacionada con el potencial de contacto entre los metales.

En el punto de impacto del rayo se tiene una interfaz entre el metal y el tubo de plasma que constituye la descarga de retorno. En la interfaz se produce una caída de tensión (ΔV) aproximadamente constante del orden de 5 a 10V. La potencia disipada en el punto de impacto es entonces:

$$P(t) = \Delta V \times i(t) \quad (4.3)$$

$$\text{La energía vale } W = \int \Delta V \times i(t)dt \quad (4.4)$$

en el tiempo que dura la descarga. Si el voltaje es constante resulta

$$W = \Delta V \times \int i(t) dt \quad (4.5)$$

$$= \Delta V \times Q \quad (4.6)$$

Esa energía localizada puede llegar a derretir o incluso evaporar el metal, perforándose por ejemplo una chapa.

Este efecto es mas pronunciado en rayos con componente de corriente continua (mayor transferencia de carga).

Daños asociados a la energía específica $\frac{W}{R}$

Sabemos que la energía disipada en una resistencia es $W = \int i(t)v(t)dt$ y además $v(t) = Ri(t)$, sustituyendo:

$$\frac{W}{R} = \int i^2(t)dt \quad (4.7)$$

$\frac{W}{R}$ es la energía específica, y multiplicada por la resistencia R del elemento da la energía disipada en el elemento a causa de la circulación de la corriente $i(t)$.

$$\left[\frac{W}{R}\right] = A^2s \quad (4.8)$$

El calentamiento, fundición o incluso evaporación de materiales resistivos, los cuales pueden ser o no buenos conductores, están relacionados directamente con este parámetro. Dada la rapidez del fenómeno, se produce un proceso adiabático en el cual la energía no es disipada, traduciéndose en calentamiento del objeto por el cual circula la corriente. Esto puede llevar a la destrucción de conductores, a la explosión de estructuras de madera por evaporación de la humedad interna y, fundamentalmente por efecto de los rayos largos, a la ignición de materiales inflamables como la propia madera. Los incendios forestales originados por descargas atmosféricas se deben a la componente continua de la corriente de descarga.

Cada uno de estos mecanismos debe ser tenido en cuenta en diferentes aspectos del diseño de las protecciones. La corriente de pico define las sobretensiones de tierra y los voltajes sobre elementos resistivos, así como las tensiones propagadas en líneas de potencia debido a la impedancia característica de las mismas. La derivada de la corriente define las tensiones inducidas en las estructuras o en los propios elementos captadores de rayo. La carga transferida define la robustez requerida de los metales en los que se

prevé puede impactar un rayo. La energía específica es un elemento del análisis de riesgo y sirve para dimensionar los elementos de conducción del rayo a tierra.

4.2. Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones

Qué influye en el daño a las personas?

- Impacto directo
- Potencial de paso (Step Potential)
- Potencial de contacto (Touch Potential)
- Descarga lateral (Side Flash)

Para la evaluación de las sobretensiones y chispas peligrosas causadas por acoplamiento inductivo puede utilizarse como valor máximo el correspondiente a impactos cortos subsecuentes para rayos negativos. Los valores con probabilidad menor al 1 % son:

- $\hat{I}_p = 50kA$
- $\frac{dI}{dt} = \frac{50kA}{0,25\mu s} = 200\frac{kA}{\mu s}$

Para la evaluación de los efectos térmicos y mecánicos pueden utilizarse como valores máximos de los parámetros de la corriente los correspondientes a los rayos positivos. Los valores con probabilidad menor al 10 % son:

- $\hat{I}_p = 200kA$
- $Q_{flash} = 300C$
- $Q_{long} = 100C$
- $\frac{W}{R} = 10\frac{MJ}{\Omega}$

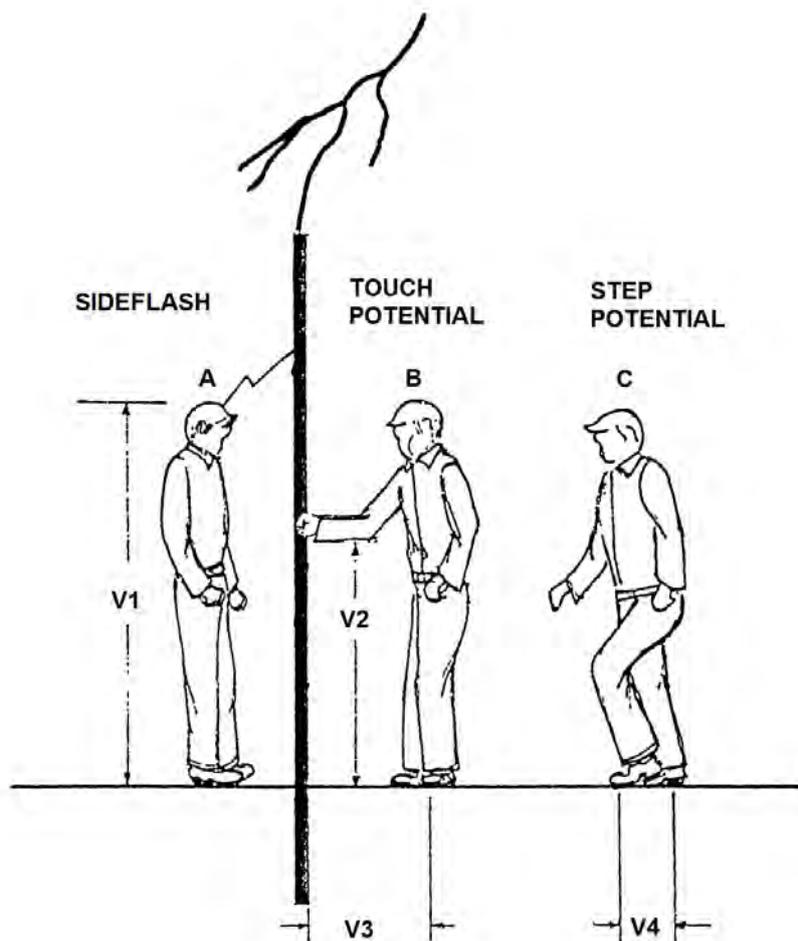


Figura 4.3: Daño a las personas.

Potencial de paso

Vamos a calcular el potencial $V4$ de la figura 4.3, suponiendo que la barra vertical es un conductor a la punta del cual impacta un rayo de 30kA de pico (valor bastante típico).

Supongamos que tenemos un terreno homogéneo y dispersión radial de la corriente; la resistencia entre ambos pies es la resistencia del cascarón semi-esférico de espesor $r_2 - r_1$ (siendo r_1 y r_2 las distancias del poste a cada uno de los pies).

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi r^2} \Rightarrow R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho dr}{2\pi r^2}$$

$$\Rightarrow R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \text{ y } V4 = \Delta U_{12} = \frac{\hat{I}_p \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.9)$$

Usando los valores $r_1 = 20m$, $r_2 = 21m$ y $\rho = 200 \frac{\Omega}{m}$ (terreno arenoso con poca humedad, por ej.) en la ecuación 4.9, obtenemos que $V4 = (30kA)(0,076\Omega) = 2,3kV$. Hay riesgo de daño con $\Delta U > 500V$.

Si bien los zapatos de seguridad tienen suelas aislantes, cuando ocurre una variación de tensión rápida pueden conducir corrientes importantes por efecto capacitivo. Si el zapato tiene una superficie S de contacto con el suelo y un espesor de la suela l , su capacidad aproximada será $C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_s \cdot ub0 \cdot S}{l}$ y la corriente será $I = C \cdot \frac{dV}{dt}$

Potencial de toque

Para calcular el potencial $V2$ de la figura 4.3, suponemos que la persona toca a un metro de altura el conductor de bajada. Para obtener la tensión total a la que queda sometida la persona, hay que sumarle el potencial $V3$ de forma similar a lo calculado en el ejemplo anterior.

$$V2 = R\hat{I}_p + L \frac{di}{dt} \quad (4.10)$$

En la ecuación 4.10 R y L son la resistencia e inductancia del cable de 1 metro respectivamente. Los valores de L van habitualmente de $1 \frac{\mu Hy}{m}$ a $2 \frac{\mu Hy}{m}$ y considerando que la pendiente $\frac{di}{dt}$ es $30 \frac{kA}{\mu s}$ (suponemos un tiempo de subida de $1\mu s$) obtenemos $V2 \approx 30$ a $60kV$ (se despreció el término $R\hat{I}_p$ ya que la resistencia de un conductor de $1m$ y de la sección que suelen tener las bajadas de rayos es del orden de $1m\Omega$).

Daño a distancia

Supongamos que tenemos un circuito impreso con una pista formando una espira cuadrada de $0,1m$ de lado y a $1m$ un conductor de bajada de un parrayos y que está en el mismo plano que dicho conductor. Como hay campos electromagnéticos que varían en el tiempo, aparece una tensión inducida

en la pista.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \tag{4.11}$$

$$E = \frac{d\phi}{dt} = S \cdot \frac{dB}{dt} \tag{4.12}$$

$$E = \frac{\mu_0 S}{2\pi R} \frac{di(t)}{dt} \tag{4.13}$$

$$\approx \frac{\mu_0 S}{2\pi R} \frac{\hat{I}_p}{t_{subida}}$$

Siendo S el área de la espira y R la distancia del centro de la misma a la bajada.

Si consideramos una descarga con una valor de pico bajo, p.ej de 10 kA y un tiempo de subida de 1μs (un segundo retorno por ejemplo):

$$E \approx \frac{(4\pi \times 10^{-7})(0,1m \times 0,1m)}{2\pi \times 1m} \frac{10kA}{1\mu s}$$

$$\approx 20V$$

Si la resistencia de la pista del impreso es $R = 0,1\Omega$ entonces $I = \frac{20V}{0,1\Omega} = 200A$. En este ejemplo se uso un valor de la corriente de pico bajo y una valor de la resistencia de la pista mas alto que los que corresponden a pistas finas, incluso con estas asunciones resulta una corriente que destruiría cualquier impreso.

En efecto se han observado placas quemadas por este fenómeno.

Las figuras 4.4 a 4.7 muestran distintos mecanismos de acople de los efectos del rayo a circuitos eléctricos.

La figura 4.8 ilustra la perturbación causada por un rayo cercano en una línea de transmisión o distribución eléctrica.

4.2 Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones 87

Proc.: MTL Surge Technologies: www.mtlsurgetechnologies.com

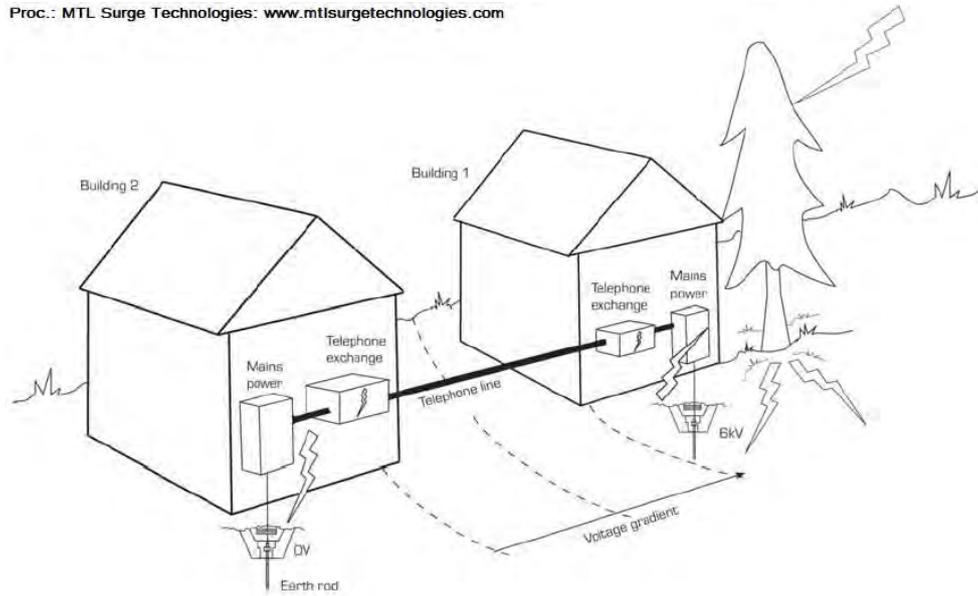


Figura 4.4: Acople resistivo.

Proc.: MTL Surge Technologies: www.mtlsurgetechnologies.com

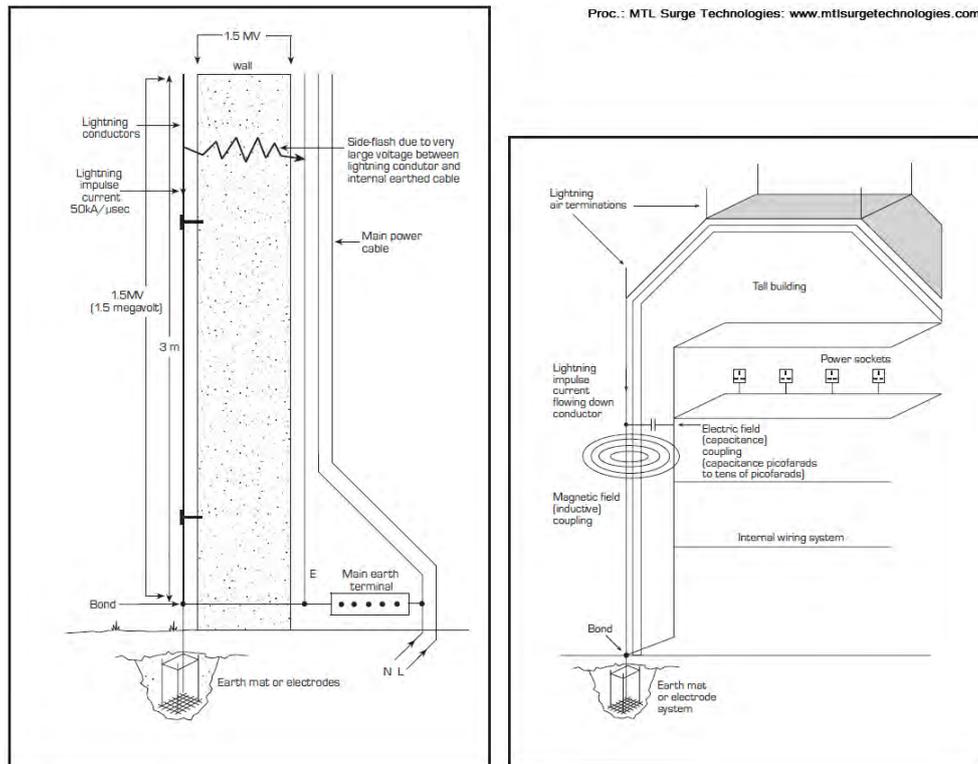


Figura 4.5: Sobretensión en conductores, descarga lateral y acople inductivo.

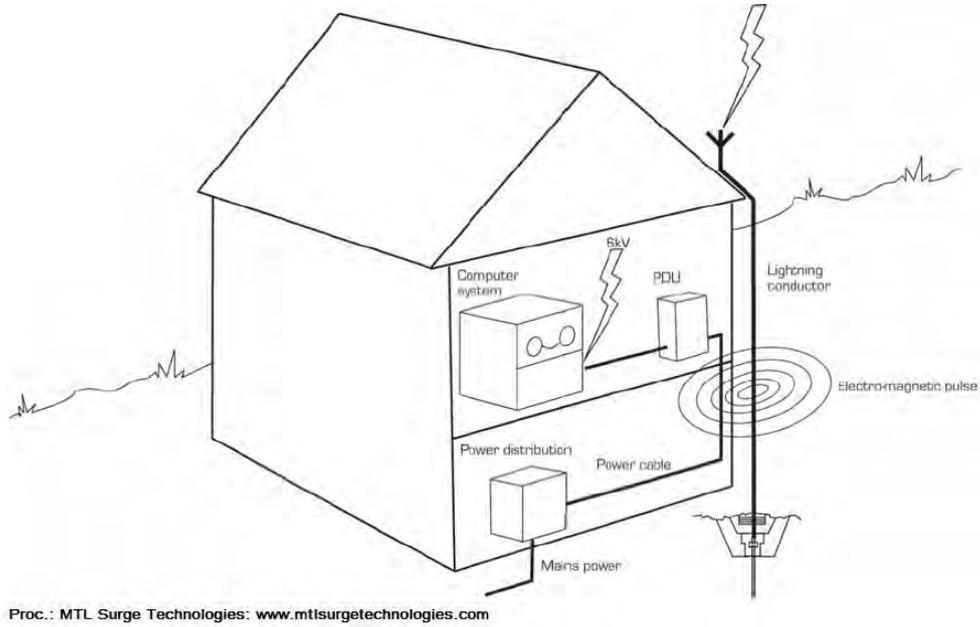


Figura 4.6: Acople inductivo.

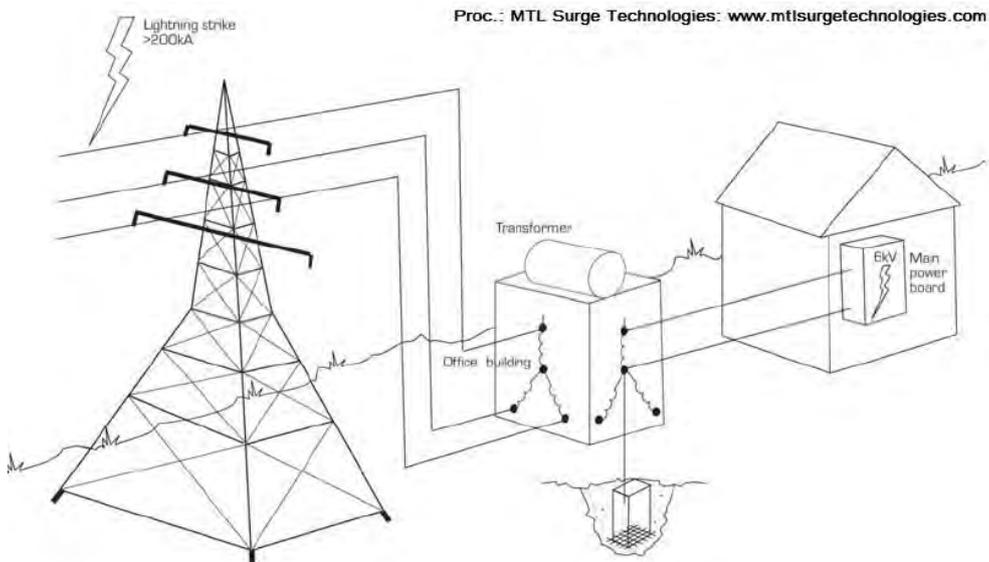


Figura 4.7: Acople capacitivo.

4.2 Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones 89

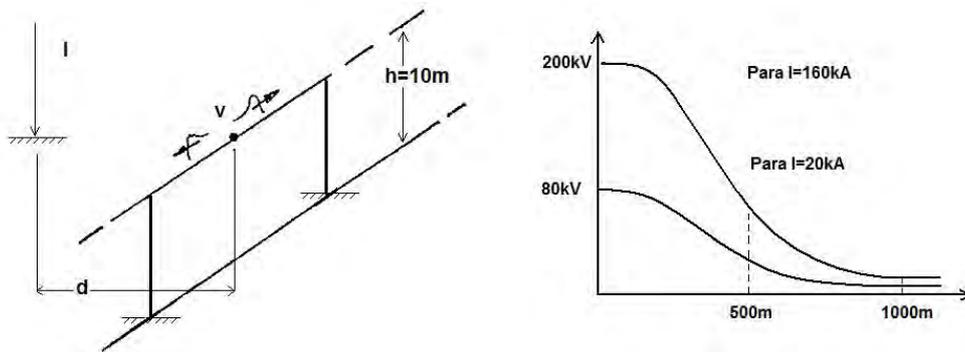


Figura 4.8: Voltajes inducidos producido por una descarga cercana.

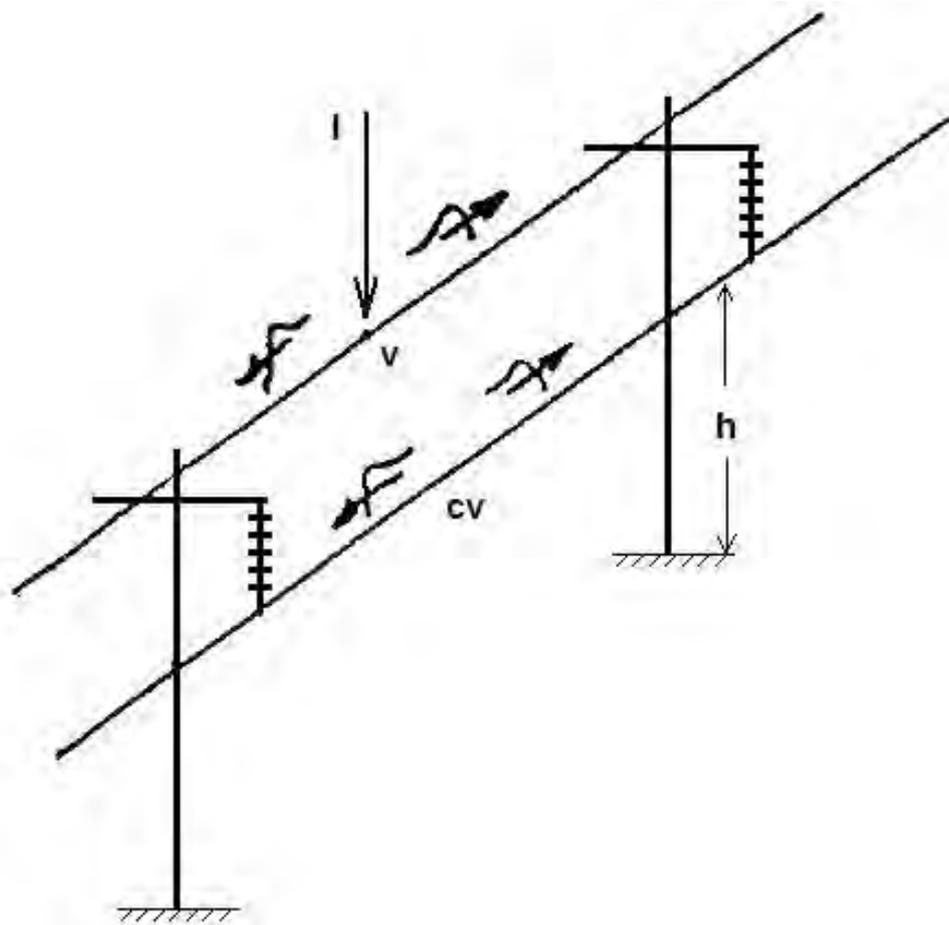


Figura 4.9: Voltajes inducidos producido por ondas viajeras acopladas.

En la figura 4.8 además tenemos que:

4.2 Interacción de la Descarga con Personas e Instalaciones 90

- v : Voltaje inducido en un conductor mediante inducción electromagnética.
- $v=f [I, h, d, \text{Forma de onda de la corriente}]$.

Y en la figura 4.9:

- v : Voltaje producido sobre el conductor impactado.
- cv : Voltaje inducido en conductor adyacente paralelo.
- c : Factor de acople electromagnético.
- $c=f [\text{radio del conductor, } h, \text{espaciamiento de los conductores, efecto corona}]$

Daño por Q

En un impacto de rayo, el canal ionizado está a una temperatura de 30.000 °C. Si el impacto es sobre un metal, en el punto de impacto se produce el fenómeno ya descrito de creación de un potencial de contacto.

Llamemos U al potencial de contacto. Como es constante en el punto la potencia resulta, retomando la ecuaciones (4.5):

$$\begin{aligned}W &= \int U(t)i(t)dt \\ &= U \int i(t)dt \\ &= UQ\end{aligned}$$

Considerando chapa de aluminio de 2mm y un rayo pequeño de 20C, $U = 10V$ y $W = 200\text{joule}$.

Los valores de energía/gramo para fundir diferentes metales son, por ejemplo:

Zinc 112 joule/g

Aluminio 400 joule/g

Con 200J alcanza para fundir 0,5g de aluminio.

En realidad parte del calor se emplea en llevar el aluminio a la temperatura de fusión (658°C). El calor específico del aluminio es $0,9 \frac{J}{g \cdot K}$, si se parte de la temperatura ambiente, el calor generado alcanza para fundir 0,2g de aluminio. En una chapa de 2mm de espesor podría hacer un agujero de 6mm de diámetro.

Capítulo 5

Análisis de Riesgo de Impacto Directo y Determinación del Nivel de Protección. Zonas de Protección y Formas de Onda. Cálculo de Riesgo de Sobretensiones.

Toda estructura y las personas que la utilizan están expuestas a sollicitaciones de tensión y corriente asociadas a probables descargas atmosféricas sobre las mismas.

Asimismo, toda instalación interior de baja tensión conectada a la red de distribución de energía (en BT o MT) y/o a otros servicios (eléctricos y no eléctricos) y el equipamiento conectado a la misma, están expuestos a sollicitaciones de tensión y corriente asociadas a las descargas atmosféricas sobre la estructura que contiene la instalación o a descargas atmosféricas lejanas que se acoplan a la instalación como ya se explicó.

Se considera que la principal vía de propagación de los efectos de las descargas son los conductores de la red de distribución de energía (debido a su menor impedancia) y las antenas de comunicaciones y conductores asociados. Las antenas de comunicación y sus conductores asociados se tratan aparte en este curso, debido a su doble naturaleza: captor natural de descargas directas y equipo en servicio a proteger.

¿Cómo se evalúa si las sollicitaciones a las que está expuesta la estructura, instalación o equipamiento causarán daños sobre los mismos y si esos daños

son aceptables o no? En caso de que deba diseñarse una protección, ¿qué parámetros pueden manejarse para el diseño?

Para contestar estas preguntas se utilizan formas de onda de tensión y corriente que fueron determinadas como representativas de estos eventos, y se seleccionan ciertas formas de onda y se ajustan sus parámetros según el tipo e intensidad del riesgo evaluado.

En los métodos de evaluación presentados en las normas que se consultaron (IEC 62305, BS 6651: 1999 - Inglaterra, SABS 0313:1999 - Sudáfrica, CP 33:1996 - Malasia) se manejan siempre los siguientes conceptos:

1. Las solicitaciones mencionadas tienen una frecuencia anual que depende de la frecuencia anual de descargas atmosféricas nube-tierra en la región (N_g) y de la geometría de la estructura. En particular para el caso de sobretensiones depende también de la geometría de las instalaciones o estructuras vinculadas.
2. Estas solicitaciones causarán daño según su intensidad y en relación a la vulnerabilidad de la estructura, instalaciones o equipos. Asimismo esos daños podrán ser considerados como un riesgo aceptable en comparación con índices de riesgo generales según el nivel o tipo de pérdidas o consecuencias sobre el entorno que generen esos daños.
3. Debido a la naturaleza probabilística del rayo y a la variabilidad de las características de los medios de transmisión (líneas de potencia, telefónicas y cables coaxiales) los transitorios causados por los rayos tienen formas de onda y parámetros muy variables. Sin embargo se han podido seleccionar un conjunto de formas de onda representativas de la mayoría de los transitorios reales. Esta selección está basada en medidas de campo y de laboratorio.

Es muy difícil determinar los niveles máximos y mínimos de los parámetros de dichas formas de onda.

Observación: Los Niveles máximos se utilizan para el dimensionamiento de los componentes del sistema, selección de los protectores, evaluación de las tensiones de paso y de toque y de las distancias de seguridad. Los niveles mínimos se utilizan para el dimensionamiento de los captosres o identificación de los puntos de impacto, ya que la distancia de impacto se determina para la corriente mínima de descarga.

Se puede decir que:

- A mayor frecuencia anual de solicitaciones será mayor el número de solicitaciones de intensidad alta y por tanto aumenta el riesgo de daño sobre las estructuras.

- Para una zona de determinado grado de exposición, se establecen distintas intensidades de solicitaciones de acuerdo al riesgo de daño de la estructura o equipamiento a proteger.

Como se verá más adelante, cuanto más importante y/o vulnerable es lo que se va a proteger, mayor es el riesgo de daños y pérdidas que se le asocia. Su protección se proyecta considerando parámetros más exigentes; p.ej. solicitaciones de la menor intensidad prevista para el diseño de captosres (menor distancia de impacto), y de la mayor intensidad y $\frac{di}{dt}$ para las sobretensiones. Esto en general corresponde a cuánto se aspira a disminuir la probabilidad de daños durante un evento.

5.1. Análisis de riesgo de impacto directo BS6651

BS6651 es la denominación de la norma de UK sobre protección contra descargas atmosféricas. Se eligió esta norma como ejemplo para mostrar los criterios de evaluación de riesgo por su claridad expositiva. Se usó la última edición de 1999. Recientemente Inglaterra adoptó la norma IEC 62305 con el nombre de IEC EN 62305, la evaluación propuesta es más compleja pero los principios generales son los mismos.

En el capítulo 3 se vieron tanto las formas de corriente representativas como la distribución de sus valores para la corriente de descarga.

El análisis de riesgo se basa en el análisis de la probabilidad de daños debido a descargas directas, basado en un cierto nivel de riesgo asumido.

Estructuras con riesgo de explosión inherente (ej.: Fábricas de explosivos, depósitos o cañerías de combustible y tanques de combustible) usualmente necesitan un sistema de protección de la clase más alta. Hay normas específicas para este tipo de instalaciones.

Para el resto de las estructuras, es aplicable el estándar de protección recomendado por las normas generales de protección contra rayos. Esta norma indica muchos casos en que la necesidad de protección es evidente, por ej.:

- Lugares donde se congregan un gran número de personas.
- Lugares vinculados a servicios públicos esenciales.
- Áreas con mucha frecuencia de rayos.
- Donde existen estructuras muy altas o aisladas.

- Lugares con estructuras históricas o de importancia cultural o patrimonial.
- Estructuras que contienen materiales explosivos o inflamables.

Hay otros casos en los que la decisión no es tan simple. En estos casos debe hacerse la evaluación de riesgo.

Sin embargo, existen algunos factores que no pueden ser evaluados y pueden dejar sin validez el resto de las consideraciones. Por ejemplo, el deseo de que no exista ningún riesgo de vida evitable o que los ocupantes del edificio se sientan siempre a salvo, pueden hacer decidir a favor de la protección, aunque normalmente se aceptaría que no hay necesidad de ello.

Para hacer una evaluación de los riesgos de exposición, se consideran los siguientes factores:

- El uso que se le da a la estructura.
- La naturaleza de su construcción.
- El valor de su contenido o las consecuencias de los efectos de una descarga.
- La ubicación de la estructura.
- La geometría de la estructura.

La norma que se está tomando como ejemplo es aplicable a estructuras de hasta 50 m de altura.

5.1.1. Probabilidad de riesgo aceptable

Fumar 10 cigarrillos por día	1 en 400
Accidentes varios	1 en 2.000
Accidentes de tráfico	1 en 8.000
...	...
Rayos directos	1 en 2.000.000 (5×10^{-7})

Cuadro 5.1: Probabilidad de muerte de un individuo por año de exposición.

Para ayudar a visualizar los riesgos de impacto asociados a los riesgos diarios, la tabla 5.1 da algunas pautas. Esta tabla permite una apreciación de la escala de riesgos asociados con diferentes actividades.

En general riesgos mayores a 1×10^{-3} (1 en 1.000) por año se consideran

inaceptables. Con riesgos de 1×10^{-4} (1 en 10.000) por año es normal que se destine dinero público para tratar de eliminar o mitigar sus efectos. Riesgos menores a 1×10^{-5} (1 en 100.000) se consideran en general aceptables, aunque igual se debería destinar dinero público para campañas educativas destinadas para reducir aquellos riesgos que pueden considerarse evitables.

Se toma como riesgo aceptable 1 en 100.000. Si resulta menos que 1×10^{-5} es aceptable no proteger, salvo que otras consideraciones lo requieran. Si resulta más alto debería haber muy buenas razones para no proteger.

5.1.2. Probabilidad de recibir impactos. Cálculo del nivel ponderado de riesgo

Definiremos a continuación algunos parámetros que se usan en el cálculo del factor de riesgo.

Área equivalente de captación:

P Es el número probable de impactos sobre la estructura en un año. Se calcula como el número de descargas a tierra por km^2 y por año (N_G) x Área efectiva de captación en m^2 (A_C).

A_C Es la superficie equivalente de exposición de la estructura, y se define como la superficie a nivel de suelo que tiene la misma frecuencia anual de descargas directas de rayo que la estructura en consideración.

N_G Es la densidad media anual de descargas directas de rayo nube-tierra, por km^2 y por año. La media en Uruguay es 4, en Singapur es 12.6 y en Florida (EE.UU.) del orden de 13.

Para la determinación de la superficie equivalente se considera una generatriz, en un plano perpendicular a la estructura, con origen en un punto superior de la estructura y pendiente 1:1, con la cual se recorre todo el perímetro superior de la estructura a proteger. La superficie equivalente de exposición es aquella que se va generando entre la intersección de dicha generatriz y el plano del suelo, a medida que la generatriz recorre el perímetro completo de la estructura.

Para una estructura de altura H, largo L y ancho A, la superficie equivalente de exposición, se indica en la Figura 5.1. El área que corresponde a las aristas es consecuencia de la mayor posibilidad de éstas de generar trazadores, por ser elementos puntiagudos que perturban las líneas de campo.

Cuando la superficie equivalente de exposición de una estructura cubre totalmente la de otra estructura, la de esta última no se contabiliza.

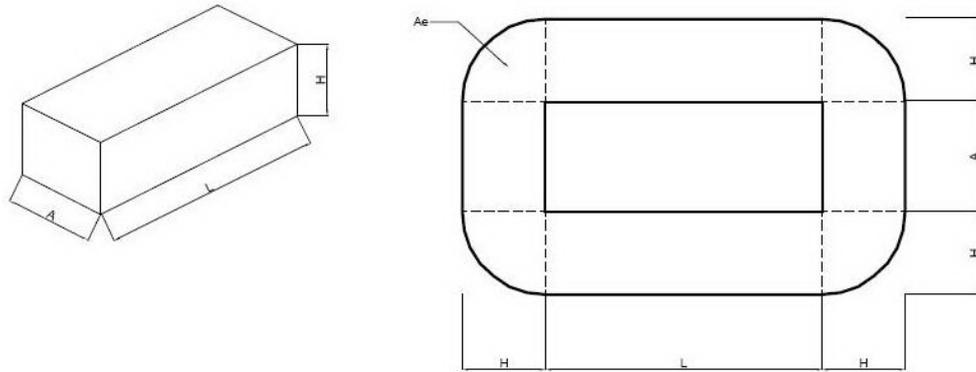


Figura 5.1: Superficie equivalente de exposición de una estructura de altura H , largo L y ancho A .

Cuando las superficies equivalentes de varias estructuras tienen zonas comunes, se considera la unión como una única superficie equivalente.

Ejemplo: Cálculo del área efectiva de captación para un prisma de dimensiones L , A , H .

$$A_C = AL + 2AH + 2LH + \pi H^2 \quad (5.1)$$

$$\text{El número probable de impactos al año es } P = A_C N_G 10^{-6} \quad (5.2)$$

Factores de ponderación:

Se aplican a P factores de ponderación para evaluar el riesgo de daños ocasionados por los impactos directos y compararlo con los niveles de riesgo admitido (no todos los impactos causarán daño, depende del uso de la estructura, tipo de construcción, contenido, etc.).

Esos factores son los A, B, C, D, y E de los cuadros 5.2 a 5.6 que siguen.

Casas habitación u otros edificios de tamaño comparable	0,3
Casas habitación u otros edificios de tamaño comparable, con antenas exteriores	0,7
Fábricas, laboratorios	1
Oficinas, hoteles, edificios residenciales	1,2
Lugares de reunión (terminales, iglesias, estadios)	1,3
Escuelas y hospitales	1,7

Cuadro 5.2: Factor A, uso de la estructura.

Nótese que el factor A crece con la gravedad de las consecuencias, en términos generales con la cantidad de personas que pueden ser afectadas.

“Encerrado” en una estructura de acero con techo no metálico	0,2
Hormigón armado con techo no metálico	0,4
Armadura de acero u hormigón armado con techo metálico	0,8
Mampostería con techo no metálico	1
Madera con techo no metálico	1,4
Madera o mampostería con techo metálico	1,7
Techo de paja	2

Cuadro 5.3: Factor B, tipo de construcción.

El factor B evalúa el tipo de construcción según la posibilidad de que haya chispas y de que sea inflamable.

Edificios normales (sin contenido de valor o especialmente susceptible)	0,3
Edificios con contenidos de especial valor o especialmente susceptibles (Industrias - Agricultura)	0,8
Estaciones de potencia, radio, gas, centrales telefónicas	1
Plantas clave, edificios históricos, museos	1,3
Escuelas y hospitales	1,7

Cuadro 5.4: Factor C, contenido.

El factor C categoriza el contenido material según su importancia y consecuencias de su falla.

Rodeadas de estructuras de igual o mayor altura	0,4
Con pocas estructuras o árboles de igual altura	1
Construcciones aisladas o de altura más del doble que las circundantes	2

Cuadro 5.5: Factor D, grado de aislamiento.

El factor D considera que las estructuras aisladas tienen mayor probabilidad de recibir impactos directos.

Plano	0,3
Colina	1
Montaña entre 300 y 900 m	1,3
Montañas por encima de 900 m	1,7

Cuadro 5.6: Factor E, terreno.

El factor E tiene en cuenta las características del terreno.

Definimos FR como el factor de riesgo total, y se calcula de la siguiente forma:

$$FR = A \times B \times C \times D \times E \times P \quad (5.3)$$

Con P calculado como en la ecuación 5.2. El resultado de la ecuación 5.3 se compara con $P_0 = 10^{-5}$.

Ejemplo:

$N_G = 4$ rayos por km^2 y por año.

Estructura prismática: $L = 70m$, $A = 12m$ y $H = 10m$.

Ubicado en terreno plano, aislado de otras estructuras, y construido de mampostería con techo no metálico.

Parámetros para dimensionar protecciones:

Los valores de la probabilidad de impacto P y del factor de riesgo total FR pueden ser usados para determinar las características de las protecciones y sobre todo del nivel de protección requerido.

A partir del valor de P , la norma BS6651 presenta una curva (mostrada en la figura 5.2) para seleccionar el valor máximo probable de corriente de descarga de rayo en función de la relación $\frac{P}{P_0}$, este valor se utiliza para el dimensionado de los componentes del sistema de protección que dependen de este valor máximo (conductores, puesta a tierra).

A partir de FR puede determinarse lo que se llama el “nivel de protección”.

La norma IEC 62305 es la más completa que conocemos. Define 4 niveles de protección (I a IV) y cada nivel tiene asociado un conjunto de valores límite de distintos parámetros asociados a la descarga que deben ser tenidos en cuenta. A su vez, cada nivel corresponde a un rango de porcentajes de rayos que la protección debe captar y conducir a tierra con seguridad.

Los cuadros 5.8 y 5.9 ilustran este aspecto.

El cuadro 5.8 indica por ejemplo que si queremos proteger un sistema contra el 99 % de los rayos se debe considerar que protegemos contra rayos desde un valor tan bajo como 2,9kA de pico; el 99 % de los rayos tienen una corriente mayor. Eso implica considerar distancias de impacto tan bajas como 20 m. Dimensionando según esos datos se tiene una protección de nivel I. Los niveles II, III, y IV, progresivamente menos exigentes se definen de una manera análoga.

El cuadro 5.9 indica las solicitaciones máximas que debe soportar el sistema para los distintos niveles.

La determinación del riesgo y del nivel de protección que propone la norma IEC 62305 es de implementación muy compleja. Una buena aproximación consiste en utilizar el procedimiento indicado en la BS6651 y con los valores obtenidos y el riesgo aceptable calcular el valor E (efectividad) y hacerlo corresponder con los niveles de protección de la norma IEC 62305 de acuerdo al cuadro 5.7.

La efectividad E (el nombre corresponde a la efectividad requerida para la protección) se calcula como $1 - \frac{P_0}{FR}$.

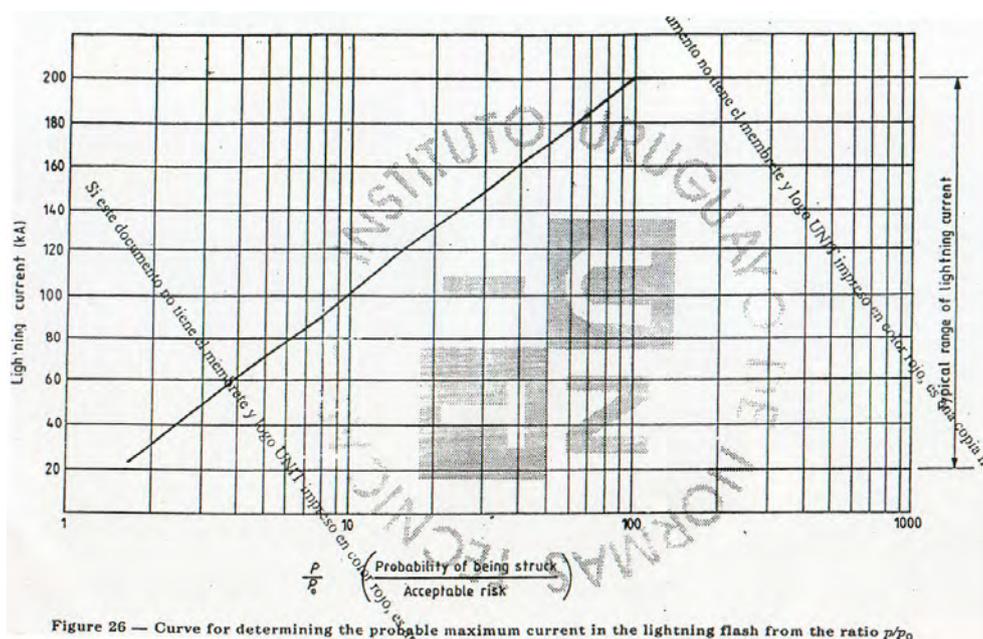


Figura 5.2: Norma BS6651.

Nivel de Protección (N) IEC	Efectividad (E)
I	$0.95 \leq E < 0.98$
II	$0.90 \leq E < 0.95$
III	$0.80 \leq E < 0.90$
IV	$0 < E < 0.80$

Cuadro 5.7: Relación entre nivel del protección y efectividad.

5.2 Riesgo de impacto sobre estructuras altas, de más de 50 m (Norma CP33) 100

Nivel de Protección (N)	Distancia de impacto/ radio de la esfera, metros	Corriente de pico mínima, kA (según norma IEC)	Probabilidad de intercepción del rayo, %
I	20	2,9	99
II	30	5,4	97
III	45	10,1	91
IV	60	15,7	84

Cuadro 5.8: Límite inferior de diseño.

Parámetro	Nivel de protección		
	I	II	III-IV
Corriente de choque I (kA)	200	150	100
Energía específica W/R (MJ/Ω)	10	5,6	2,5
Carga $Q_{Impulso}$ (As)	100	75	50
Carga $Q_{Prolongada}$ (As)	200	150	100
Efectividad	98 %	95 %	80 - 90 %

Cuadro 5.9: Límite superior de diseño.

Como vemos, el mayor nivel de protección implica prever rayos débiles, que corresponden a una esfera más pequeña y entonces un sistema de captosres más densos, y a la vez rayos más fuertes, de alta corriente de pico y carga.

5.2. Riesgo de impacto sobre estructuras altas, de más de 50 m (Norma CP33)

Lo tratado en las secciones anteriores se aplica a estructuras de hasta aproximadamente 50m.

En las estructuras muy altas la generación del rayo es distinta, ya que empieza a aumentar el porcentaje de rayos originados en la estructura mediante guías escalonadas ascendentes. Para estas estructuras, existen fórmulas empíricas que relacionan la cantidad anual de descargas en la estructura (N), con la altura de la estructura (H).

En la conferencia internacional sobre edificios altos - Singapur 1984, el profesor Liew propuso la siguiente relación entre media de descargas sobre una estructura y media de descargas en el lugar:

$$N = 0,04e^{0,015H} N_G \quad (5.4)$$

La muestra para la obtención de la ecuación empírica 5.4 incluye estructuras de 22m a 540m e índices cerámicos de 10 a 60. Esta relación muestra que el número de descargas sobre la estructura crece muy rápidamente con su altura.

Del total de descargas sobre la estructura, la fórmula empírica que da el porcentaje de rayos ascendentes es:

$$P_U = 68,2 \ln(H) - 315,5 \quad (5.5)$$

La fórmula anterior es válida en el rango 100 a 540m aproximadamente. En estructuras de alturas menores a 100m casi no hay rayos ascendentes, para alturas de 200m son el 46% y para alturas mayores a 450m casi todos son iniciados desde la estructura.

5.3. Análisis de riesgo de sobretensiones (CP33, BS6651 y IEEE C62.41)

En esta sección se comparan las tres normas y se muestra que son razonablemente equivalentes.

5.3.1. Caracterización de sobretensiones y sobrecorrientes de origen atmosférico para determinación de riesgo de daños

Para representar estos eventos se utilizan formas de onda de tensión y corriente asociadas a distintas zonas de la estructura, de acuerdo al grado de exposición de la zona, y diferenciando si se trata de solicitaciones en líneas de alimentación de potencia, datos o telefonía.

Las normas que establecen las formas de onda para cada zona son por ejemplo BS 6651 Apéndice C, ANSI/IEEE C62.41-1991 y CP33- Apéndice D.

Estas formas de onda se toman como representativas de lo que puede ocurrir durante un evento y se utilizan como formas de onda de ensayo de tolerancia a las solicitaciones, tanto del sistema o equipamiento como de eventuales dispositivos supresores de sobretensiones a instalar.

Para el sistema o equipamiento se ensaya su nivel de inmunidad.

Para las protecciones se ensaya su capacidad y nivel de protección.

Formas de onda de corriente y tensión según norma BS6651

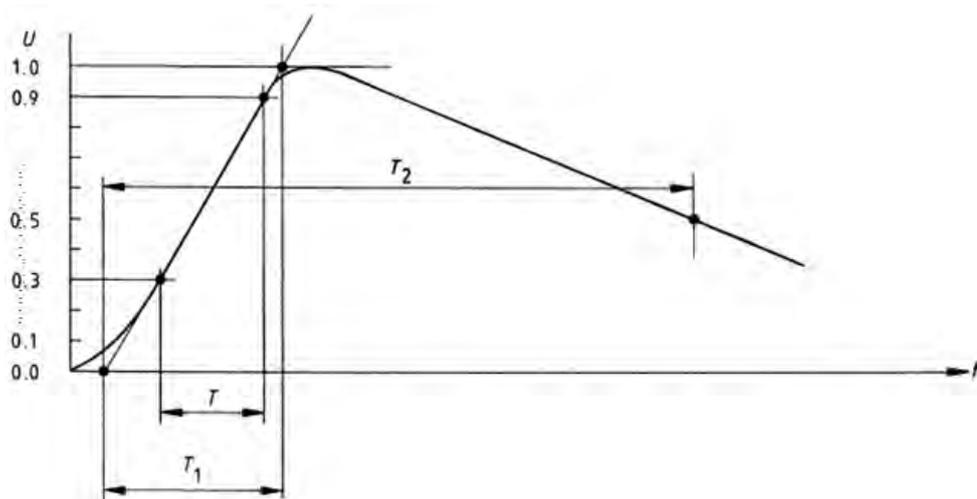


Figura 5.3: BS6651-Forma de onda de corriente en cortocircuito 8/20 μs .

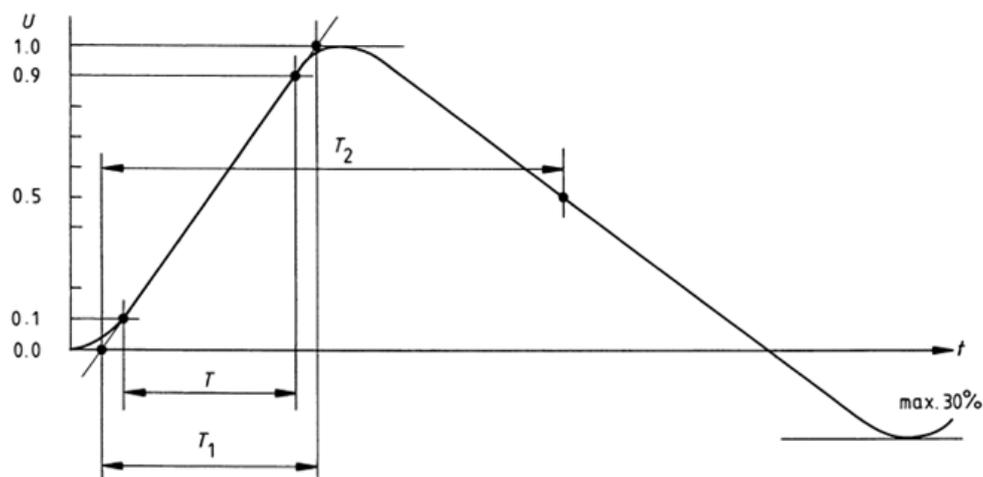


Figura 5.4: BS6651-Forma de onda de voltaje en circuito abierto 1,2/50 μs .

a) Líneas de alimentación.

El transitorio en las líneas de alimentación está representado por una onda de impulso de tensión 1.2/50 μs y una onda de corriente 8/20 μs “combination wave” como se muestra en las figuras 5.3 y 5.4. La propagación de estas ondas en la instalación genera una atenuación de los valores de pico.

Este efecto es representado por tres categorías de localización C, B y A (ver

figura 5.7).

De más expuesta a menos expuesta, se caracterizan:

- Categoría C Corresponde a la zona aguas arriba del tablero general (del lado de la fuente).
 - Tablero general del edificio (conectado a la red de distribución, a un transformador MT/BT o a otro edificio) - del lado de la alimentación
 - Tableros que alimentan cargas exteriores - del lado de la carga
 - Equipamiento fuera del edificio.
- Categoría B Representa los tableros de distribución.
 - Desde el lado de la carga del tablero general hasta el lado de la alimentación de equipamiento conectado a través de tomas o cajas de protección.
 - Aparatos que no son conectados a través de tomas o tableros de protección.
 - Del lado de la carga para equipamiento conectado a través de tomas o tableros de protección si está a menos de 20m de la Categoría C.
- Categoría A Representa el lado de la carga conectada a través de toma-corrientes o cajas de protección.
 - Del lado de la carga para equipamiento conectado a través de tomas o tableros de protección si está a más de 20m de la Categoría C.

En una misma categoría de localización, la intensidad del transitorio esperado crece con el aumento del riesgo de que dicho transitorio ocurra. Esto se representa mediante la definición de niveles de exposición. El nivel de exposición se selecciona según el resultado de la evaluación de riesgo.

b) Líneas de datos.

Todos los dispositivos de protección consideran la categoría C independientemente de su localización, ya que la forma de onda (lenta) $10/700 \mu s$ no se atenúa con la extensión de la instalación como la onda $8/20 \mu s$.

Magnitudes representativas de las formas de onda en las líneas de alimentación.

Exposición del sistema	Voltaje de pico kV	Corriente de pico A
Low	2	166,7
Medium	4	333,3
High	6	500

Cuadro 5.10: Categoría de localización A (líneas de alimentación).

Exposición del sistema	Voltaje de pico kV	Corriente de pico kA
Low	2	1
Medium	4	2
High	6	3

Cuadro 5.11: Categoría de localización B (líneas de alimentación).

Exposición del sistema	Voltaje de pico kV	Corriente de pico kA
Low	6	3
Medium	10	5
High	20	10

Cuadro 5.12: Categoría de localización C (líneas de alimentación).

Para la generación de estas ondas se utiliza un generador combinado cuyos componentes tienen valores tales que genera una tensión $1.2/50 \mu s$ en circuito abierto, una corriente $8/20 \mu s$ en cortocircuito y tiene una impedancia efectiva definida como cociente entre los picos de tensión y corriente.

Magnitudes representativas de las formas de onda en las líneas de datos.

Exposición del sistema	High impulse current test kA	Let-through voltage test	
		Voltage kV	Current A
Low	2,5	1,5	37,5
Medium	5	3	75
High	10	5	125

Cuadro 5.13: Categoría de localización C (líneas de datos).

Las ondas representativas para las perturbaciones que se propagan a través de las líneas de datos, están definidas con mas detalles en las normas ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

Formas de onda según la norma IEEE C62.41 “Caracterización de sobretensiones en sistemas de Baja Tensión, para circuitos de potencia AC”

Esta norma no se refiere a líneas de datos.

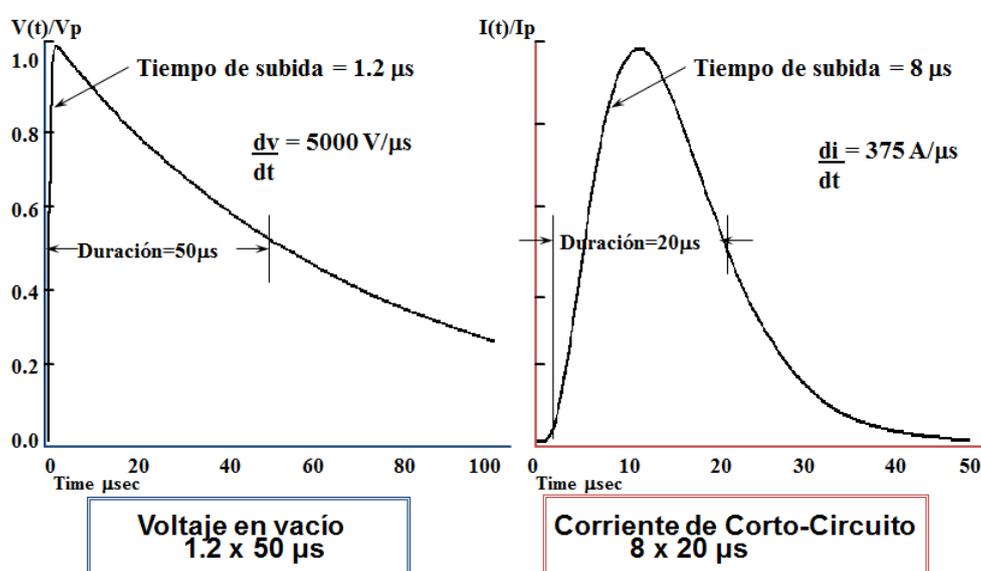


Figura 5.5: ANSI C62.41-1991 Onda combinada.

De acuerdo a esta norma, las tres formas de onda básicas utilizadas para representar los transitorios en líneas de potencia son las de impulso unidireccional de tensión 1.2/50 μs y de corriente 8/20 μs , “combination wave”, y la onda de coseno amortiguado 0.5 μs , 100 kHz, “ring wave”. En la figura 5.5 se muestra la onda combinada y la onda oscilatoria amortiguada en la figura 5.6.

La norma IEEE C62.41 usa, como se dijo, tres formas. Dos de ellas modelan tensión y corriente de la descarga cuando se propaga por los circuitos eléctricos, y son equivalentes a la de la norma BS6651 y se usan para las zonas más expuestas.

La tercera forma, llamada “ring wave”, que se usa en zonas más internas de la instalación, modela el fenómeno de un impulso aplicado a un circuito complejo, que tiene resonancias. Modela entonces una oscilación amortiguada.

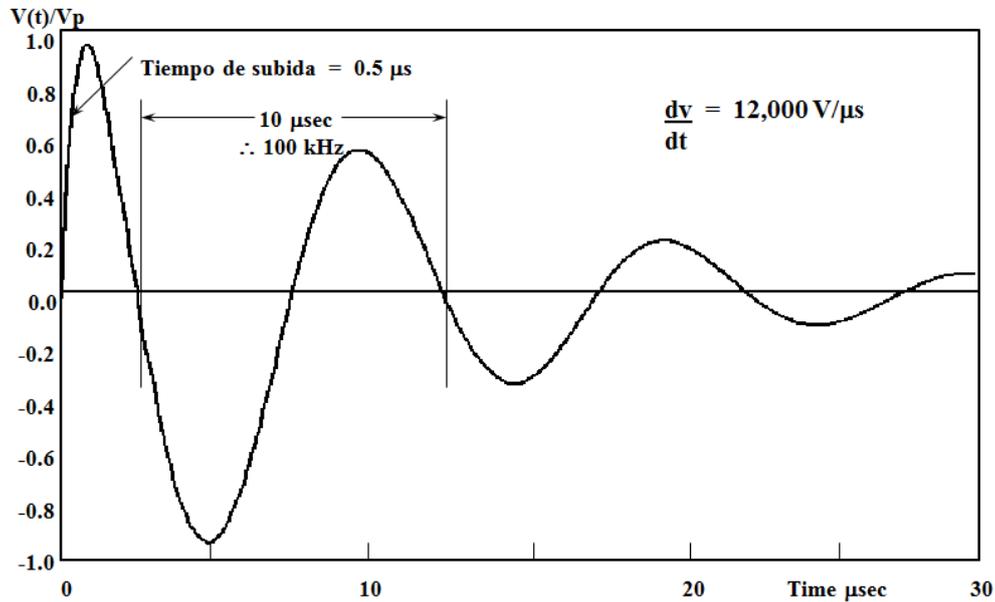


Figura 5.6: ANSI C62.41-1991 0.5 μ s - 100 kHz “Ring” Wave.

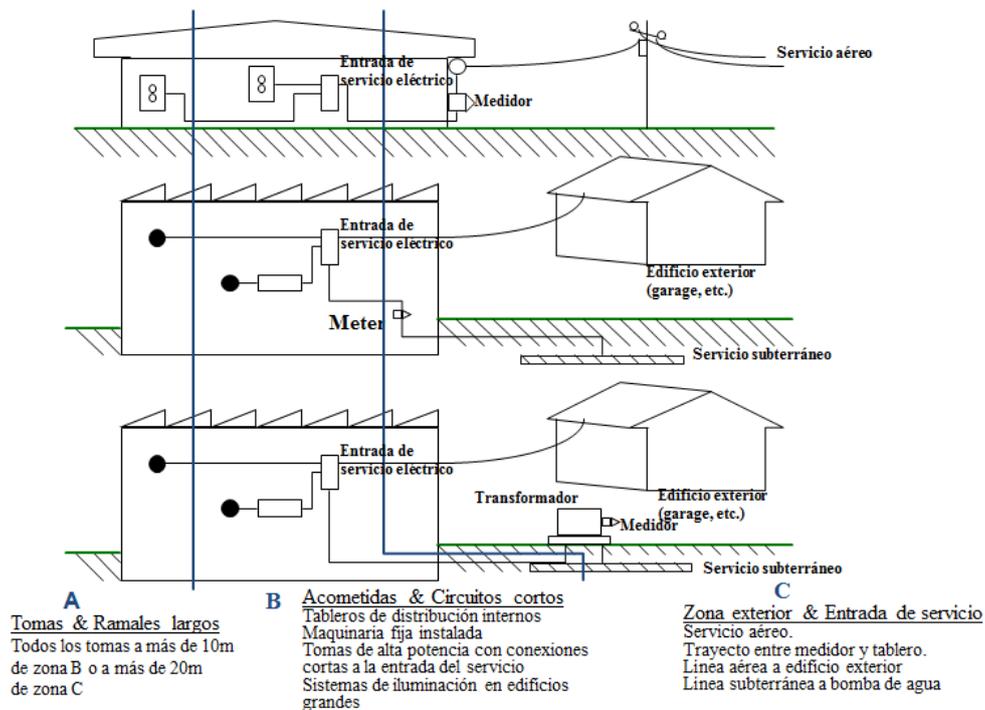


Figura 5.7: IEEE C62.41-1991 Categorías de Localización.

La propagación de estas ondas en la instalación genera una atenuación de los valores de pico. Este efecto es representado por tres categorías de localización C, B y A. En la figura 5.7 se muestra esta categorización que en general no difiere de las ya vistas.

- Categoría C Instalación exterior y servicios de entrada.
- Categoría B Tableros de distribución, y circuitos derivados cortos.
- Categoría A Toma corrientes y circuitos derivados largos.

En una misma categoría de localización, la intensidad del transitorio esperado crece con el aumento del riesgo de que dicho transitorio ocurra. Esto se representa mediante la definición de niveles de exposición, el nivel de exposición se selecciona según el resultado de la evaluación de riesgo.

Rango de valores de pico :

“Ring wave”, 2 a 6 kV, 70 a 500 A,

“Combination wave” 2 a 20 kV, 1 a 10 kA, 1,2 μ s/50 μ s - 8 μ s/20 μ s

Location Category	System Exposure	Voltage (Volts)	Current (Amps)	Impedance (Ω)
A1	Low	2.000	70	30
A2	Medium	4.000	130	30
A3	High	6.000	200	30
B1	Low	2.000	170	12
B2	Medium	4.000	330	12
B3	High	6.000	500	12

Cuadro 5.14: C62.41-1991 0.5 μ sec - 100 kHz “Ring” Wave.

Las categorías A, B y C y los ensayos que se indican para cada una corresponden a un escenario de sobrecorrientes o sobretensiones que entran desde los servicios o son inducidas por rayos cercanos o en la estructura. Las sobrecorrientes o sobretensiones de la propia descarga, que tienen mayor energía producen elevación de potencial de tierra y pueden inyectar corrientes desde el sistema de tierra deben modelarse con otras formas de onda como la 10/350 μ s.

Los sistemas y equipamiento deben tener aislación serie que soporte la tensión y/o protección shunt que soporte la corriente de ensayo.

Para seleccionar la curva y los valores de sus parámetros debe determinarse

Location Category	System Exposure	Voltage (Volts)	Current (Amps)	Impedance (Ω)
B1	Low	2.000	1.000	2
B2	Medium	4.000	2.000	2
B3	High	6.000	3.000	2
C1	Low	6.000	3.000	2
C2	Medium	10.000	5.000	2
C3	High	20.000	10.000	2

Cuadro 5.15: C62.41-1991 1,2 x 50 μ sec - 8 x 20 μ sec “Combination” Wave.

el nivel de exposición y para ello se utilizan métodos de evaluación de riesgos, que veremos mas adelante.

Para seleccionar las ondas de ensayo que deben soportar las eventuales protecciones contra sobretensiones debe hacerse una cuantificación del riesgo de que ocurran sobretensiones. Cuanto mayor es la probabilidad de ocurrencia, mayores son las solicitaciones probables.

5.3.2. Análisis de riesgo de sobretensiones

El análisis se basa en la norma de Singapur CP33-1996 (Protección Contra Descargas Atmosféricas de Equipo Eléctrico o Electrónico dentro y sobre Estructuras - Recomendaciones informativas para asistencia al diseño de sistemas de protección).

Introducción

En el análisis de riesgo precedente (sección 5.1.2) se presentó un método para decidir sobre la necesidad de protección de estructuras contra el rayo directo. El resultado es un número llamado factor de riesgo (FR) que tiene dos funciones:

- Su comparación con el riesgo asumido (1 en 10^5 como criterio normalmente aceptado).
- Su uso para determinar el nivel de protección según IEC, y el valor de los parámetros correspondientes.

Su valor además orienta sobre el valor de intensidad máxima de la descarga a usar en el diseño del sistema de protección primaria, aunque la norma de UK indica el riesgo de impacto no ponderado como el parámetro a tomar para este uso.

En el factor de riesgo influyen el área directamente expuesta, el uso humano,

el tipo de construcción, el contenido, el grado de aislamiento y las características del terreno.

En forma análoga, se realiza un análisis de riesgo de características similares en el que se cuantifica la probabilidad de que se produzcan sobretensiones que puedan dañar equipos instalados en la estructura en estudio.

El resultado es un número R que expresa una cantidad probable ponderada de sobretensiones por año, y que se debe tomar en cuenta para:

- La toma de decisión sobre la necesidad de protección secundaria y terciaria.
- El dimensionado de las protecciones de acuerdo a los criterios de ensayo (curvas IEEE C62.41).

Decisión de instalar protección contra descargas atmosféricas.

La instalación de protección para instalaciones eléctricas y electrónicas contra los efectos secundarios de las descargas se decide según:

- El número probable de descargas ponderado en el “área de influencia”.
- La vulnerabilidad de la configuración del sistema.

Número probable de descargas que pueden producir sobretensiones.

El cálculo también se basa en el número de descargas por año, pero el área de captación a considerar debe tener en cuenta impactos en lugares que, si bien pueden no afectar la seguridad, sí pueden ser el origen de sobretensiones que se propagan a los equipos en el recinto. No se considera solamente el área de captación vinculada al impacto directo del rayo.

Área efectiva de captación

Es el área equivalente A_e que, multiplicada por la densidad de descargas, da el número probable de sobretensiones por año.

$$P = A_e N_g 10^{-6} \quad (A_e \text{ expresada en } m^2) \quad (5.6)$$

Está dada por los siguientes componentes, que se suman:

Ap Área de la planta de la estructura.

At Área del terreno circundante. Es el área comprendida entre el perímetro de la estructura y una línea a distancia D de ese perímetro.

Valor de D : Se toma un valor en metros numéricamente igual a la resistividad del terreno expresada en Ωm , hasta un máximo de 500.

En el caso de que la altura H de la estructura exceda el valor de D así calculado, la línea se ubica a una distancia H del perímetro.

Aa Área de captación de las estructuras asociadas. Es el área de captación calculada de igual forma de estructuras adyacentes que tienen conexión eléctrica directa o indirecta con el equipo en la estructura en consideración.

Nota 1: se suma solamente el área que no se superpone con el área $A_p + A_t$.

Nota 2: La captación por estructuras no vinculadas eléctricamente está tomada en cuenta en A_t .

Am Área efectiva de captación de los servicios de alimentación de potencia. Es un área efectiva que tiene en cuenta la captación de las líneas de potencia vinculadas a la estructura.

Se calcula según la tabla 5.16, donde:

- D se define igual que para A_t . En esta aplicación en ningún caso se sustituye por una altura.
- L es la longitud en metros de los conductores de potencia hasta el primer punto protegido, con un máximo de 1000m. Si no se conoce la longitud se toma 1000m.

Ad Área efectiva de captación de las líneas de datos de y hacia el exterior, vinculadas a la tierra del edificio. Es un área efectiva que tiene en cuenta la captación de las líneas de datos vinculadas a la tierra de la estructura.

Se excluyen los teléfonos tradicionales en caso de que estén alimentados exclusivamente desde la central telefónica, y si tuvieran algún equipo asociado se excluyen en caso de que estén alimentados de la misma manera y no haya vinculación a tierra ni a la red eléctrica. Cuando hay modems o routers, por ejemplo, hay vinculación eléctrica y puesta a tierra, por lo que no se excluyen estas líneas.

La fibra óptica no aporta al área efectiva de captación a menos que tenga malla metálica.

Si hay más de una línea, las áreas efectivas deben sumarse. Los cables multipares se consideran una única línea.

Se calcula según la tabla 5.17, donde:

- D se define igual que para A_t . En esta aplicación en ningún caso se

sustituye por una altura.

- L es la longitud en metros de los conductores, desde el edificio hasta la última protección, con un máximo de 1000m. Si no se conoce la longitud se toma 1000m.

Baja tensión, aéreo	10 x D x L
Alta tensión, aéreo (a transformador en la estructura)	4 x D x L
Baja tensión, subterráneo	2 x D x L
Alta tensión, subterráneo (a transformador en la estructura)	0,1 x D x L

Cuadro 5.16: Área efectiva de captación de los conductores de potencia.

Aéreo	10 x D x L
Subterráneo	2 x D x L
Fibra óptica sin malla metálica	0

Cuadro 5.17: Área efectiva de captación de los conductores de datos.

Vulnerabilidad del sistema.

El número P antes calculado (ecuación 5.6) debe ser afectado por factores de ponderación, definidos en los cuadros siguientes, que expresan el grado de vulnerabilidad.

Edificios con protección contra rayos y conexión equipotencial de acuerdo a normas	1
Edificio en que es difícil implementar referencia equipotencial para equipo eléctrico y electrónico (ejemplo: edificios de más de 100 m de largo)	2

Cuadro 5.18: Factor de ponderación F (efectividad de la protección primaria).

Construcciones circundadas por otras iguales	0,4
Pocas iguales	1
Construcciones aisladas o de altura más del doble que las circundantes	2

Cuadro 5.19: Factor de ponderación G (grado de aislamiento).

Notar que es igual al factor D para impacto directo (cuadro 5.5).

Plano	0,3
Pendiente	1
Cima	1,3

Cuadro 5.20: Factor de ponderación H (tipo de terreno).

Notar que es casi igual al factor E para impacto directo (cuadro 5.6).

La ecuación 5.7 es el riesgo de sobretensión causada por rayo en una instalación. Indica el número de sobretensiones debidas a rayos por año.

Nota: $\frac{1}{R}$ indica, en años, el tiempo medio entre sobretensiones causadas por rayos para la instalación en estudio.

$$R = F \times G \times H \times P \quad (5.7)$$

Decisión de instalar protección.

Para tomar la decisión que implicaría R se suele tomar en cuenta algunas consideraciones humanas y económicas, como:

- Las consecuencias sobre la seguridad o la salud debido a pérdida de control de plantas o de servicios esenciales.
- El costo del tiempo fuera de servicio, que debe ser comparado con el costo de la protección.
- El costo de los equipos.

Dicha ponderación se muestra en el cuadro 5.21.

Uso de la estructura y consecuencias del daño al contenido	“Rating” de consecuencia de pérdidas
Equipo doméstico de bajo costo y escasas consecuencias debidas a su no operación	1
Equipo comercial e industrial cuya no operación causa trastornos importantes	2
Equipo comercial e industrial cuya no operación causa trastornos con altos costos financieros	3
Procesos altamente críticos en que la pérdida de control de plantas o la no operación de equipos puede ocasionar severos costos humanos o ambientales	4

Cuadro 5.21: Evaluación de pérdidas. Clasificación de estructuras y contenidos.

Estas consideraciones permiten determinar un nivel de exposición que se admite, y en consecuencia la protección requerida.

Una vez determinados R y el rating de consecuencia de pérdidas se determina el nivel de protección recomendado, del cual surgen criterios de diseño de los dispositivos de protección.

El nivel de exposición queda expresado cualitativamente en 4 niveles, despreciable, bajo, medio y alto. “Despreciable” indica que no se justifica instalar protección específica de equipos.

Rating de consecuencia de pérdidas	Nivel de exposición			
	$R < 0,005$	R de 0,005 a 0,0499	R de 0,05 a 0,499	$R > 0,5$
1	Despreciable	Despreciable	Bajo	Medio
2	Despreciable	Bajo	Medio	Alto
3	Bajo	Medio	Alto	Alto
4	Medio	Alto	Alto	Alto

Cuadro 5.22: Clasificación del nivel de exposición.

5.3.3. Relación entre los niveles de exposición y la selección del nivel de protección

Esta recomendación de la norma CP33 llega a la determinación de niveles de exposición y da algunos ejemplos. (La norma BS6651 sigue el mismo

procedimiento).

Por otra parte, la norma IEEE C62.41, entre otras, categoriza zonas eléctricas, define ondas de ensayo, y establece tres niveles de protección para cada zona, lo que se traduce en tres niveles de valores de las ondas de ensayo.

Una guía para el diseño del sistema de protección de equipos surge entonces de la vinculación de estas dos normas. Un nivel de exposición “Alto” puede orientar para elegir los protectores de cierto equipo de datos en zona “A” según IEEE C62.41 de manera que soporten la onda de ensayo “Ring Wave” más exigente, indicada como “A3” (tabla 5.14).

El número R determinado puede además servir como orientación para la selección de protectores específicos, ya que la vida útil de los mismos es una función del número de eventos al que puede estar sometido, paramétrica en la magnitud de los eventos. Un descargador puede soportar por ejemplo una onda $8/20 \mu s$ de 100 kA una única vez, pero soporta la misma onda con valor de pico 20 kA 10 veces.

Nota: Otras normas pueden contener recomendaciones para dimensionado de protectores utilizando solamente la onda de combinación. Por ejemplo la BS6651, utiliza el mismo método de evaluación de riesgo que la CP33, pero diferencia las formas de onda y valores para los protectores de alimentación y de datos y no utiliza la “ring wave” recomendada por la IEEE.

5.3.4. Aplicación del criterio en forma diferenciada para determinación de protectores para líneas de potencia y de datos

Para todo el equipo dentro o sobre la estructura se considera el riesgo total R calculado según el método presentado, considerando todas las áreas equivalentes de captación.

Sin embargo, para determinar el nivel de protección a colocar en la entrada de potencia, en una salida de potencia o una entrada/salida de señal, no es necesario tomar toda el área: se toma el área de captación del edificio, la de la tierra circundante, la de estructuras asociadas y la de la línea a proteger, excluyendo las demás. Para cada línea se procede de igual manera a efectos de dimensionar su protector, generalmente un supresor de transitorios.

5.3.5. Ejemplo

Edificio comercial con salas de computación, aislado de otros edificios, con árboles cercanos de altura similar. Dimensiones 100m x 60m y 15m de

altura, protegido contra impacto directo según norma CP33.

Terreno plano, de resistividad homogénea de $100 \Omega m$.

Densidad de descargas 12,6 descargas por km^2 y por año (Florida USA, sudeste asiático).

Cable de potencia: 250 m, baja tensión, subterráneo.

Torre de iluminación de 7 m de altura, a 100 m del centro de la cara de 100m del edificio, alimentada en forma subterránea.

Línea de datos en fibra óptica sin vaina de metal.

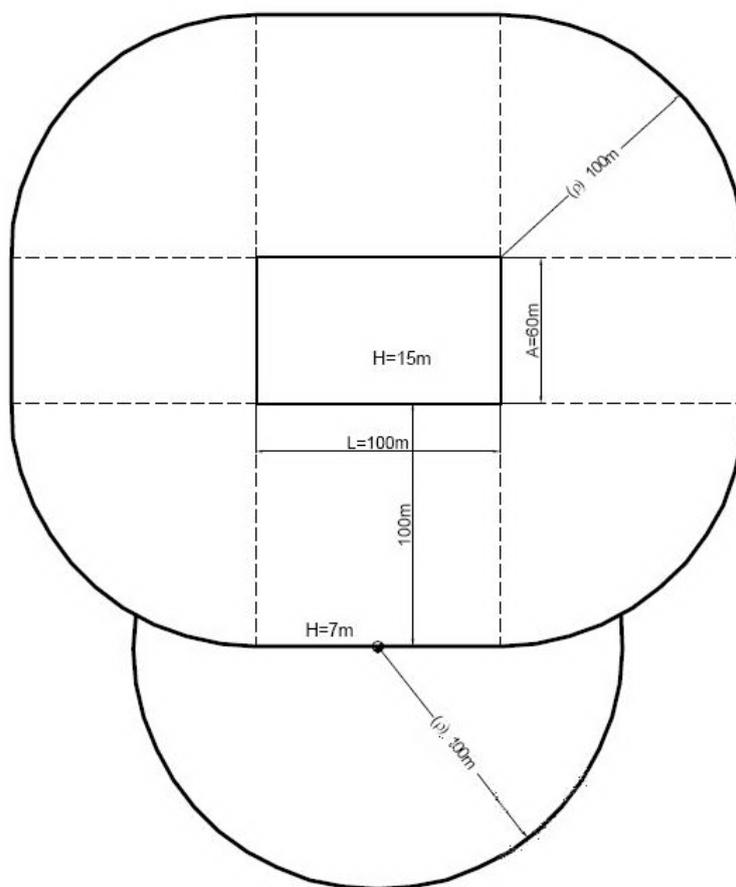


Figura 5.8: Diagrama del ejemplo.

Determinación del riesgo R

1. $N_G = 12,6$ Este valor corresponde a Singapur, se sugiere rehacer el ejemplo para el caso de Uruguay con $N_G = 4$ y analizar las variaciones.

2. Area equivalente de captación

- Area de la planta: A_p
 $A_p = 60 \times 100 = 6000 \text{ m}^2$
- Area del terreno circundante: A_t
 $A_t = 2 \times 100 \times 100 + 2 \times 100 \times 60 + \pi \times 100^2 = 63416 \text{ m}^2$
- Area de estructuras asociadas (el farol; como aproximación se asume un semicírculo): A_a
 $A_a = \pi \times \frac{100^2}{2} = 15708 \text{ m}^2$
- Area de captación de los servicios de potencia: A_m
 A_{m_1} (entrada) = $2 \times 100 \times 250 = 50000 \text{ m}^2$
 A_{m_2} (alimentación de la luz) = $2 \times 100 \times 100 = 20000 \text{ m}^2$
- A_d (línea de datos) = 0 (fibra óptica sin vaina de metal)

Area efectiva de captación total $A_e = A_p + A_t + A_a + A_{m_1} + A_{m_2} + A_d$
 $A_e = 6000 + 63416 + 15708 + 50000 + 20000 + 0 = 155124 \text{ m}^2$

3. Número probable de descargas por año: $P = A_e N_G 10^{-6}$
 $P = 1,955$

4. Riesgo de ocurrencia R de sobretensiones causadas por rayos.

- Para todo el sitio
 $R = F \times G \times H \times P = 1 \times 1 \times 0,3 \times 1,955 = 0,587$
Este valor corresponde a una sobretensión cada 1,7 años en promedio. Por su uso, el rating del edificio se toma 2. Esto resulta en un nivel de exposición “alto”.
- Para la entrada de potencia, el área de captación es
 $A_e(\text{pot}) = A_p + A_t + A_a + A_{m_1} = 135124 \text{ m}^2$
 $R(\text{línea de potencia}) = 0,511$
Este sería el riesgo a utilizar en la protección del tablero de entrada.
Como el rating es 2, el nivel de exposición es también “alto”.
Según IEEE C62.41, el tablero de entrada está en zona B.
El protector a instalar debe adecuarse a las condiciones de ensayo denominadas B3.
- Para salida a iluminación el área equivalente de captación es
 $A_e(\text{Ilum}) = A_p + A_t + A_a + A_{m_2} = 105124 \text{ m}^2$
 $R(\text{línea de iluminación}) = 0,3967$

Este sería el riesgo a utilizar en la protección del tablero de iluminación exterior.

Como el rating es 2, el nivel de exposición resulta “medio”.

Según IEEE C62.41, la salida subterránea a iluminación es zona B.

El protector a instalar debe adecuarse a las condiciones de ensayo denominadas B2.

5.4. Guía rápida para la selección de los dispositivos de protección para las líneas de alimentación.

Combinando los criterios anteriores se puede dar un resumen que categoriza zonas eléctricas en una instalación y recomienda las solicitaciones que deben soportar los equipos que se instalen en cada zona.

Las categorías de localización se corresponden con lo que plantea la norma IEC 60364-4 “Instalaciones eléctricas de edificios- Protección contra sobretensiones”.

La misma da como guía una tabla que establece las categorías de tensión soportada de impulso (categorías de sobretensiones) indicando, para cada una de ellas, el valor de tensión soportada de impulso que debe tener el equipamiento de dicha categoría. Así mismo, determina el valor máximo de tensión residual (ver tema 10) de los dispositivos de protección que se instalen en cada zona en los casos en que dicha protección sea requerida.

Seleccionando la tensión soportada de impulso del equipamiento de acuerdo a la tabla 5.23, la coordinación de aislamiento puede lograrse en toda la instalación. Se reduce así el riesgo de falla a un nivel aceptable y se proporciona una base para el control de sobretensiones.

Descripción de las categorías de sobretensiones:

- Categoría I: Comprende el equipamiento a ser conectado a la instalación eléctrica fija y que requiere protección especial contra sobretensiones transitorias. Las medidas de protección para limitar las sobretensiones transitorias al nivel especificado en la tabla 5.23, para dicha categoría, deben ser tenidas en cuenta fuera del equipamiento o bien en la instalación eléctrica fija o bien entre dicha instalación y el equipo. En esta categoría se incluye el equipamiento electrónico.

Tensión nominal U_0/U (V)	Tensión soportada de impulso (kV)			
	(Equipamiento instalado en la proximidad del origen de la instalación) CATEGORÍA IV	(Equipamiento que forma parte de la instalación eléctrica fija) CATEGORÍA III	(Equipamiento conectado a la instalación eléctrica fija) CATEGORÍA II	(Equipamiento sensible) CATEGORÍA I
230/400	6	4	2,5	1,5
400/690	8	6	4	2,5
<p>Nota 1: Para otros valores de tensión debe consultarse la norma IEC 60364-4-4.4.</p> <p>Nota 2: El concepto de categoría de tensión soportada de impulso es utilizado para equipos energizados directamente desde la Red de Distribución.</p>				

Cuadro 5.23: Tensión de impulso que debe ser soportada por el equipamiento.

- Categoría II: Comprende el equipamiento a ser conectado a la instalación eléctrica fija y que no queda comprendido en la Categoría I. Los valores correspondientes a esta categoría, suponen que dicho equipamiento está ubicado suficientemente lejos del origen de la instalación como para que las sobretensiones sean atenuadas naturalmente por las condiciones de la instalación. Si por el contrario, se ubican próximos al origen de la instalación, este equipamiento requiere de protección adicional por medio de descargadores, que limiten el nivel de sobretensión al valor especificado para esta categoría en la tabla 5.23. Ejemplos de este tipo de equipamiento son electrodomésticos, herramientas portátiles y otros elementos similares.
- Categoría III: Comprende el equipamiento que forma parte de la instalación eléctrica fija y equipamiento para el que se requiere un mayor grado de disponibilidad. Ejemplos de este tipo de equipamiento son tableros de distribución, interruptores, sistemas de canalizaciones, seccionadores, toma corrientes, y equipamiento para uso industrial como ser motores conectados en forma permanente a la instalación fija.
- Categoría IV: Comprende el equipamiento a ser instalado en la proximi-

dad del origen de la instalación. Ejemplos de este tipo de equipamiento son las unidades de supervisión y control instaladas en el origen de la instalación.

Medidas para el control de sobretensiones

Nota 1: Las medidas de protección incluidas en este Capítulo no consideran las descargas directas de rayo sobre las líneas de baja tensión de la Red de Distribución que alimenta la instalación o sobre la instalación eléctrica interior.

En la mayoría de los casos no son necesarias medidas de control para sobretensiones de maniobra, ya que el riesgo de sobretensiones de maniobra de mayor valor que el correspondiente a la Categoría II es bajo.

(i) Control Inherente

Cuando la instalación interior es alimentada por una red de baja tensión completamente subterránea, y no incluye líneas aéreas, se prevé un bajo riesgo de sobretensiones en la instalación, y se considera suficiente la selección del equipamiento con una tensión soportada de impulso de acuerdo a la tabla 5.23.

En este caso no se consideran necesarias protecciones adicionales contra sobretensiones de origen atmosférico en el origen de la instalación.

En esta situación, puede ser necesaria la protección adicional contra sobretensiones en aplicaciones donde una alta confiabilidad o altos riesgos (p. ej. de fuego), son esperados.

Nota 2: Los conductores aislados suspendidos son considerados como equivalentes a cables subterráneos si cuentan con pantalla metálica conectada a la puesta a tierra.

Obs. La norma IEC 60364 incluye también las instalaciones alimentadas o que incluyen líneas aéreas de baja tensión, cuando el nivel cerámico es menor que 25. Esto no se incluye en el reglamento, porque en Uruguay es mayor.

(ii) Control por protección

Cuando una instalación es alimentada o incluye líneas aéreas de baja tensión, se considera necesaria la instalación de protección contra sobretensiones de origen atmosférico en el origen de la instalación.

Obs. La norma IEC 60364 también incluye como condición que el nivel cerámico sea mayor que 25.

Esta protección debe ser provista por dispositivos de protección contra sobretensiones que tengan un nivel de protección correspondiente a la Categoría II de la tabla 5.23 (tensión residual menor a 2,5 kV o 4 kV según corresponda), o por otras medidas que provean al menos una atenuación equivalente de la sobretensión.

En esta situación, puede ser necesaria la instalación de protecciones particulares, en aplicaciones donde una alta confiabilidad o altos riesgos (p. ej. de fuego) son esperados, y donde el riesgo aceptable es excepcionalmente bajo.

Capítulo 6

Detección de Descargas Atmosféricas.

Existen dos grupos de conocimientos y técnicas complementarios; uno es el detectar la probabilidad de una descarga atmosférica (sistema de alerta), y otro consiste en obtener su localización (sistemas de localización y registro) luego de que se produjo un rayo. Las razones para estos sistemas son variadas:

- Detección de la proximidad de una tormenta eléctrica para tomar medidas de protección (suspensión de operaciones de riesgo, protección de personas, previsión de maniobras con la red eléctrica).
- Determinación de la causa de un daño (pérdida de vidas, daños a estructuras)

6.1. Sistemas de alerta

Los sistemas de alerta se usan en lugares en que es razonable cambiar la actividad si la probabilidad de riesgos es alta. Por ejemplo una plataforma de lanzamiento de vehículos espaciales, un aeropuerto o un predio amplio y descampado en que se practican deportes o recreación.

Como se vio anteriormente, el campo eléctrico E en buen tiempo vale $100 \frac{V}{m}$ con dirección hacia la tierra, mientras que en presencia de tormenta eléctrica su dirección está invertida y el módulo es cientos de veces superior. Entonces usando un detector de campo eléctrico se puede establecer un sistema de alerta de rayos.

Resumiendo los valores de E tenemos:

- $E = 100 \frac{V}{m}$ - Buen tiempo

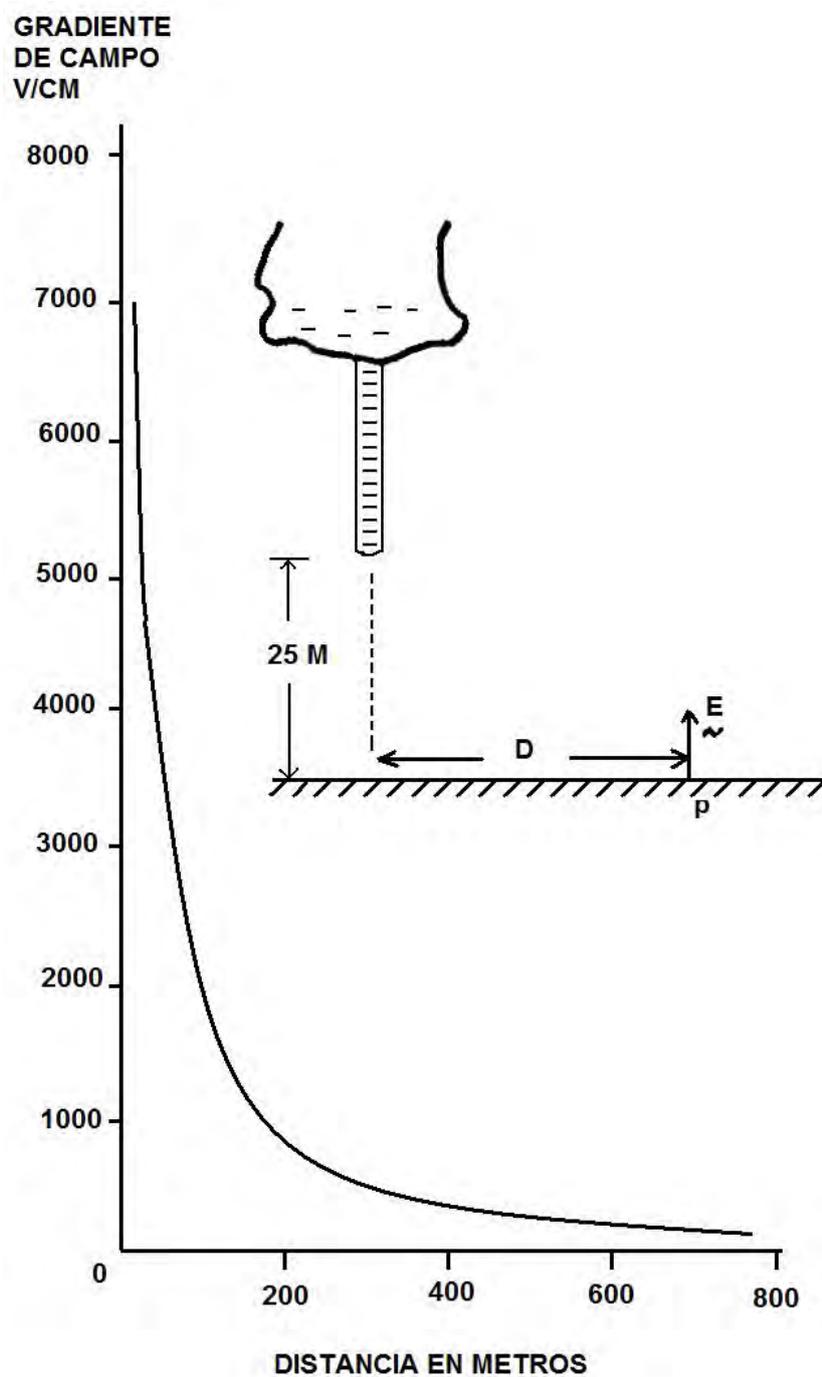


Figura 6.1: Gradiente de campo eléctrico en la tierra sobre el líder escalonado.

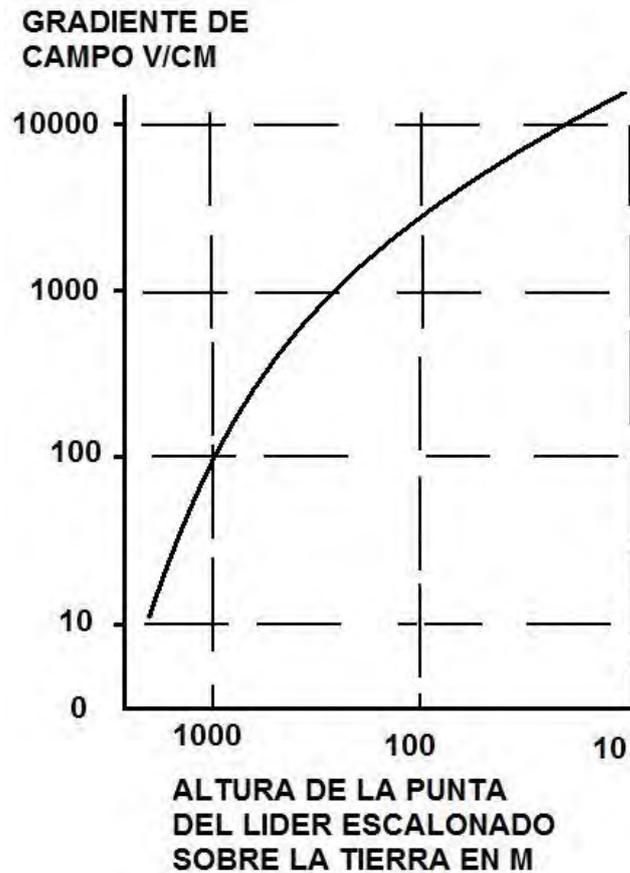


Figura 6.2: Gradiente de campo eléctrico en la tierra sobre el líder escalonado.

- $E = 1.000 \text{ a } 10.000 \frac{V}{m}$ - Presencia de nube de tormenta eléctrica
- $E = 100.000 \frac{V}{m} \text{ a } 500 \frac{kV}{m}$ - Condiciones para presencia de rayo

El circuito mayormente usado en la detección del campo eléctrico atmosférico es el amplificador operacional conectado como amplificador de carga, mostrado en la figura 6.3.

Suponiendo que estamos trabajando en la zona lineal (región de operación de esta configuración), como idealmente la ganancia de un amplificador operacional es infinita, para un voltaje de salida finito la diferencia de voltaje entre las entradas debe ser infinitesimal. Por lo tanto, al tener el terminal positivo conectado a tierra tenemos el terminal negativo en “tierra virtual” y de esta forma el voltaje en bornes del capacitor C_F es V_o . Despreciando la resistencia R_F , la carga q que induce E en la placa se relaciona con C_F de la

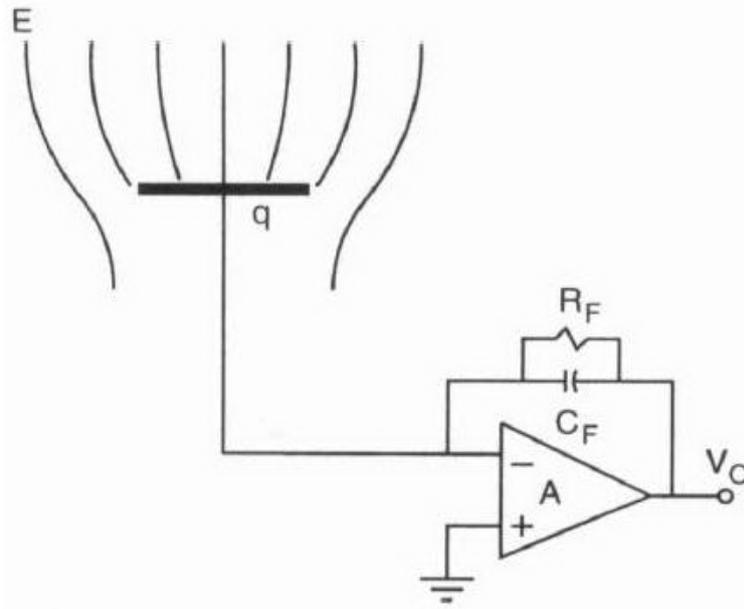


Figura 6.3: Amplificador de carga.

siguiente forma:

$$q = -\frac{V_o}{C_F} \quad (6.1)$$

Además usando la Ley de Gauss tenemos la aproximación:

$$E \simeq \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (6.2)$$

Por lo que obtenemos la siguiente relación entre E y q :

$$E \sim \frac{V_o}{C_F} \quad (6.3)$$

Los problemas en la elección de R_F son: si la resistencia es muy chica el capacitor se descarga antes de obtener la medida correspondiente, y si es muy grande V_o no sigue las variaciones de E . La constante de tiempo $R_F C_F$ necesitaría ser mayor a 5 veces la duración del evento a medir.

En general no se usa el circuito anterior por su dificultad de ser calibrado, en su lugar se usa el molino de campo mostrado en la figura 6.4.

El rotor está conectado al potencial de tierra y gira a una frecuencia f . Al ir girando va cubriendo y descubriendo los electrodos estáticos, cada par de electrodos opuestos están conectados y sus señales eléctricas entran al circuito mostrado en la figura 6.6.

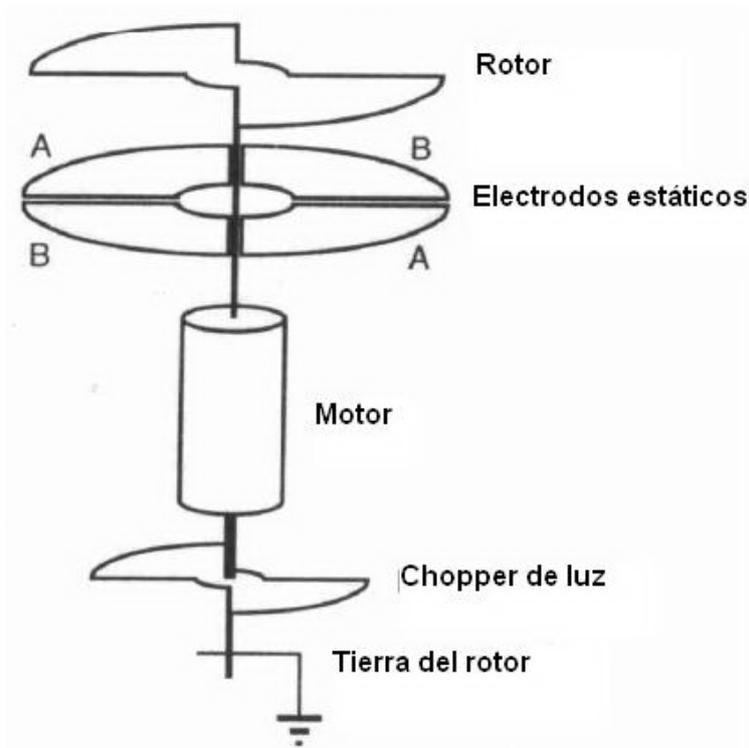


Figura 6.4: Molino de campo.

Al igual que el circuito anterior, la cantidad de carga inducida q es proporcional al campo eléctrico local E .

Observamos en la figura 6.6 que cada señal eléctrica entra al terminal negativo de un amplificador de carga, y se obtienen los voltajes VA y VB mostrados en la figura 6.5. Estos voltajes no dependerán de la frecuencia f de rotación del rotor, si f excede en aproximadamente 5 veces la frecuencia eléctrica del amplificador de carga ($\frac{1}{R_F C_F}$).

Los voltajes VA y VB teóricamente serían ondas triangulares, pero por los efectos de bordes, las señales resultantes son más parecidas a dos sinusoides, desfasadas 90° entre sí.

Estos voltajes son combinados en una única señal en el amplificador diferencial, obteniendo el voltaje $V2$ de la figura 6.5.

Posteriormente, la señal combinada es rectificadora con signo, obteniéndose el voltaje $V3$ de la figura 6.5. El voltaje $V3$ será positivo o negativo según el sentido del campo eléctrico E ; para esto se usa la señal de referencia VC de la figura 6.5. Esta señal se obtiene con una placa de las mismas dimensiones del rotor, que gira solidario a él (el ángulo relativo entre ambos se puede modificar, y se usa para la calibración del molino usando un campo eléctrico

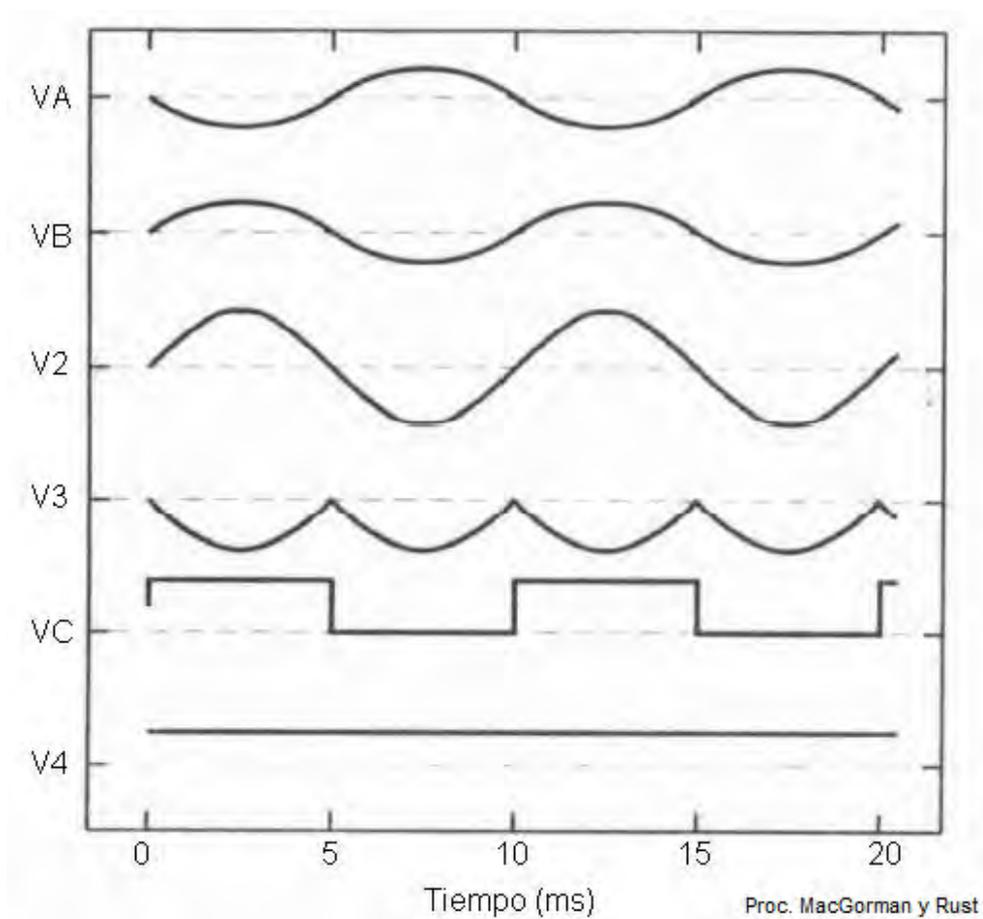


Figura 6.5: Curvas de las señales eléctricas del circuito del molino de campo.

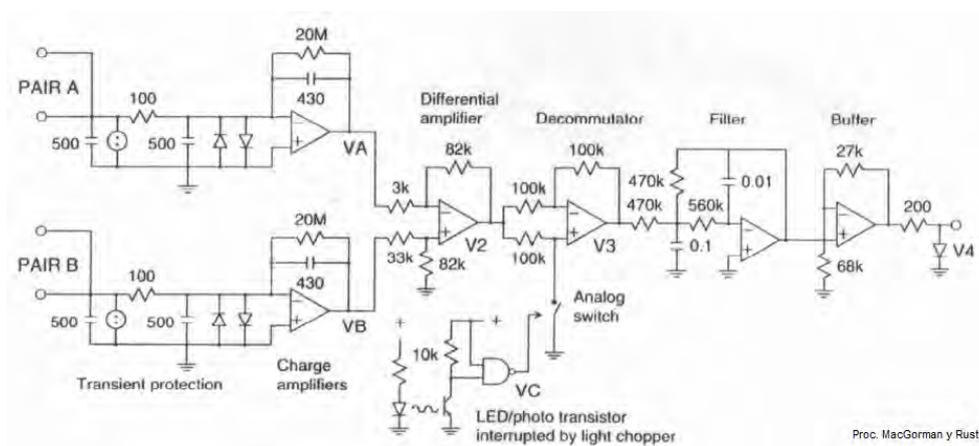


Figura 6.6: Circuito del molino de campo.

conocido). La placa interrumpe o no un haz de luz entre un LED y un fototransistor como se aprecia en la figura 6.6.

Por último, la señal es filtrada y se obtiene V_4 , cuyo valor es proporcional al campo eléctrico local E .

$$E = GV_4 \quad (6.4)$$

Se debe evitar la entrada de agua y polvo al molino, por esa razón en la práctica se coloca hacia abajo como se muestra en la figura 6.7. El problema de esta configuración es que distorsiona las líneas de campo eléctrico como se observa en la figura; para solucionarlo se tiene en cuenta los efectos geométricos en la calibración.

$$E = \mathcal{F}GV_4 \quad (6.5)$$

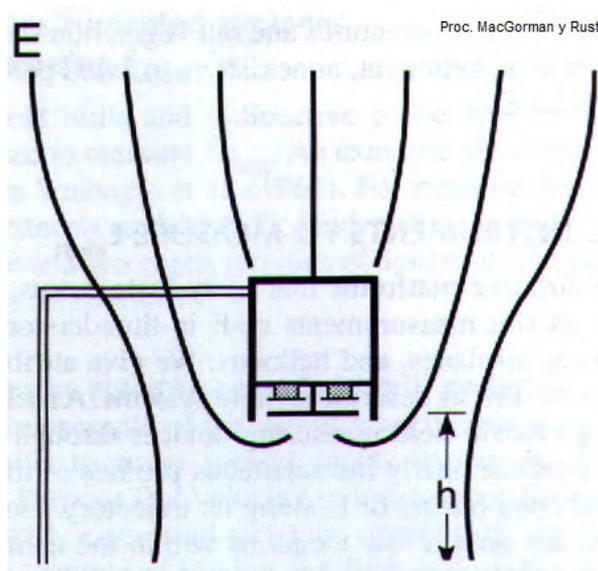


Figura 6.7: Representación de un molino de campo colocado hacia abajo.

6.2. Sistemas de localización y registro

Esta sección tratará sobre los sistemas de localización del lugar donde “cayó” el rayo y su registro. Como vimos anteriormente, existen tres tipos de rayos: internube, intranube y nube-tierra. En esta área de trabajo nos interesan los rayos nube-tierra que son de los cuales nos debemos proteger,



Figura 6.8: Foto de un molino de campo operativo.

sin embargo existe interés para detectar los otro tipos, como para fines estadísticos y para la seguridad de las aeronaves por ejemplo.

Existen métodos de detección satelital, donde se detectan todos los tipos de rayos juntos, sin que sea posible distinguirlos en la figura 2.19 tenemos un ejemplo de los resultados que se obtienen por ese método. También están los radares meteorológicos, que incluso detectan la dirección de donde proviene el trueno para detectar solamente los rayos nube-tierra, se puede recurrir al método de Krider et al., que en 1976 formuló que si detectamos el rayo cuando está en el pico de la curva de la corriente de retorno, la detección corresponde a un punto del canal a pocos cientos de metros sobre la tierra, y prácticamente encima del punto de impacto.

Esta corriente se puede detectar debido a su intensidad y a su subida muy rápida, que irradia radio frecuencia.

6.2.1. DF - Direction finder

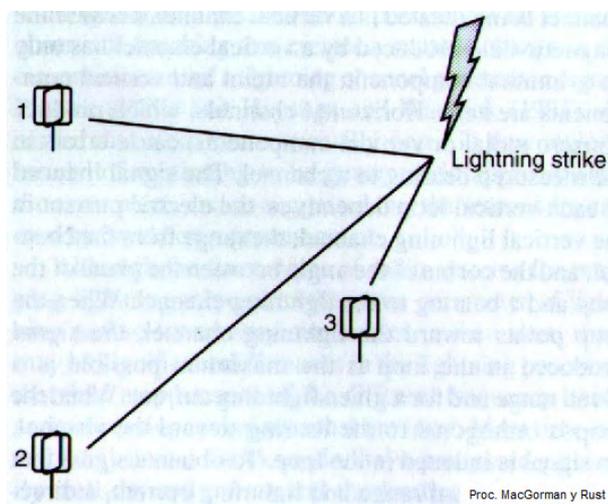


Figura 6.9: Esquema de un sistema DF.

El sensor básico en esta tecnología consiste en dos antenas loop, colocadas perpendicularmente entre sí, una en dirección norte-sur, y la otra en dirección este-oeste.

Cada antena detecta el campo magnético inducido por el rayo, y se toma el cociente entre las dos antenas que determina la tangente hacia la ubicación del rayo. Teniendo dos o más estaciones que no estén en línea recta hacia el impacto, se triangula y de esta forma se obtiene la localización. En la figura 6.9 se tiene un esquema del método.

6.2.2. ToA - Time of arrival

Este método consiste en medir el tiempo de arribo de un punto específico del rayo en cada estación, y un procesador central halla las diferencia en los tiempos de arribo entre diferentes estaciones.

La diferencia entre el tiempo de arribo de dos estaciones determina un lugar geométrico, que en un plano sería una hipérbola. Con la diferencia de tiempo de otra estación se obtiene otra hipérbola que corta a la anterior en dos puntos. La indeterminación se levanta con una cuarta estación. En la figura 6.10 se tiene un esquema del método.

En general se usan estos dos métodos combinados.

Es de hacer notar que con pocas antenas se puede cubrir una extensión grande. El Uruguay podría tener un sistema de detección de unas 4 o 5 antenas en total.

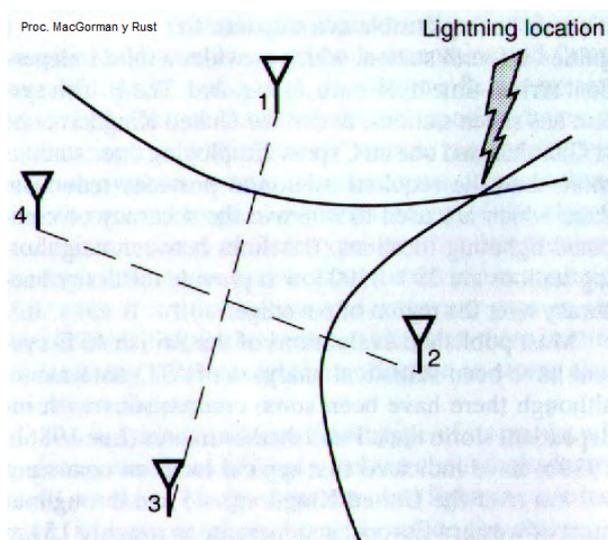


Figura 6.10: Esquema de un sistema ToA.

Capítulo 7

Captore (Puntos de impacto - Pararrayos).

7.0.3. Introducción

El propósito de la protección contra descargas atmosféricas es evitar los daños que puede producir el impacto de un rayo local o remoto a personas, estructuras, valores y a la continuidad de servicios. Esto se logra mediante dispositivos y sistemas que conduzcan a tierra la corriente del rayo directo en forma controlada y limiten a niveles seguros los efectos indirectos de la descarga. La primera fase de la acción de protección contra el rayo directo la constituye el impacto al elemento del sistema de protección destinado a recibirlo o captarlo. Ese elemento puede ser un dispositivo agregado, que llamamos comúnmente pararrayos, o puede ser una parte de la estructura a proteger que tiene características adecuadas para recibir el impacto, como por ejemplo una torre metálica.

*Llamamos **Captor** al dispositivo o elemento que se destina específicamente a recibir el impacto del rayo en la zona donde está la estructura o sistema que necesitamos proteger. Debe ser capaz de recibir el impacto sin daños que alteren su función después del impacto, de conducir la descarga a una toma de tierra o de permitir su conexión a un conductor adecuado a este propósito y de ofrecer un punto de impacto preferencial frente al resto de la estructura o sistema, que consideramos vulnerable.*

Prácticamente desde el momento en que Benjamín Franklin propone su sistema de captor de descarga, conductor de bajada y puesta a tierra - básicamente el sistema que ha probado su efectividad durante más de 250 años y que seguimos usando- quedaron planteados dos temas. Uno de ellos

fue la determinación (y la ampliación) del área que un elemento captor de rayos era capaz de proteger interceptando las descargas que de otro modo impactarían en la misma y el otro implicaba la posibilidad de impedir directamente la formación del rayo. A lo largo de estos 250 años se han propuesto entonces diferentes sistemas alternativos con el fin de influir en el fenómeno en uno u otro sentido. Es así que sobre todo en las cuatro últimas décadas se han estado comercializando dispositivos que mediante diversos métodos pretenden o bien aumentar significativamente el área de captación de descargas con respecto al pararrayos convencional o bien evitar la formación del rayo sobre la instalación a proteger. En la literatura se los denomina generalmente “sistemas no convencionales”.

En este capítulo se presenta entonces el funcionamiento y los criterios de diseño del sistema destinado a recibir el impacto y se analiza además el funcionamiento pretendido de los sistemas no convencionales mencionados.

7.1. Repaso de electricidad atmosférica y principio de funcionamiento

7.1.1. Estructura y funcionamiento de un sistema de protección contra descargas atmosféricas

Un sistema de protección contra descargas atmosféricas está compuesto esencialmente por el sistema captor del impacto, el conductor de bajada y la conexión a tierra. Si la instalación a proteger lo requiere se debe incluir un conjunto de interconexiones que disminuyan a niveles tolerables las diferencias de potencial generadas entre diferentes partes de la instalación protegida así como elementos supresores de tensiones transitorias entre conductores eléctricos creadas por el impacto local o remoto del rayo.

El sistema captor del impacto o interceptor del rayo consiste en uno o más elementos metálicos previstos para recibir la descarga de manera que el impacto no se produzca en partes vulnerables de la estructura o sistema a proteger. Pueden ser parte de la estructura a proteger o pueden ser elementos agregados, como barras metálicas verticales o conductores horizontales suspendidos sobre dicha estructura o sistema. En algunos casos los elementos captadores se instalan separados de la instalación a proteger, de manera que la corriente del rayo no circule en las proximidades o por partes de la misma, aún en forma controlada. Es común esta exigencia en instalaciones con alto riesgo de explosión.

Las barras verticales se han fabricado tradicionalmente con la terminación

superior en punta y se las llama “Puntas Franklin”, ya que fue Franklin quien propuso esta implementación desde un principio. El pararrayos común que se emplea en el Uruguay es una forma de punta Franklin. Los conductores horizontales suspendidos suelen llamarse “hilos de guardia” y también fueron propuestos por Franklin en 1753 [1].

Ya sean propios de la estructura o agregados, los elementos metálicos que componen el sistema captor deben ser capaces de interceptar la descarga, soportar el efecto del impacto sin daños que afecten su función, efectividad y durabilidad, con sección suficiente como para conducir la corriente del rayo y ubicados en todos los puntos donde el impacto es probable. Dichos puntos se determinan mediante metodología basada en las propiedades físicas de la descarga atmosférica. Su efectividad depende fundamentalmente de su posición en la estructura a proteger y es independiente de detalles de forma o estructura en una escala de hasta algunas decenas de centímetros [24]. En particular la evidencia experimental de los últimos años indica que la terminación en punta no mejora la efectividad [27]. La última edición de la norma NFPA780 [15] que regula este tipo de instalaciones en Estados Unidos establece, en cada punto en que se trata el tema, que la terminación de las barras verticales puede ser tanto en punta como roma. En esta y otras normas como la CEI se establecen datos dimensionales solamente en el sentido de garantizar la necesaria capacidad de conducción de corriente y la robustez frente a los impactos [13].

El sistema de conductores de bajada que debe llevar la descarga a tierra consiste también en elementos metálicos adicionales tales como cables de dimensión adecuada para conducir la máxima corriente prevista y elementos de la propia instalación, llamados bajadas naturales, como torres metálicas, hierro de armado estructural de hormigón e incluso caños metálicos de agua que tengan la continuidad y las dimensiones adecuadas. El diseño del sistema de bajada debe tender a minimizar efectos de la corriente tales como sobretensiones en los propios conductores que pueden producir arcos a la estructura y campos electromagnéticos que afecten las instalaciones. Esto se logra minimizando la impedancia general del sistema mediante conductores múltiples - de longitud mínima y mínimo número de curvas - que dividan la corriente en forma razonablemente simétrica en torno a la instalación y usando los componentes naturales en la mayor extensión posible.

En las instalaciones en que no se permite la circulación de corriente de la descarga por partes estructurales las bajadas deben ser todas adicionales y estar suficientemente alejadas de la estructura a proteger, usualmente varios metros, debido a las sobretensiones por los conductores. Por ejemplo, la corriente de un rayo de valor de pico 20 kA (más del 50% de los rayos supera ese valor) circulando por un cable de bajada de 10 m de altura produce una

tensión en la punta con respecto a tierra o respecto a una estructura próxima de entre 200 kV y 2 MV. El diseño según normas actuales implica prever tensiones de hasta 4 MV para ese tipo de instalación.

El sistema de puesta a tierra consiste en una interconexión de electrodos verticales y horizontales enterrados y partes conductoras enterradas de la estructura a proteger. La extensión y disposición debe ser tal que se asegure la dispersión de la carga en el terreno de manera que las diferencias de potencial de tierra en la zona de la instalación causadas por la corriente del rayo se reduzcan a límites tolerables por personas y equipos. El sistema de interconexión equipotencial consiste en conductores que unen todos los elementos metálicos de la estructura de manera de prevenir los efectos de las tensiones transitorias creadas por los rayos. Entre esos efectos se cuentan desde diferencias de potencial de tierra entre equipos hasta arcos eléctricos desde conductores de bajada a otros objetos metálicos.

Los supresores de transitorios son en general dispositivos de comportamiento fuertemente no lineal frente a la corriente y que limitan las sobretensiones que se crean entre conductores de servicios de energía o información y la estructura, ya sea porque un rayo directo en la estructura eleva la diferencia de potencial entre la misma y sus cables de servicios o porque un rayo remoto afectó el potencial de dichos cables con respecto al de la estructura.

Este capítulo trata entonces el sistema captor. Sin embargo los otros componentes del sistema de protección deben ser tenidos en cuenta para la evaluación de la performance de todos los sistemas propuestos.

7.1.2. La descarga atmosférica y el funcionamiento convencional del captor

Estructura de la Nube y Fases de la Descarga

Una nube o célula típica de tormenta eléctrica se forma, madura y se disipa en unas horas. En su fase madura tiene su base a unos 2- 4 km del suelo, una altura que puede llegar hasta 20 km o más y se extiende horizontalmente unos 8-16 km [25]. Contiene agua en distintos estados, como agua líquida en partículas o gotas de distintos tamaños, diversas formas de hielo, nieve, y vapor de agua, llamadas todas hidrometeoros, Presenta grandes diferencias de temperatura, desde alguna decena de grados Celsius en la base, pasando por 0 °C a unos 4-5 km de altura hasta unos -50 °C en la parte superior. En su interior se producen fuertes corrientes de aire ascendentes y descendentes del orden de 40 a 100 km/h [25], [3], [2]. La electrificación interna se produce fundamentalmente por procesos de interacción entre los distintos hidrometeoros y a grandes rasgos se compone de carga negativa en la parte inferior

de la nube, carga positiva en la parte superior y usualmente una pequeña zona de carga positiva en una parte relativamente reducida de la base de la nube.

La carga total de la parte negativa es de unos - 40 C y tiene su centro de cargas a unos 7-8 km de altura, en la zona de temperaturas de -10 a -25 °C. La carga positiva también es de unos +40 C y tiene su centro de cargas a una altura de 10 a 12 km. La zona de carga positiva en la base es de unos +2 a +5 C y se cree que no siempre está presente [2]. Todos los valores numéricos dados en el presente trabajo corresponden aproximadamente al caso promedio, en la realidad presentan mucha dispersión (figura 7.1).

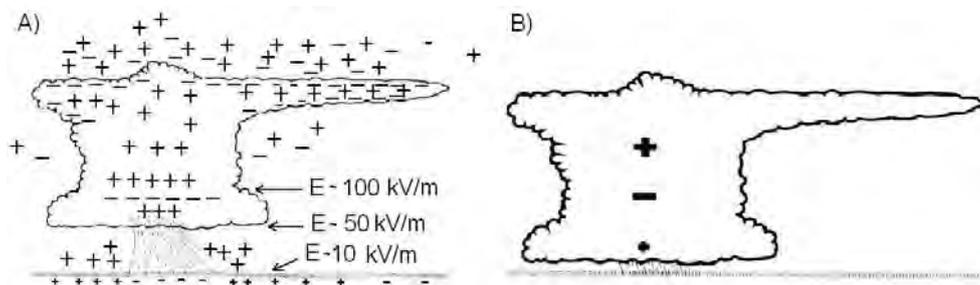


Figura 7.1: A) Carga eléctrica en una nube. B) Modelo de estructura de carga de una nube. Adaptado de MacGorman y Rust [2].

El 90 % de las descargas nube-tierra se inician en el interior de la nube y llevan carga negativa a tierra. Una descarga de este tipo se inicia en un fenómeno llamado “Ruptura Preliminar”, una descarga electrostática en el interior de la nube, en la zona de carga negativa, típicamente a altura de unos 5 a 8 km. La ruptura preliminar es seguida por un proceso de descarga dentro de la nube que dura algunos milisegundos a partir del cual se comienza a formar la llamada “Guía Escalonada” de la nube a tierra.

La guía escalonada consiste en un tubo conductor de aire ionizado y cargado negativamente, de unos 10 cm de diámetro y rodeado de una capa de algunos metros de espesor de ionización tipo corona [28]. Ese tubo se va formando a saltos o pasos de longitud media típica 50 m, con un intervalo de 20 a 50 μs entre saltos, propagándose hacia tierra a una velocidad media típica de 20 $\frac{cm}{\mu s}$. Usualmente se ramifica, y en general una o dos ramificaciones llegan a las proximidades del suelo en unos 20 a 30 ms. Cuando la punta de la guía llega a cierta distancia del suelo que puede ser de decenas a centenas de metros, se produce el llamado “proceso de enlace” (attachment process en la literatura en inglés, la más abundante), estableciéndose un canal conductor entre el suelo y la nube con una carga neta negativa total de 3 a 5 C. Se produce entonces la “descarga de retorno”, el rayo propiamente dicho desde

el punto de vista de las protecciones, que se propaga hacia la nube a $\frac{1}{3}$ de la velocidad de la luz, llevando carga negativa a tierra desde el canal de la guía y desde la nube, con una corriente impulsiva cuyo pico puede alcanzar hasta 400 kA. Su trayectoria sigue la de la guía y reproduce su forma a tramos de distintas direcciones (a esto se debe la típica forma en zigzag irregular de los rayos). Es usual que luego de la descarga de retorno el camino recorrido por la descarga de retorno vuelva a adquirir carga de la nube y provocar varias descargas de retorno subsecuentes, en promedio unas 4 veces, aunque se han registrado casos de más de 30. Estas descargas subsecuentes no presentan ramificaciones.

El rayo puede iniciarse también desde estructuras a tierra. El proceso de formación presenta algunas diferencias pero la descarga principal se propaga siempre desde tierra. Algunos rayos llevan carga positiva neta a tierra. De todas formas hay que tener presente que la corriente del rayo es siempre movimiento de electrones.

El Proceso de Enlace

Los objetos en tierra - suelo, estructuras, árboles y el sistema captor- recien intervienen en el fenómeno durante el proceso de enlace, es decir unos 20-100 ms después del inicio de la descarga dentro de la nube y cuando la guía escalonada está formada casi en su totalidad.

En condiciones de buen tiempo la tierra está cargada negativamente, el campo eléctrico en el aire apunta hacia el suelo y tiene un valor medio de $100 \frac{V}{m}$. Si hay una nube de tormenta eléctrica típica como la descrita la tierra adquiere carga positiva y el campo al nivel del suelo apunta hacia arriba con un valor medio de unos $5 - 10 \frac{kV}{m}$. El campo en la base de la nube es de unos $50 \frac{kV}{m}$. La diferencia de potencial entre nube y tierra puede ser de decenas a cientos de megavoltios.

Cuando no circulan corrientes la superficie de la tierra y de los objetos y estructuras ubicadas sobre ella puede considerarse como equipotencial, con el campo perpendicular a la misma. Si bien el campo medio es de algunos kilovoltios por metro, en bordes y zonas de bajo radio de curvatura de objetos salientes o expuestos la variación del potencial con la distancia aumenta drásticamente (figura 7.2). Por lo tanto el campo local en esas zonas es mucho mayor, llegando a valores cercanos al de la ruptura del aire como dieléctrico (del orden de 1 a $3 \frac{MV}{m}$). En esos puntos se genera ionización y emisión tipo corona a su alrededor, que inicialmente es de unos pocos microamperes. Zonas típicas incluyen bordes y puntas de edificios y torres, árboles, rocas, mástiles, hilos conductores suspendidos y objetos similares.

Cuando la guía escalonada (llamado también líder descendente) con su

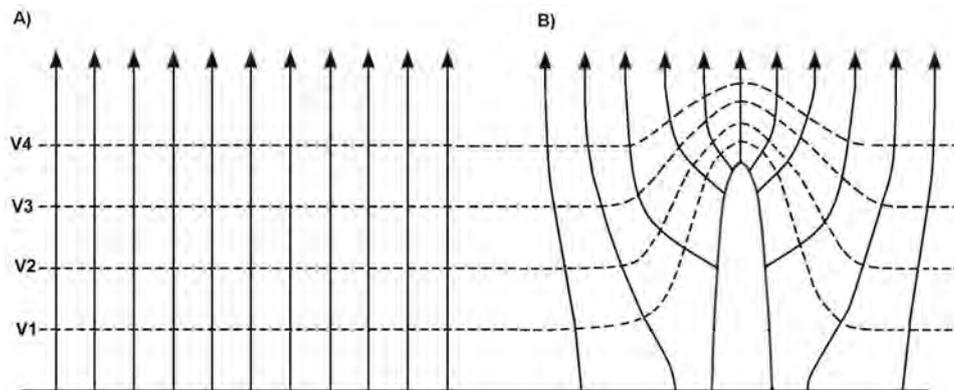


Figura 7.2: A) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en terreno plano. B) Líneas equipotenciales y campo eléctrico en presencia de un conductor en punta. Adaptado de MacGorman y Rust [2].

carga eléctrica ya mencionada y su potencial en un valor del orden del de la nube se acerca al suelo el campo eléctrico promedio entre punta de guía y suelo va aumentando y también la emisión corona de todos los puntos salientes del tipo mencionado, que llega al orden de unidades de amperes.

Cuando el campo promedio entre la punta de la guía y los puntos salientes de tierra (que son múltiples en cualquier entorno normal) llega a unos $500 \frac{kV}{m}$ las corrientes corona de dichos puntos aumentan y se transforman en canales ionizados que se propagan hacia arriba de manera análoga a la propagación de la guía escalonada, impulsados por el propio campo eléctrico. Las velocidades medias de propagación observadas varían desde $1-2 \frac{cm}{\mu s}$ a poco menos de $30 \frac{cm}{\mu s}$ [1], [24]. Esos canales se llaman “guías o trazadores ascendentes” (upward leaders, a veces también streamers). Cuando el campo entre la punta de uno de esos trazadores ascendentes y la punta de la guía descendente llega a un valor suficientemente alto se completa el canal conductor entre la tierra y la nube y se produce la primera descarga de retorno entre la nube y el objeto que emitió el trazador ascendente. El objeto se convierte entonces en el punto de impacto. El trazador ascendente exitoso, que es de los múltiples trazadores generados por una guía el que logra establecer la conexión, proviene generalmente de uno de los primeros objetos cuya distancia a la punta de la guía descendente llega a un valor tal que el campo medio a través de esa distancia adquiere el valor crítico.

Distancia de Impacto R_s

Del proceso de enlace se desprende que el diseño del sistema captor de una protección se basa en la identificación de los lugares de la instalación a proteger capaces de emitir un trazador ascendente exitoso. El método de identificación se basa en el concepto de “distancia de impacto” (striking distance).

La distancia de impacto se define como la distancia entre la punta de la guía escalonada descendente y el punto de impacto en el momento en que el campo eléctrico medio entre esos dos puntos adquiere el valor crítico (500 kV/m) [25].

Alternativamente, la distancia de impacto se define como la distancia que hay entre la punta de la guía descendente y el objeto que recibirá el impacto en el momento en que comienza a desarrollarse el trazador ascendente exitoso desde ese objeto [24], [25].

De la definición se desprende que la distancia de impacto depende fuertemente de la carga eléctrica almacenada en la guía escalonada descendente, ya que es esta carga la que produce el campo eléctrico de valor tal que permite el inicio y desarrollo del trazador ascendente. Dicha carga es muy difícil de medir, y aún más difícil es determinar su distribución a lo largo del canal [25]. Por otra parte se dispone de datos sobre la corriente de pico de la primera descarga de retorno, que a su vez es uno de los parámetros fundamentales para el diseño de la protección. Esa corriente también depende de la carga en el canal, por lo tanto existe una relación entre la corriente de retorno y la distancia de impacto. Se han propuesto diversas formas para esta relación a partir de estudios teóricos, modelos, observaciones y datos experimentales. La expresión más usada es de la forma:

$$R_s = AI^b \quad (7.1)$$

donde R_s es la distancia de impacto, I la corriente de pico de la primera descarga de retorno y A y b constantes. Se han propuesto distintos valores para A y b , muchos de ellos derivados de estudios de impactos sobre líneas de alta tensión.

La norma de la CEI publicada en 2006 [13] toma los valores propuestos por un grupo de trabajo de la IEEE. La distancia de impacto se expresa entonces como

$$R_s = 10I^{0,65} \quad (7.2)$$

donde I es la corriente de pico en kiloampere y R_s la distancia de impacto en metros ¹.

¹Si bien la fórmula (7.2) es la adoptada por la norma CEI para la determinación de

Esta expresión no toma en cuenta diferencias entre las formas de los objetos conectados a tierra capaces de generar un trazador ascendente. Como ya se señaló basta que presenten bordes o puntas que permitan el aumento del campo como para iniciar la descarga corona. Los detalles en escala menor que algunos centímetros no son relevantes en un modelo útil para las protecciones de estructuras.

Se han desarrollado expresiones más complejas para fines específicos, como líneas de transmisión de energía eléctrica. Los coeficientes varían ligeramente para la distancia de impacto a líneas, hilo de guardia y tierra [1].

Zonas de Atracción o Captura y Zonas de Protección. Esfera Rodante.

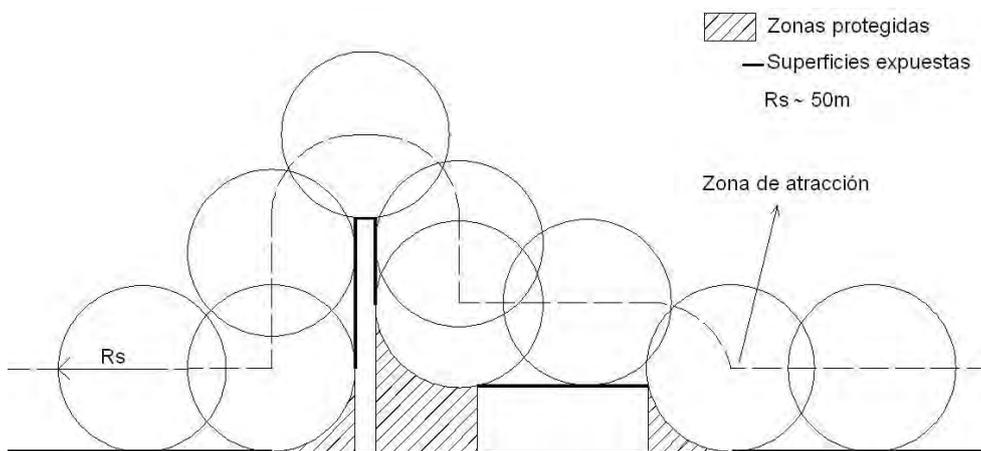


Figura 7.3: Determinación de las zonas protegidas y las superficies expuestas mediante el método de la esfera rodante.

La distancia de impacto es entonces una herramienta adecuada para determinar las zonas expuestas de una estructura. Se elige su valor de acuerdo a la mínima corriente de pico para la cual se decide proteger la estructura y se determinan los puntos a los cuales la punta de la guía escalonada puede acercarse a esa distancia. La determinación se realiza mediante el llamado “método de la esfera rodante”. El método consiste en determinar qué zonas y puntos serían tocados por una esfera de radio R_s que rodara en todas direcciones sobre la instalación a proteger (figura 7.3). Los espacios y superficies

la distancia de impacto, cabe señalar que recientemente se ha propuesto otra fórmula $R_s = 1,9I^{0,9}$ basada en una investigación sobre la distribución de carga a lo largo de la guía escalonada. Fue propuesta por Cooray, Rakov y Theethayi [29].

no alcanzados por la esfera constituyen las “zonas de protección”. El centro de la esfera genera una superficie constituida por los puntos a los que podría llegar la punta de una guía para que se produzca un impacto a la instalación con la corriente de retorno correspondiente al valor de R_s elegido.

La superficie generada por el centro de la esfera cuando la misma está en contacto con la instalación a proteger es la “zona de atracción o captura” de dicha instalación.

Diseño Convencional del Sistema Captor

Una vez determinadas las zonas de protección y las zonas expuestas se diseña el sistema captor. Se identifican los componentes naturales utilizables en las zonas expuestas, se agregan componentes adicionales en los lugares donde es necesario crear zonas de protección y se conecta todo a tierra en forma adecuada. Una vez realizado el diseño la esfera rodante solamente puede tocar elementos del sistema captor (figura 7.4). Las superficies lisas y planas como las paredes de edificios muy altos o el techo de edificios muy extensos se protegen mediante componentes naturales, cables de bajada utilizados como captores y mallas de metal de dimensiones normalizadas adosadas a las superficies a proteger [13].

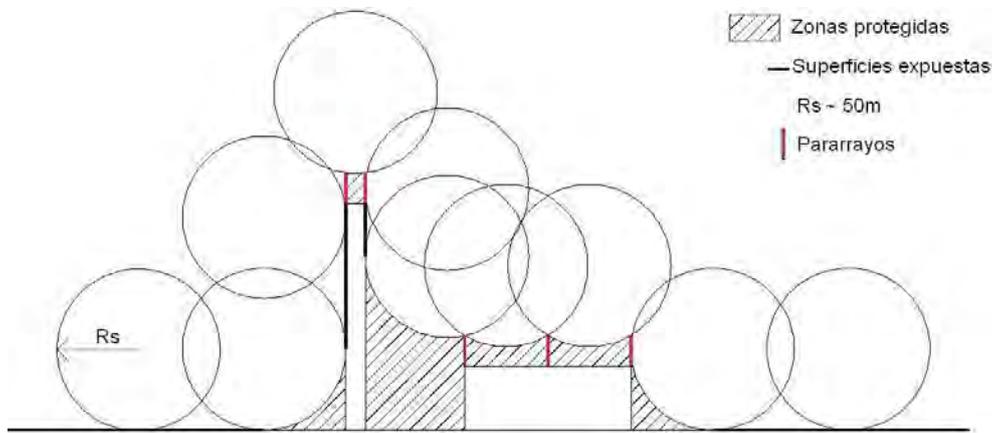


Figura 7.4: Protección mediante pararrayos. En la estructura alta los pararrayos sólo protegen el extremo superior, su superficie lateral debe ser protegida de otra manera.

La norma NFPA780 establece una distancia de impacto de 45 m, correspondiente a un rayo de 10 kA. La estructura quedaría protegida contra rayos de más de 10 kA, que constituyen el 90 % de las descargas a tierra. La norma CEI establece varios radios de acuerdo a una clasificación de niveles de

Nivel de Protección	Dist. Impacto/ Radio Esfera (m)	Corriente de pico Norma CEI (kA)	Tamaño de la malla para sup. planas (m)	Probabilidad de intercepción del rayo (%)
I	20	2,9	5 x 5	99
II	30	5,4	10 x 10	97
III	45	10,1	15 x 15	91
IV	60	15,7	20 x 20	84

Cuadro 7.1: Niveles de protección establecidos en la norma CEI 62305 - 3 incluyendo dimensiones de la esfera rodante, corriente mínima de pico, dimensiones de la malla de protección de superficies planas y probabilidad de intercepción de rayos. Adaptado de [1], [13]).

protección. El mayor nivel de protección prevé un radio de la esfera de 20 m, correspondiente a un rayo de 3 kA. El 99 % de los rayos tiene una corriente de pico mayor. (Tabla 7.1, adaptada de [1], [13]).

Un rayo de, digamos, 2 kA podría entonces impactar en zona protegida, pero con muy baja probabilidad y, por su baja magnitud, con consecuencias más leves.

Para las superficies planas se establece una correspondencia entre la malla de protección y el radio de la esfera. Aplicado estrictamente, el método de la esfera indica que el rayo podría impactar en la superficie protegida por la malla en los huecos dejados por la misma. En realidad la probabilidad de impacto de esas zonas es muy baja debido a su baja capacidad de generar aumento local del campo [24]. En todo caso los conductores de la malla cumplirían esa función. Aparentemente la relación entre las dimensiones de la malla y la distancia de impacto se fundamenta más en la experiencia que en la teoría [25].

7.2. Implementación del Captor o sistema de captores

Los pasos a seguir y los aspectos a tener en cuenta son básicamente los siguientes.

7.2.1. Determinación del nivel de protección.

De acuerdo al análisis de riesgo de impacto directo y a sus consecuencias se define un nivel de protección. Lo más adecuado es hacerlo según la tabla 7.1

adaptada de la norma CEI. El nivel de protección establece qué porcentaje de los rayos posibles debe ser interceptado por el sistema captor y por lo tanto fija el valor máximo de la distancia de impacto y el radio de la esfera rodante correspondiente.

7.2.2. Determinación del tipo de protección externa según el sistema a proteger y su contenido.

El conjunto formado por el captor del rayo, el conductor de la corriente del rayo a tierra y la puesta a tierra se llama “protección externa”. En su forma más simple consiste en un pararrayos vertical instalado en un techo, uno o dos conductores de bajada adosados al techo y a la pared y uno o dos conductores verticales enterrados (jabalinas). En un sistema de este tipo la corriente del rayo circula inevitablemente por partes de la estructura a proteger o tiene contacto con la misma. Por otra parte existen estructuras a proteger en que por sus características o contenido no se admite esta situación (estructuras que contienen explosivos, por ejemplo). Se tienen entonces dos tipos básicos de protección externa, según que el contacto con la estructura quiera evitarse o pueda admitirse.

7.2.3. Protección externa en que la corriente del rayo no debe tener contacto con la estructura.

En este caso la estructura a proteger debe quedar en su totalidad dentro de la zona de protección creada por otros objetos según una cierta esfera rodante. Esos objetos reciben el impacto y son el sistema captor. La forma más común de este tipo de captores la constituyen los llamados “hilos de guardia”.

Hilos de guardia.

Son conductores horizontales que se tienden sobre la estructura a proteger, en número y espaciamiento tales que la esfera rodante toque estos conductores y no la estructura. Se sostienen mediante soportes verticales, también separados de la estructura, que a su vez funcionan como conductores de bajada, llevando la corriente a tierra. (Figura 7.5). Pueden ser cables de cualquier metal que soporte la intemperie y el impacto de un rayo, según tabla 7.14.

Los principales parámetros de diseño son el número de hilos y las distancias mínimas entre la estructura y cada hilo y sus soportes.

El número de hilos lo da el criterio de la esfera rodante según la Figura 7.5. Se ve que depende de las distancias.

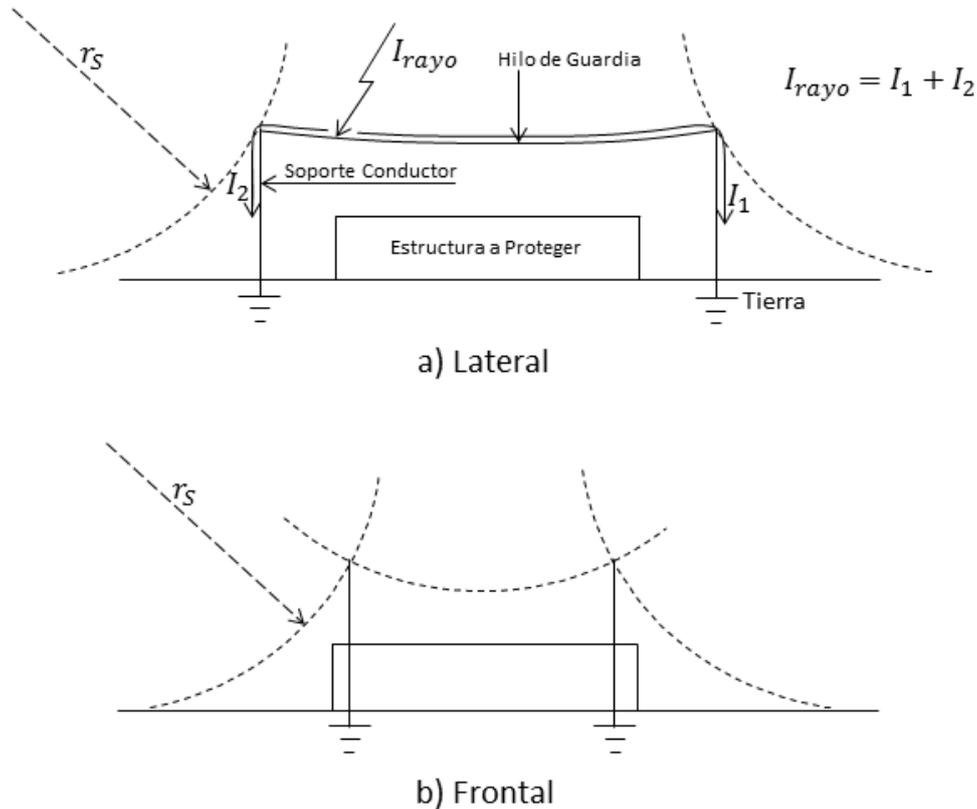


Figura 7.5: Zonas de protección por hilo de guardia.

Las **distancias mínimas** dependen de que un rayo que impacta en el hilo de guardia una tensión importante con respecto a tierra en el punto de impacto. *Esa tensión depende de la longitud l de la trayectoria a tierra de la corriente y se distribuye a lo largo del hilo y las bajadas.* Si consideramos que en el momento del impacto la estructura está aproximadamente al potencial de tierra se tiene una tensión importante entre el sistema de protección y la estructura. Si la tensión entre un punto de la protección y un punto de la estructura es tal que el campo eléctrico medio llega a un valor crítico, se va a producir una descarga (chispa, arco) entre la protección y la estructura.

El campo medio se puede estimar como $\langle E \rangle \approx \frac{U}{s}$, siendo U la tensión entre la línea y la estructura y s la mínima distancia entre la línea y la estructura. El máximo valor admisible es del orden de $500 \frac{kV}{m}$.

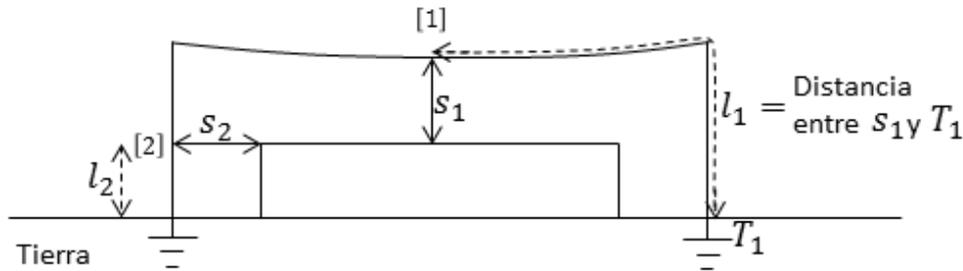


Figura 7.6: Puntos y distancias críticas con longitudes a los puntos de tierra más cercanos.

Se concluye entonces que dado el rayo con los parámetros más exigentes para el cual queremos proteger (máximo valor de pico y sobre todo máxima velocidad de subida de la corriente), se debe calcular la distancia s para que la máxima tensión dividida por s resulte menor a $500 \frac{kV}{m}$.

Para el cálculo se debe considerar la distancia s entre protección y estructura en los llamados puntos críticos, en los cuales el cociente $\frac{U}{s}$ es máximo, y se debe calcular la tensión producida por el rayo en esos puntos en el hilo de guardia o las bajadas. Esos puntos son los más cercanos a la estructura; Si hay muchos puntos a la misma distancia el punto crítico estará donde la tensión desarrollada por el rayo sea mayor. Se debe considerar además la mínima distancia entre los puntos críticos y el plano de tierra.

La figura 7.6 muestra los puntos críticos 1 y 2, las distancias críticas s_1 y s_2 y las longitudes l_1 y l_2 a los puntos de tierra más cercanos.

Ejemplo:

Un rayo con una corriente de pico de 50 kA y con un tiempo de subida de $0,5 \mu s$ impacta una línea de guardia como la de la figura 7.6 en su punto medio (punto crítico 1). La línea de guardia tiene 20 metros de largo y 10 metros de altura y cae unos 50 cm en el medio. La estructura protegida tiene 18 metros de largo y 8 metros de altura. La línea de guardia como los conductores de bajada son de acero galvanizado de 50 mm^2 de sección. (8 mm de diámetro).

Determinar las tensiones máximas entre los conductores y la estructura en los puntos críticos y decidir si la estructura está o no protegida contra ese tipo de rayo.

Como el rayo cae en el punto 1 suponemos que se divide en forma simétrica hacia las dos tierras.

La resistencia del alambre es aproximadamente $R = \rho \times \frac{l}{s} = 0,1 \times \frac{(\frac{20}{2}+10)}{50} = 0,04\Omega$

La inductancia $L(l_1) \approx 0,4620 \times \log_{10}(\frac{20}{2 \times 0,008}) = 29\mu H$

La tensión $U_1 = \frac{1}{2} \times (R \times I + L \times \frac{dI}{dt}) = \frac{0,04 \times 50}{2} + \frac{1}{2} \times 29 \times \frac{50}{0,5} = 1kV + 1450kV = 1451kV$ (la caída resistiva se puede despreciar)

$$s_1 = 10m - 8m - 0,5m = 1,5m$$

$$\frac{U_1}{s_1} = \frac{1451}{1,5} = 967 \frac{kV}{m} > 500 \frac{kV}{m} \Rightarrow \text{hay riesgo de arco con la estructura.}$$

$$L(l_2) = 0,46 \times 8 \times \log_{10}(\frac{8}{2 \times 0,008}) = 10\mu H$$

La tensión U_2 (desprecio RI) = $L(l_2) \times \frac{1}{2} \times \frac{50}{0,5} = 10 \times 50 = 500kV$

$$s_2 = \frac{(20m-18m)}{2} = 1m$$

$$\frac{U_2}{s_2} = \frac{500}{1} = 500 \frac{kV}{m} \Rightarrow \text{Está en el límite de riesgo de arco con la estructura.}$$

Conclusión: La estructura no está protegida. Hay que levantar la línea de guardia más de 1,5m.

En las normas, como la CEI 62305 - 3, la distancia de separación s entre conductores con corriente de rayo y estructura se suele expresar en forma aproximada como:

$$s = k_1 \times k_c \times \frac{l}{k_m} \quad (7.3)$$

Donde s es la distancia de separación requerida, l (ele) es la distancia por el conductor al punto de tierra equipotencial más próximo y k_i , k_c y k_m son factores que dependen del nivel de protección, del número de conductores de bajada y del material entre el conductor y el sistema a proteger respectivamente.

Para protección clase I $k_i = 0,08$, clase II: $k_i = 0,06$ y clase III y IV: $k_i = 0,04$

Para un conductor $k_c = 1$, dos conductores $k_c = 0,66$, 3 conductores 0,44

Para el aire $k_m = 1$

7.2.4. Protección externa adosada a la estructura.

Es el tipo de protección más común. La corriente puede incluso circular por partes de la estructura que admiten ser destinadas a esa función. Para su diseño y especificación se procede de acuerdo a lo que sigue.

Identificación de las zonas expuestas al impacto directo:

Al determinar el nivel de protección se determina la distancia de impacto y por lo tanto el radio r_s de la esfera rodante. Se hace “rodar” la esfera sobre la estructura a proteger; los puntos de contacto posibles son los de las zonas de impacto para los rayos de intensidad correspondiente a ese nivel de protección. (ver figura 7.3 y figuras 3.26 y 3.27).

Identificación de puntos de impacto preferenciales dentro de las zonas expuestas.

Son objetos o partes de la estructura o sistema que presentan radios de curvatura del orden de cm, es decir lugares donde el campo debajo de la nube cargada se intensifica debido a la forma y por lo tanto aumenta la probabilidad de que se forme efecto corona de intensidad tal que dé lugar a un trazador o guía ascendente. (figura 7.2). Ejemplos de esos puntos pueden ser bordes, esquinas, puntas, caños, parapetos, objetos salientes, conductores adosados y árboles.

Identificación de Captores Naturales.

Antes de colocar pararrayos se recomienda identificar los llamados captosres naturales. Son objetos pertenecientes a la estructura a proteger, que cumplen lo descrito en el punto anterior, pero que además sean

- Metálicos, buenos conductores eléctricos.
- Fáciles de conectar a conductores de bajada adecuados para conducir a tierra la corriente de bajada.
- Robustos, en el sentido de que soporten el impacto del rayo de mayor capacidad de causar daños previsto en el diseño, sin que se altere su función primaria, (mecánica, eléctrica) ni afecte la continuidad de servicios.

Los captosres naturales pueden por lo tanto consistir en elementos metálicos tales como caños, torres, parapetos, barandas, techos, revestimientos

Class of LPS	Material	Thickness ^a <i>t</i> mm	Thickness ^b <i>t'</i> mm
I to IV	Lead	–	2,0
	Steel (stainless, galvanized)	4	0,5
	Titanium	4	0,5
	Copper	5	0,5
	Aluminium	7	0,65
	Zinc	–	0,7

^a *t* prevents puncture.

^b *t'* only for metal sheets if it is not important to prevent puncture, hot spot or ignition problems.

Figura 7.7: Espesores recomendados de metales para impacto directo (Norma IEC 62305 -3).

Material	Espesor mm
Acero	4
Cobre	5
Aluminio	7

Figura 7.8: Espesores recomendados de metales para impacto directo (Norma IEC 62305 -3) donde no es admisible la perforación del material.

metálicos y elementos similares, que cumplan con determinadas especificaciones en cuanto a espesor o diámetro del metal constitutivo. Se debe tener en cuenta además los pares galvánicos que se forman al conectar estos elementos al sistema de conductores de bajada a efectos de evitar o mitigar la corrosión. Los espesores típicos requeridos según el metal se encuentran en diversas normas. Las tablas 7.7 y 7.8 corresponden a la norma 62305-3.

Captors Adicionales.

Después de incorporar al diseño los captors naturales (puede no haber ninguno) la protección de las zonas expuestas se realiza instalando elementos metálicos llamados captors adicionales. El pararrayos vertical es un tipo de captor adicional. La protección obtenida es la ilustrada en la figura 7.4.

Los captosres adicionales pueden ser implementados por cualquier combinación de los siguientes elementos:

1. Líneas de guardia (ya tratadas en sistemas de protección aislados de la estructura).
2. Varillas o vástagos verticales.
3. Mallas de conductores adosados.

Las líneas de guardia (catenary wires) fueron presentadas en el punto 7.2.3.

Varillas o vástagos verticales.

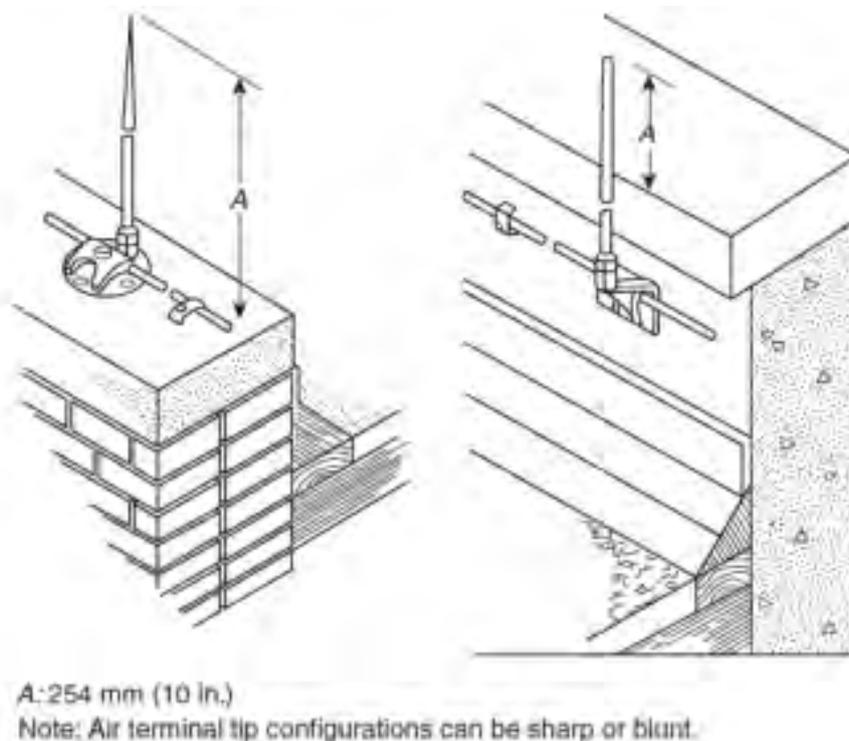


Figura 7.9: Captosres verticales según la norma NFPA780. La altura A es típicamente 60 cm.

La figura 7.4 muestra el principio de protección con elementos de este tipo. Consisten en varillas de 10 a 15 mm de diámetro, de altura compatible con sus características mecánicas. En general para alturas mayores a unos 60 cm - 1 m se colocan sobre un soporte. No se especifican alturas, ya que es mucho más importante la ubicación y el número que la altura.

La terminación en punta no es necesaria, y hay evidencia experimental con sustento teórico que muestra que es más bien contraproducente. La norma NFPA780 de Estados Unidos indica pararrayos según la figura 7.9, de 60 cm de altura y punta que puede ser afilada o roma.

Empresas que suministran materias para protección según norma IEC 62305 -3 ofrecen varillas para instalación vertical (air terminals) de 1 m de largo y 10 mm de diámetro. Si se requiere más altura ofrecen soportes tales que el captor completo queda como máximo con 5 m de altura. La punta es roma. Las puntas múltiples no cumplen ninguna función, salvo quizás facilitar su identificación como captor.

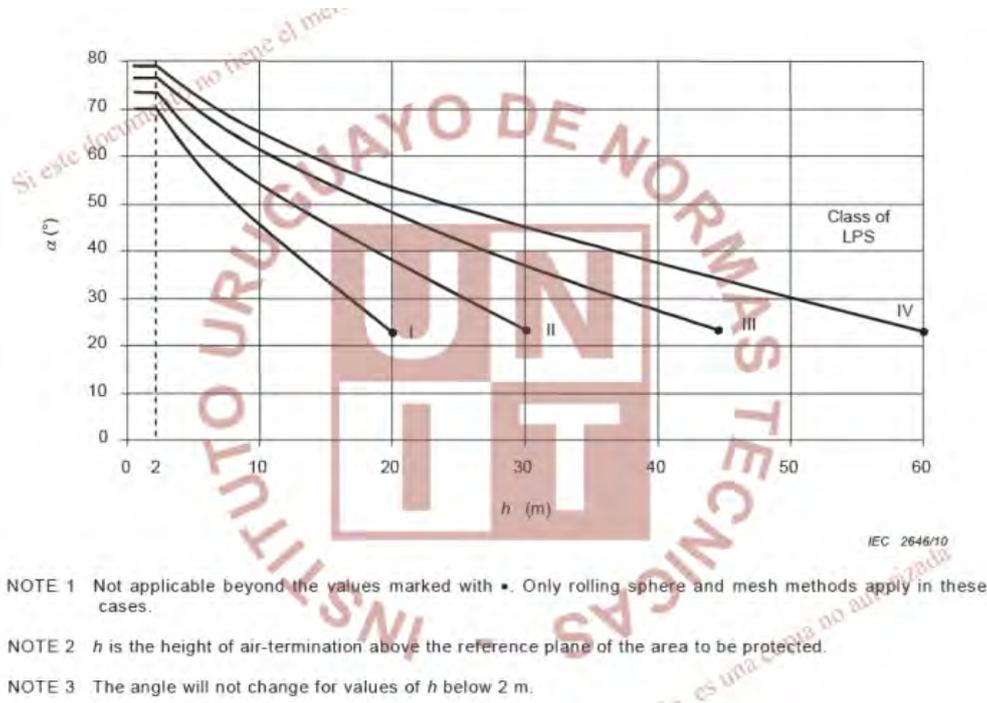


Figura 7.11: Ángulo de protección en función de la altura para distintos niveles de protección. El cono es aplicable hasta donde están dibujadas las curvas.

de protección es entonces el que forma el pararrayos con la generatriz del cono. En la práctica se usaba (y suele usarse) un ángulo de 45° . Para niveles de protección altos correspondería un ángulo menor. La idea es que lo que queda dentro del cono está protegido.

El método del cono es más fácil que el de la esfera a efectos de ubicar los pararrayos, y puede emplearse en la medida de que el resultado sea una aproximación razonable al de la aplicación de la esfera, o que es posible solamente a alturas bajas.

Sin embargo es muy frecuente que se use fuera de su rango de validez, aumentando la altura para aumentar la zona de protección. Es común ver un pararrayos en el medio de la azotea de un edificio de 10 pisos. Una simple evaluación visual teniendo en cuenta la distancia de impacto (esfera rodante) muestra que los bordes de la azotea y la parte superior de las paredes no están protegidos y tienen tanta probabilidad de captar el rayo como el pararrayos. Se ve además que un aumento de la altura del pararrayos no corrige esta situación.

Teniendo en cuenta la sencillez de su aplicación y lo extendido de su uso,

las normas indican cómo usar el cono en forma adecuada, partiendo de la esfera rodante.

La figura 7.10, tomada de la norma mexicana NMX-J-549-ANCE-2005-A, ilustra la aproximación del cono al criterio de la esfera rodante.

El criterio de aproximación usado por las normas citadas es el del ángulo de áreas equivalentes. Dada una esfera apoyada en el piso o nivel de referencia y en la punta del objeto que crea la zona de protección consideramos el arco de circunferencia correspondiente al plano perpendicular al piso al que pertenece el pararrayos. Se traza la recta AE (figura 7.10) con un ángulo α que corta a la circunferencia en un punto P tal que el área de la zona entre la circunferencia y la recta entre A y el punto de corte P sea igual al área de la zona PEB limitada por la circunferencia, la recta y el piso.

Está claro que la aplicabilidad depende de la existencia de esas áreas. A mayor protección, menor radio de la esfera y menor altura del pararrayos para el cual se puede aplicar el método.

La figura 7.11, de la norma IEC 62305 -3, muestra el ángulo del cono -según el criterio de áreas iguales- en función de la altura y el nivel de protección y además el rango de alturas para la aplicabilidad del método.

Mallas de conductores contra la estructura.

Una alternativa para proteger grandes superficies planas las constituyen las mallas de conductores adosados e interconectados. La tabla 7.1 indica las dimensiones de la malla (distancias entre conductores) para los distintos niveles de protección. Los conductores deben ser lo suficientemente robustos como para recibir el impacto y conducir la corriente así como para ser instalados a la intemperie. Pueden ser cables o conductores cilíndricos de 8 a 12 mm de diámetro dependiendo del material así como cintas de 2 x 50 mm.

En la parte 3.E (cambiar a 3.5) se planteó si un conductor adosado puede proteger ya que la esfera rodante puede tocar la estructura dentro de las mallas. Se supone que en una superficie plana un alambre conductor de la malla va a emitir un trazador con más probabilidad que un plano no conductor. En principio un plano, aún con baja conductividad puede formar corona si el campo es lo suficientemente intenso e inhomogéneo como el producido por la punta de la guía escalonada. Para esto dicha punta debería acercarse más que a un objeto con cierta curvatura.

Este hecho se cuantifica en la fórmula para la distancia de impacto a un plano propuesta por los investigadores Cooray, Rakov y Theethayi [29]. La distancia de impacto en ese caso vale:

$$r_s = 1,9.I^{0,90} \quad (7.4)$$

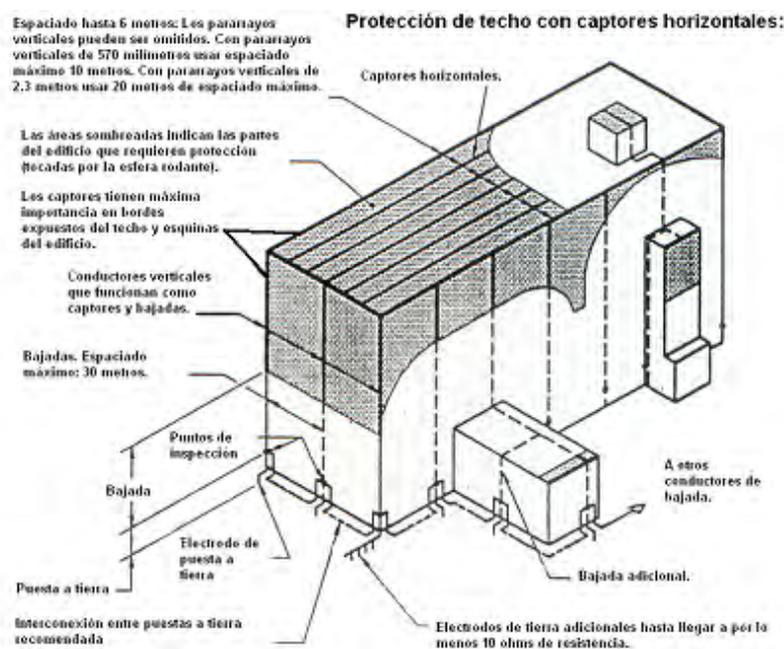


Figura 7.12: Protección de techo mediante malla conductores y captos horizontales (tomado de la norma australiana AS 1768). Incluye el mismo método para protección de caras verticales expuestas.

Para un rayo de 10 kA, la distancia de impacto según la fórmula de la IEC es de 45 metros.

Según la fórmula (7.4) es de 15 metros.

Más allá de las necesarias verificaciones experimentales o por medida de campo, las suposiciones en que se basa el método de las mallas parece razonable. La figura 7.12 muestra esquemáticamente una protección por malla.

Protección de fachadas y elementos verticales.

Las figuras 7.9 y 7.12 muestran que para estructuras altas (altura del orden de la distancia de impacto elegida) la esfera rodante entra en contacto con paredes verticales, que por lo tanto están expuestas al impacto. Las investigaciones muestran que la probabilidad de un impacto de bajo pico de corriente (esfera chica) en los lados verticales de una estructura de menos de 60 m de altura es muy baja, por lo tanto no se considera necesario proteger esas zonas contra impacto directo. Por encima de 60 metros hay que proteger esas zonas, sobre todo salientes, balcones, esquinas, antenas. Lo más corriente es utilizar elementos metálicos ya existentes, como revestimientos, parapetos



Fig. 4.32. Photograph of a lightning strike to a TV tower guy wire showing an abrupt change in channel shape near the attachment point. Taken from Krider and Alejandro (1983).

Figura 7.13: Impacto lateral en una estructura alta. Se ven los arcos en la cadena de aisladores.

metálicos, ventanas. Las antenas pueden protegerse con captores adicionales (pueden verse en algunas antenas de telefonía celular). Si no se dispone de esos elementos se usa una malla como la de techos; y los conductores de bajada externos se dimensionan como captores. En torres metálicas las riostras con continuidad son captores naturales. Las antenas son captores naturales pero a su vez elementos activos, por lo tanto sus conductores deben ser objeto de medidas especiales de protección.

La figura 7.13 muestra un impacto lateral en una torre de TV con aisladores en las riostras.

Materiales para implementación de captores.

Las tablas 7.14 y 7.15, tomadas de la norma IEC 62305-3, indica los materiales que se usan en captores y otros elementos de las protecciones, su uso y dimensiones.

Para la elección del material se debe tener en cuenta la resistencia a la corrosión, precio, exposición al robo así como otros factores. La conductividad eléctrica no es un factor a tener en cuenta pero en general no es determinante. Las caídas de tensión dependen fundamentalmente de la forma, ya que son esencialmente inductivas. La conductividad incide sí en el calentamiento por conducción, el cual se puede resolver aumentando la sección de los conductores ligeramente si por ejemplo se decide usar acero galvanizado en lugar de cobre.

7.2.5. Resumen.

El sistema convencional de captores que responde a las características físicas comprobadas de la descarga atmosférica se basan en el concepto de distancia de impacto, parámetro que depende de las características del rayo. Se trata entonces de implementar protecciones que ofrezcan puntos de impacto definidos y controlados, conectados a bajadas y puestas a tierra adecuadas. Esta implementación puede ser trabajosa; aparecen entonces propuestas en el mercado que ofrecen dispositivos eventualmente capaces de modificar el comportamiento natural del rayo. Son los llamados sistemas no convencionales, que se analizan en lo que sigue.

Material	Use			Corrosion		
	In open air	In earth	In concrete	Resistance	Increased by	May be destroyed by galvanic coupling with
Copper	Solid Stranded	Solid Stranded As coating	Solid Stranded As coating	Good in many environments	Sulphur compounds Organic materials	—
Hot galvanized steel ^{c, d, e}	Solid Stranded ^b	Solid	Solid Stranded ^b	Acceptable in air, in concrete and in benign soil	High chlorides content	Copper
Steel with electro-deposited copper	Solid	Solid	Solid	Good in many environments	Sulphur compounds	
Stainless steel	Solid Stranded	Solid Stranded	Solid Stranded	Good in many environments	High chlorides content	—
Aluminium	Solid Stranded	Unsuitable	Unsuitable	Good in atmospheres containing low concentrations of sulphur and chloride	Alkaline solutions	Copper
Lead ^f	Solid As coating	Solid As coating	Unsuitable	Good in atmosphere with high concentration of sulphates	Acid soils	Copper Stainless steel
<p>^a This table gives general guidance only. In special circumstances more careful corrosion immunity considerations are required (see Annex E).</p> <p>^b Stranded conductors are more vulnerable to corrosion than solid conductors. Stranded conductors are also vulnerable where they enter or exit earth/concrete positions. This is the reason why stranded galvanized steel is not recommended in earth.</p> <p>^c Galvanized steel may be corroded in clay soil or moist soil.</p> <p>^d Galvanized steel in concrete should not extend into the soil due to possible corrosion of the steel just outside the concrete.</p> <p>^e Galvanized steel in contact with reinforcement steel in concrete should not be used in coastal areas where there may be salt in the ground water</p> <p>^f Use of lead in the earth is often banned or restricted due to environmental concerns.</p>						

Figura 7.14: Comportamiento de metales usados en sistemas de protección (Norma IEC 62305 -3).

Table 6 – Material, configuration and minimum cross-sectional area of air-termination conductors, air-termination rods, earth lead-in rods and down-conductors^a

Material	Configuration	Cross-sectional area mm ²
Copper, Tin plated copper	Solid tape	50
	Solid round ^b	50
	Stranded ^b	50
	Solid round ^c	176
Aluminium	Solid tape	70
	Solid round	50
	Stranded	50
Aluminium alloy	Solid tape	50
	Solid round	50
	Stranded	50
	Solid round ^b	176
Copper coated aluminium alloy	Solid round	50
Hot dipped galvanized steel	Solid tape	50
	Solid round	50
	Stranded	50
	Solid round ^c	176
Copper coated steel	Solid round	50
	Solid tape	50
Stainless steel	Solid tape ^d	50
	Solid round ^d	50
	Stranded	70
	Solid round ^c	176

^a Mechanical and electrical characteristics as well as corrosion resistance properties shall meet the requirements of the future IEC 62561 series.

^b 50 mm² (8 mm diameter) may be reduced to 25 mm² in certain applications where mechanical strength is not an essential requirement. Consideration should in this case, be given to reducing the spacing between the fasteners.

^c Applicable for air-termination rods and earth lead-in rods. For air-termination rods where mechanical stress such as wind loading is not critical, a 9,5 mm diameter, 1 m long rod may be used.

^d If thermal and mechanical considerations are important then these values should be increased to 75 mm².

Figura 7.15: Dimensiones de elementos metálicos usados en sistemas de protección (Norma IEC 62305 -3).

7.3. Sistemas no Convencionales. Introducción

Teniendo en cuenta las características del fenómeno y de la protección convencional se analizarán sistemas de protección que hemos llamado no convencionales.

Esos sistemas están comprendidos en una de dos clases [25], [26].

Una clase agrupa esquemas de protección cuyo objetivo es evitar la formación del rayo sobre la estructura modificando las condiciones eléctricas de la nube o de la guía escalonada funcionando como “Eliminadores de rayos”. Estos sistemas han sido comercializados bajo el nombre DAS (Dissipation Array System - Sistema de disipación) y últimamente como CTS (Charge Transfer System - sistema de transferencia de carga).

La otra clase se basa en captosres tipo pararrayos verticales pero equipados con un dispositivo en la punta destinado a aumentar significativamente el área de protección generada en comparación con la que se establece al aplicar el método de la esfera rodante a un pararrayos vertical convencional. Se los conoce como dispositivos ESE (Early Streamer Emission - emisión temprana de trazador). En español se les llama PDC (Pararrayos con Dispositivo de Cebado). A veces aparece la sigla en francés PDA (Paratonnerres à Dispositif d’Amorçage) ya que la mayor parte de estos dispositivos se ha desarrollado en Francia.

Ambas propuestas resultan naturalmente atractivas para el responsable del diseño de la instalación. En particular los dispositivos ESE permitirían proteger una instalación mediante unos pocos pararrayos de baja altura, simplificando el estudio y el diseño de la protección, particularmente en estructuras complejas ya existentes y no protegidas. En lo que sigue se presenta para ambas clases el funcionamiento pretendido, una síntesis del análisis de la teoría, y resultados de estudios, experimentos y observaciones realizados por usuarios y por la comunidad científica internacional.

7.4. Sistemas de Disipación o de Transferencia de Carga (sistemas CTS - “Charge Transfer Systems”)

Con estos dispositivos se intenta cambiar las condiciones eléctricas de la atmósfera sobre y en las proximidades de la zona a proteger de manera de evitar el rayo o por lo menos reducir la probabilidad de su formación. Las descripciones de su funcionamiento dadas por los fabricantes se basan en el

efecto corona ya mencionado que se produce en irregularidades del terreno y estructuras bajo un campo eléctrico como el que se produce bajo una nube durante una tormenta eléctrica, y en la correspondiente emisión o absorción de cargas por parte de objetos en punta sometidos a dicho campo eléctrico. Su construcción emplea conductores de bajo diámetro, del orden de algunos milímetros, cuyo extremo puede considerarse una punta. Estos conductores son comunes a todas las construcciones propuestas, y de aquí en adelante nos referiremos a esos conductores como "puntas".

7.4.1. Descargas en Puntas (Point Discharge) o Efecto Corona

Se entiende por efecto corona o descarga en puntas [2], [30] una descarga eléctrica debida a la ionización del aire en una punta o lugar en que un campo eléctrico existente está fuertemente intensificado en forma local por factores geométricos. Su intensidad es menor que la de una chispa eléctrica y puede mantenerse en estado aproximadamente estacionario confinada en un volumen alrededor de la punta.

Si en un campo eléctrico uniforme sobre un plano conductor colocamos una punta conductora conectada al plano, se produce un aumento de la intensidad del campo en la punta debido a que la dirección del campo debe ser perpendicular al conductor.

La representación de la magnitud del campo eléctrico por la densidad de líneas de fuerza permite visualizar su intensificación en la punta y la dependencia de dicha intensificación de la curvatura de la punta (figura 7.2). Si la intensificación es suficiente el campo actúa sobre electrones libres (siempre presentes debido a rayos cósmicos y radiactividad natural) acelerándolos de manera que adquieran suficiente energía cinética como para ionizar la molécula o partícula atmosférica con la que choquen. De esa forma se generan nuevos iones que son acelerados produciéndose un efecto de avalancha. Si la punta y el plano están cargados positivamente (lo usual durante una tormenta eléctrica) parte de los electrones generados fluirán hacia la punta produciendo una corriente al plano -que puede ser la tierra- y los iones positivos se alejarán de la punta. Los iones positivos forman una carga espacial que hace disminuir el campo eléctrico alrededor de la punta, inhibiendo la formación de nuevos iones. Se puede llegar entonces a un estado estacionario definido por un volumen en el que se produce la descarga corona, una corriente que fluye por el conductor en punta y por la velocidad de recombinación de las moléculas ionizadas. El volumen y la corriente dependen del campo original en ausencia de la punta en la zona circundante. Si este campo aumenta, por

ejemplo en una tormenta eléctrica con la aproximación de una guía descendente, la descarga corona pierde su condición estacionaria y puede convertirse en un trazador ascendente y eventualmente formar un rayo de retorno. Los fuegos de San Telmo (St Elmo's fire) son una forma de corona producida en mástiles durante una tormenta eléctrica.

El fenómeno puede ser alterado en alguna medida por el viento que arrastra los iones.

La emisión de cargas por puntas bajo la acción del campo eléctrico atmosférico fue descrita por Franklin ya en 1749, antes de la invención del pararrayos [31].

7.4.2. Estructura de un CTS y Acción Buscada

La idea básica detrás de los CTS es la utilización de las cargas eléctricas que salen de conductores en punta en el campo eléctrico en condiciones de tormenta. Se intenta formar una carga espacial de características tales que la hagan capaz de modificar las condiciones eléctricas de la atmósfera al punto de impedir la formación de un rayo entre la nube y la estructura a proteger. Se parte de la suposición de que esto es posible si el sistema CTS libera una cantidad suficientemente grande de carga eléctrica por unidad de tiempo, mediante un dispositivo provisto de una cantidad adecuada de puntas, ubicado sobre el área a proteger y conectado a una toma de tierra de muy baja impedancia y de distribución especial.

En los últimos años han aparecido otras propuestas, como dispositivos sin puntas que generan supuestamente iones en su interior y los liberan a la atmósfera, o aparatos "semiconductores" que pretenden limitar la corriente del rayo [32]. Al momento no se dispone de material con argumentación sobre el funcionamiento de estos dos últimos tipos, solamente material comercial [33]. Por lo tanto el presente documento tratará solamente los sistemas basados en emisión desde puntas, por ser los más difundidos y estudiados. En realidad las conclusiones pueden extenderse a cualquier otro mecanismo de emisión de cargas a la atmósfera.

7.4.3. Antecedentes

El análisis de los mecanismos de funcionamiento propuestos requiere una presentación histórica, ya que los mismos han ido cambiando al ritmo de consecutivas refutaciones provenientes tanto de la comunidad científica como de la evidencia experimental y de la operación real.

El primero en especular con la posibilidad de impedir el rayo mediante la emisión - absorción de cargas en una punta conductora fue el propio Fran-

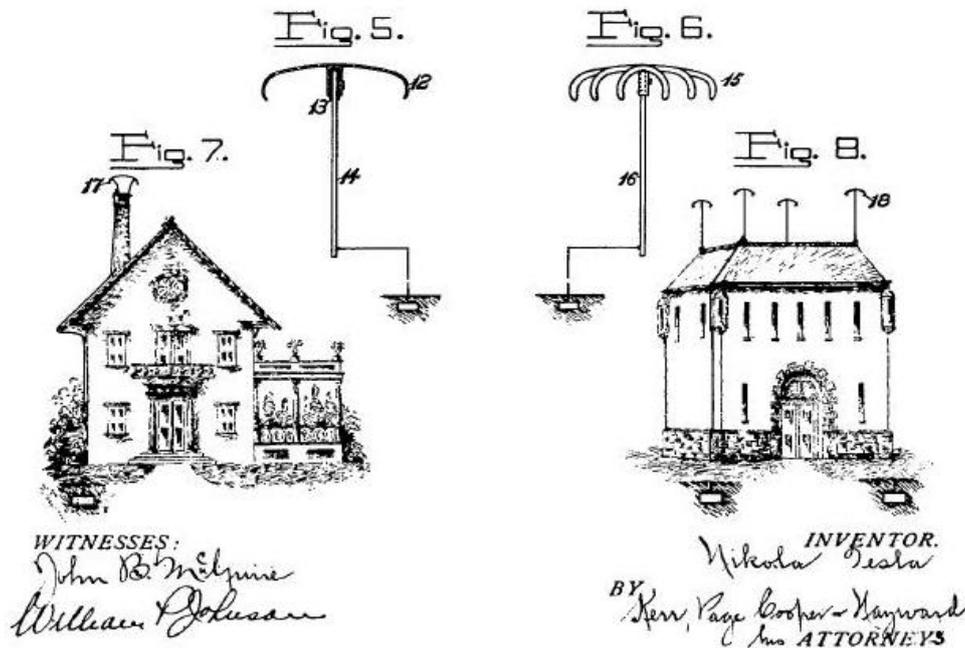


Figura 7.16: Dibujos de Tesla tomados de su patente "Lightning Protector", N° 1,266,175. 14 de Mayo 1918.

klin, en 1752. Su idea original para la protección contra rayos consistía en la "descarga silenciosa de la nube" mediante la corriente de un conductor terminado en punta hacia arriba y enterrado en tierra en el otro extremo [1]. Más adelante sostuvo un doble funcionamiento para su pararrayos; si no podía prevenir el rayo, suministraba un punto preferente de impacto y conducía la corriente a tierra en forma segura. Ya en 1753 Lomonosov sugería que ésta última era la forma en que el pararrayos realmente funcionaba [1] lo que después fue corroborado con múltiples observaciones al difundirse rápidamente la aplicación del dispositivo.

En 1754, mientras Franklin estaba experimentando, surge la primera propuesta de uso de múltiples puntas para generar carga suficiente como para neutralizar la nube e impedir el rayo. El checo Procop Divisch construyó una "Máquina meteorológica". Las descripciones [25], [26] hacen referencia a una estructura con de 216 puntas puestas a tierra instaladas en un marco de madera a 7.4 m de altura. Más tarde, en 1775, el físico alemán Lichtenberg - conocido por las llamadas "figuras de Lichtenberg" en las cuales se basó una de las primeras formas de estimar la corriente de un rayo - propuso impedir la caída de rayos sobre una casa colocando un hilo de guardia de alambre de púas [1]. El hilo de guardia como pararrayos había sido propuesto en esa

época por Franklin. La experiencia fue mostrando que la eficacia de la protección residía en el funcionamiento de la punta del pararrayos como punto preferencial de impacto desde donde se podía conducir la corriente a tierra en forma controlada. Los esfuerzos entonces se concentraron en la determinación de las áreas de protección del pararrayos convencional, tarea en la cual participaron conocidos físicos del siglo XIX como Gay-Lussac en 1823 [1].

El hito siguiente en los esfuerzos por impedir el rayo lo constituye la patente que en 1918 registró Nikola Tesla, considerado en Estados Unidos como el padre de la corriente alterna polifásica [34]. Según la patente de Tesla las medidas habían probado que la carga liberada por muchas puntas era insignificante comparada con la carga inducida en el terreno por la tormenta eléctrica y que las puntas “Franklin” provocaban una ionización que favorecía la formación del rayo. La propuesta de Tesla (figura 7.16) consistía en un dispositivo en forma de sombrilla, que por su forma no intensificaba el campo en sus proximidades y por lo tanto hacía más difícil la ionización previa a la formación de una guía ascendente. Una estructura cubierta por esas sombrillas no presentaría ante el rayo puntos para la formación preferencial de la guía ascendente ya que los bordes y puntas estarían cubiertos, y por lo tanto disminuiría la probabilidad de su formación. En caso de formarse el rayo el dispositivo funcionaría como una protección convencional. Si bien su implementación práctica es muy difícil por razones mecánicas e incluso estéticas, esta propuesta tiene interés por su relación con el funcionamiento efectivo de los dispositivos actuales, como se verá.

En 1930 se otorgó a J. M. Cage, de Los Ángeles, una patente para un sistema compuesto por alambres con puntas suspendidos de una torre de acero, destinado a proteger tanques de petróleo.

7.4.4. Sistemas Comercializados Actualmente

Es a partir de 1971 que los sistemas destinados a prevenir o impedir los rayos empiezan a ser fabricados y comercializados. Los nombres genéricos han ido cambiando, siendo los más usuales Sistemas Disipativos (DAS - Dissipative Array Systems) primero y Sistemas de Transferencia de Carga (CTS - Charge transfer Systems) en la actualidad.

El desarrollo, la fabricación y comercialización han sido realizados por prácticamente una sola empresa llamada “Lightning Eliminators and Consultants” (LEC), que comenzó sus actividades en 1971. Si bien han surgido otras empresas la situación de predominio subsiste, y su cofundador y responsable, R. B. Carpenter, fue el referente en la defensa del sistema y en la búsqueda de su justificación teórica y reconocimiento como protección efectiva. LEC está representada en el comité técnico de la norma NFPA 780,

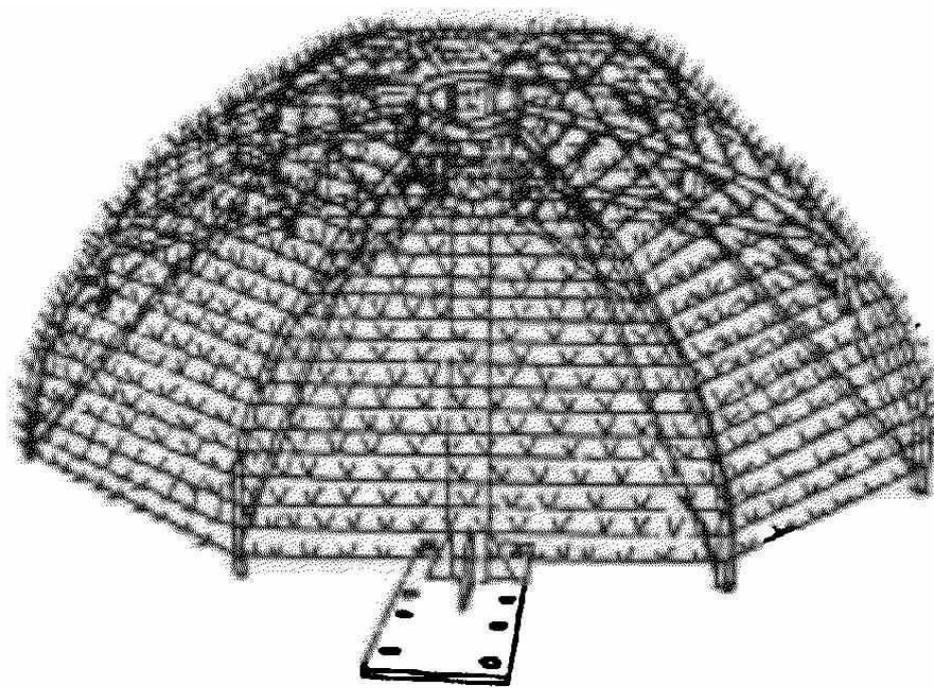


Figura 7.17: Disipador en forma de paraguas. Cortesía de Mousa [35].

que trata de la instalación de sistemas de protección convencionales [15].

La figura 7.17 muestra la estructura de un dispositivo de transferencia de carga típico.

Se compone de tres elementos básicos [25], [35], [36]:

El “ionizador” o “disipador” que consiste en una armazón en forma de paraguas, usualmente de algunos metros de diámetro y envuelta en alambre con puntas, que se instala en una torre por encima de la estructura a proteger. Las dimensiones varían. Una estructura típica, como la usada por la NASA en uno de sus ensayos [35] puede tener 6 m de diámetro y 300 m de alambre con puntas (4 cada 7 cm) de 2 cm de largo. Otras implementaciones usan puntas más espaciadas y más largas.

El “colector de corriente o carga de tierra”, un conductor que rodea la zona a proteger y que conecta electrodos de puesta a tierra dispuestos en cerco cada 10 m aproximadamente, formando un sistema de puesta a tierra de muy baja impedancia. En terrenos de alta resistividad los fabricantes recomiendan electrodos químicos.

Los “conductores de servicio” que conectan el ionizador al sistema de



Figura 7.18: Disipador en forma de paraguas para protección de una instalación de gas. Cortesía de Hartono [32].

tierras.

Además del conjunto de elementos mencionados, que eléctricamente no difiere de una buena instalación convencional, se recomienda la instalación de supresores de sobretensiones en los conductores eléctricos vinculados al equipamiento a proteger.

La figura 7.18 muestra una instalación típica. Otro tipo de ionizador es el esférico (figuras 7.19 y 7.20) o en forma de plumero (figura 7.21). De menores dimensiones y número de puntas, son comercializados como soluciones híbridas que “eliminan la mayoría de los rayos y capturan los restantes” [35]. Otras empresas han presentado distintas implementaciones, con ionizadores cilíndricos o en forma de anillo con las puntas dispuestas radialmente, así como líneas de guardia o riostras de torres con puntas, en definitiva iguales a la propuesta de Lichtenberg de 1775.

El funcionamiento pretendido del sistema se muestra en la figura 7.22. Debajo de una nube de tormenta cargada negativamente en su base, la tierra adquiere una carga positiva superficial, y el campo eléctrico es de algunos kilovoltios por metro, intensificándose en las irregularidades de las cuales puede partir un líder ascendente si el campo se intensifica ante la presencia de una guía escalonada.

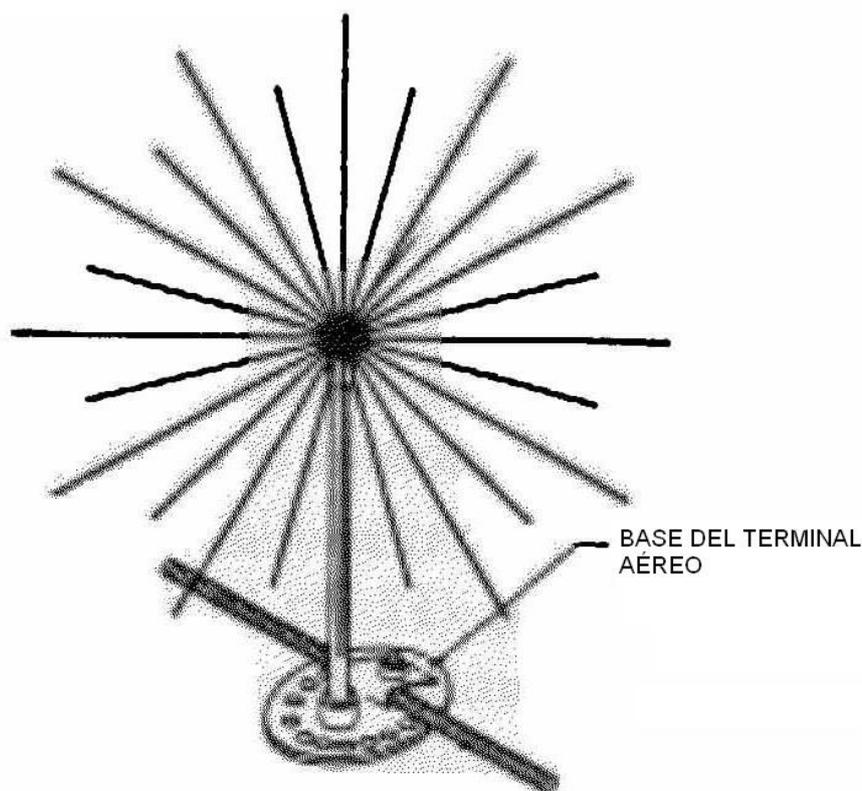


Figura 7.19: Disipador esférico. Cortesía de Mousa [35].

La idea es que, al colocar el CTS, las puntas del ionizador bajo efecto del campo eléctrico generan por efecto de descarga en punta iones cargados positivamente, que forman una nube de carga espacial positiva de magnitud tal -en carga y extensión- que es capaz de interactuar con la nube o las descargas impidiendo la formación del rayo. De paso se afirma [25], [36], [37] que esa carga proviene de la zona "protegida" que queda dentro del colector de corriente o carga, que queda debajo de la nube de carga positiva, con carga superficial despreciable. Una zona de esas características no sería capaz de iniciar un trazador ascendente y estaría por lo tanto protegida.



Figura 7.20: Disipadores esféricos. Cortesía de Hartono [32].



Figura 7.21: Limitadores de corriente en una refinería. Cortesía de Hartono [32].

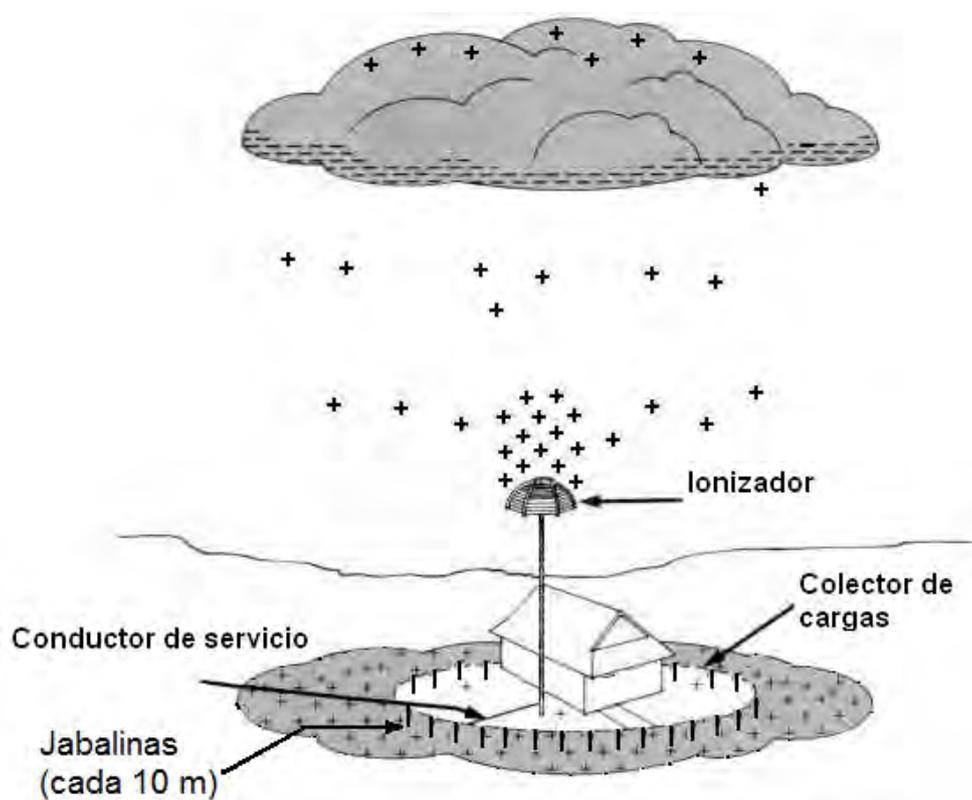


Figura 7.22: Funcionamiento pretendido de un CTS. Adaptado de Zipse 1994 [36].

7.4.5. Teorías de Funcionamiento

Las teorías o más bien conjeturas propuestas del mecanismo de protección están basadas en la magnitud esperable de la carga liberada y en el carácter de la interacción de esa carga con los demás actores de la descarga atmosférica. Las propuestas varían, se mezclan con argumentos de venta destinados al cliente no informado sobre electricidad atmosférica, y en su mayor parte carecen de base cuantitativa, justificada o no [1], [25], [38]. En lo que sigue se presentan las teorías más significativas, siguiendo su evolución histórica.

Descarga de la Nube

El primer mecanismo de acción sugerido fue el de la descarga de la nube. Los iones positivos generados por las puntas neutralizarían la carga negativa de la nube en proporción suficiente como para impedir la formación de un rayo sobre la zona protegida. Por supuesto que esto implica que los iones son capaces de llegar en cantidad y velocidad adecuada a la nube, lo cual implica que decenas de Coulombs de carga deben subir varios kilómetros en menos de 10 s, que es el tiempo estimado de reconstitución de la carga en la célula de tormenta eléctrica. La disponibilidad de iones está limitada por la intensidad de descarga de las puntas. Para explicar este mecanismo, esta intensidad se asumió como del orden de $40 \mu A$.

Aún admitiendo este valor, y admitiendo además que la corriente de un sistema de puntas es la suma de las corrientes de las puntas individuales, cosa que como se verá no es cierta, se llegaría a una generación de $0,6 \frac{C}{s}$ por parte del ionizador descrito [35]. Estos iones positivos generados por las puntas no son electrones, sino moléculas de aire y partículas pesadas que se han cargado al perder electrones hacia las puntas por efecto del campo y tienen por lo tanto movilidad mucho más baja que los electrones, estimándose su velocidad en el orden de $10 \frac{m}{s}$ [39]. Una nube de tormenta puede generar en un minuto varias descargas de decenas de Coulombs, que duran unos 100 ms cada una y se extienden varios kilómetros. En ese tiempo el ionizador teóricamente lograría generar 36 C extendidos unos 600 m en ausencia total de viento. Aún este cálculo realizado con valores exageradamente optimistas muestra la imposibilidad de neutralizar ni siquiera parte de la carga de la nube.

La carga emitida realmente es mucho menor, y los propios defensores de estos sistemas han ya admitido hace tiempo la imposibilidad de que la misma afecte la nube [40].

Apantallamiento por Carga Espacial Generada

Esta explicación del modo de operación se basa en que, si bien las cargas no llegan a la nube, son efectivamente generadas por las puntas formando una carga espacial sobre la zona a proteger (figura 7.22) Dicha zona, presentada como la zona delimitada por el sistema de tierras llamado colector de carga, quedaría libre de cargas positivas inducidas por la nube. Adicionalmente la carga espacial generada formaría una pantalla protectora que actuaría como una “jaula de Faraday” según artículo de Carpenter et al. [38]. En esta referencia no hay argumentos cuantitativos asociados con esta explicación.

Habría dos mecanismos de protección derivados de este modo de operación. El primero está relacionado con la ausencia de cargas positivas en la zona protegida, retiradas por el colector. El campo eléctrico entonces sería demasiado bajo como para que de los objetos de esa zona se pueda iniciar un trazador ascendente que vaya al encuentro de una guía descendente para formar el rayo. El rayo se formaría entonces con un trazador iniciado desde fuera de la zona. Este presunto mecanismo parece ser la justificación de los argumentos de los vendedores a fines de la década del 90. Entonces afirmaban que no se podía impedir el rayo pero sí que cayera en la zona protegida (protección más bien poco solidaria con los vecinos...).

Si se compara la conductividad del aire con la de la tierra se ve que la capacidad de suministrar cargas positivas de la tierra es mucho mayor que la capacidad de disiparlas de las puntas [41] por acción del campo. La zona vacía de cargas por acción del colector carece de toda base física, ya que toda la zona es el mismo conductor.

El segundo está relacionado con la carga espacial formada sobre la zona protegida con las cargas retiradas por el colector, zona que podría actuar como pantalla para que no se formen nuevas cargas positivas en la tierra por inducción de la nube, lo cual no es sustentable dada la cantidad de carga positiva inducida en toda la región y la conductividad de la tierra.

Los árboles y hojas de pasto, a pesar de su baja conductividad, también generan descarga corona bajo la acción del campo eléctrico de una nube de tormenta, que muchas veces es visible [25], [36]. La corriente generada por los millones de agujas de un bosque de coníferas excede largamente la de un ionizador, sin lograr impedir los rayos, que incluso son responsables de la existencia de ciertas especies. Se ha observado que las semillas de sequoia gigante germinan en ceniza y no en pinocha, por ejemplo.

Medidas realizadas muestran que una palmera puede generar 4 veces más corriente corona que una punta metálica a una altura similar.

Se ha llegado a plantear la neutralización de la guía escalonada por parte de la carga espacial como mecanismo de protección. Como se le ha dado

una cierta base cuantitativa e incluso se ha presentado como fundamento de un borrador de norma IEEE para CTS, que a su vez ha sido usado como argumento de venta, se trata este mecanismo con cierto detalle.

Neutralización de la Guía Escalonada Descendente

Esta explicación del modo de operación fue descrita por Zipse [40]. Se supone que el sistema CTS es capaz de crear una zona de carga espacial de magnitud suficiente como para atraer a la guía escalonada descendente, que generalmente es una carga negativa, y neutralizarla total o parcialmente. Se admite que no todas las guías pueden ser neutralizadas. En caso de formarse un rayo, éste se formaría con el ionizador, que entonces actuaría como una protección convencional.

La viabilidad de este modo de operación dependería de la cantidad de puntas del ionizador y de la corriente corona que es capaz de emitir cada punta. Se asume además que el mínimo tiempo de reconstitución de la carga en la nube como para generar un nuevo rayo es de 10 s [1].

Según se desprende del artículo de Zipse y del borrador de la norma que se pretendió hacer aprobar con estos fundamentos, la idea básica es que el número de puntas del ionizador o disipador está dado por la expresión

$$N = \frac{k \cdot q}{I_p \cdot t} \quad (7.5)$$

donde N es el número de puntas requerido para el ionizador, I_p es la corriente corona que genera una punta en el campo eléctrico generado por una nube de tormenta, que puede estar entre $10 \frac{kV}{m}$ y $50 \frac{kV}{m}$, t es el tiempo de regeneración de carga, los 10 s ya mencionados, q es la carga espacial necesaria para neutralizar la guía y k es una eficiencia no definida. En otras versiones la k no aparece [39].

El valor q se toma aparentemente igual a 5 C [25]. Zipse relaciona el valor q con la carga total de la nube mediante la fórmula

$$q = \frac{Q \cdot a}{A} \quad (7.6)$$

donde a es el área a proteger, A parece ser el área donde una celda de tormenta induce carga y Q la carga negativa de la nube.

El valor I_p que se toma para esta propuesta es del orden de $60 \mu A$ [40].

Para disipar 5 C en 10 s se necesitaría (con $k = 1$)

$$N = \frac{5C}{60 \times 10^{-6} A \cdot 10s}$$

Basándose en esta pretendida forma de operación Zipse [36], [40] presentó una solicitud de norma de CTS a la IEEE, quien la recibió para estudio con la denominación Draft IEEE P1576/02.01 2001.

La existencia de este borrador en trámite constituyó un nuevo argumento de venta, ya que la existencia de una norma sugiere legitimidad técnica.

Tanto la teoría de la emisión corona y temas afines como los datos experimentales muestran que no es posible neutralizar la guía escalonada descendente mediante estos dispositivos. Hay tres razones básicas [39], [42].

En primer lugar, la emisión de iones positivos por efecto corona en objetos con puntas o irregularidades salientes requiere un campo del orden de $1000 \frac{V}{m}$. El campo a nivel del suelo originado por una nube de tormenta eléctrica alcanza valores típicos de 2000 a 10000 $\frac{V}{m}$ [39], [40]. Como ya se dijo, los iones positivos son en general moléculas de aire ionizadas que se mueven mucho más lentamente que los electrones debido a las colisiones con otras moléculas siendo su velocidad típica de unos $10 \frac{m}{s}$. Por lo tanto la emisión de iones por efecto del campo se mueve unos 100 m en los 10 s que en promedio tarda la carga eléctrica en una nube en recomponerse luego de una descarga. La eventual carga espacial generada por efecto corona en un sistema de puntas quedaría confinada en ese tiempo a una zona unos 100 m por encima del CTS. La carga emitida de esta forma reduce el campo eléctrico a nivel del suelo. Se puede hacer un cálculo del valor de una carga eléctrica positiva tal que desde una distancia de 100 m reduzca el campo eléctrico a nivel del CTS a un valor menor que $1000 \frac{V}{m}$, valor necesario para iniciar la corriente corona. Si el campo eléctrico generado por la nube es de $-5000 \frac{V}{m}$ el campo necesario es de $4000 \frac{V}{m}$. Aplicando la fórmula del campo para una carga puntual se deduce que son necesarios solamente 4×10^{-3} C para que el efecto corona se inhiba fuertemente. Por lo tanto no es posible para el CTS emitir los 2,5 C que se dicen necesarios para neutralizar una guía escalonada, ya que su baja velocidad mantiene la carga confinada a distancias mucho menores que la recorrida por dicha guía [39]. El viento puede llevarse las cargas, pero ya no estarían para neutralizar la guía.

En segundo lugar, una punta en el campo eléctrico producido al nivel del suelo por una tormenta emite a lo sumo $10 \mu A$, 6 veces menos que lo supuesto por Zipse en el artículo en el cual justifica la presentación de su proyecto de norma para el uso de CTS [40].

En tercer lugar la fórmula (7.5) no es correcta, ya que la emisión producida por múltiples puntas próximas no es la suma de los valores de la emisión de cada punta como si estuviera sola. La emisión de cargas positivas por parte de una punta apantalla el campo negativo de la nube y hace que disminuya la cantidad de carga emitida por dicha punta y sus puntas vecinas. Medidas realizadas, descritas en [39] muestran que un conjunto de 80 puntas emite

una corriente corona del orden de 2 veces el valor de la corriente emitida por una punta aislada.

La aprobación del borrador de la norma PAR 1576 presentado por Zipse y otros fue descartada en 2004 por la comisión de la IEEE encargada de estudiarla debido a que los proponentes no presentaron la fundamentación física que habían prometido, consistente esencialmente en artículos de los autores de las referencias [43], [44].

Limitación de la Cantidad de Rayos Iniciados desde Estructuras y Eliminación Parcial de Rayos

En los últimos años la argumentación de los promotores y vendedores de CTS ha cambiado, fundamentalmente debido al acuerdo unánime de la comunidad científica internacional sobre la imposibilidad de evitar el impacto de un rayo mediante dispositivos generadores de carga. El principal vendedor (LEC) contrató científicos rusos especialistas en descargas eléctricas y física de plasma para elaborar una teoría científicamente sustentable sobre el funcionamiento de sus instalaciones. En base a los estudios realizados por estos científicos se admite ahora que las descargas pueden hacer impacto en estructuras protegidas por CTS pero se afirma que el número de impactos es mucho menor y que en todo caso el CTS es capaz de actuar como un pararrayos convencional conduciendo la corriente a tierra en forma segura. En particular se afirma que la generación de iones por parte del CTS genera una capa uniforme sobre el mismo que inhibe la formación de guías originadas desde la estructura (rayos iniciados desde abajo). Este tipo de protección tendría un efecto apreciable solamente en estructuras muy altas como edificios y torres de más de 200 m de altura, aproximadamente [44].

Estas conclusiones, que como se ve muestran ya una fuerte reducción en la pretensión de eliminar rayos mediante CTS, son incluso cuestionadas por otros investigadores. En particular Cooray [42] de la Universidad de Uppsala muestra que sería posible una reducción de la cantidad de rayos que pueden hacer impacto en un CTS sobre una torre a gran altura pero que esto se debe fundamentalmente a la forma geométrica del CTS (ionizador en forma de paraguas) que hace que la distancia de impacto R_s disminuya, y no a la presencia de ionización corona en las puntas. R_s tiene sin embargo un valor mínimo crítico dependiente de la carga en la guía escalonada e independiente del tamaño del “paraguas”. Por lo tanto el dispositivo CTS es incapaz de evitar los impactos de descargas en el mismo. Si la disminución de R_s depende de la forma y no de la eventual generación de iones, queda claro que todas las otras formas de CTS que no sean el “paraguas” (hilos de guardia con puntas, disipadores esféricos, plumeros, etc.) son absolutamente inútiles.

La disminución de rayos ya sea por la forma o por los argumentos de los científicos que trabajan para los fabricantes (Aleksandrov y colaboradores) está restringida claramente a torres altas y se refiere exclusivamente a impactos sobre el propio protector. Se deduce por lo tanto que los CTS son totalmente inútiles para proteger estructuras no cubiertas por los mismos. En particular Aleksandrov en [44] afirma que los sistemas CTS si reducen los rayos lo hacen solamente en su superficie y que no se puede afirmar que el área de protección pueda extenderse. Se trata entonces de un dispositivo que a lo sumo se protege a sí mismo y solo en cierta medida.

Es interesante observar entonces lo acertado de la conjetura de Tesla en 1918 sobre los mecanismos de inhibición de trazadores ascendentes mucho antes de que aparecieran los CTS ionizantes comerciales. Ver figura 7.16.

Cabe agregar un comentario sobre el funcionamiento como pararrayos convencional, funcionamiento previsto por los fabricantes al admitir que no todos los rayos son eliminados. Si el dispositivo tiene un R_s menor que el de otros objetos o partes de estructuras susceptibles de recibir rayos entonces funcionan como malos pararrayos ya que la zona de protección es menor que la de una punta Franklin común.

7.4.6. Resultados observados. Experimentos de Campo, Campañas de Observación y Registro de Eventos

Desde su introducción comercial en 1971 los dispositivos CTS que empezaron llamándose DAS (Dissipative Array System) se han estado instalando en distintos tipos de estructuras. Originalmente pensados para torres de comunicaciones, su uso se ha extendido a edificios, plantas industriales, líneas de transmisión, subestaciones, aeropuertos, etc. Los resultados de observaciones han mostrado múltiples impactos de rayos en instalaciones o estructuras protegidas por estos dispositivos. Es de particular interés señalar los casos que siguen.

La Nasa instaló dispositivos CTS para la protección en el centro espacial Kennedy en Florida para proteger los vehículos espaciales y sus instalaciones. Ya en 1975 se reportan repetidos impactos en las cuatro torres con CTS [31]. Actualmente la Nasa utiliza terminales convencionales e hilos de guardia para los mismos fines con resultados satisfactorios. Se ha utilizado también la iniciación artificial de rayos mediante cohetes que llevan un alambre aterrado.

En 1988 y 1989 la FAA (Federal Aviation Administration) realizó un estudio de la performance de dispositivos CTS instalándolos en lugar de dispositivos convencionales en tres aeropuertos de Florida. Se usaron dos tipos

de instalaciones con sistemas de agujas, unos de forma toroidal y otros en forma de sombrilla. La FAA registró impactos en los sistemas CTS los cuales resultaron dañados [25], [45]. Los fabricantes objetaron estos experimentos entre otras cosas debido a que se habían utilizado los CTS con las puestas a tierra de los sistemas convencionales. De todas formas la FAA descartó el uso de DAS-CTS y reinstaló su protección convencional que ha probado ser efectiva.

En 1994 se presentó un estudio sobre descargas atmosféricas en una planta nuclear en Estados Unidos [25]. La planta había recibido tres impactos en dos años (1988 y 1989). Luego de instalado un sistema DAS la planta recibió otros tres impactos en dos años.

En 1998 se presentó un estudio de torres de comunicaciones con sistemas DAS en Japón. Las torres estaban instrumentadas como para medir corrientes de rayos. Estas torres recibieron múltiples impactos antes y después de la instalación de los sistemas DAS mostrando una vez más que estos dispositivos son incapaces de impedir las descargas. Se reportó que los daños a los sistemas de comunicaciones asociados a estas torres disminuyeron lo cual se debe no a a ausencia de rayos sino a los sistemas de puesta a tierra y de supresión de transitorios que fueron instalados con el sistema [25].

Estos son algunos de los múltiples casos documentados de impactos a sistemas DAS-CTS que muestran por la vía de la experiencia que la pretensión de eliminación de descargas atmosféricas por parte de estos sistemas carece de fundamento.

El caso de las instalaciones de Federal Express en el aeropuerto de Memphis (Tennessee).

Los vendedores de sistemas CTS han basado largamente su argumentación en la existencia de muchos clientes satisfechos. En particular han tomado como bandera el aparente éxito de un sistema de CTS en las instalaciones de Federal Express en el aeropuerto de Memphis, Tennessee, USA [37]. Utilizando el sistema de detección de rayos en servicio en el área presentaron en 1999 un mapa mostrando los impactos registrados en el área de dicho aeropuerto. El mapa presentaba un "hueco", una zona donde no había registros de impactos que coincidía con el área pretendidamente protegida de Federal Express. Los registros válidos comprendían el período de 1996 a 1998. Este resultado fue presentado como una prueba de que los CTS efectivamente eliminaban los rayos. Los científicos que ponían en duda la efectividad de los CTS argumentaron que el período de medida era demasiado corto como para sacar conclusiones de ese tipo. También se presentaron otros argumentos. La controversia llegó a su fin con la publicación del trabajo de Krider en 2004 [46]. El mismo muestra un mapa de la distribución de descargas nube tierra en un área de 20 km por 20 km centrada en el aeropuerto de Memphis.

Se muestra un registro de 4160 ocurridos entre 1997 y 1999 uniformemente distribuidos. No se registran huecos (zonas claramente sin rayos) en el área.

¿Muchos clientes satisfechos?

Los fabricantes muestran una lista de muchos clientes satisfechos como argumento para la efectividad de los sistemas CTS [25], [37], [43]. En relación a esto se debe señalar que estos clientes carecían de un sistema de protección antes de instalar estos sistemas. Junto con los dispositivos los vendedores instalan excelentes sistemas de tierra (que lo son con el pretexto de absorber cargas para disiparlas en el aire mediante el ionizador) y sistemas de supresión de transitorios. Tienen por lo tanto todas las características de un buen sistema convencional de protección contra descargas atmosféricas y por lo tanto ofrecen protección. La disminución de la distancia de impacto que se registra en algunos tipos no es apreciable si se coloca suficiente cantidad de ionizadores.

Se obtiene meramente protección convencional pero a un costo mucho más alto.

7.4.7. Funcionamiento del CTS como Protección Convencional

Un sistema CTS completo con sus terminales, sus bajadas, sus buenas puestas a tierra y sus protecciones complementarias parece constituir un buen sistema convencional y de hecho es de esta forma que proporciona protección, más allá de la eventual disminución de Rs. Sin embargo, se debe tener en cuenta que muchos dispositivos ionizadores están compuestos de conductores de sección muy inferior a la requerida en un captor para recibir una descarga sin sufrir daño, lo cual puede llevar a que un impacto dañe las puntas y las haga caer, constituyendo un riesgo para el sistema protegido y alrededores. También los hace vulnerables debido a la corrosión (ver puntas en los CTS en forma de sombrilla y en los que tienen forma de esfera o de plumero en las figuras 7.17 y 7.19).

Por otra parte se debe tener en cuenta que, aunque haya protección, una cosa es conocer el mecanismo por el cual la protección actúa, llevando la corriente de los rayos a tierra y suprimiendo los transitorios y otra muy distinta es creer que la ausencia de daños se debe a la falta de impactos ya que esto puede llevar a no darle la importancia que tiene el mantenimiento de las protecciones adicionales.

Si se tiene en cuenta esta consideración, lo que corresponde es realizar un

diseño convencional tomando en cuenta todos sus aspectos. Un ejemplo interesante es el trabajo de Molina y Viggiano [47].

7.4.8. Resumen sobre Dispositivos CTS

Los sistemas de transferencia de carga o disipativos no son capaces ni de evitar los rayos ni de desviarlos de las estructuras o sistemas a proteger. No es posible ni neutralizar la nube ni la guía escalonada. La menor distancia de impacto que presentan ciertos dispositivos CTS se debe únicamente a su forma geométrica y no a la disipación de iones en el aire. En torres altas teóricamente se podría constatar una disminución de los rayos iniciados desde la estructura. Esto no ha sido confirmado por experiencias de campo ya que muchas torres de comunicaciones registran similar número de impactos antes y después de la instalación de dispositivos CTS. Incluso los científicos que han pretendido validar este sistema de protección han llegado a la conclusión de que la protección solo comprende el área de un CTS en forma de paraguas sin añadir protección a la estructura cercana. Esto confirma además que todos los otros sistemas de disipación mediante emisión de iones que no tienen esa forma son inútiles en todos los casos. El 80 % de los rayos son iniciados en la nube. El CTS es totalmente inefectivo frente a este tipo de rayos. Del 20 % restante solo una parte menor podría ser inhibida por un CTS.

7.5. Dispositivos ESE (Early Streamer Emission, Emisión Adelantada de Trazador)

Son conocidos también como PDC (Pararrayo con Dispositivo de Cebado), PDA (Paratonnerre à Dispositif d'Amorçage) y también "pararrayos activos". Internacionalmente se los conoce como dispositivos ESE, y es esta sigla la que se usará en el presente texto.

Se ha creado solamente una norma relativa a su ensayo y empleo, la norma francesa NF C 17-102 de 1995. La norma española UNE 21186 es una traducción de la francesa con diferencias menores. La norma australiana-neozelandesa AS/NZS 1768 contiene un apéndice informativo sobre un método de cálculo de zonas protegidas basado en ESE. No es una norma en sí y no es considerada en este trabajo [32]. Hay referencias en información comercial de que en otros países (Argentina, Macedonia, Portugal, Rumania, Eslovaquia y Serbia) se han creado normas o reglamentos basados en la norma francesa original [48]. Los sistemas de protección basados en dispositivos ESE difieren de los convencionales en el uso de puntas verticales o pararrayos de características especiales pretendidamente capaces de generar un trazador

ascendente antes, y por lo tanto significativamente más largo que una punta vertical convencional colocada en el mismo lugar y a la misma altura. Dicho trazador ascendente encontraría la guía escalonada a una distancia mayor, aumentando la zona de protección. De esta forma una única punta ESE sustituiría varias puntas convencionales, lo cual constituye la afirmación central de sus proponentes y el atractivo básico para su uso.

7.5.1. Funcionamiento de la protección basada en dispositivos ESE

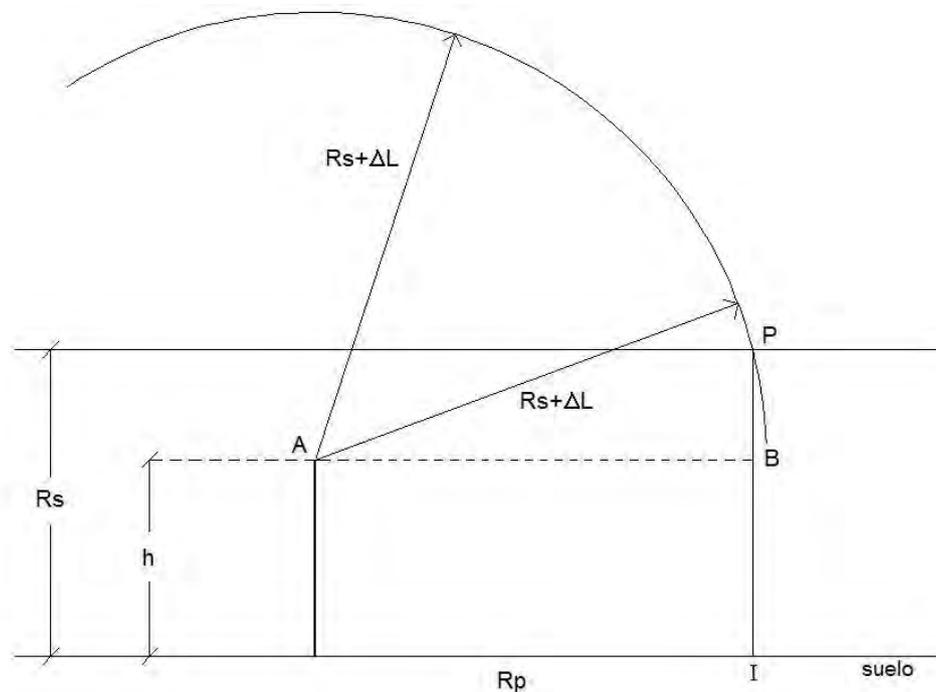


Figura 7.23: Cálculo de la “zona de protección” de un ESE.

Según sus proponentes y fabricantes el mecanismo de protección es el siguiente.

Al acercarse la guía escalonada, la punta del dispositivo ESE inicia el trazador ascendente un cierto tiempo Δt del orden de decenas de microsegundos antes de lo que lo haría la punta de una barra vertical común o punta Franklin ubicada en la misma posición. Se obtendría la “emisión temprana” a que hace referencia el nombre en inglés.

Esa afirmación implica que el trazador anticipado, que consiste en una descarga capaz de propagarse, se inicia y se propaga con un campo eléctrico

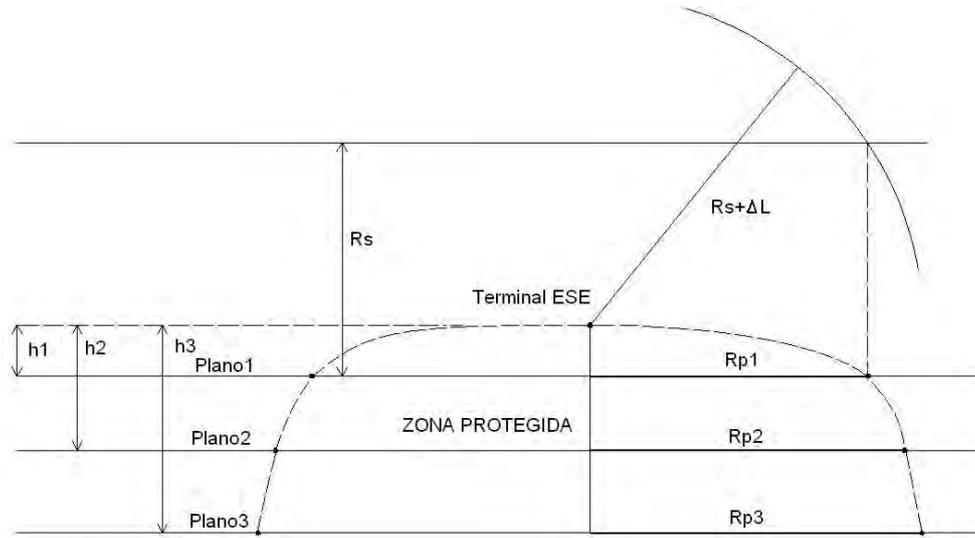


Figura 7.24: Construcción de la zona espacial “protegida” de un ESE.
 $R_p = R_p(h)$ de acuerdo a la fórmula 7.

significativamente menor que en el caso de la punta convencional u objeto emisor.

Se aduce además que esa ventaja temporal se traduce en una ventaja espacial o ganancia en longitud consistente en una distancia

$$\Delta L = v \Delta t \quad (7.7)$$

donde v es la velocidad pretendida de propagación del trazador ascendente generado, que se toma como de un valor medio de $1 \frac{m}{\mu s}$, según lo consignado en la norma francesa citada [48] y en folletos de fabricantes [49].

La distancia de impacto al dispositivo ESE se toma entonces como $\Delta L + R_s$, siendo R_s la distancia de impacto convencional con valores según la tabla 7.1.

Una vez calculada la distancia de impacto al ESE se determina mediante el cálculo geométrico que sigue una “zona de protección”.

Se considera un dispositivo ESE instalado en el extremo superior de un mástil vertical con su punta a una altura h sobre una superficie plana (figura 7.23). La zona de atracción o captura del plano es una recta horizontal a altura R_s , siendo R_s la distancia de impacto convencional estimada según la ecuación (7.2). La distancia de impacto supuesta para el ESE es $\Delta L + R_s$. Se concluye entonces que las guías descendentes cuyas puntas lleguen a una distancia $\Delta L + R_s$ del ESE antes que a una distancia R_s del piso generarán el trazador ascendente exitoso desde el ESE. Este criterio determina entonces

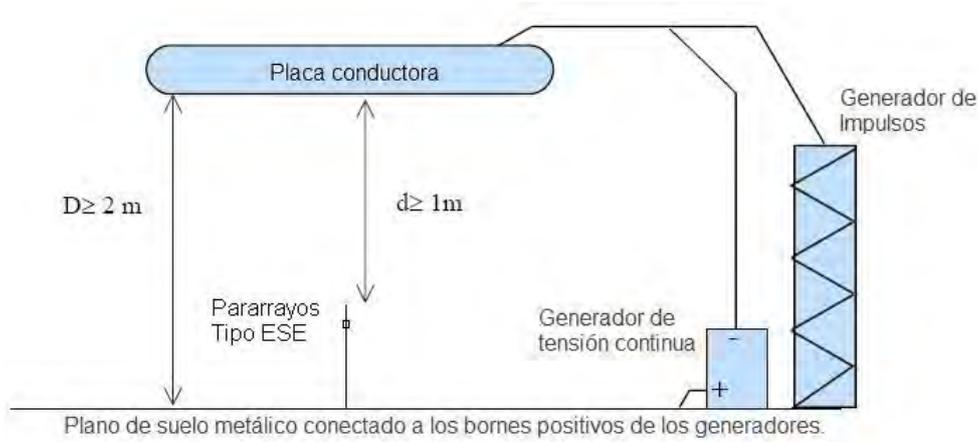


Figura 7.25: Configuración de ensayo de un pararrayos tipo ESE en laboratorio.

una zona circular del piso con centro en el pie del mástil del ESE limitada por la proyección vertical I de los puntos P de altura R_s que distan $\Delta L + R_s$ de la punta A del ESE (figura 7.23).

Las descargas que se hubieran establecido contra el piso de esa zona se establecerían entonces contra el ESE. El radio de esa zona se denomina entonces radio de protección R_p y se calcula aplicando Pitágoras al triángulo ABP de la figura 7.23.

$$R_p^2 = (AB)^2 = (\Delta L + R_s)^2 - (R_s - h)^2$$

$$R_p = [(\Delta L + R_s)^2 - (R_s - h)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7.8)$$

Haciendo cuentas se llega a la expresión que aparece en la norma francesa

$$R_p = [\Delta L(\Delta L + 2R_s) - h(R_s - h)]^{\frac{1}{2}} \quad (7.9)$$

De acuerdo al cálculo, la expresión (7.7) indicaría solamente el radio del área de suelo plano alrededor del ESE a altura h que estaría protegida por el mismo si las hipótesis sobre la distancia de impacto aumentada fueran correctas.

Sin embargo dicha expresión se utiliza además para determinar una “zona protegida” de carácter volumétrico [30, figura 2.2.3.1]. La construcción de esa zona se muestra en la figura 7.24.

La norma indica que la fórmula R_p es válida para $h \geq 5m$. Para valores menores de h la superficie se completa mediante funciones lineales expresadas por curvas [30, figura 2.2.3.3 a) a c)].

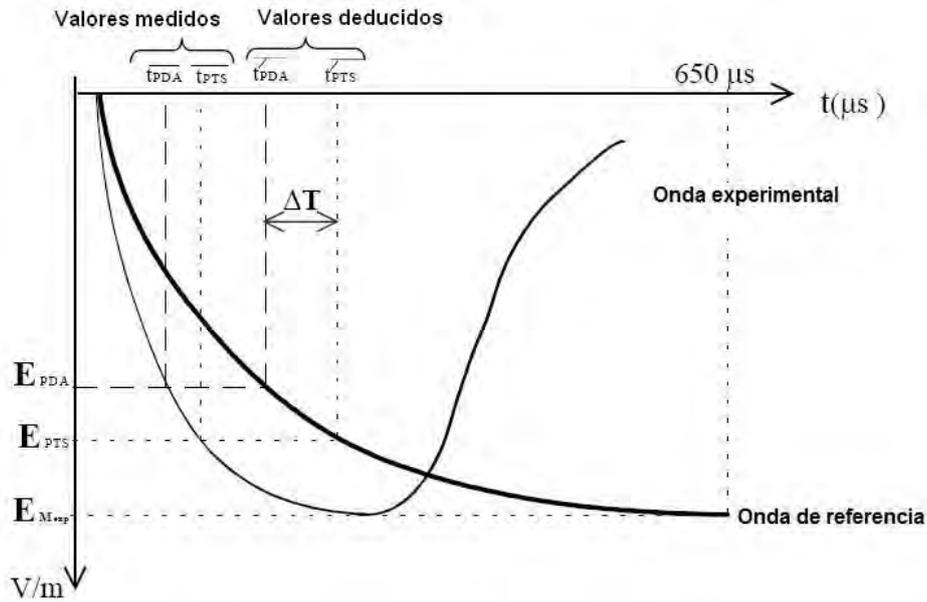


Figura 7.26: Deducción del adelanto temporal Δt a partir de los resultados del ensayo según la figura 7.25.

Finalmente, los proponentes y fabricantes de ESE así como la norma afirman que cualquier objeto que quede dentro de la superficie de revolución así definida está protegido al mismo nivel que el establecido convencionalmente para la distancia de impacto adoptada para su cálculo. En esta afirmación se basa todo el método de protección mediante estos dispositivos.

Un elemento básico de la teoría es el valor de Δt . La norma establece el método que se describe a continuación para medirlo de manera de determinar y comparar la efectividad de un ESE (figura 7.25).

Se instala a una distancia $h \geq 2m$ por encima de un piso plano metálico una superficie metálica paralela al piso de bordes redondeados hacia arriba y de dimensión mínima igual o mayor que h . Se instala en el medio una punta ESE a una distancia $d \geq 1m$. Se bloquea el funcionamiento del dispositivo de manera que el ESE se comporte como una punta convencional.

Se aplica una tensión continua ente placa y piso tal que el campo esté entre 10 y $25 \frac{kV}{m}$, en el entendido de que esos valores son representativos del medio eléctrico cerca de tierra bajo una nube de tormenta.

Se superpone una tensión de impulso tal que el tiempo de subida del campo esté entre 100 y $1000 \mu s$ y que la pendiente en el instante inicial esté entre 2×10^8 y $2 \times 10^9 \frac{V.s}{m}$. Se mide el tiempo T_{PTS} desde el inicio del impulso al momento de la descarga entre la placa superior y la punta y se registra el valor E_{PTS} del campo en el momento de la descarga.

Luego se hace lo mismo con la punta activada, se mide el tiempo T_{PDA} y el campo correspondiente E_{PDA} . Si el dispositivo funciona estos valores deben ser menores que los anteriores. Los valores E_{PTS} y E_{PDA} se llevan a una curva de referencia dada por la norma, normalizada al campo máximo del impulso experimental, y que llega a dicho máximo en $650 \mu s$. De esa forma se determinan los tiempos deducidos T'_{PTS} y T'_{PDA} . Se determina la diferencia de tiempos $T'_{PTS} - T'_{PDA}$ en la onda de referencia correspondiente a la diferencia de campos (figura 7.26). Esta diferencia es tomada como la ventaja temporal Δt asociada al dispositivo ensayado.

Los subíndices empleados corresponden a las siglas en francés de pararrayos convencional (PTS) y pararrayos ESE (PDA).

El fabricante toma entonces este adelanto temporal Δt como característico de su dispositivo e incorpora a las especificaciones de su producto las áreas y volúmenes de protección calculados según lo descrito.

El adelanto medido de esta forma puede estar entre 20 y $100 \mu s$ [50], lo que según la fórmula (7.9) puede dar, para una distancia de impacto convencional de 45 m (ver tabla 7.1) un radio de protección de 51 m a 135 m con un ESE con su punta a sólo 5 m de altura sobre la eventual superficie plana a proteger.

7.5.2. Operación de los dispositivos ESE

El funcionamiento de los dispositivos ESE se basa en la creación, por algún medio, de una ionización del aire alrededor de su punta mucho mayor que la que se produce naturalmente en un captor vertical convencional en condiciones de campo eléctrico bajo una tormenta, de manera de crear condiciones para la emisión anticipada del trazador ascendente.

7.5.3. Pararrayos radiactivos

El primer medio utilizado para obtener un aumento de ionización fue la radiactividad. El físico húngaro Szillard planteó en 1914 por primera vez la posibilidad del aumento de la zona de atracción de un pararrayos agregando cerca de su punta una fuente radiactiva [25]. En su forma actual consiste en un vástago terminado en punta con un recinto en la proximidad de la misma que contiene un elemento radiactivo, normalmente radio o americio. (figura 7.27). Se han realizado numerosos experimentos para determinar la efectividad de estos dispositivos. Entre los más significativos se encuentran los realizados por Müller-Hillebrand en 1962 [28], [51], mostrando que en condiciones de tormenta la ionización producida por el campo eléctrico es la misma en una punta común y en un pararrayos radiactivo, y varios órdenes de magnitud mayor que la producida por la radiación propia de este último. El uso de



Figura 7.27: Pararrayos radiactivo. Cortesía de P. Gruet [50].

pararrayos radiactivos está prohibido en muchos países, fundamentalmente debido al peligro potencial que implica el uso de una sustancia radiactiva en forma diseminada y sin mayor control. Sin embargo esta prohibición no es global y su empleo está muy difundido: desde 1930 hasta su prohibición en 1986 se instalaron sólo en Francia decenas de miles de pararrayos radiactivos [50].

7.5.4. Pararrayos activos (ESE) no radiactivos

Según un estudio realizado por un organismo dependiente del Ministerio de Desarrollo Territorial y Medio Ambiente de Francia [50] la prohibición de los pararrayos radiactivos en Francia estimuló el desarrollo de otros medios de producir el aumento de ionización buscado. Usualmente esta ionización se

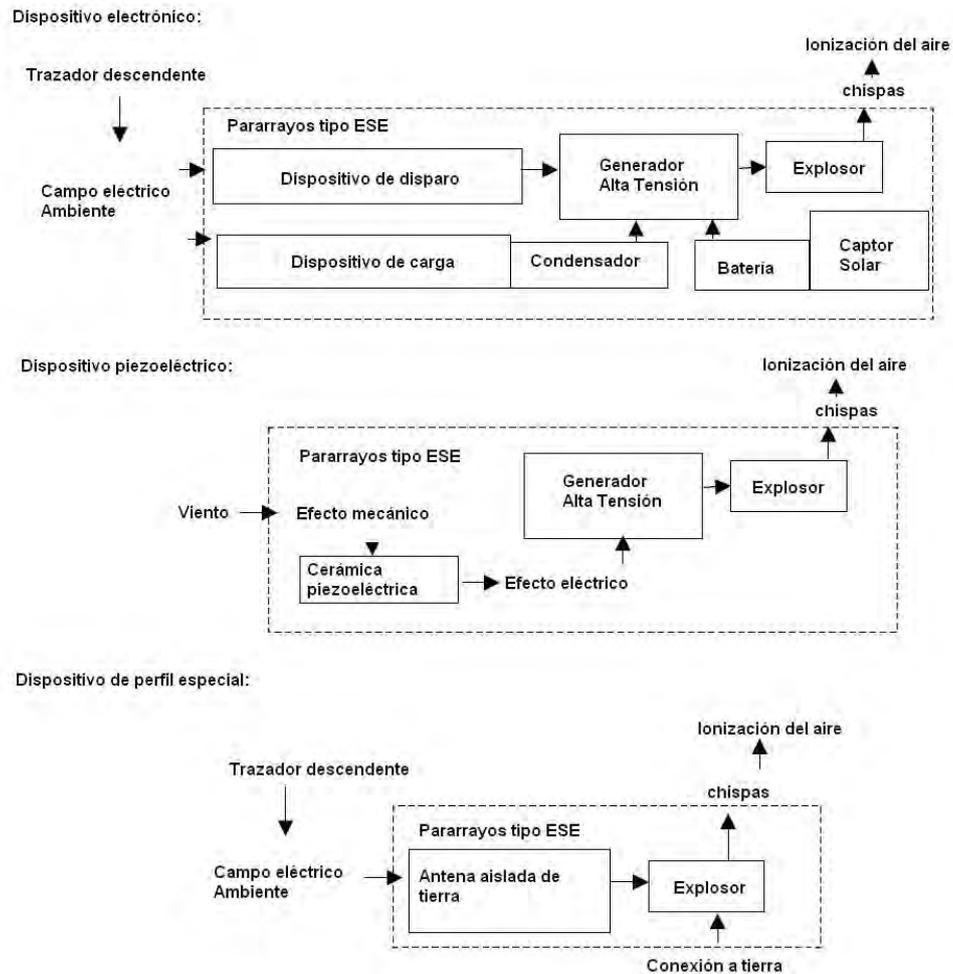


Figura 7.28: Mecanismos de funcionamiento de distintos dispositivos ESE. Cortesía de P. Gruet [50].



Figura 7.29: Ejemplos de pararrayos ESE disponibles comercialmente.

Dispositivos A y D: Dispositivos eléctricos.

Dispositivo B: Dispositivo de perfil especial.

Dispositivo C: Dispositivo de perfil especial.

Dispositivo E: Dispositivo de mecanismo no informado.

Dispositivo F: Dispositivo piezoeléctrico.

Cortesía de P. Gruet [50] y Hartono [32].

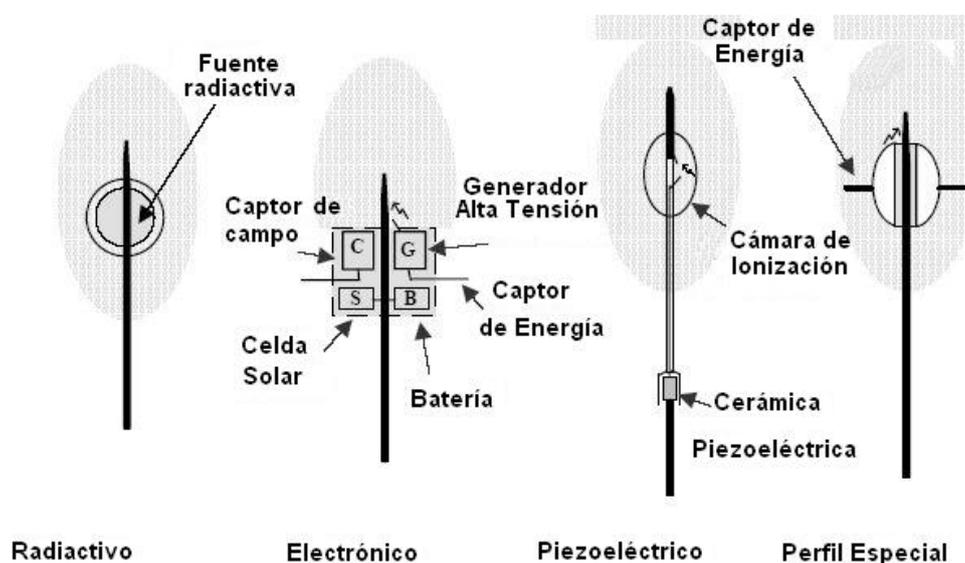


Figura 7.30: Representación esquemática de distintos tipos de ESE. Cortesía de P. Gruet [50].

produce generando chispas en las proximidades de la punta del pararrayos. Existen por menos tres tipos de pararrayos activos no radiactivos: de disparo electrónico, piezoeléctricos y de perfil especial. Se indica el principio básico de su funcionamiento según [50].

Los dispositivos de disparo electrónico consisten en un generador de alta tensión que hace saltar una chispa entre dos electrodos. Esa chispa se traduce en la ionización del aire buscada. El generador es disparado por un dispositivo electrónico que incluye un detector de intensidad de campo eléctrico. Estos dispositivos necesitan energía eléctrica para su funcionamiento. Para su alimentación se han desarrollado distintos métodos. Algunos dispositivos usan una batería cargada por un panel solar. Otros utilizan el propio campo eléctrico ambiente creado por la nube de tormenta para cargar un condensador de almacenamiento de energía.

Los dispositivos piezoeléctricos se basan en que la parte superior del pararrayos descansa en equilibrio sobre una cerámica piezoeléctrica. El viento mueve la parte superior comprimiendo la cerámica y generando así impulsos de alta tensión que generan chispas en un punta auxiliar ubicada en una cámara de ionización dentro de la parte superior del pararrayos. Los iones suben a la punta del pararrayos aumentando la carga eléctrica en esa zona.

Los pararrayos de perfil especial consisten en un captor vertical conectado a tierra rodeado de elementos metálicos de formas especiales aislados de tal

manera que tomen el potencial ambiente del aire. Su funcionamiento se basa en que al acercarse una guía descendente la tensión entre la parte a tierra y las partes aisladas (“antenas” o “captosres de energía”) aumenta a miles de voltios provocando chispas entre esas partes que contribuyen al aumento de la ionización.

Los principios de funcionamiento se ilustran en la figura 7.28. La figura 7.29, tomada de [32], [50] muestra ejemplos de pararrayos activos disponibles comercialmente.

Efectividad de la protección basada en dispositivos ESE

Para este análisis debe tenerse en cuenta la validez de los argumentos físicos que sustentan este tipo de protección, las condiciones de medida y los valores reales de los parámetros utilizados, los métodos de cálculo, los resultados de experimentos relevantes de laboratorio y de campo y finalmente los resultados de campañas de observaciones de efectividad de protecciones en operación. Se debe tener en cuenta además los resultados de investigaciones realizadas por la comunidad científica internacional, las conclusiones de organismos de normalización y sus consecuencias técnicas e incluso legales.

La ventaja temporal Δt

Esta ventaja, base de todo el sistema, puede efectivamente medirse en las condiciones de ensayo de las figuras 7.25 y 7.26. Este ensayo sólo puede realizarse con los dispositivos radiactivos, de disparo electrónico o de perfil especial. Según [50] los dispositivos de perfil especial presentan los mayores valores. Es de hacer notar que muchos dispositivos ESE disponibles en el mercado no han sido ensayados [50]. Algunos, como los piezoeléctricos, no pueden ser ensayados bajo la norma.

La principal objeción a la ventaja temporal es que las condiciones de campo eléctrico en las que se realiza su medida (campo eléctrico transitorio pero espacialmente uniforme) difieren fuertemente de las condiciones reales reinantes en una tormenta, y ni siquiera son las más aproximadas a la realidad que se pueden obtener en laboratorio. Las condiciones creadas por la proximidad de la guía escalonada descendente son representadas con mejor aproximación por un campo entre puntas a la mayor distancia que permita un laboratorio que por un campo entre punta y plano a aproximadamente un metro de distancia [52]. En experimentos realizados generando descargas entre la punta de un pararrayos conectado al piso y la punta de un cable colgando del techo no se ha detectado diferencia entre un ESE y un pararrayos convencional. Como ejemplo de experimento de este tipo puede mencionarse el de C Buquegneau,

de la Facultad politécnica de Mons, año 1985 [53]. Se instalaron dos pararrayos, un ESE y uno convencional, a la misma distancia de la punta de un cable colgante vertical. No se constataron diferencias significativas entre el número de descargas que impactaron al ESE y al pararrayos convencional.

Corresponde señalar que los resultados de experimentos y ensayos de laboratorio no pueden ser tomados como representativos de lo que sucede en el fenómeno a escala natural. En particular muchos investigadores (como Uman y Rakov de la Universidad de Florida) consideran que no es posible que con descargas de laboratorio se pueda simular el proceso de enlace del rayo natural [25].

La velocidad del trazador ascendente y la ventaja espacial ΔL

Las medidas de trazadores ascendentes naturales arrojan resultados que oscilan entre 1 y 30 $\frac{cm}{\mu s}$, con un valor medio del orden de 10 $\frac{cm}{\mu s}$ [1], [2]. Probablemente las únicas medidas de velocidades de trazadores ascendentes naturales exitosos sean las de Yokohama et al., según [25], con valores entre 8 y 27 $\frac{cm}{\mu s}$. Admitiendo como ciertas todas las demás suposiciones sobre las cuales se basa el funcionamiento de los ESE, la velocidad adecuada a emplear para el cálculo de ΔL parece ser no mayor a 2 $\frac{cm}{\mu s}$ [24]. Estos valores son muy inferiores al de 1 metro por microsegundo que recomienda la norma. Aún suponiendo un Δt real de 100 μs la ventaja espacial obtenida con velocidades de propagación reales es de 2 a 10 m, valores muy inferiores a los 100 m que implica el uso de la norma y por lo tanto irrelevantes en situaciones prácticas [25]. Las observaciones indican por lo tanto que un pararrayos ESE no ofrece ventaja significativa sobre el pararrayos vertical convencional [54].

La propagación del trazador ascendente iniciado por el ESE

El adelanto temporal implica que el trazador ascendente comienza a propagarse bajo la acción de un campo eléctrico entre el pararrayos y la punta de la guía escalonada de valor medio muy inferior al campo crítico necesario para iniciar un trazador desde una punta convencional. Según la norma, a un rayo potencial de 10 kA le correspondería, para un ESE de 100 μs , una distancia de impacto de 145 m, tres veces mayor que en el caso convencional. Esto significaría que el trazador comienza a propagarse con un campo tres veces menor.

Una vez iniciado el trazador ascendente, para que se propague debe convertirse en un líder que vaya creando un camino conductor ascendente. Este fenómeno es completamente independiente del pararrayos, depende solamente de la intensidad del campo eléctrico y de las propiedades dieléctricas del

aire [24], [32]. Por lo tanto, aunque el trazador se inicie con un campo más débil, es muy poco probable que empiece a propagarse hasta que el campo llegue a un valor que lo permita. Por lo tanto la ventaja temporal no se traducirá en una ventaja espacial, al retardarse la propagación. Esta es la conclusión del grupo de trabajo sobre descargas atmosféricas de CIGRE (Comisión Internacional de Grandes Redes Eléctricas) [54].

La zona de protección del ESE y la norma francesa NF C 17-102

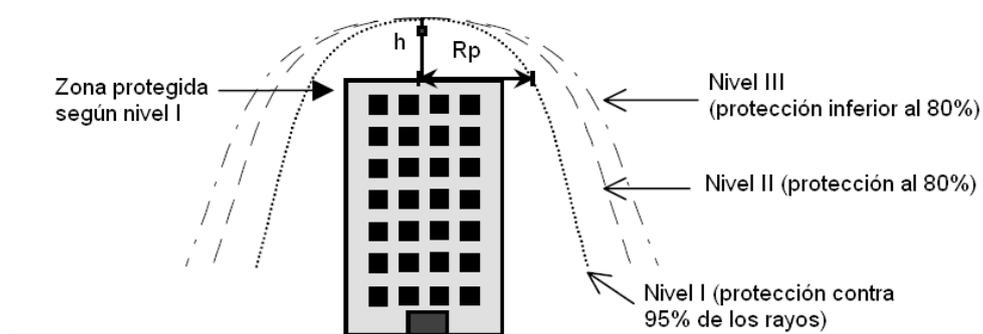


Figura 7.31: Las curvas de la figura forman, girando alrededor del eje del pararrayos ESE, el volumen presuntamente protegido por el mismo. Cortesía de P. Gruet [50].

Si se dejan de lado las objeciones sobre los adelantos temporales y espaciales y las condiciones de propagación del trazador ascendente, la fórmula (7.9) indica el área protegida en una superficie plana. Esa fórmula fue obtenida aplicando el método de la esfera rodante en forma convencional en una situación en que R_s es la distancia de impacto del suelo y $R_s + \Delta L$ la del ESE. La norma propone usar la misma expresión para generar una zona de protección volumétrica como se ha descrito.

La figura 7.31 muestra dicha zona dentro de la cual hay una estructura supuestamente protegida.

La figura 7.32 muestra un corte de la zona construida según la fórmula (7.9) y la figura 7.24, en la cual hay una estructura de techo AB supuestamente protegida. Si se aplica el método de la esfera rodante de la misma forma que la utilizada para deducir la expresión (7.7) se ve claramente que los puntos A y B no están protegidos por el ESE ya que estos puntos son capaces de emitir un trazador antes que el ESE con adelanto incluido. Se ve entonces que el volumen de revolución denominado zona protegida es una extrapolación totalmente incorrecta de la fórmula (7.9). La norma no toma en cuenta

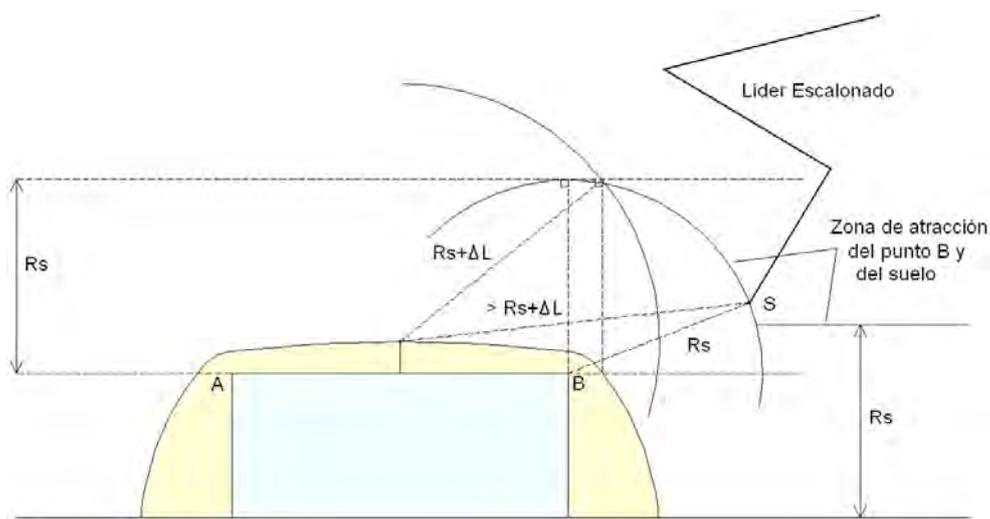


Figura 7.32: Al llegar al punto S la punta de la guía escalonada se encuentra a una distancia R_s de B y a una distancia mayor a $R_s + \Delta L$ de la punta del ESE. Por lo tanto el rayo va a hacer impacto en la estructura a proteger, en el punto B que está dentro de la zona supuestamente de protección del ESE.

entonces todos los otros trazadores ascendentes que la estructura puede generar. La norma tiene por lo tanto un error geométrico básico que invalida sus resultados aún admitiendo sus propias suposiciones sobre el fenómeno físico. Cualquiera sean esas suposiciones, la norma es incorrecta en su punto fundamental.

Cabe señalar que la norma realiza otra afirmación peligrosa: Extiende la aplicabilidad de la zona de protección de los ESE a áreas de esparcimiento al aire libre (punto 1.1.1 de la norma francesa [48]), lo cual está en contra del consenso general de que durante una tormenta eléctrica no hay zonas abiertas en la cual no se corra riesgo de daño personal ni sistema de protección que elimine ese riesgo [55].

7.5.5. Experimentos de campo, campañas de observación y registro de eventos

Los resultados del análisis precedente, que muestra la carencia de fundamentos físicos para el funcionamiento pretendido de los ESE, han sido confirmados con rayos reales por experimentos y campañas de observaciones, así como por reiterados reportes de impactos sobre instalaciones con este tipo de equipos como protectores.

En el campo experimental, uno de los trabajos más relevantes es el de

Moore et al. [27]. Moore y su equipo instaló un conjunto de pararrayos en una zona de Nuevo México en la que hay frecuentes tormentas eléctricas y registró impactos en los mismos. Los registros se realizaron durante 8 años culminando en el año 2000. El objetivo del experimento era comparar pararrayos de puntas afiladas comunes -puntas Franklin- con pararrayos con el extremo romo con distintos diámetros, pero incluyó varios pararrayos tipo ESE, radiactivos y no radiactivos. Todos los impactos sobre pararrayos se produjeron sobre puntas romas de diámetros 12,7 mm, 19 mm y 24 mm de diámetro. Ningún ESE logró captar rayos aunque los impactos (incluyendo uno en un árbol cercano) se produjeron claramente dentro de la zona pretendida de protección. Se constató además que tampoco hubo impactos sobre las puntas Franklin afiladas. Tampoco se constató diferencias entre las corrientes producidas por el campo eléctrico en las puntas Franklin y los ESE. La conclusión del estudio es que las puntas ESE y las Franklin se comportan en forma similar, siendo a su vez menos efectivas que las puntas romas. Según los autores, el aumento del campo eléctrico por efecto de la punta afilada decrece rápidamente con la distancia a la punta, con lo cual cualquier inicio de trazador ascendente entra rápidamente en una zona de campo demasiado bajo para su propagación. Los resultados concuerdan con las conclusiones de CIGRÉ ya citadas, en cuanto a la ineffectividad de producir ionización temprana si el campo no es lo suficientemente intenso como para sostener la propagación de un trazador.

La norma de Estados Unidos NFPA780 en su última versión (2004) incorpora las puntas romas aunque a un nivel equivalente a las afiladas tradicionales [15].

Una de las campañas de observaciones más significativas es la realizada por Hartono y Robiah en Kuala Lumpur y Shah Alam, Malaysia [56], [57]. Los autores aprovecharon dos circunstancias favorables en esas ciudades: Un gran número de pararrayos ESE instalados y un índice cerámico promedio de 250, quizás el más alto del mundo en zonas densamente pobladas y por lo menos 6 veces más alto que el de Uruguay. En esas condiciones fue posible en una campaña de unos 12 años registrar un número importante de impactos de rayos y estudiar su relación con los dispositivos ESE. Los autores tomaron fotografías de un cierto número de edificios importantes equipados con ESE antes y después de impactos de rayos. Los registros muestran daños en los edificios por impactos reiterados, no solamente en la discutible zona de protección indicada por los fabricantes sino incluso a distancias del orden de 10 m del mástil de estos dispositivos. Se registró un lapso medio de 2 años entre las fotografías antes y después de un impacto con daños. Es interesante destacar que en el estudio se incluyó el seguimiento de edificios con puntas Franklin tradicionales, constatándose daños en los mismos como

consecuencia de una instalación incorrecta. Los impactos se produjeron en zonas claramente no protegidas según el criterio de la esfera rodante ya presentado en el punto 2. Lo mismo sucedió con los ESE, con lo cual se generó nueva evidencia tanto del comportamiento similar de puntas Franklin y ESE como de la validez del método aceptado por las normas internacionales para determinación de las áreas expuestas.

Existen además registros de eventos aislados en los cuales instalaciones de importancia con protección basada en ESE han sido dañadas durante tormentas eléctricas. El más conocido es el que causó la destrucción en 1976 de un monumento de Bernini en el Vaticano, supuestamente protegido por un pararrayos radiactivo [25]. Como eventos recientes documentados pueden citarse los daños en una refinería en Colombia en el 2000 [26], o la salida de servicio de una estación de radar para uso meteorológico un mes después de su puesta en servicio debido a 7 impactos en las instalaciones durante una tormenta en Turquía en febrero de 2004 [58].

7.5.6. Uso de los ESE en Estados Unidos: intentos de normalización y situación legal actual

La norma más difundida y aceptada en Estados Unidos es la NFPA780, elaborada y publicada por la National Fire Protection Association (NFPA), e incluye solamente la protección llamada convencional en este artículo. Por iniciativa de fabricantes de pararrayos ESE radiactivos y no radiactivos se elaboró un borrador de una norma para dispositivos ESE análoga a la norma francesa. La norma llevaría el nombre NFPA781. Un extenso estudio financiado por el Consejo de Normalización de la NFPA dio lugar a más de 300 informes y artículos, de los cuales el 99 % llegaba a la conclusión de que los ESE no presentaban ventaja alguna sobre el pararrayos convencional [51]. La NFPA decidió entonces rechazar en primera instancia el borrador y no publicar normas sobre ESE debido a la falta de evidencia sobre su presunta mayor eficacia y también a la falta de base científica para la misma. Se inició así un proceso en el cual fabricantes de ESE trataron de revertir la situación. Entre otras acciones plantearon que la protección convencional según la norma NFPA780 tampoco tenía base científica. Los ataques llevaron a la NFPA en el año 2000 a considerar la suspensión de su actividad de normalización en el área, cosa que fue rechazada por la comunidad técnica y científica internacional [30], [59]. Finalmente la norma NFPA781 fue desechada en forma definitiva y en 2004 la NFPA publicó la nueva edición de la norma 780 actualmente vigente.

En 1996 y en conexión con estos hechos, los fabricantes de ESE Heary

Bros, Lightning Preventor of America y Nacional Lightning Protection Corp. demandaron judicialmente a una asociación y a dos compañías (Lightning Protection Institute, Thompson Lightning Protection Inc., and East Coast Lightning Equipment, Inc.) por conspiración, falsa publicidad y difamación de producto en relación a la mejor performance de los pararrayos ESE frente a los convencionales.

En octubre de 2003 la Corte Federal de Arizona desechó la demanda y habilitó una contrademanda por parte de una de las compañías inicialmente llevadas a juicio [60].

El fallo final fue dado el 7 de octubre de 2005 [61], [62]. Según el mismo, considerando la documentación presentada, se prohíbe a los fabricantes de ESE anunciar y promover la venta de sus productos utilizando como argumento de venta que los mismos protegen un área mayor que la especificada en la norma NFPA780 para los pararrayos convencionales. Se les prohíbe además decir en su publicidad que los dispositivos ESE son aptos para protección de áreas abiertas tales como canchas de juego, parques de diversiones, campos de golf, estadios y similares. Cabe recordar que la norma francesa los avala para este uso.

7.6. Conclusiones

De acuerdo a lo expuesto, no hay argumentos científicos ni evidencia experimental que sustente la posibilidad de evitar mediante un dispositivo CTS que un rayo haga impacto en una estructura si se dan las condiciones para el mismo. La carga emitida por el sistema típico en condiciones de tormenta es despreciable frente a la de una guía descendente. El registro de impactos en este tipo de instalaciones muestra que a lo sumo se puede confiar en ellas en calidad de captosres convencionales.

Tampoco hay evidencia de que un dispositivo de “cebado” tipo ESE o PDC pueda proteger un área mayor que una punta Franklin tradicional. Incluso objetos romos pero capaces de generar un aumento local de campo pueden ser tan o más efectivos en el momento de establecer una guía ascendente exitosa. Los argumentos en que se basa el funcionamiento de los ESE consisten en extrapolaciones de resultados de laboratorio que no son consistentes con las observaciones de los fenómenos a escala real. La velocidad del trazador ascendente es en realidad un orden de magnitud menor que la supuesta. Además la ionización anticipada supone un trazador ascendente que se propaga por acción de un campo eléctrico menor que el necesario para que se produzca este fenómeno. A esto se agrega que la norma que pretende dar sustento formal a estos dispositivos propone una extrapolación de sus

propias suposiciones totalmente errónea.

La protección contra descargas atmosféricas es ante todo un problema de seguridad, y debe ser por lo tanto basada en sistemas probados. La evidencia de la efectividad de los modelos electrogeométricos está avalada por abundante material experimental, entre el cual se destaca la experiencia con líneas de transmisión de energía eléctrica.

En cualquier caso, la efectividad de un sistema contra descargas atmosféricas no depende sólo del tipo y forma de los captosres -que además pueden ser parte de la estructura- sino de que sea concebido en forma integral, tomando en cuenta todos los aspectos: las bajadas, las puestas a tierra, las protecciones contra sobretensiones, la equipotencialidad, la educación del usuario y el mantenimiento posterior y de que además dicho sistema sea parte de la instalación a proteger desde el inicio del proyecto y construcción.

7.7. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración, en forma de información actualizada, artículos, referencias y permisos de reproducción de material, recibida de R. Kithil, a través del National Lightning Safety Institute así como de A. Mousa, Z. A. Hartono, P. Gruet, J. Molina, E. P. Krider y A. Carranza.

Capítulo 8

Conductores de Bajada a Tierra.

El sistema de bajadas es el conjunto de conductores entre el punto de impacto elegido al diseñar la protección externa (pararrayos adicionales o puntos de impacto metálicos naturales) y el sistema de puesta a tierra.

De la misma forma que en el caso de los captores, los conductores de bajada pueden consistir en partes de la estructura a proteger que se consideran adecuadas para esa función y en caso necesario en elementos adicionales (cables, etc) dispuestos a tal efecto. En algunos casos el sistema de bajadas se diseña también como captor, como puede ser en edificios altos con varias bajadas. Las sobretensiones más importantes asociadas a un rayo se generan en la conducción de la corriente a tierra y en la dispersión de dicha corriente en la tierra. En el trayecto a tierra además se genera calor.

La función del sistema de conductores de bajada a tierra es entonces conducir la corriente de la descarga de manera que las sobretensiones autoinducidas en los propios conductores o inducidas en otros sean mínimas, que la potencia disipada se limite a valores seguros compatibles con la economía de la instalación y que esté configurado de tal forma que contribuya al máximo a mitigar las sobretensiones en tierra.

Como punto de partida para el análisis de las bajadas estudiamos el comportamiento de un cable recto sometido a la corriente de un rayo. El cable se modela como una resistencia (R) en serie con una inductancia (L).

Si el cable es una bajada a tierra existe una capacidad entre el conductor y tierra. Esa capacidad debe ser tenida en cuenta en algunos tipos de sistemas. En este primer análisis no la tendremos en cuenta.

8.1. Cálculo de las inductancias

8.1.1. Modelo de captor y bajada a tierra vertical rectilínea.

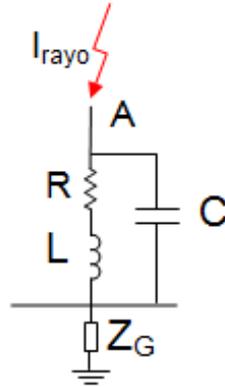


Figura 8.1: Modelo de captor y bajada a tierra vertical rectilínea.

Si por un circuito circula una corriente, entonces se genera un campo magnético que da lugar a un flujo magnético. Ese flujo es:

$$\psi = N\phi = N \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad (8.1)$$

Siendo S una superficie limitada por el circuito, \int_S la integral de superficie en ella, \vec{n} su vector normal y dS el elemento de área. El símbolo “ \cdot ” denota el producto escalar. N es la cantidad de espiras atravesadas por el flujo ϕ . Si la corriente varía, entonces varía el flujo magnético y se obtiene una fuerza electromotriz ε .

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (8.2)$$

$$\psi = NCi(t) \quad (8.3)$$

Siendo C una constante geométrica, que depende del medio y de la geometría del circuito, definimos la inductancia:

$$\varepsilon = \underbrace{NC}_{=L} \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \varepsilon = L \frac{di(t)}{dt} \quad (8.4)$$

Esa fuerza electromotriz se “opone” a la circulación de la corriente, lo que se ve como una inductancia interpuesta.

8.1.2. Conductor rectilíneo

Vamos a determinar la inductancia de un conductor rectilíneo de longitud h (la altura de una bajada por ejemplo). En general se calcula la inductancia de los solenoides, pero es claro que un conductor rectilíneo crea campo magnético en el propio espacio que ocupa y tendrá autoinductancia.

A los efectos de calcular el flujo magnético, supongamos un cilindro conductor hueco con tapas, con dos conductores que salen de los centros de las tapas hacia el exterior. Por los cables circula una corriente $i(t)$ que en el cilindro se distribuye en forma simétrica y uniforme en su superficie, con dirección y sentido paralelo a su eje. Es una corriente superficial de baja densidad.

De existir campo magnético en el interior del cilindro, el mismo será per-

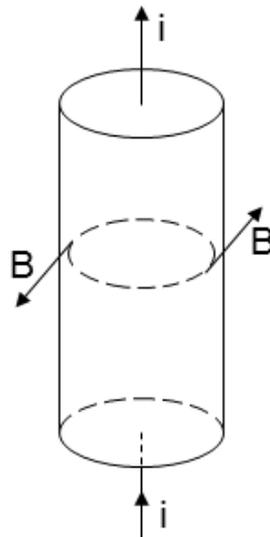


Figura 8.2: Cilindro hueco metálico con corriente circulando por el exterior paralelamente a su eje.

pendicular a la corriente $i(t)$.

Por la ley de Ampere:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = N\mu_0 i \quad (8.5)$$

Donde “.” es el producto escalar.

Si la aplicamos a una circunferencia interior al cilindro con centro en el eje y en un plano perpendicular al mismo, \vec{B} y $d\vec{l}$ son colineales. Como no hay corriente dentro del cilindro, $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$. Comprobamos entonces que el campo magnético \vec{B} dentro del cilindro generado por corrientes que circulan por su superficie es cero.

Consideremos ahora un circuito compuesto por un conductor recto cilíndrico

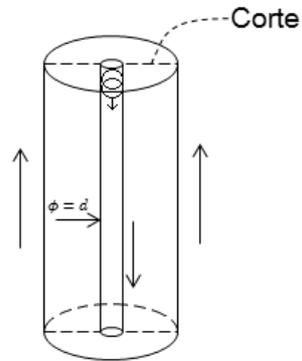


Figura 8.3: Conductor con camino de retorno.

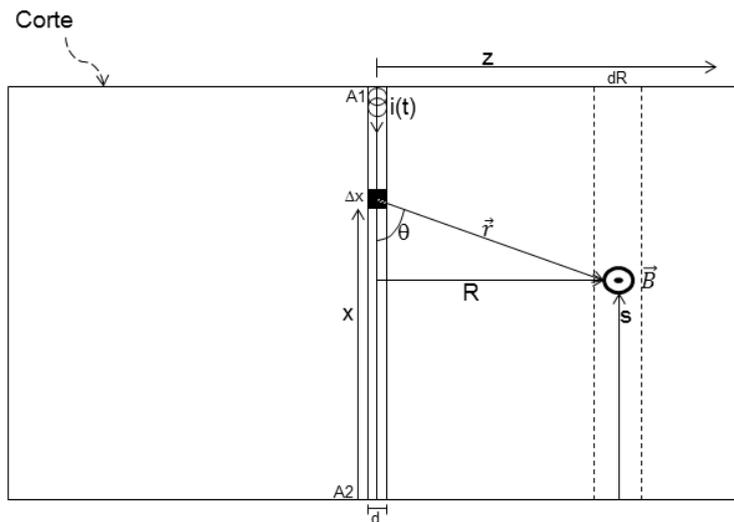


Figura 8.4: Corte ampliado del conductor con camino de retorno.

de diámetro d y altura h en serie con una fuente de corriente conectado a los centros de las tapas de un cilindro como el de la figura 8.2. La corriente circula ahora por el conductor eje y retorna por las paredes del cilindro.

El campo magnético dentro del cilindro se debe solamente al conductor central ya que como se vio las paredes del cilindro exterior no contribuyen al campo interior.

Notación:

d es el diámetro del conductor central.

z es la coordenada radial a partir del centro.

s es la coordenada vertical desde el extremo inferior del cable.

h es la longitud total del mismo.

Para un punto genérico en el cilindro, R denota la distancia al eje, S la coordenada vertical, es decir que se usan coordenadas cilíndricas. El ángulo es indiferente por la simetría del problema. Δx es el elemento de conductor cuyo efecto en el punto considerado estamos estudiando.

El campo \vec{B} a una distancia R del centro del conductor, depende de R y S , siendo S la coordenada al extremo inferior del cable.

El flujo ψ de B a través de la superficie del rectángulo de altura h y de ancho $z - \frac{d}{2}$ es el flujo asociado al campo magnético creado por el conductor central, por lo tanto su inductancia (inductancia de un conductor rectilíneo finito) vale $L = \frac{\psi}{i}$

$$\psi = \int_{p=\frac{d}{2}}^{\infty} \left[\underbrace{\int_0^h B(R, S) dS}_{d\psi} \right] dR \quad (8.6)$$

Cálculo del flujo

El campo \vec{B} total en un punto se obtiene integrando el que crea cada elemento de conductor:

$$B = \int_0^h dB$$

Por la ley de Biot Savart,

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{x} \times \vec{r}}{r^3}$$

donde \times representa el producto vectorial.

geoméricamente, $\vec{r} = \sqrt{R^2 + (x - S)^2}$

pues se forma un triángulo rectángulo.

$$d\vec{x} \times \vec{r} = dx \cdot \underbrace{r \sin(\theta)}_{\frac{R}{r}} = R dx$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \cdot \frac{R}{r^3} \cdot dx = \frac{i\mu_0}{4\pi} \frac{R}{(R^2 + (x - S)^2)^{3/2}} dx$$

$$\Rightarrow B(R, S) = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_0^h \frac{R}{(R^2 + (x - S)^2)^{3/2}} dx$$

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow B(R, S) = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{(x - S)}{(R^2 + (x - S)^2)^{1/2}} \Big|_0^h \\
\Rightarrow B(R, S) &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \left[\frac{(h - S)}{(R^2 + (x - S)^2)^{1/2}} + \frac{S}{(R^2 + (x - S)^2)^{1/2}} \right] \\
d\psi &= dR \left[\int_0^h B(R, S) dS \right] \Rightarrow \psi = \int_0^\infty d\psi \\
d\psi &= dR \frac{i\mu_0}{4\pi R} \int_0^h \left[\frac{h - S}{(R^2 + (h - S)^2)^{1/2}} + \frac{S}{(R^2 + S^2)^{1/2}} \right] ds \\
d\psi &= \frac{dR}{4\pi R} i\mu_0 \left[- (R^2 + (h - S)^2)^{1/2} - (R^2 + S^2)^{1/2} \right] \Big|_0^h = \frac{dR}{4\pi R} i\mu_0 \left[2\sqrt{R^2 + h^2} - 2R \right] \\
d\psi &= \frac{dR}{R} \frac{\mu_0 i}{2\pi} \left[\sqrt{R^2 + h^2} - R \right] \\
\psi &= \frac{\mu_0 i}{2\pi} \int_{\frac{d}{2}}^\infty \frac{\sqrt{R^2 + h^2} - R}{R} dR = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \left[\sqrt{R^2 + h^2} - h \ln \left(\frac{h + \sqrt{R^2 + h^2}}{R} \right) - R \right] \Big|_{p=\frac{d}{2}}^\infty \\
\boxed{L = \frac{\psi}{i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[h \ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + p}}{p} \right) - \sqrt{h^2 + p^2} + p \right]} & \quad (8.7)
\end{aligned}$$

Para $R \rightarrow \infty$, $\sqrt{R^2 + h^2} - R \rightarrow 0$, en tanto que $\ln\left(\frac{h + \sqrt{R^2 + h^2}}{R}\right) \rightarrow \ln 1 = 0$. Es por ello que la primitiva se evalúa en p , que luego se hará igual a $\frac{d}{2}$.

En la literatura esta inductancia suele aparecer con el logaritmo en base 10 y con ciertas aproximaciones, basadas en que $h \gg d$.

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[h \ln \frac{2h}{p} - h \right] \\
&\Rightarrow L = \frac{\mu_0}{2\pi} 2,303h \log \left(\frac{4h}{d} \right) - \frac{\mu_0}{2\pi} h \\
&\Rightarrow \boxed{L = 0,46h \log \left(\frac{4h}{d} \right) - 0,2h} \quad (8.8)
\end{aligned}$$

En donde L se expresa en μH y h y d deben ser expresados en metros.

$$\text{Cuando } h \gg d \Rightarrow \boxed{L \approx 0,46h \log \left(\frac{4h}{d} \right)} \quad (8.9)$$

No existe inductancia (L) por metro ya que la misma no es lineal con h .

Por lo tanto cuando tenemos un conductor de bajada, aproximando la co-

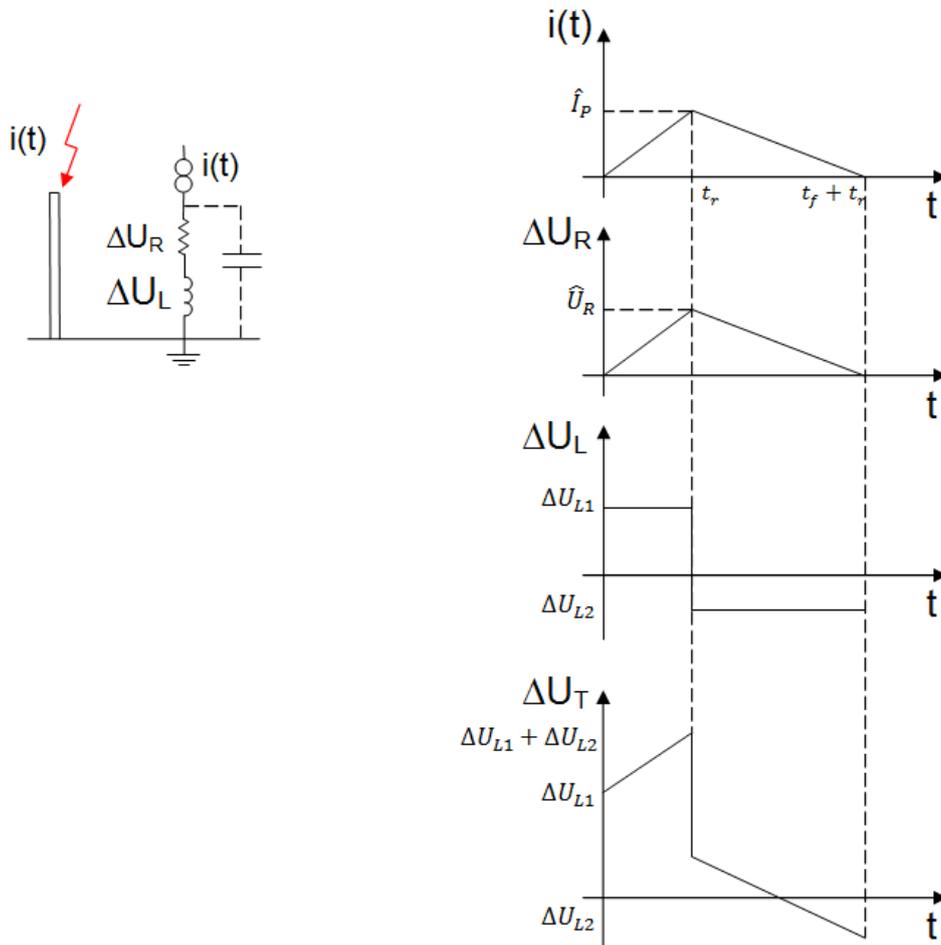


Figura 8.5: Modelo eléctrico de bajadas.

riente del rayo con un triángulo, se lo puede modelar como en la figura 8.5.

$$\Delta U_R = Ri$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta U_L = L \frac{di}{dt} \\ \frac{di}{dt} \approx \frac{\hat{I}_P}{t_r} \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta U_{L1} = \frac{L\hat{I}_P}{t_r}$$

$$\text{Luego } \frac{di}{dt} = -\frac{I_P}{t_f} \Rightarrow \Delta U_{L2} = -\frac{L\hat{I}_P}{t_f}$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\Delta U_L}{t_{UL}}$$

Siendo t_{U_L} el tiempo de subida de U_L (en la figura 8.5 es cero).
 Esto nos sirve para tener idea de cuánta corriente se va por la capacidad formada por el conductor y tierra.

8.1.3. Ejemplo numérico

Se considera un conductor de bajada a tierra de cobre de 50 mm^2 ($\phi = 8 \text{ mm}$) con una longitud de 30 m.

Resistividad del cobre: $\rho_{Cu} = 0,0175 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$.

Datos del rayo:

$I = 100 \text{ kA}$.

$t_r = 1 \mu\text{s}$.

$t_f = 100 \mu\text{s}$.

Se quiere saber la diferencia de tensión en el conductor de bajada y cuánto se calienta.

$$r = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 30}{50}$$

$$\Rightarrow \boxed{R = 0,0105 \Omega}$$

$$L = 0,46 \cdot 30 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot 30}{0,008} \right) - 0,2 \cdot 30$$

$$\Rightarrow \boxed{L = 51,6 \mu\text{H}}$$

$$\Delta U_R = 0,0105 \Omega \cdot 100 \text{ kA} \Rightarrow \boxed{\Delta U_R = 1,05 \text{ kV}}$$

$$\Delta U_L = 51,6 \mu\text{H} \frac{100 \text{ kA}}{1 \mu\text{s}} \Rightarrow \boxed{\Delta U_L = 5160 \text{ kV}}$$

$$\text{Para un rayo de } \left. \begin{array}{l} t_r = 2 \mu\text{s} \\ I = 30 \text{ kA} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta U_R = 300 \text{ V} \\ \Delta U_L = 774 \text{ kV} \end{array} \right.$$

Entonces se puede concluir que el efecto de la resistencia es despreciable frente al de la inductancia, ya que la caída de tensión en la resistencia es mucho menor que la caída de tensión en la inductancia. Entonces es posible despreciar la resistencia y tomar la bajada como inductiva pura.

Si cambiamos el material, observamos que la inductancia no cambia si se mantienen las dimensiones del conductor: si la bajada fuere de hierro vale que $\Delta U_{R_{Fe}} = 6 \Delta U_{R_{Cu}}$ y la caída de voltaje debido a la resistencia sigue siendo despreciable frente a ΔU_L .

8.2. Calentamiento

Supongamos una corriente de rayo triangular, cuyo tiempo de subida es de $1 \mu s$ y cuyo tiempo de bajada t_f (del pico hasta que se hace cero) es de $300 \mu s$.

Consideramos que es prácticamente un triángulo rectángulo (t_r aproximadamente cero). Entonces:

$$\begin{aligned} \frac{W}{R} &= \int_0^{t_f} \left(\hat{I} - \frac{\hat{I}}{t_f} t \right)^2 dt \Rightarrow \boxed{\frac{W}{R} = \frac{\hat{I}^2}{3} t_f} \\ \Rightarrow \frac{W}{R} &= \frac{(100 \text{ kA})^2 \cdot 300 \mu s}{3} \Rightarrow \boxed{\frac{W}{R} = 10^6 \text{ J}/\Omega} \end{aligned}$$

Si este cable es una varilla de hierro de 30 m $\Rightarrow \boxed{R = 0,06 \Omega}$ por lo que la resistencia resulta 6 veces mayor a la del cable.

$$W = 0,006 \times 10^6 \Rightarrow \boxed{W = 60 \text{ kJ}}$$

Para calcular la elevación de la temperatura se utiliza el calor específico del material. Por definición:

$$\boxed{\Delta T = \frac{W}{M \cdot C_{Fe}}}$$

Donde:

- ΔT : Elevación de temperatura [$^{\circ}C$].
- W : Energía (Calor suministrado al material en Joules).
- M : Masa [kg].
- C_{Fe} : Calor específico del hierro [$\frac{J}{kg^{\circ}K}$].

$$C_{Fe} = 469 \frac{J}{kg^{\circ}K}.$$

La masa del conductor la podemos calcular mediante la siguiente fórmula:

$$M = V \cdot d$$

Donde:

- V : Volumen [m^3].
- d : Densidad [$\frac{kg}{m^3}$].

$$\Rightarrow M = 50 \times 10^6 \cdot 30 \cdot 7800 \Rightarrow \boxed{M = 12 \text{ kg}}$$

$$\Rightarrow \Delta T = \frac{60000}{(12)(469)} \Rightarrow \boxed{\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Si consideramos un conductor de 2 mm^2 de cobre de 30 m de longitud:

$$R = \frac{(0,0175)30}{2} \Rightarrow \boxed{R = 0,26 \text{ } \Omega}$$

$$W = (0,26)10^6 \Rightarrow \boxed{W = 2,6 \times 10^5 \text{ J}}$$

$$M = 2 \times 10^6 \cdot 30 \cdot 8900 \Rightarrow \boxed{M = 0,53 \text{ kg}}$$

$$\Delta T = \frac{2,6 \times 10^5}{(0,53)390} \Rightarrow \boxed{\Delta T = 1257 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Ahora bien, la temperatura de fusión del cobre es 1083°C . Para llegar a esa temperatura desde por ejemplo 25°C , podemos ver que se necesita una energía algo menor, de $2,18 \times 10^5 \text{ J}$. El exceso de energía es de 42.000 joule.

El calor de fusión del cobre es de $205000 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}$.

Para fundir los 0,53kg se necesitan entonces 108.000J. El alambre llega entonces a 1083°C y los 42.000 Joules se absorben durante la fusión, que si bien no llega a completarse totalmente daña seriamente al material. En suma, se requiere una bajada más robusta en este caso.

8.3. Comparación entre conductor rectilíneo y cinta

Cuando se quiere bajar sustancialmente la autoinductancia de una bajada para limitar la subida de tensión, se usan a veces conductores en forma de cinta en lugar de cilíndricos. Es evidente que la variación es más notoria en bajadas cortas, pues si la cinta es muy larga su ancho se vuelve despreciable frente a su largo. Una aplicación aconsejable es el aterramiento de tableros de entrada.

Su inductancia es:

$$\boxed{L_{cinta} = 0,46(h) \log_{10} \left(\frac{2h}{w+t} \right) + (0,1)h + 0,045(w+t)} \quad (8.10)$$

$$\text{Sea un conductor rectilíneo } \begin{cases} S = 50 \text{ mm}^2 \\ \phi = 8 \text{ mm} \\ l = 30 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow \boxed{L_{cable} \approx 52 \text{ } \mu\text{H}}$$

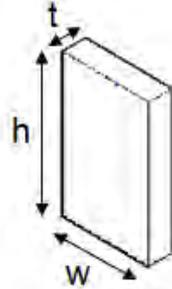


Figura 8.6: Cinta.

$$\text{Sea una cinta de la misma sección } \begin{cases} t = 0,5 \text{ mm} \\ w = 100 \text{ mm} \\ l = 30 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow \boxed{L_{\text{cinta}} \approx 41 \mu\text{H}}$$

Suponiendo que tenemos que las longitudes del cable y la cinta son de 2 m de longitud obtenemos las siguientes inductancias:

$$\begin{aligned} L_{\text{cable}} &= 2,46 \mu\text{H} \\ L_{\text{cinta}} &= 1,67 \mu\text{H} \end{aligned}$$

Entonces si el conductor de bajada es corto (un par de metros o menos) conviene poner cintas ya que la inductancia es del orden de la mitad que la de los cables.

8.4. Efecto de los ángulos en las bajadas

En las curvaturas de los conductores de bajada se produce un aumento del campo magnético, aumentando la inductancia y por lo tanto la fem auto-inducida. Entonces se debe tener en cuenta esta curvatura para que no salten chispas debido al aumento de la fem en un tramo muy corto, que puede generar localmente una tensión por encima de la de ruptura del aire (ver figura 8.7).

Los ángulos realizados con cintas no producen un mayor aumento del campo magnético pues el campo va por los bordes de la cinta, por lo que resulta útil su utilización cuando es inevitable efectuar curvas en el conductor de bajada. Ver figura 8.8

Cuando se utilizan cables como conductores de bajada y se requiere realizar un doblé, es recomendable realizarlo como se indica en la figura 8.9.

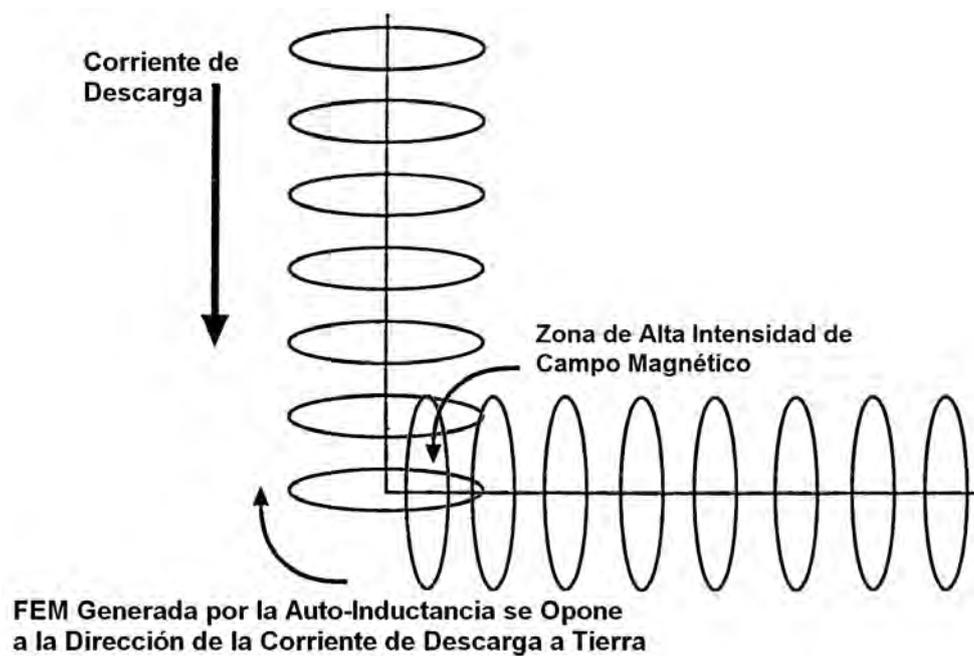


Figura 8.7: Efecto de ángulos en las bajadas.

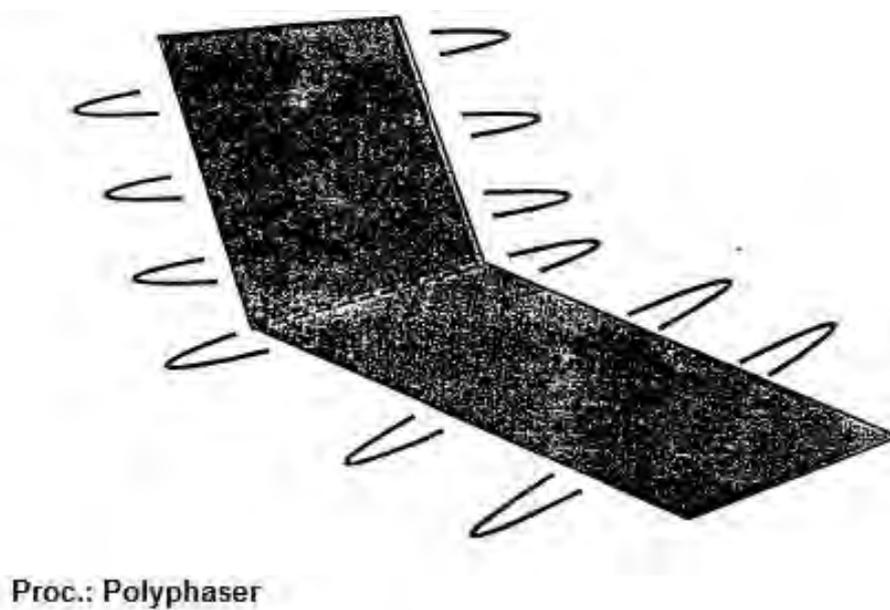


Figura 8.8: Los campos magnéticos en conductores planos son más intensos en los bordes.

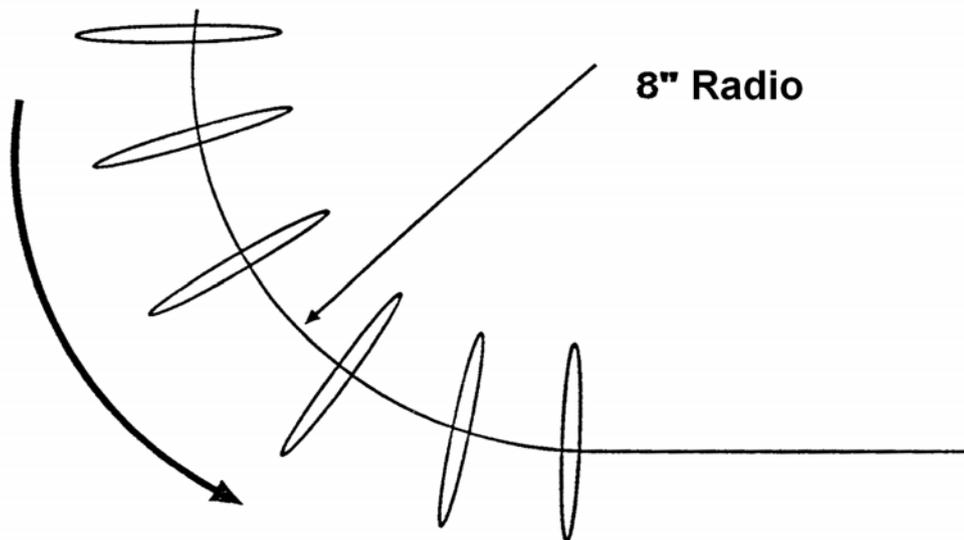


Figura 8.9: Forma de disminuir la inductancia agregada por ángulos - Recomendación de NFPA 780.

8.5. Interacciones de la bajada con otros conductores

8.5.1. Riesgo de descarga lateral

Cuando se realiza una bajada, deben estudiarse los elementos conductores cercanos a la bajada y decidir si es necesario o no conectarlos a los mismos, según exista riesgo o no de descarga lateral.

Para que exista una descarga lateral se deberá cumplir que $\frac{U}{s} > 500 \frac{kV}{m}$ siendo s la distancia entre los conductores.

Consideramos la situación de la fig 8.10. Una bajada de diámetro d corre paralela a un conductor de altura h separado una distancia s en contacto con la tierra. Suponiendo que las tierras se encuentran unidas, entonces U_T se debe solamente a variaciones del flujo entre los conductores. Si no se consideran unidas, entonces se debe agregar un término R (suponiendo que antes de la descarga lateral no se tiene corriente por el conductor).

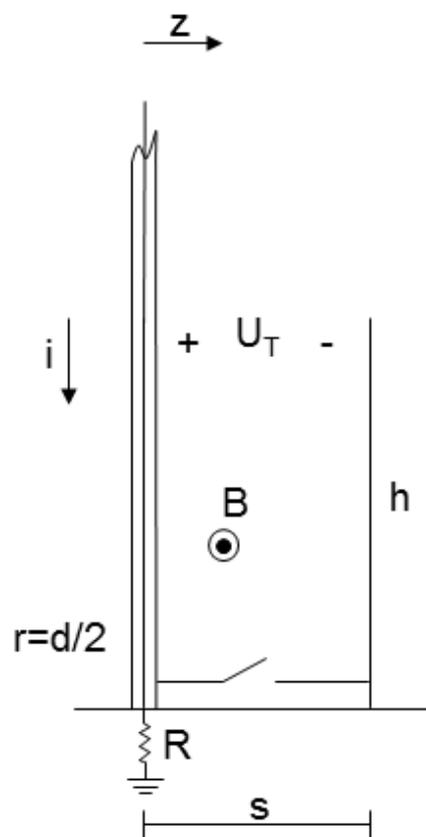


Figura 8.10: Descarga lateral.

U_T : Tensión de transferencia.

Considerando que se tiene las tierras interconectadas.

$$U_T = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_0^h \int_r^s B(z) dz dh$$

Aproximando el campo por el de un conductor rectilíneo infinito se tiene:

$$\begin{aligned}\psi &= \int_0^h \int_r^s \left(\frac{\mu_0 i}{2\pi z} \right) dz dh \\ \psi &= \frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln \left(\frac{s}{r} \right) h \\ U_T &= \frac{d\psi}{dt} = \left[\frac{\mu_0 i}{2\pi} \ln \left(\frac{s}{r} \right) h \right] \frac{di}{dt} \\ \Rightarrow M_T &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{s}{r} \right) h\end{aligned}$$

Siendo M_T la inductancia mutua de transferencia, definida como la que genera la tensión de transferencia U_T .

Entonces se tendrá una descarga lateral si la tensión U_T crece con la distancia con una pendiente mayor a $500 \frac{kV}{m}$.

Según sean los valores de h , s , r se pueden obtener las curvas (1) y (2). Con la curva (1) no se tendrá una descarga lateral, mientras que con la curva (2) se tendrá riesgo de descarga lateral contra cualquier conductor ubicado entre r y P .

Ahora si quitamos la interconexión entre los dos conductores la tensión de

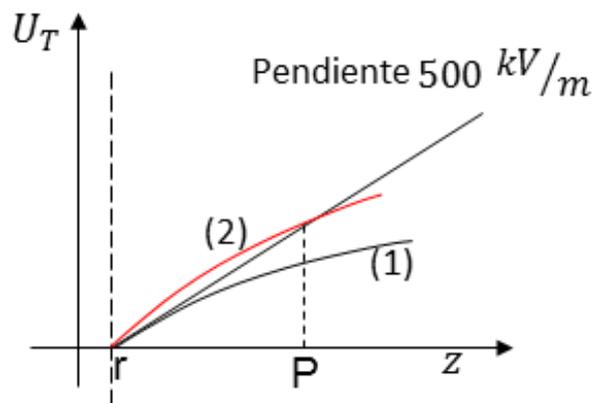


Figura 8.11: Descarga lateral conductores con tierras interconectadas.

transferencia queda de la siguiente manera:

$$U_{T \text{ Total}} = M_T \frac{di}{dt} + Ri(t)$$

R es aproximadamente del orden de algunos Ω , por lo que $Ri(t)$ no es despreciable.

Ahora si desconectamos ambos conductores, en la parte inferior aparece el término $R_i(t)$, lo que determina que la curva de la tensión de transferencia suba, entonces salta arco.

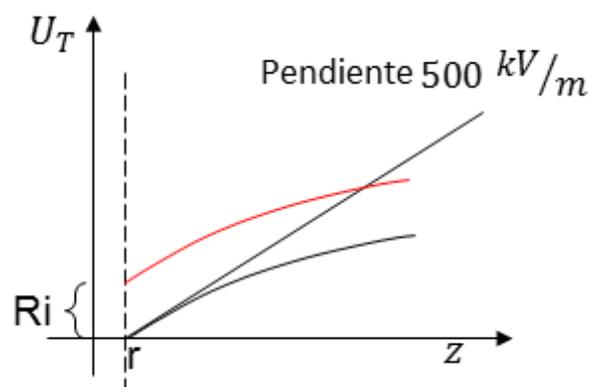


Figura 8.12: Descarga lateral conductores con tierras no interconectadas.

8.5.2. Tensión inducida en un conductor

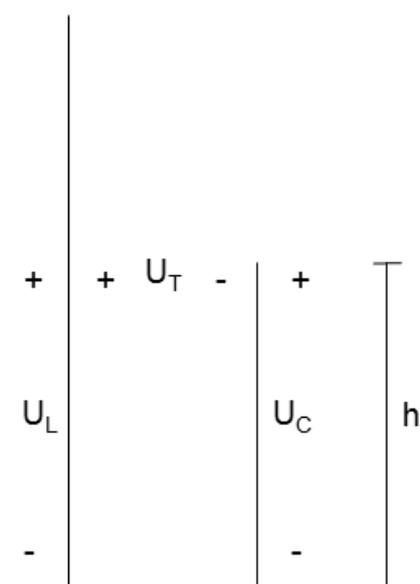


Figura 8.13: Tensiones entre dos conductores.

$$U_L \cong 0,46h \log \left(\frac{4h}{d} \right) \frac{di}{dt} - 0,2h$$

$$U_T = 0,46h \log \left(\frac{s}{r} \right) \frac{di}{dt}$$

$$U_C = U_L + U_T$$

$$U_C = \left[0,46h \left(\log \left(\frac{4h}{d} \right) - \log \left(\frac{2s}{d} \right) \right) - 0,2h \right] \frac{di}{dt}$$

$$\text{Siendo } r = \frac{d}{2}$$

Despreciando el término 0,2h obtenemos:

$$\Rightarrow U_M = \underbrace{0,46h \log \left(\frac{2h}{s} \right)}_{\text{Mutua entre ambos conductores}} \frac{di}{dt}$$

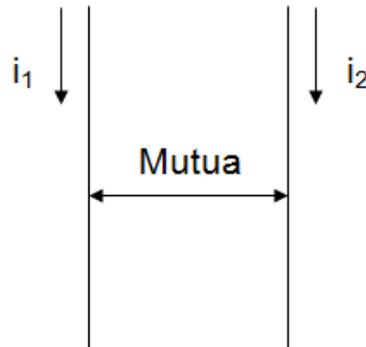


Figura 8.14: Tensiones mutuas.

$$M \frac{di_1}{dt} = U_{i_2}$$

$$U_C = L \frac{di}{dt} = 0,46h \log \left(\frac{4h}{d} \right) \frac{di}{dt}$$

$$U_T = M_T \frac{di}{dt} = 0,46h \log \left(\frac{2s}{d} \right) \frac{di}{dt}$$

$$U_M = M \frac{di}{dt} = 0,46h \log \left(\frac{2h}{s} \right) \frac{di}{dt}$$

El sistema de ecuaciones U_C , U_T , U_M permite determinar cómo influye la corriente de rayo de un conductor en otro y permite determinar cómo se reparten las corrientes en los conductores de bajada.

8.5.3. Interacciones entre bajadas iguales

Se consideran dos bajadas iguales separadas una distancia “s”, bajo la hipótesis que la resistencia $R_B \approx 0$, por lo que únicamente se considerará la inductancia L_B .

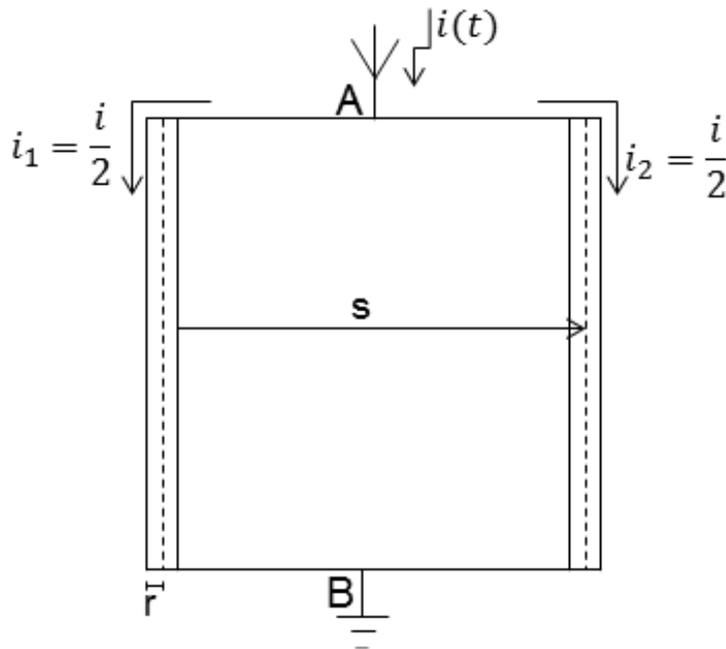


Figura 8.15: Interacción entre bajadas iguales.

$$U_{AB} = L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

Suponemos que $i_1 = i_2 = \frac{i}{2}$

$$\Rightarrow U_{AB} = 0,46h \log \left(\frac{2h}{r} \right) \frac{1}{2} \frac{di}{dt} + 0,46h \log \left(\frac{2h}{s} \right) \frac{1}{2} \frac{di}{dt}$$

$$= 0,46h \left[\log \left(\frac{2h}{r} \right) + \log \left(\frac{2h}{s} \right) \right] \frac{1}{2} \frac{di}{dt}$$

$$\text{Si } s \rightarrow r \Rightarrow U_{AB} = 0,46h \log \left(\frac{2h}{r} \right) \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

Entonces se comporta como un solo conductor, por lo que no se gana nada si se instalan dos bajadas juntas.

Cuando s crece (hasta una distancia aproximadamente igual a $2h$), entonces U_{AB} queda en la mitad:

$$U_{AB} = \left[0,46h \log \left(\frac{2h}{r} \right) \right] \frac{1}{2} \frac{di}{dt}$$

Entonces la corriente se reparte por igual, pero la tensión baja según la separación existente entre los conductores de bajada.

8.5.4. Interacciones entre bajada natural (torre) y bajada adicional (conductor)

Consideremos una torre de 30 m de altura con una inductancia L_T y una bajada con una inductancia L_B .

$$\text{Datos numéricos: } \begin{cases} L_B = 53 \mu H \\ L_T = 24 \mu H \\ \frac{di}{dt} = 20 \frac{kA}{\mu s} \end{cases}$$

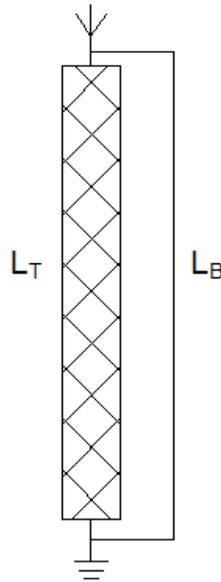


Figura 8.16: Torre.

$$\begin{aligned} U_{AB} &= L_B \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_T}{dt} \\ &= L_T \frac{di_T}{dt} + M \frac{di_B}{dt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{di_T}{dt} + \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_T}{dt} &= \frac{L_B - M}{L_B + L_T - 2M} \frac{di}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} &= \frac{L_T - M}{L_B + L_T - 2M} \frac{di}{dt} \end{aligned}$$

Si consideramos la mutua $M = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{di_T}{dt} &= \left(\frac{53}{24 + 53} \right) 20 \frac{kA}{\mu s} \Rightarrow \boxed{\frac{di_T}{dt} = 6,2 \frac{kA}{\mu s}} \\ \frac{di_B}{dt} &= \left(\frac{24}{24 + 53} \right) 20 \frac{kA}{\mu s} \Rightarrow \boxed{\frac{di_B}{dt} = 13,74 \frac{kA}{\mu s}} \end{aligned}$$

Si consideramos la mutua, de forma empírica para torre y coaxiales:

$$M \approx 0,166 \sqrt{L_T \cdot L_B} \approx 6 \mu H$$

$$\frac{di_B}{dt} = 5,5 \frac{kA}{\mu s}$$

$$\frac{di_T}{dt} = 14,5 \frac{kA}{\mu s}$$

Por lo tanto la inductancia mutua aumenta la diferencia entre las derivadas de las corrientes. Si consideramos crecimiento lineal de la corriente hasta su máximo, la relación vale para las corrientes pico.

8.5.5. Interacciones entre bajada y estructura

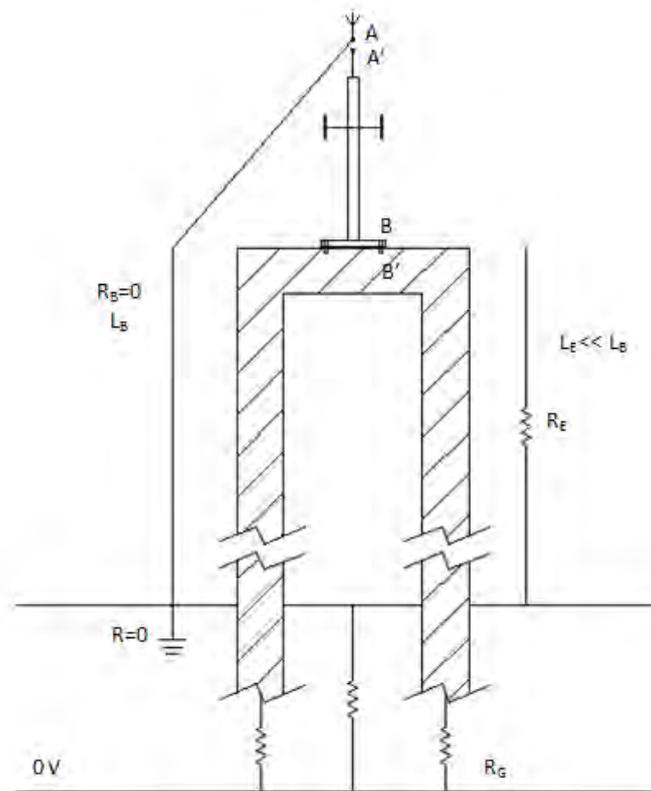


Figura 8.17: Edificio.

Consideremos el edificio de la figura. El mismo cuenta con una antena con pararrayos y con base abulonada al edificio. Se considerarán las siguientes hipótesis:

- Resistencia de conductor de bajada cero, $R_B = 0$. Representa lo que uno pretendería de un conductor de bajada.

- Estructura con resistencia R_E .
- Puesta a tierra de la estructura R_G .
- Inductancia de la estructura mucho menor que de la bajada $\Rightarrow L_E \ll L_B$; a raíz de su geometría.

El conjunto del edificio presentará el circuito eléctrico equivalente indicado en la figura 8.18.

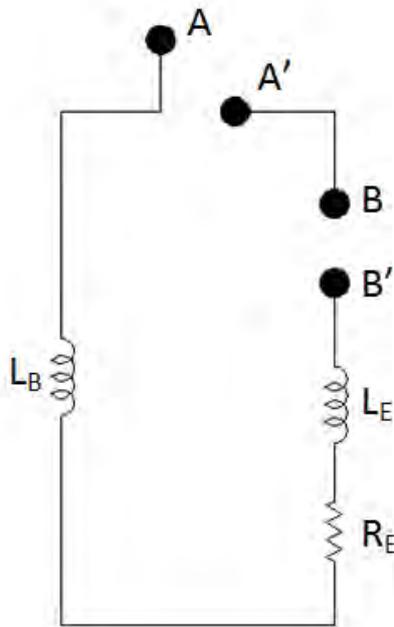


Figura 8.18: Circuito equivalente.

1. Considerando A separado de A' : La corriente I de un rayo circulará por la bajada. El $\frac{di}{dt}$ genera una tensión a lo largo de la bajada de tal magnitud que seguramente salte un arco entre $A - A' \Rightarrow$ la corriente se distribuirá entre la bajada y la estructura.
2. A unido con A' y $B - B'$ mal conectado: toda la tensión desarrollada en la bajada se establece en $V_{BB'}$ \Rightarrow en esa zona se producirá un chisperío y luego la corriente se distribuirá entre la bajada y la estructura.

Entonces la situación que resulta siempre y que hay que estudiar es $A - A'$ y $B - B'$ en contacto. Sobre todo, en la práctica, hay que cuidar que

esos contactos sean buenos desde la construcción del edificio o, si ya fue construido, asegurar la continuidad eléctrica con elementos adicionales. Con las corrientes por la bajada (B) y la estructura (E).

$$i_E + i_B = i(t)$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} = L_B E \frac{di_E}{dt} + (R_E + R_G) i_E$$

Suponemos una corriente según la figura 8.19.

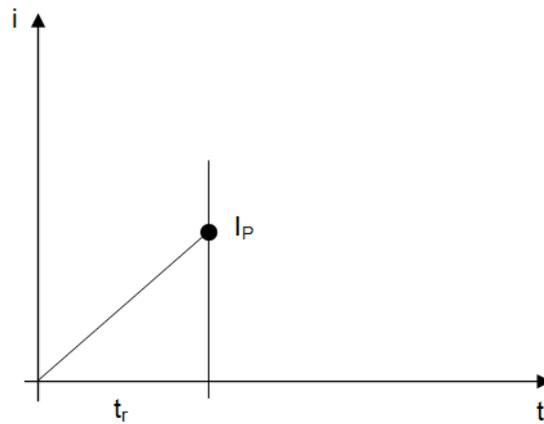


Figura 8.19: Corriente de pico.

$$i(t) = \frac{I_P}{t_r} t$$

Valores máximos:

$$1.^{\text{er}} \text{ stroke} : \begin{cases} I = 200 \text{ kA} \\ t_r = 5 \mu\text{s} \end{cases}$$

$$2.^{\text{do}} \text{ stroke} : \begin{cases} I = 50 \text{ kA} \\ t_r = 0,25 \mu\text{s} \end{cases}$$

$$R = R_G + R_E$$

$$i_B(t) = -\frac{L_B}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_B + L_E} t} \right) + \frac{I_P}{t_r} t$$

$$i_E(t) = i - i_B(t) = \frac{L_B}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L_B + L_E} t} \right) + \frac{I_P}{t_r} t$$

El circuito es válido hasta que se produce algún arco (flash over), luego el circuito cambia.

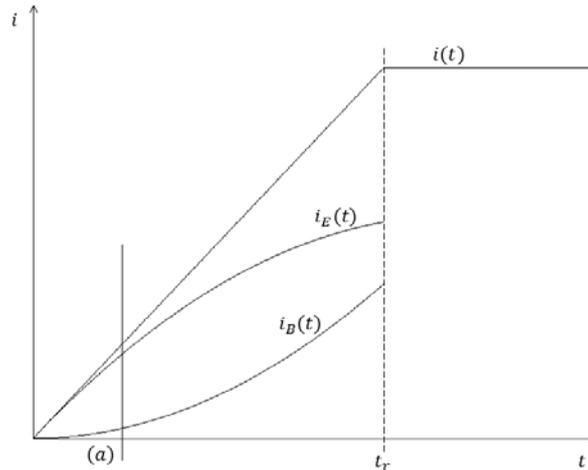


Figura 8.20: Reparto de corriente en edificio.

$i(t)$ es la total.

i_E la que va por la estructura.

i_B la que va por la bajada.

En (a) la corriente se reparte de acuerdo a las inductancias (más inductancia \Rightarrow menos corriente), por lo tanto la mayor parte de la corriente inicial se va por la estructura.

Luego de t_r la corriente baja con menos pendiente, por lo tanto circulará por la bajada de acuerdo más bien a las resistencias.

De lo expuesto surgen las siguientes recomendaciones, para que no haya sobretensiones ni descargas localizadas.

1. Usar en lo posible la estructura como parte de la bajada.
2. Instalar como mínimo dos bajadas simétricas en relación a la estructura de igual longitud.
3. Adosar bajadas a la estructura para evitar descargas bajada-estructura.
4. Unir todo lo que genera diferencias de potencial.

Capítulo 9

Conexiones y Cableados de Tierra.

La puesta a tierra en el contexto de un sistema de protección contra descargas atmosféricas es parte esencial de los tres niveles de protección.

El diseño de la puesta a tierra debe asegurar:

1. La transferencia de la carga a tierra, limitando además el aumento de potencial en el punto de impacto.
2. La limitación de tensiones y corrientes creadas directamente o inducidas en conductores de tierra que vinculan los equipos del sistema a proteger.
3. Un adecuado retorno de eventuales corrientes de descarga a través de dispositivos locales de protección.

Los conductores involucrados en 2) y 3) pueden ser además parte de otros sistemas de tierra, distintos del de descargas atmosféricas:

- a) La puesta a tierra de protección del sistema en baja frecuencia (50 Hz) o “tierra de potencia”.
- b) El sistema de tierra de señal asociado a la performance de equipos electrónicos.
- c) La puesta a tierra de las estructuras metálicas no eléctricas del edificio o sistema a proteger.
- d) Planos de tierra para antenas.

El diseño de la puesta a tierra para descargas atmosféricas está por lo tanto fuertemente relacionado con el diseños de los sistemas a) a d).

Las finalidades básicas de la conexión eléctrica a tierra o “puesta a tierra” de un sistema o equipo son:

1. Seguridad personal.
2. Protección del equipamiento contra daños.
3. Reducción del ruido en equipo electrónico.
4. Referencia de tensión cero para la electrónica.
5. Plano de tierra sintonizado para antenas de AM.

Como se verá en el desarrollo del capítulo, los factores que afectan la performance de una puesta a tierra en una protección contra descargas atmosféricas son los siguientes:

1. La impedancia de tierra.
2. La configuración del sistema de tierra.
3. El diseño general del sistema.

9.1. Criterios de diseño del sistema de puesta a tierra

La puesta a tierra de protección de potencia se diseña para corrientes altas de 50 Hz, que pueden circular durante cientos de milisegundos. La resistencia de los conductores y de la puesta a tierra debe ser por lo tanto la más baja posible. La caída de tensión de origen inductivo en los conductores es sensiblemente menor que la resistiva.

Las corrientes involucradas en descargas de retorno de rayos presentan anchos de banda del orden de los MHz, con pendientes de subida del orden de $50 - 100 \frac{kA}{\mu s}$. Por lo tanto los componentes inductivos y capacitivos inciden fuertemente en el comportamiento de la puesta a tierra. De todos modos un bajo valor de la componente resistiva es importante y es una guía para la elección y dimensionado de los componentes.

Generalmente se toman los siguientes criterios para el diseño:

- Debe transferir carga a tierra, limitando la subida de tensión en el punto de impacto. Llamada GPR por su sigla en inglés (Ground Potential Rise).

- Se debe limitar la corriente y la tensión (directa e inducida) en conductores entre elementos del sistema a proteger.
- Se debe asegurar el retorno de corrientes a través de protectores.
- Se debe asegurar la dispersión de la carga y configurar los conductores en tierra de manera de disminuir las diferencias de potencial (GPD - Ground potential differences) entre distintas partes del sistema a proteger.
- Se debe estudiar la coordinación con las otras puestas a tierra (potencia, elementos metálicos no directamente vinculados a aparatos eléctricos, electrónica y plano de tierra en antenas).

9.2. Resistencia de puesta a tierra

9.2.1. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra fue realizado en los años 30 por Dwight, quién realizó el cálculo para distintas configuraciones.

El ejemplo más simple es el electrodo semiesférico de radio a .

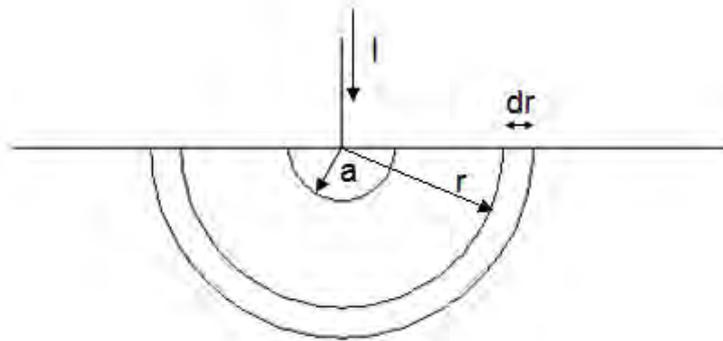


Figura 9.1: Electrodo semiesférico.

Si la resistividad del terreno es uniforme, la resistencia del casquete semiesférico de espesor dr y radio r de la figura 9.1 vale

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi r^2}$$

$$\text{la resistencia total: } R_{a \rightarrow \infty} = \int_a^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (9.1)$$

Si se quiere calcular el valor del potencial E con respecto a un punto infinitamente alejado:

$$U_{E\infty} = I \frac{\rho}{2\pi a} \quad (9.2)$$

¿Por qué es importante la resistencia de un electrodo semiesférico? Los conductores de la puesta a tierra pueden formar un sistema complejo, pero a cierta distancia del mismo la corriente comienza a distribuirse como proveniente de un electrodo semiesférico. Como se verá, en esto se basa la medida de la resistencia de puesta a tierra.

9.2.2. Medición de la resistencia de puesta a tierra

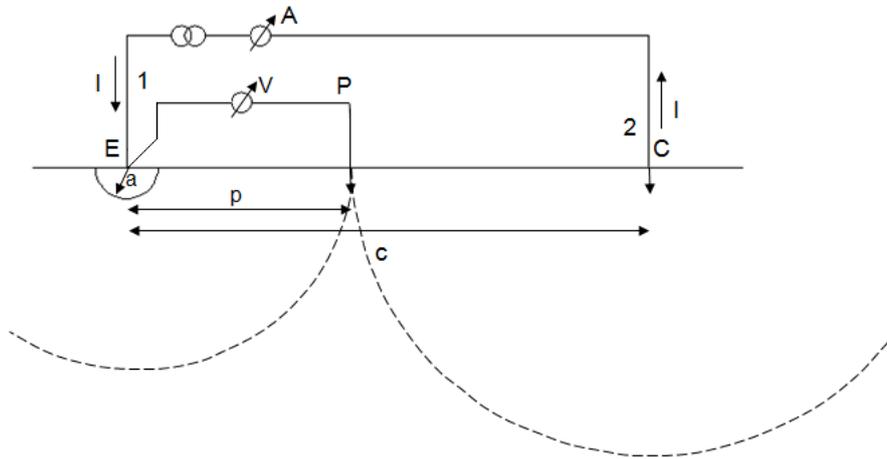


Figura 9.2: Medida de puesta a tierra.

Un método para medir la resistencia de una puesta a tierra consiste en clavar una pica a una distancia c de la puesta a tierra a medir, y otra a una distancia p . Entre la puesta a tierra E y el punto C se hace circular una corriente I mediante el circuito externo indicado en la figura 9.2. Mediante un voltímetro se mide la caída de tensión entre E y el punto intermedio P . La resistencia medida es entonces el cociente $\frac{U_{EP}}{I}$.

Esa resistencia medida varía con la posición del punto P . Para obtener el punto en que la resistencia medida es la de la puesta a tierra en estudio hacemos el cálculo para un electrodo de valor de puesta a tierra conocido: el electrodo semiesférico con valor según ecuación (9.1). La diferencia de potencial entre E y P se calcula sumando las contribuciones de las corrientes I entrante por E y $-I$ (saliente por C) a la elevación de potencial de E y P

respecto a un punto infinitamente alejado.

La resistencia a medir será:

$$R_{medida} = \frac{U_{E\infty} - U_{P\infty}}{I}$$

Considerando la ecuación (9.2) se calcula el potencial del punto E y P respecto a un punto infinitamente alejado (se supone que en el electrodo hemisférico no hay caída de tensión, el potencial de E y el del borde de la semiesfera es el mismo):

$$U_{E\infty} = U_{E_{inyi}} - U_{E_{sati}} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{c-a} \right)$$

$$U_{EP\infty} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{c-p} \right)$$

$$U_{Med} = U_{E\infty} - U_{EP\infty} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{c-a} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} \right)$$

$$R_{Med} = \frac{U_{Med}}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \left(1 - \frac{a}{c-a} - \frac{a}{p} + \frac{a}{c-p} \right)$$

Si se trata de un electrodo semiesférico se debe obtener una resistencia de la forma indicada en la ecuación (9.1), lo que implica que se debe cumplir la siguiente condición:

$$\begin{aligned} -\frac{a}{c-a} - \frac{a}{p} + \frac{a}{c-p} &= 0 \\ \Rightarrow \frac{1}{c-a} + \frac{1}{p} &= \frac{1}{c-p} \end{aligned}$$

Como $a \ll c$, entonces se cumple que $\frac{1}{c-a} \approx \frac{1}{c}$.

Usando esa aproximación y haciendo unas sencillas cuentas obtenemos la ecuación de segundo grado:

$$p^2 + cp - c^2 = 0$$

Al resolverla obtenemos:

$$\boxed{p = 0,62c}$$

Entonces el valor de p antes mencionado es el que hace que el valor medido coincida con el valor verdadero. Lo que equivale a decir que la pica P debe estar a una distancia del 62% de la distancia c.

Aplicación del método a cualquier puesta a tierra.

Lo calculado es válido para un electrodo semiesférico. Para medir una puesta a tierra compleja se toma una distancia c claramente mayor que la supuesta extensión de la puesta a tierra en el terreno. Se mide entonces la resistencia según la ecuación (9.2) con la pica en el punto P a una distancia $p_e = 0,62c$ y luego se repite la medida para p mayores y menores que p_e en un rango de distancias de al menos $p_e \pm 0,1c$. Si el resultado de la medida es aproximadamente el mismo en ese entorno (se admite variación de algunas unidades porcentuales), puede decirse que la resistencia medida es aproximadamente la de la puesta a tierra real; la pica está suficientemente alejada de la puesta a tierra y de la pica del punto c como para que la diferencia de potencial U_{EP} sea aproximadamente constante. Se asume entonces que la curva de potencial es la de una puesta a tierra semiesférica. (ver figura 9.4). Se considera que las tomas de tierra están desacopladas.

Si por el contrario el valor obtenido (proporcional a la diferencia de potencial según (9.2)) varía apreciablemente, aumentando al aumentar p , se infiere que la distancia c es demasiado corta como para que en el segmento EC haya una zona desde la cual la puesta a tierra pueda asimilarse a una semiesférica. Se aumenta la distancia y se repite el procedimiento hasta llegar a un valor c tal que exista un segmento de aproximadamente $0,2c$ de longitud en el que la diferencia de potencial y por lo tanto la resistencia medida sea aproximadamente constante. Ese valor de resistencia es entonces el que se toma como resistencia de la puesta a tierra en estudio.

Si tomamos medidas de resistencia moviendo la pica P entre E y C obtenemos curvas como la que se muestran en la figuras 9.5 y 9.6. la figura 9.5 muestra claramente la zona de resistencia constante, que se tomará como resistencia de puesta a tierra. La Figura 9.6 corresponde a la puesta a tierra de una subestación, muestra los resultados de usar distancias c demasiado cortas (la subestación tiene una puesta a tierra extensa) y el efecto de agrandar el valor c . (número que identifica la curva, expresado en metros).

La frecuencia de la corriente que se inyecta no puede ser múltiplo de 50 o 60 Hz, ya que normalmente existen corrientes de tierra de esas frecuencias y sus armónicos, provocadas por los sistemas eléctricos, que tienen tierras de protección e incluso retornos por tierra (electrificación rural). Usualmente se emplea $f = 128$ Hz, aunque también se usan otros valores (94, 105, 111). La medida de tensión se filtra para que sólo detecte la caída de tensión provocada por la corriente inyectada. No puede utilizarse corriente continua porque se producen efectos electrolíticos en el suelo que pueden afectar la medida.

La fuente de corriente, el voltímetro, el filtro y sus contactos usualmente

conforman un único instrumento llamado telurímetro. La lectura principal es el cociente $\frac{V}{I}$.

En la figura 9.3 se indica la disposición de los electrodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra y su conexión al telurímetro (método de tres contactos). Los contactos C1 y C2 corresponden a la fuente de corriente, mientras que P1 y P2 corresponden a la medida de tensión. La corriente inyectada es del orden de 10 a 100 mA.

La figura 9.4 muestra los potenciales y da la evolución entre la resistencia medida y la resistencia de puesta a tierra para diferentes valores de relación c/a .

Como ya se indicó, en la figura 9.6 se puede observar la dificultad que puede tener una buena medida de la resistencia de puesta a tierra. Una subestación tiene distintas puestas a tierra distribuidas y malla de tierra. La subestación del ejemplo está rodeada por una cerca metálica aterrada de 25 x 31 m.

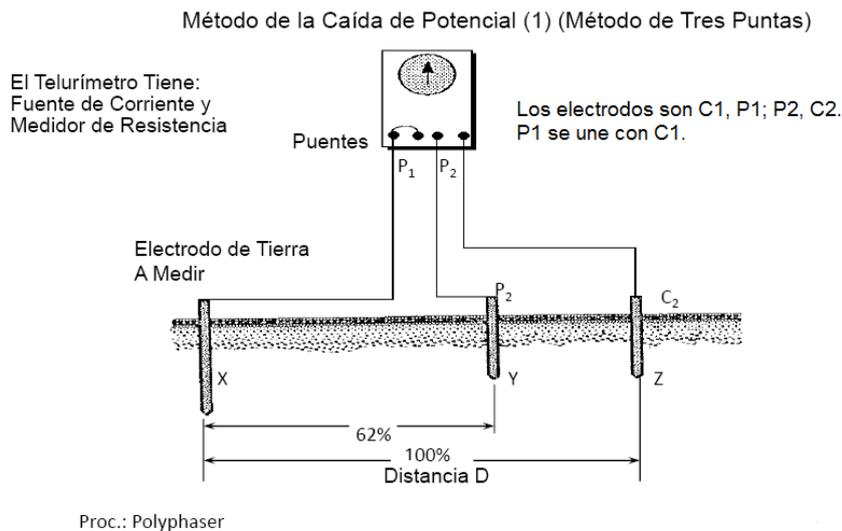


Figura 9.3: Medida de la puesta a tierra.

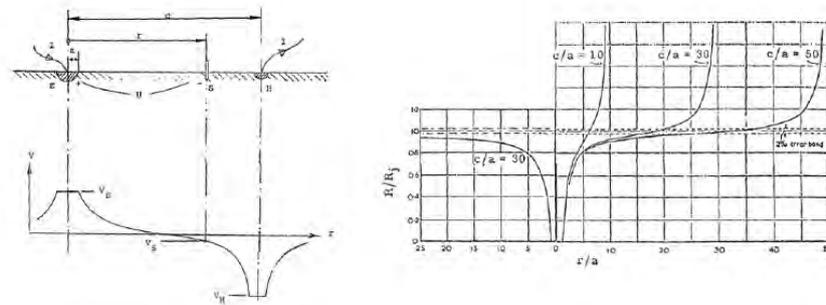


Figura 9.4: Fundamento geométrico del método de tres electrodos para la puesta a tierra.

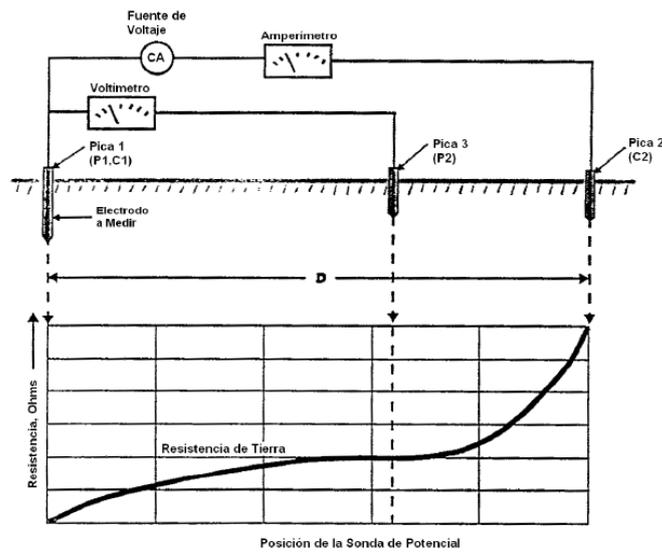


Figura 9.5: Método de la caída de potencial.

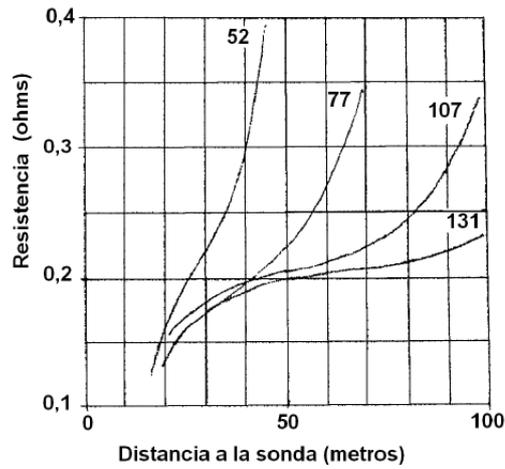
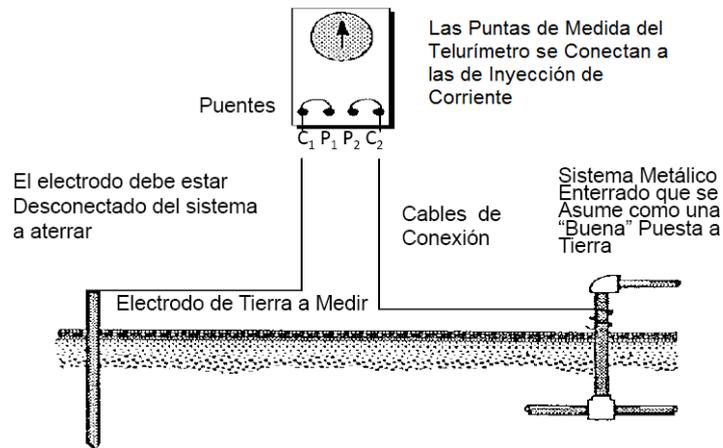


Figura 9.6: Ejemplo de dificultad de obtener una buena medida de tierra

Muchas veces es difícil aplicar el método descrito en la figura 9.2. Si se tiene acceso a un sistema metálico que pueda ser considerado una tierra de muy baja resistencia se puede realizar una medida aproximada de acuerdo a la figura 9.7.



Proc.: Polyphaser

Figura 9.7: Medida de la puesta a tierra método de dos puntas

9.3. Resistividad del terreno

En lo anterior hemos considerado terreno homogéneo en cuanto a resistividad. Esto no sucede en la práctica, la composición del suelo es muy variable, y la resistividad puede ser desde la de un buen conductor (metales, agua salada) hasta la de un aislante (granito).

La resistividad se ve además afectada por distintos factores:

- Contenido de la humedad: en general más humedad implica mejor conducción.
- Nivel de minerales: Más iones, mejor conducción.
- Temperatura: la conductividad del suelo aumenta con la temperatura.
 - Nota: lo anterior implica que se debe controlar la resistencia de puesta a tierra en diferentes momentos del año.

9.3.1. Resistividad para varios materiales de suelo

En lo que sigue se indican valores de referencia. La información disponible es muy diversa y los valores varían fuertemente según distintas fuentes.

Suelo	Rango de Resistividad [Ωm]
Tierra	5 - 50
Arcilla	4 - 100
Arena y grava	50 - 1.000
Piedra caliza (superficial)	100 - 10.000
Piedra caliza	5 - 4.000
Roca sedimentaria	5 - 100
Arenisca	20 - 2.000
Granito	900 - 50.000
Pizarra	600 - 5.000

Cuadro 9.1: Resistividad de varios tipos de suelo.

9.3.2. Variación de la resistividad con la humedad

Resistividad del Agua [Ωm]	
Agua de mar	0,1 - 10
Agua subterránea, pozos	10 - 150
Lagos y ríos	100 - 400
Lluvia	800 - 1.300
Destilada comercial	1.000 - 4.000
Pura	>250.000
Hielo	10.000 - 100.000

Cuadro 9.2: Resistividad del agua.

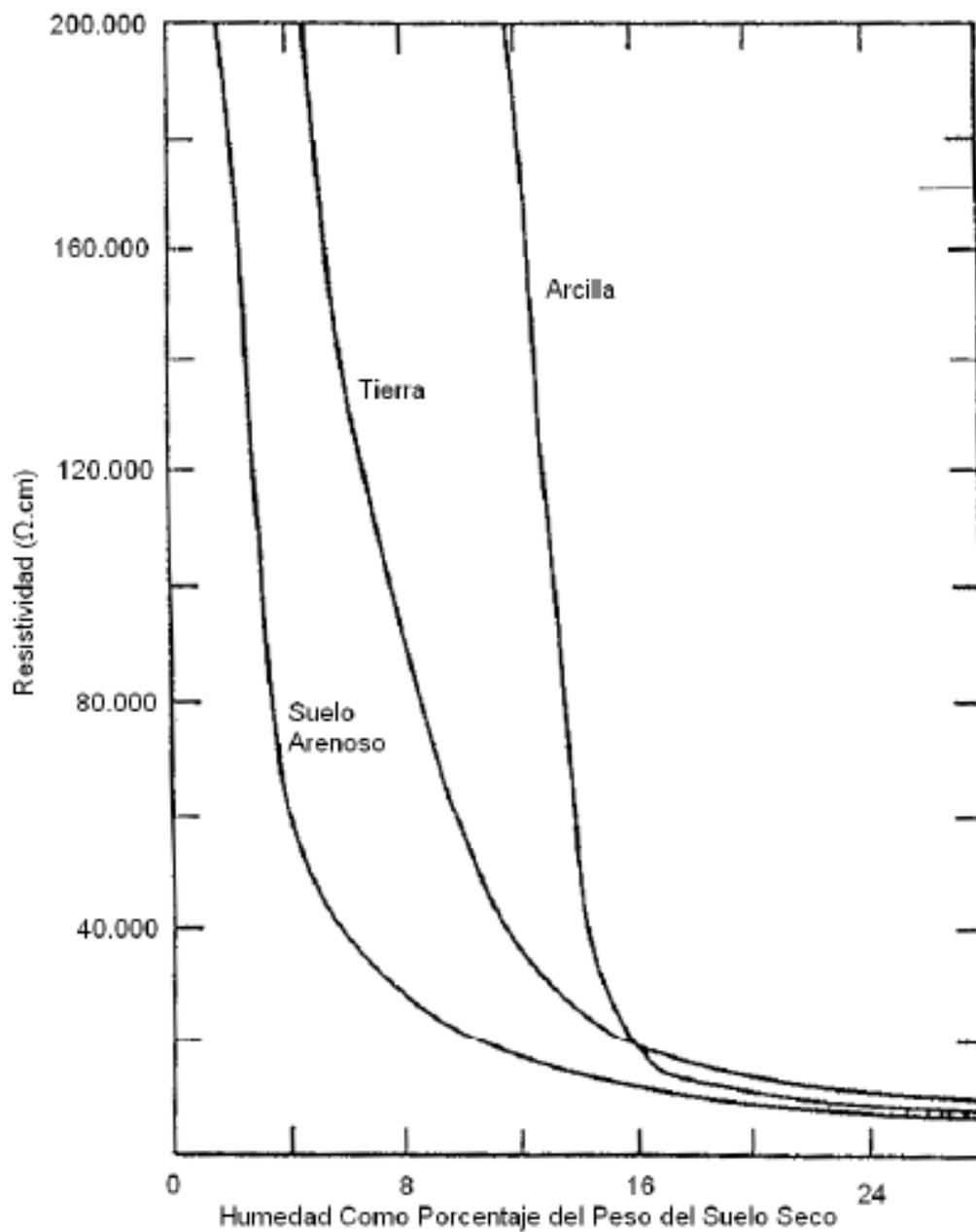


Figura 9.8: Ejemplo de variación de la resistividad del suelo en función del contenido de humedad ($100 \Omega \text{cm} = 1 \Omega \text{m}$).

9.3.3. Medición de la resistividad del terreno

La resistividad del terreno es un parámetro fundamental para el diseño de una puesta a tierra. Como primera aproximación consideramos suelo homogéneo; en general el terreno está estratificado horizontalmente y es difícil obtener valores con exactitud.

Medición mediante una varilla de tierra.

Se mide su resistencia a distintas profundidades y se calcula la resistividad utilizando la fórmula teórica de la resistencia de un electrodo vertical en función de la resistividad. Es un método poco preciso.

Medida de muestras del suelo

Este tipo de medidas no tiene demasiado valor.

Método de Wenner

Este método permite obtener una buena medida de la resistividad y además información acerca de la estructura del suelo. la medida se realiza con un telurímetro como el descrito para medir resistencia de puesta a tierra. Se clavan 4 picas alineadas de acuerdo a la figura 9.9 y se inyecta corriente por las picas exteriores. Se mide la diferencia de potencial entre las dos picas interiores. Designamos las picas con los mismos símbolos que los correspondientes bornes del telurímetro.

Para calcular los potenciales en las picas de medida se utiliza el procedimiento de la ecuación (9.1).

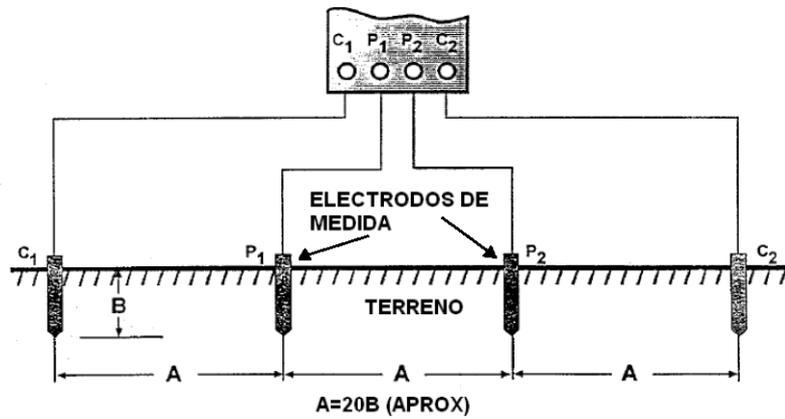


Figura 9.9: Método de Wenner para medida de resistividad

El potencial en el punto P_1 debido a la corriente I entrante en C_1 y saliente en C_2 es:

$$V_{P_1} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{A} - \frac{1}{2A} \right] = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{2A}$$

El potencial en P_2 debido a la corriente I entrante en C_1 y saliente en C_2 es:

$$V_{P_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{2A} - \frac{1}{A} \right] = -\frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{2A}$$

Por lo tanto la diferencia de potencial entre P_1 y P_2 es:

$$V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{I\rho}{2\pi A}$$

La resistencia R medida (lectura del telurímetro) es:

$$R = \frac{V_{P_1} - V_{P_2}}{I} = \frac{\rho}{2\pi A}$$

Finalmente la resistividad es:

$$\boxed{\rho = 2\pi RA} \quad (9.3)$$

En la figura 9.10 se indica la variación de la resistividad en función de la separación de las picas para tres terrenos no homogéneos, junto con la estratificación del suelo en dos y tres capas.

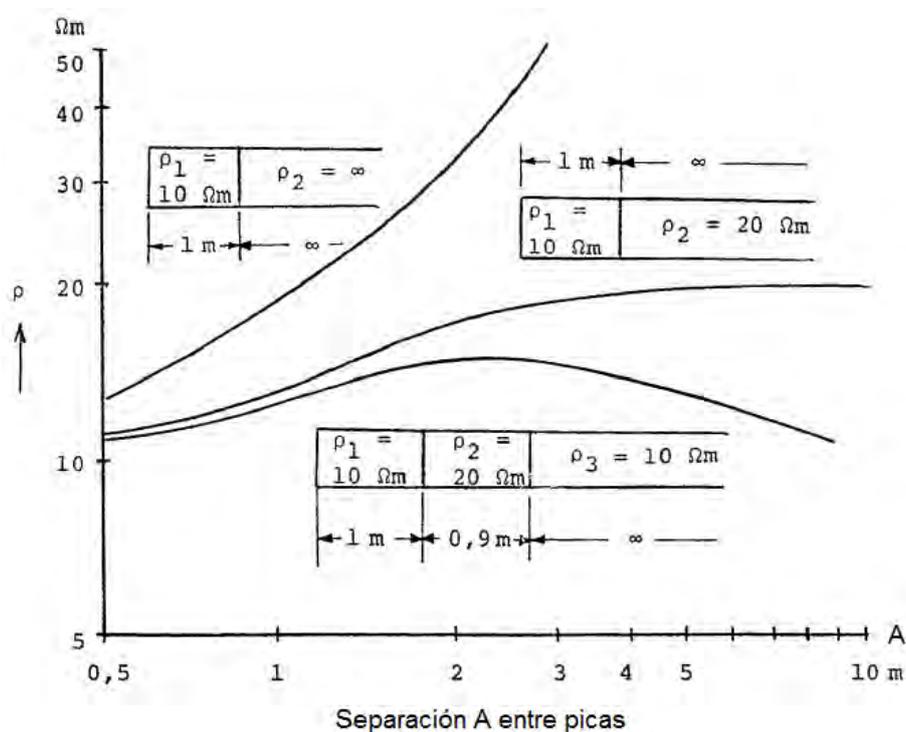


Figura 9.10: Medida de la resistividad y estructura del terreno

9.4. Implementación de una puesta a tierra para protección contra descargas atmosféricas

Una puesta a tierra de protección contra descargas atmosféricas debe cumplir con los siguientes requisitos generales:

- Baja resistencia: los valores obtenidos con telurímetro (valor “megger”) deben ser inferiores a aproximadamente 10Ω .
- Baja inductancia (uso de electrodos múltiples distribuidos en lugar de un único electrodo muy profundo).
- Diseño adecuado para asegurar la dispersión de la carga del rayo en el suelo, en forma efectiva, sin causar elevación demasiado alta del potencial del terreno.

En una puesta a tierra de rayos es más importante la dispersión de la carga y la limitación de las diferencias de potencial en la zona a proteger que

el valor total en Ω medido a baja frecuencia con telurímetro.

Una puesta a tierra se implementa con componentes conductores, generalmente pero no necesariamente metálicos, llamados electrodos, enterrados en el suelo y con buen contacto eléctrico con el material que compone el mismo. El electrodo más corriente es la jabalina, que consiste en una varilla metálica de acero con revestimiento de cobre clavada verticalmente en el suelo. Al clavarse se establece un buen contacto con el material del terreno, y dependiendo de las características del mismo se obtiene una resistencia comparativamente baja en un área muy pequeña.

Generalmente se emplean varillas de sección circular de 15 a 20 mm de diámetro y longitudes variables. Una jabalina simple tiene unos 2 m de longitud; puede implementarse con profundidades mayores, de varios metros (típicamente unos 6 m) clavando sucesivamente -una sobre otra- secciones más cortas (de 1,5 m de longitud) preparadas en los extremos para que queden adecuadamente conectadas entre sí.

Las jabalinas demasiado largas presentan un comportamiento inductivo que aumenta la impedancia total, aumentando la elevación de potencial (GPR) en la toma de tierra en caso de impacto de un rayo en el captor asociado. Por otra parte, profundidades mayores a cierto valor dependiente de la resistividad del suelo no aportan una disminución significativa de la resistencia medida a baja frecuencia con telurímetro (figura 9.11).

Por lo tanto un sistema de tierra para rayos suele implementarse con varias jabalinas cortas conectadas en paralelo.

Los conductores horizontales enterrados constituyen otro grupo de electrodos de uso común. Pueden ser conductores de sección circular, como varillas o cables, o conductores planos (cintas). Se usan fundamentalmente como electrodos de tierra simples, sobre todo en lugares donde no se puede clavar jabalinas, como conexión entre jabalinas en paralelo y como conductor perimetral alrededor de una estructura formando parte de sistemas de tierra en los que se busca reducir las diferencias de potencial de tierra (GPD) durante un impacto.

Un caso particular de puesta a tierra con conductores horizontales lo constituye la malla de tierra, enterrada debajo de la estructura a proteger. Por su costo su uso se restringe a instalaciones en las que se trata de reducir las diferencias de potencial de tierra (fundamentalmente el potencial de paso) en caso de defectos a tierra del sistema eléctrico en lugares con alta potencia de cortocircuito (subestaciones, tableros industriales). Estando presente es un componente eficaz en la tierra de rayos.

En lo que sigue se presentan distintos aspectos relacionados con la instalación práctica de puestas a tierra con los componentes descritos.

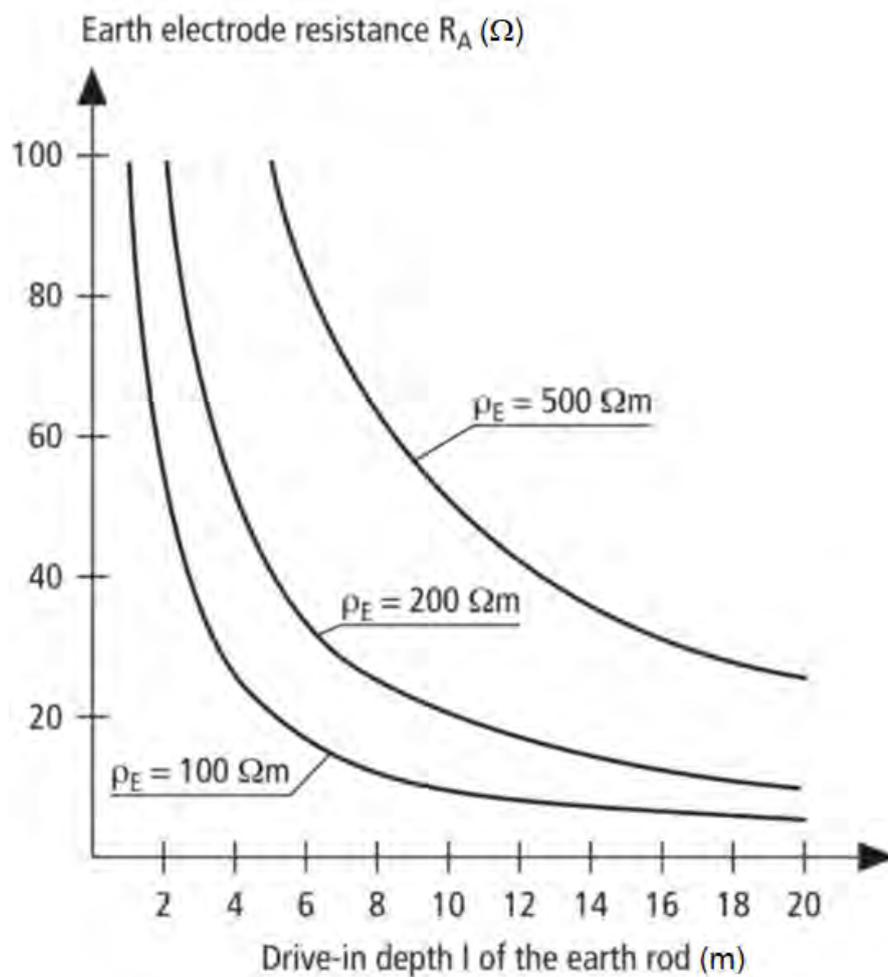


Figura 9.11: Resistencia de puesta a tierra en función del largo del electrodo para diferentes resistividades del suelo.

9.4.1. Ejemplo de comportamiento de una puesta a tierra convencional

Supongamos que se tiene una varilla de 1/2" clavada en un suelo arenoso húmedo (15 % de agua en peso) con una resistividad $200 \Omega m$, con una resistencia calculada de 100Ω y una inductancia de $2,5 \mu H$.

Si cae un rayo de 30 kA con $2 \mu s$ de subida, la caída inductiva con la varilla en el aire es de 37,5 kV. La subida de potencial resistiva es de $100 \times 30 = 3$ MV. La caída inductiva, menor que la calculada en el aire, no incide en este caso.

Si la resistividad fuera uniforme y el suelo muy conductor (tierra de cultivo, $5 \Omega m$), la resistencia sería de $2,5 \Omega$ y la subida de tensión solamente 75 kV. Puede llegar a 90 kV si se agrega el efecto de la inductancia.

9.4.2. Tablas y fórmulas

	Semiesfera, radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
•	Un electrodo de tierra, largo L, radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
• •	Dos electrodos de tierra $s > L$, espaciamiento s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
—	Alambre horizontal enterrado, largo 2L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
○	Anillo de alambre de diámetro D, diámetro de alambre d y profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{3D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
⊗	Plato horizontal enterrado, radio a, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

Figura 9.12: Fórmulas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

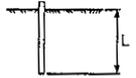
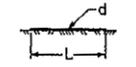
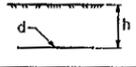
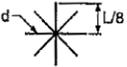
Tipo de Electrodo	Vista Lateral	Vista de Arriba	Fórmula	Ref.
Electrodo Vertical en Superficie			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) \approx \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1.36 \cdot d}$	①
Conductor en Superficie			$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{1.36 \cdot d}$	①
Conductor Enterrado			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1.85 \cdot h d}$	②
Ocho Conductores Enterrados			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2 \cdot 10^4}{2.69 \cdot h d}$	②

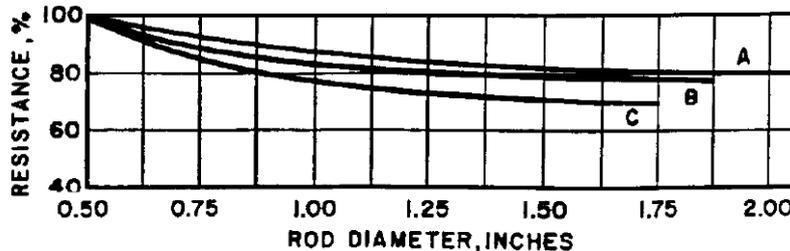
Tabla de Ref.: ① $d \ll L$ ② $d \ll 4h \ll L/n$ ③ $d \ll \alpha \ll L/n$

Nota: El largo del material enterrado es siempre el mismo.

Figura 9.13: Fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra.

9.4.3. Jabalinas: influencia del diámetro

La figura 9.14 muestra la poca influencia que tiene el diámetro de la jabalina en una puesta a tierra real. Alcanza con un diámetro suficiente como para que la jabalina tenga la resistencia mecánica adecuada por ser clavada en un terreno.



Three tests by different people (A, B & C.) Each took a 1/2-inch Ground Rod which was used as a reference and set to 100%. The Rod size was increased and different results are due to ground conductivity variations.

Figura 9.14: Influencia del diámetro de la jabalina.

9.4.4. Jabalinas: puestas a tierra con electrodos múltiples

Una forma usual de implementar puestas a tierra consiste en conectar jabalinas en paralelo. La corriente de un rayo produce un fenómeno de saturación en el suelo alrededor de la jabalina. La saturación implica que la capacidad de absorber carga por parte del suelo queda limitada. Naturalmente la saturación va a ser más intensa en la zona más próxima al electrodo. La zona de saturación (figura ??) se “llama esfera de influencia” (aunque es más bien un cilindro). Su radio en terreno homogéneo puede asumirse igual al largo de la jabalina.

La consecuencia práctica de este hecho consiste en que la distancia entre jabalinas conectadas en paralelo debe ser la suma de los largos de las mismas si queremos el máximo de reducción de la resistencia de puesta a tierra total. De esa manera los volúmenes de influencia no se superponen (figura ??). Es interesante la fórmula para dos jabalinas en paralelo de la figura 9.12.

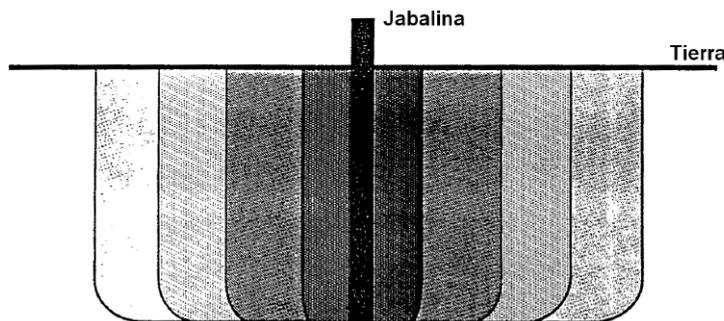


Figura 9.15: Esfera de influencia vista lateral.

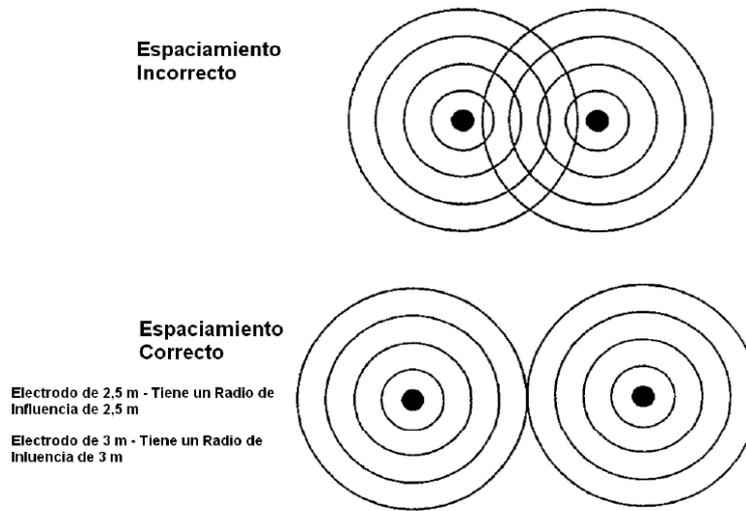


Figura 9.16: Esfera de influencia vista superior.

la figura 9.17 muestra el efecto de colocar varias jabalinas en paralelo en función del número y del espaciado. El ejemplo corresponde a jabalinas de unos 3 m (10 ft).

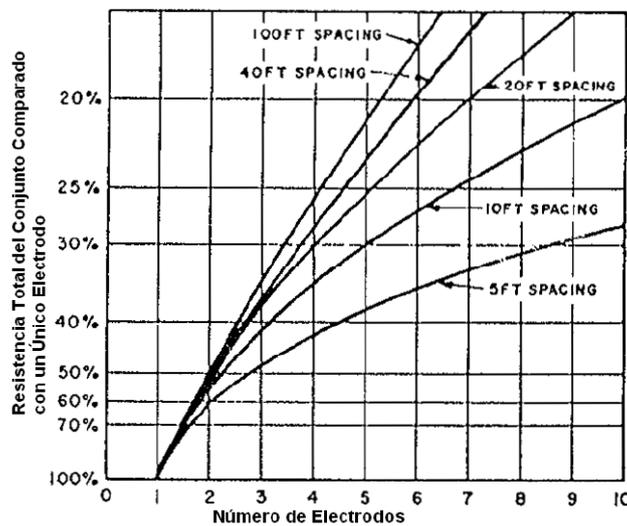


Figura 9.17: Cambio teórico de la resistencia debido al agregado de electrodos espaciados.

Si el terreno se presume no homogéneo hay que estudiar el terreno, por ejemplo a través de medidas de resistividad. La figura 9.18 presenta un caso

de interés práctico, en que la zona de baja resistividad está a unos 3 m de profundidad. Las jabalinas de aproximadamente 6 m están conectadas entre sí y tienen los 3 m de arriba en una zona de alta resistividad. Esos 3 m se comportan como una inductancia en serie con cada jabalina. Supongamos que el cable de bajada llega a la conexión de una de las jabalinas, situación usual. El conductor de interconexión queda en la zona de alta resistividad; se comporta entonces como una inductancia en serie con una de las jabalinas. Si las espaciamos 12 m de acuerdo a la regla para terreno homogéneo la segunda jabalina queda con una inductancia muy grande en serie, por lo tanto la corriente de un rayo va a circular en su mayor parte por la primera jabalina, a la que llega la bajada. En este caso conviene minimizar el espaciado entre jabalinas. De acuerdo al dibujo el espaciado debería ser de 6 m.

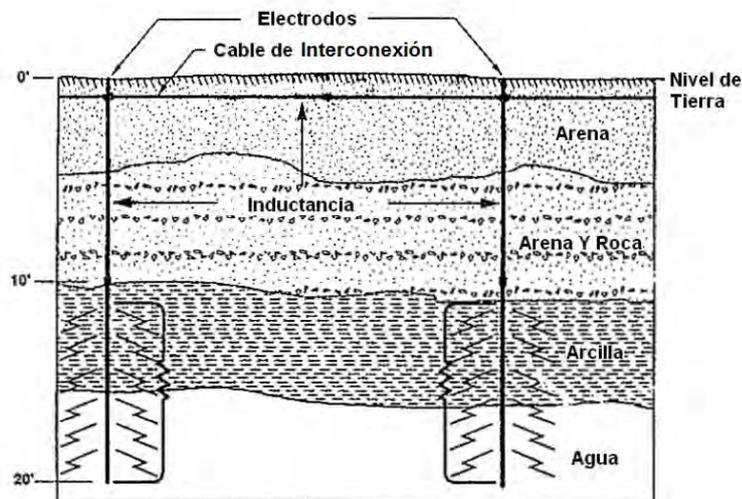


Figura 9.18: Electrodos en suelo no homogéneo con baja resistencia en la profundidad.

La figura 9.19 muestra un ejemplo de puesta a tierra incorrecta. Si bien el valor medido con el telurímetro es de 5Ω , el GPR va a ser alto debido a la alta inductancia en serie.

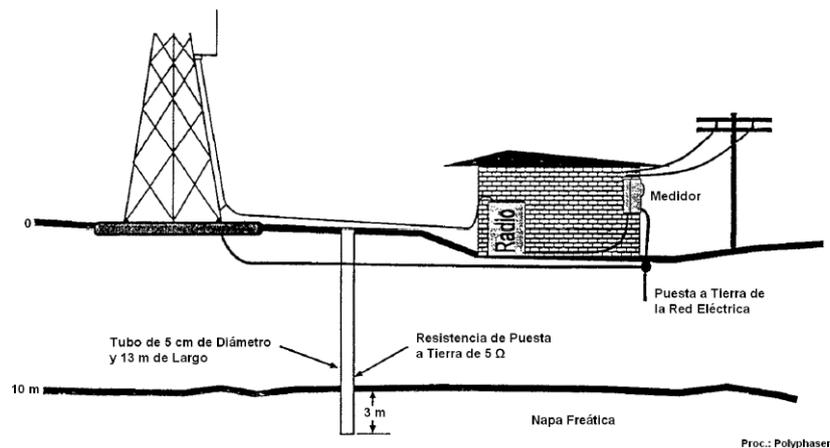


Figura 9.19: Ejemplo de electrodo con baja resistencia y alta inductancia.

9.4.5. Modificación de la resistividad del suelo

La resistividad del suelo en una puesta a tierra se puede disminuir mediante tratamiento químico, aportando aditivos apropiados. Se puede obtener una fuerte mejora de la performance de la puesta a tierra, pero aumentan los requerimientos de mantenimiento periódico y ambientales.

Las sustancias consisten en distintos tipos de electrolitos. En lo que sigue se puede ver el comportamiento del suelo tratado así como electrodos de tierra químicos. (figuras 9.22, 9.23 y 9.24).

En la figura 9.21 se observa que:

1. La resistividad baja fuertemente con el tratamiento químico.
2. Existe una fuerte variación estacionaria de la resistividad que puede ser atenuada con el tratamiento.

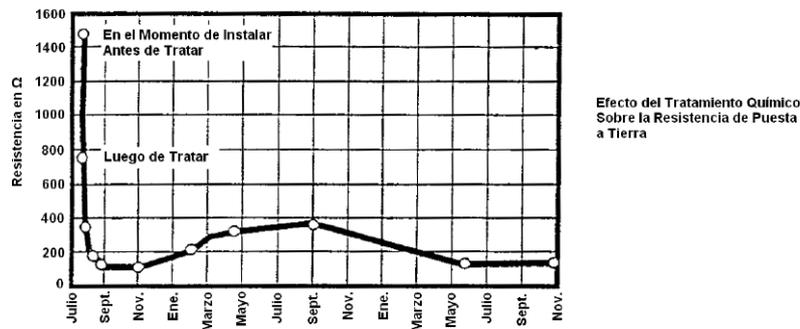


Figura 9.20: Efecto del tratamiento químico.

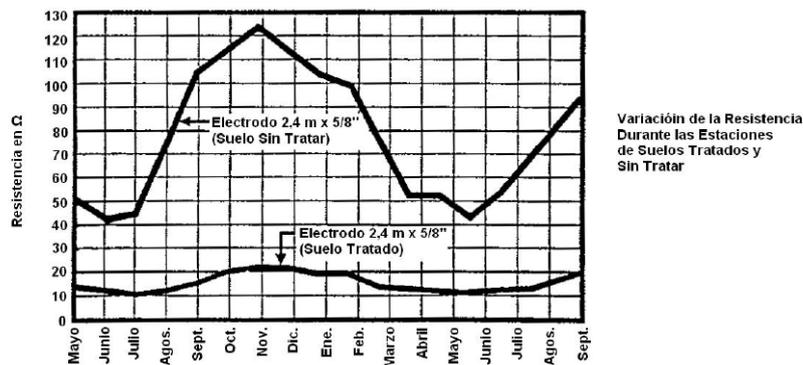
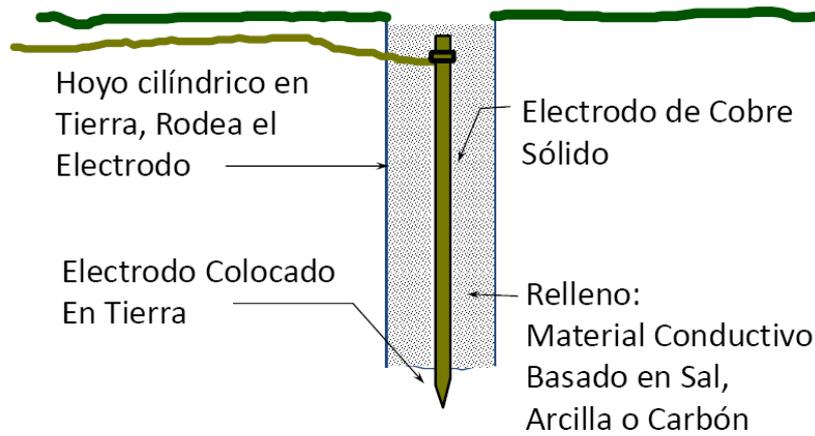


Figura 9.21: Variación de la resistividad.

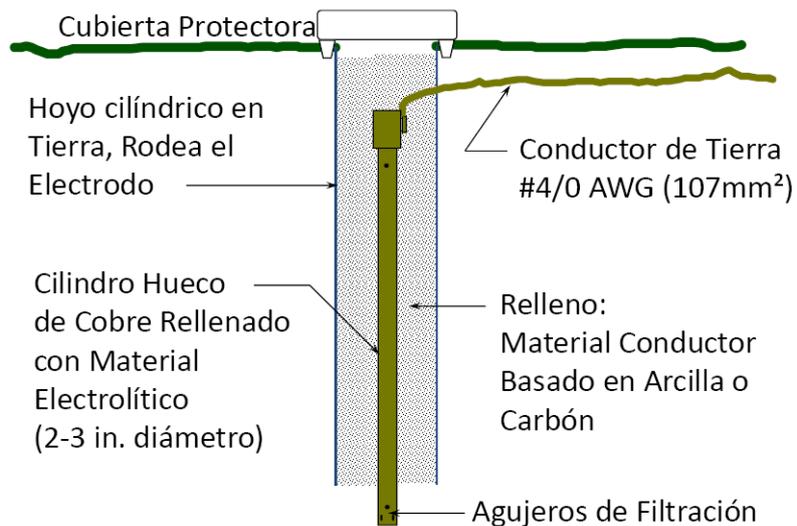
En la implementación de puestas a tierra en suelos de alta resistividad se puede considerar:

- Agregar jabalinas adicionales con menor distancia entre jabalinas, si hay capas profundas con conducción (napa de agua).
- Hacer una zanja para los conductores radiales y rellenarla con material conductor (por ejemplo coke o bentonita).
- Hacer los radiales con cinta vertical (menor inductancia y mejor contacto).
- Agregar aditivos para mejorar la conductividad del suelo.



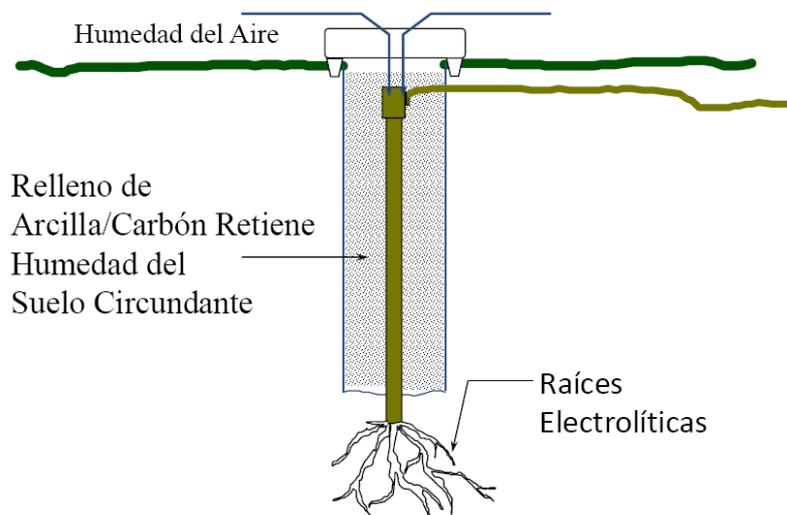
Proc.: Polyphaser

Figura 9.22: Electrodo con modificación del terreno.



Proc.: Polyphaser

Figura 9.23: Puesta a tierra electrolítica.



Proc.: Polyphaser

Figura 9.24: Puesta a tierra electrolítica.

9.4.6. Interconexiones en sistemas de puesta a tierra

Fenómenos electroquímicos que afectan las puestas a tierra

En la implementación de una puesta a tierra -y en general, en un sistema exterior de protección contra descargas atmosféricas- es frecuente tener que hacer conexiones entre metales distintos. Al estar a la intemperie o enterradas, esas uniones se ubican en lugares expuestos a la humedad y a la presencia de soluciones iónicas, lo que da lugar a corrosión. Se forman pares galvánicos o celdas electroquímicas, en las que uno de los metales se oxida (pierde electrones) según el valor y signo de la diferencia de potenciales electroquímicos de los metales en cuestión. El de menor potencial se oxida (funciona como ánodo) y el de mayor potencial funciona entonces como cátodo. El cátodo suministra electrones al material intermedio que funciona como electrolito. Incluso puede haber iones del material catódico en el electrolito, en ese caso ganan electrones (se reducen), se convierten en átomos y se depositan en el cátodo.

La figura 9.25 muestra una tabla de diferencias de potenciales electroquímicos para varios metales, entre los cuales se encuentran los de empleo común en sistemas de protección. La corrosión ocurre por lo tanto en el metal con menor potencial. Una diferencia mayor que $\pm 0,3$ V ya puede acelerar la corrosión.

Conexiones entre metales diferentes

Las conexiones más frecuentes son:

- Cobre - Hierro, por ejemplo en el aterramiento de un gabinete metálico o de una torre mediante un cable de cobre, o en la unión de una bajada de cobre con hierro estructural.
- Cobre - Zinc, como en el aterramiento de material galvanizado, como cables o chapas estructurales.
- Cobre - Aluminio, en la puesta a tierra de elementos de construcción o de protectores encapsulados en aluminio.

	MAGNESIUM	ALUMINIUM	ZINC	IRON	CADMIUM	NICKEL	TIN	LEAD	COPPER	SILVER	PALLADIUM	GOLD
MAGNESIUM	0.00	-0.71	-1.61	-1.93	-1.97	-2.12	-2.23	-2.24	-2.71	-3.17	-3.36	-3.87
ALUMINIUM	0.71	0.00	-0.90	-1.22	-1.26	-1.41	-1.52	-1.53	-2.00	-2.46	-2.65	-3.16
ZINC	1.61	0.90	0.00	-0.32	-0.36	-0.51	-0.63	-0.64	-1.10	-1.56	-1.75	-2.26
IRON	1.93	1.22	0.32	0.00	-0.04	-0.19	-0.30	-0.31	-0.78	-1.24	-1.43	-1.94
CADMIUM	1.97	1.26	0.36	0.04	0.00	-0.15	-0.27	-0.28	-0.74	-1.20	-1.39	-1.90
NICKEL	2.12	1.41	0.51	0.19	0.15	0.00	-0.11	-0.12	-0.59	-1.05	-1.24	-1.75
TIN	2.23	1.52	0.63	0.30	0.27	0.11	0.00	-0.01	-0.47	-0.94	-1.12	-1.64
LEAD	2.24	1.53	0.64	0.31	0.28	0.12	0.01	0.00	-0.46	-0.93	-1.11	-1.63
COPPER	2.71	2.00	1.10	0.78	0.74	0.59	0.47	0.46	0.00	-0.46	-0.65	-1.16
SILVER	3.17	2.46	1.56	1.24	1.20	1.05	0.94	0.93	0.46	0.00	-0.19	-0.70
PALLADIUM	3.36	2.65	1.75	1.43	1.39	1.24	1.12	1.11	0.65	0.19	0.00	-0.51
GOLD	3.87	3.16	2.26	1.94	1.90	1.75	1.64	1.63	1.16	0.70	0.51	0.00

← LESS NOBLE

Noble Metal Table: Accelerated corrosion can occur between unprotected joints if the algebraic difference in atomic potential is greater than ± 0.3 volts.

Figura 9.25: Comportamiento electroquímico de metales de interconexión.

Procedimientos para mitigar los efectos de corrosión

Se trata de realizar las conexiones de manera que los metales queden en contacto en superficies grandes en comparación con el tamaño de los conductores, que no haya humedad ni materiales electrolíticos entre los mismos, que en lo posible materiales de potenciales distintos no queden en contacto directo.

Formas de conexión:

- Soldadura exotérmica (método usual entre bajada de cobre y jabalina cobreada, por ejemplo)

- Unión realizada con mordazas o abrazaderas e impregnada con compuestos hidrófugos conductores (grasas grafitadas o con partículas de cobre) o protegida mediante materiales hidrófugos con protección.
- Uso de materiales intermedios, como chapas de acero inoxidable.

Ejemplos de conexiones a evitar:

- Cable o alambre de cobre apretado con la cabeza de un tornillo de hierro.
- Conductores cilíndricos adosados a conductores planos.

La puesta a tierra de conductores que además son parte de la estructura a proteger puede justificar el uso de protección catódica (ver puesta a tierra de riostras)

9.5. Tierras tipo Ufer

Ufer es el nombre de la persona que implementó este tipo de aterramiento. Se basa en la capacidad del hormigón de absorber humedad y mantenerla.

La tierra Ufer consiste en la utilización de cimientos o fundaciones de torres, columnas y edificios como parte fundamental de la puesta a tierra. En un principio se utilizó conductor de cobre incorporado al hormigón.

Luego se constató que era suficiente conectar el hierro estructural del hormigón armado. Su uso implica el acceso y conexión a dicho hierro estructural. En la conexión deben tomarse las precauciones asociadas con los problemas de corrosión. La tierra Ufer es adecuada para terrenos de muy alta resistividad; debe completarse con otros medios de puesta a tierra (conductores radiales, jabalinas).

El uso en edificios permite una implementación efectiva de equipotencialidad en el terreno.

Funciona como una capacidad para una corriente de rayo, pero igual se conectan radiales con jabalinas para dispersar la carga.

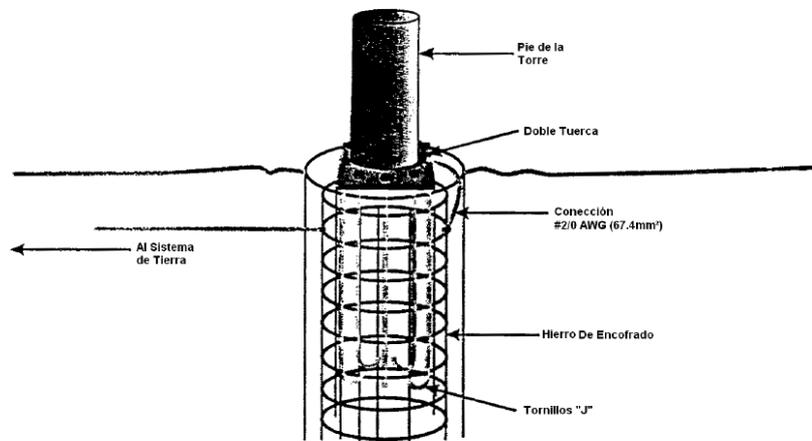


Figura 9.26: Tierra Ufer.

9.6. Puesta a tierra en cimas de cerros o en lugares rocosos de muy alta resistividad

9.6.1. Tierras Ufer

El uso de la fundación permite implementar una puesta a tierra en esas condiciones.

Debe ser completada con jabalinas u otro medio (figura 9.27). En medio rocoso el uso de jabalinas puede ser difícil de implementar (figuras 9.28 y 9.29). Una alternativa que se emplea es la instalación de electrodos superficiales, normalmente cintas de cobre (figuras 9.30 y 9.31)

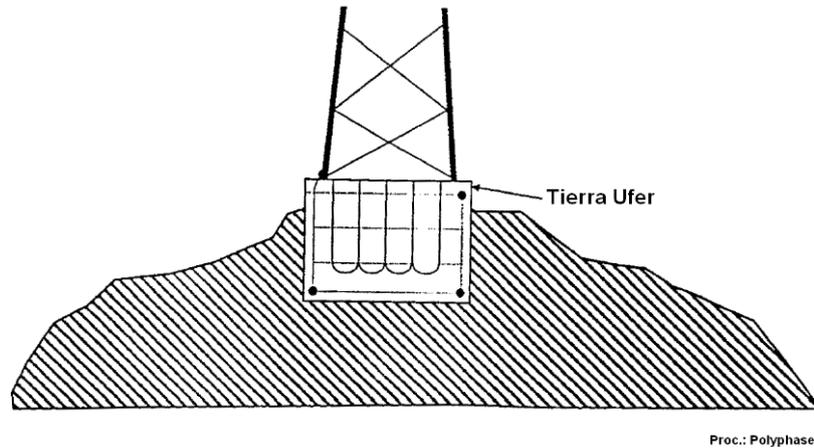


Figura 9.27: Cimiento de torre.

9.6.2. Agujeros con electrodo de material conductor

Sí se complementa la tierra Ufer con jabalinas en perforaciones en la roca no se mejora significativamente la puesta a tierra, ya que la roca es aislante (figura 9.28).

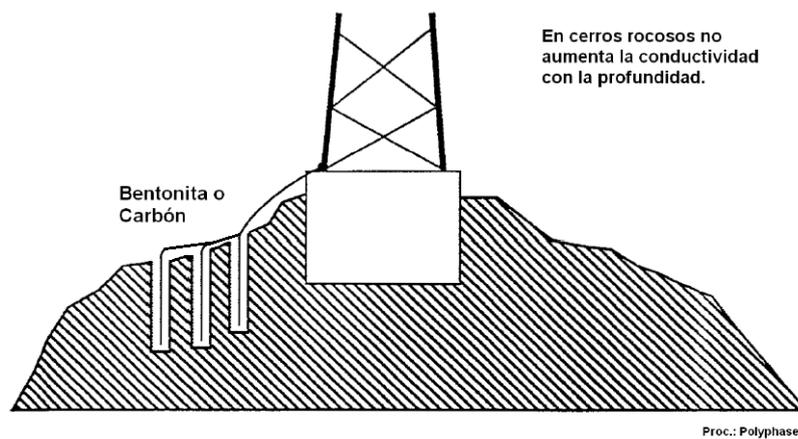


Figura 9.28: La roca como aislante.

9.6.3. Agujeros con fisuras causadas por explosivo

A continuación se da un ejemplo de implementación de una jabalina combinada con puesta de tierra química. El propósito es mejorar y extender el

contacto eléctrico con la roca.

- Perforar agujero de $\phi = 75$ mm a una profundidad de 15 m.
- Colocar una jabalina de hierro/acero revestido en cobre junto con 1 kg de explosivo para rocas.
- Llenar el agujero de agua para contener el efecto de la explosión.
- Detonar el explosivo.
- Llenar el agujero y las fisuras creadas por la explosión con un electrolito conductor. Rellenar hasta el tope durante varios días.

Un electrolito exitoso puede ser una mezcla de Bentonita:

- Una parte de Bentonita.
- Una parte de Sulfato de Sodio.
- Diez partes de Agua.

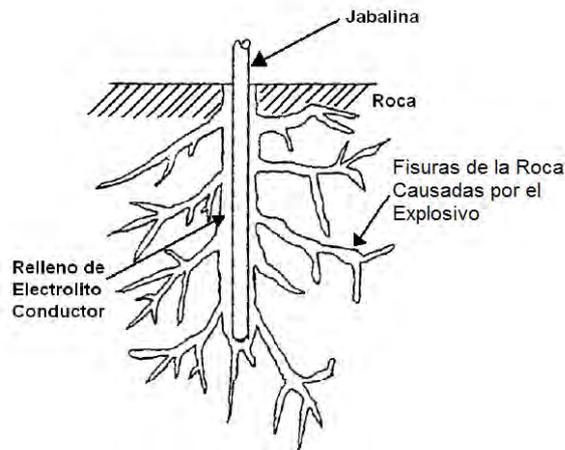


Figura 9.29: Puesta a tierra en roca de alta resistividad.

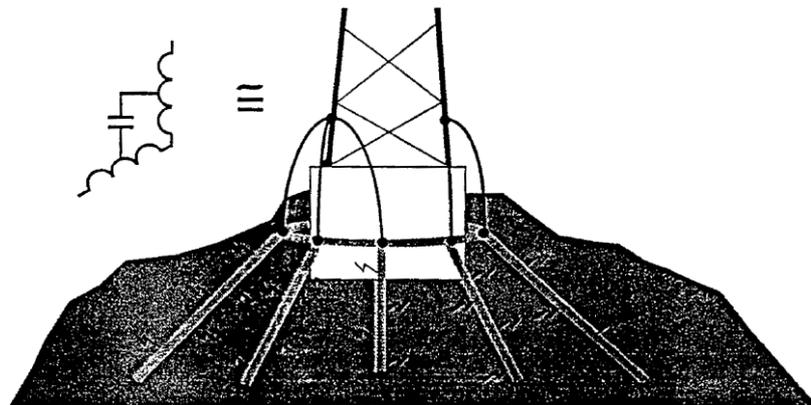
9.6.4. Radiales de cinta (strap)

Otra forma de lograr mejor contacto con la roca es utilizar radiales de cinta (planas).

Se deben tomar las siguientes precauciones con los radiales en cintas:

9.6 Puesta a tierra en cimas de cerros o en lugares rocosos de muy alta resistividad 249

- Deben fijarse de alguna manera a la roca, de forma tal que no queden tramos en el aire ya que puede pasar lo siguiente:
 - La parte del conductor que queda en el aire actúa siempre como una inductancia.
 - La sobretensión puede producir arcos en los bordes de la cinta.
- Se debe tener en cuenta la impedancia transitoria según la distribución de los radiales.
 - Los radiales y la torre forman un sistema resonante (antena) cuyas frecuencias puede ser excitadas por las componentes de alta frecuencia de la corriente de la descarga atmosférica.
 - Los radiales deben ser todos de distinta longitud para evitar grandes resonancias en una frecuencia particular.



Proc.: Polyphaser

Figura 9.30: Puesta a tierra en suelo rocoso utilizando radiales.

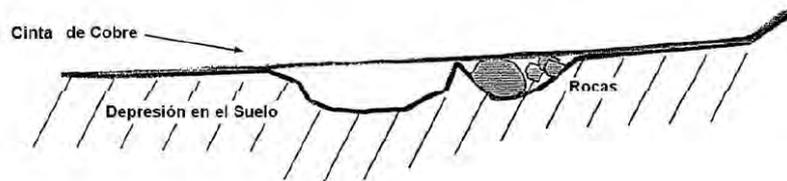


Figura 9.31: Instalación de cintas radiales.

9.7. Puesta a tierra de anclajes de riostras

Las riostras son partes estructurales de las torres y además forman parte del sistema captor, por lo tanto se debe asegurar una puesta a tierra adecuada. Los problemas de corrosión asociados tienen mucha relevancia ya que las riostras tienen poco material. La puesta a tierra debe hacerse con el mismo material que el de las riostras. Puede ser necesario agregar protección catódica con una fuente o con un ánodo de sacrificio de magnesio. Como toda protección activa requiere mantenimiento extra.

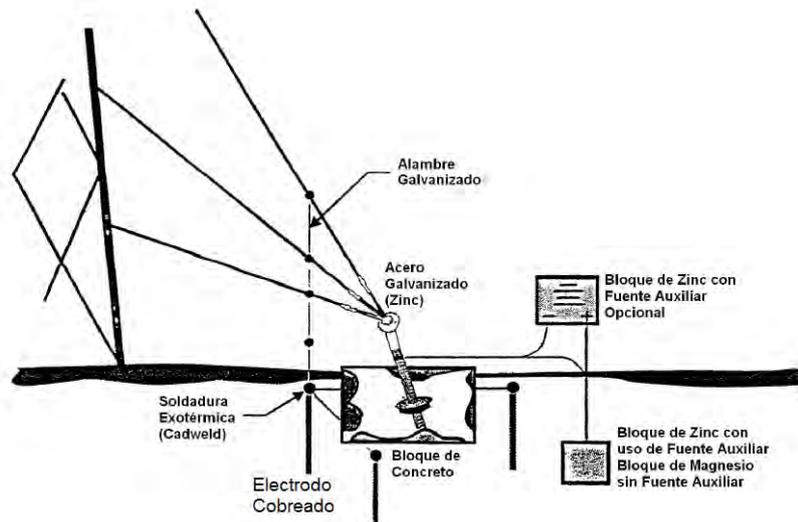


Figura 9.32: Puesta a tierra de riostras.

9.8. Respuesta dinámica de puestas a tierra

9.8.1. Comportamiento dinámico del suelo

La resistividad del suelo no es necesariamente constante durante la descarga. En suelos con resistividades no demasiado bajas, la descarga aumenta la ionización del material que rodea el electrodo, su diámetro efectivo es mayor y la resistencia transitoria es más baja.

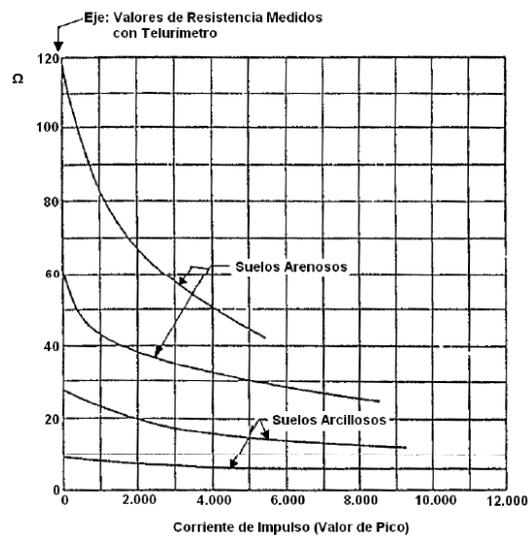


Figura 9.33: Resistencia efectiva del electrodo en función de corrientes de impulso para distintos tipos de suelo.

Las figuras 9.34, 9.35 y 9.36 representan los resultados de aplicar un impulso de corriente a través de una varilla de puesta a tierra (jabalina). Se muestra la evolución de la corriente, la tensión y la resistencia para distintos valores máximos de corriente.

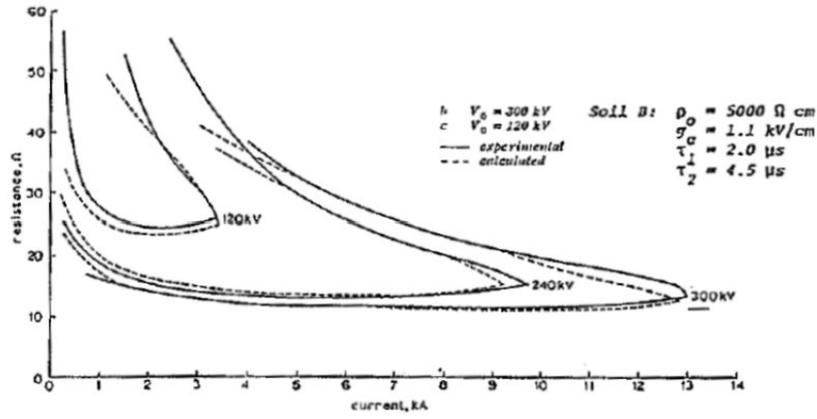


Figura 9.34: Resistencia en función de la corriente para distintas corrientes máximas. Se observa un fenómeno de histéresis.

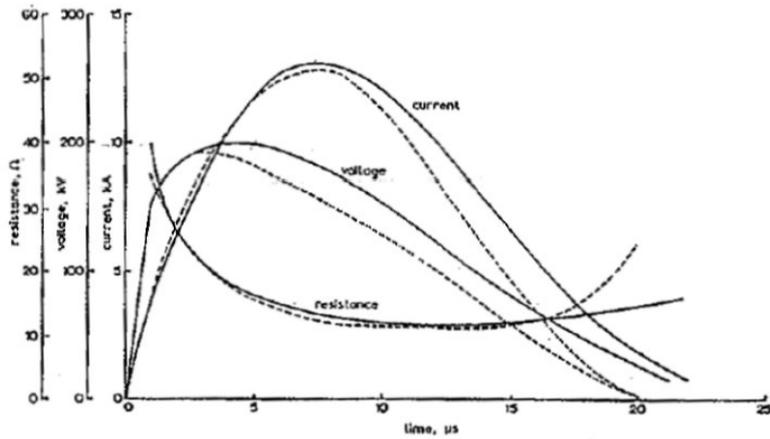


Figura 9.35: Evolución de la tensión, el impulso de corriente y la resistencia con el tiempo.

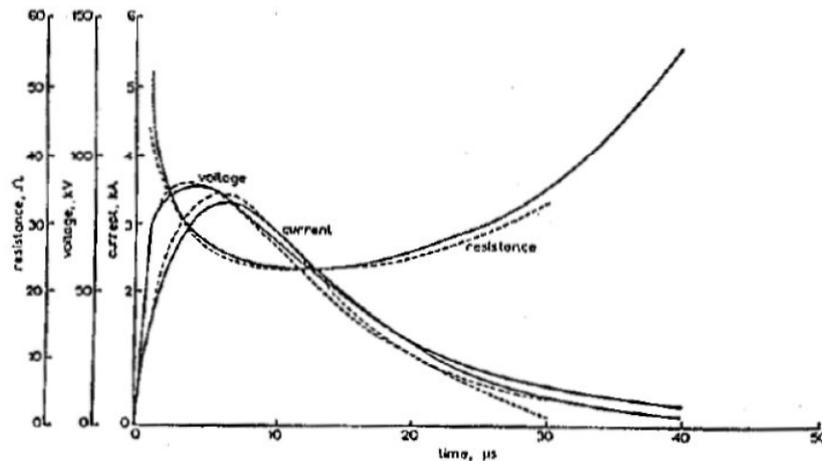


Figura 9.36: Evolución de la tensión, el impulso de corriente y la resistencia con el tiempo.

9.8.2. Caracterización de las puestas a tierra para diferentes usos

En un sistema existen diferentes puestas a tierra:

- Tierra de rayos (corriente I_L , impedancia de tierra Z_L , caída de tensión en la impedancia U_T).
- Tierra de protección del sistema eléctrico (corriente I_g , impedancia de tierra Z_g , caída de tensión en la impedancia U_G).
- Tierra de referencia electrónica (impedancia de tierra Z_e).
- Tierra de estructura (impedancia de tierra Z_E).

La puesta a tierra de rayos está sometida a corrientes de rayo (I_L) de alta frecuencia, motivo por el que la puesta a tierra se considera como una impedancia Z_L .

Las puestas a tierra de protección y de referencia de electrónica, al no estar sometidas a corrientes de alta frecuencia, se las puede modelar como una resistencia pura R_G y R_e respectivamente.

En una puesta a tierra de protección de sistema eléctrico en general se tiene una longitud "l" de cable con alguna vuelta conectados a una puesta a tierra implementada de manera que la componente resistiva R_G de la impedancia a tierra sea muy baja.

Una corriente de 50 Hz debida a una falla va a circular sin problema mientras

que ante una corriente de rayo va a predominar la parte inductiva, en general importante debido a que la longitud de los cables puede ser importante. La puesta a tierra de estructura prácticamente no tiene componente de impedancia inductiva debido a su forma.

La figura 9.37 muestra un modelo de puesta a tierra compuesto de dos jabalinas. Se toma en cuenta la resistencia e inductancia de cada electrodo (r , L), la capacidad C entre electrodo y tierra y la resistencia R de puesta a tierra.

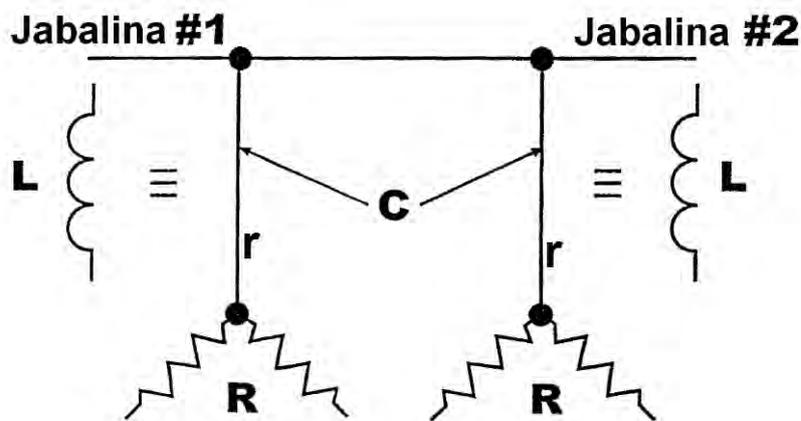


Figura 9.37: Modelo dinámico de la puesta a tierra.

A partir del modelo de puesta a tierra de rayos para una jabalina se puede calcular la impedancia de puesta a tierra Z_L en función de la variable s de laplace.

$$Z_L = \sqrt{\frac{r + Ls}{G + Cs}}$$

Para una corriente de frecuencia ω , Z_L es:

$$Z_L = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Donde:

- r : es la resistencia del conductor.
- G : $G = 1/R$, siendo R la resistencia Ohmica de la puesta a tierra.
- C : es la capacidad entre el conductor y la tierra.
- L : es la inductancia de las jabalinas.

De la expresión se deduce que para bajar la impedancia de la puesta a tierra de rayos se debe

- Bajar la inductancia.
- Aumentar la capacidad.
- Disminuir la resistencia de puesta a tierra.

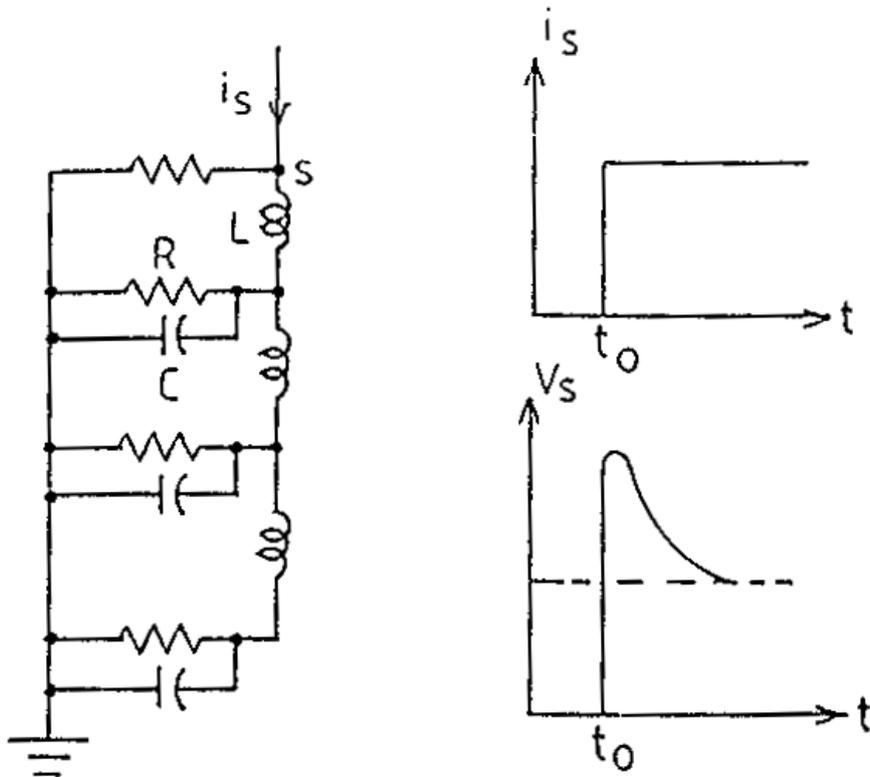


Figura 9.38: Respuesta a transitorios electrodo clavado vertical (L alta, C baja).

Las figuras 9.38, 9.39 y 9.40 muestran modelos dinámicos de electrodos comunes y sus respuestas en tensión a un escalón de corriente. En el electrodo clavado vertical (jabalina, figura 9.38) predomina la respuesta inductiva-resistiva, la capacidad es en general muy baja. En el electrodo horizontal de la figura 9.39 (muchas veces se instalan dos electrodos formando un ángulo recto, ver figura 9.41) tanto la inductancia como la capacidad son significativas y la respuesta presenta oscilaciones. La malla de tierra (figura 9.40)

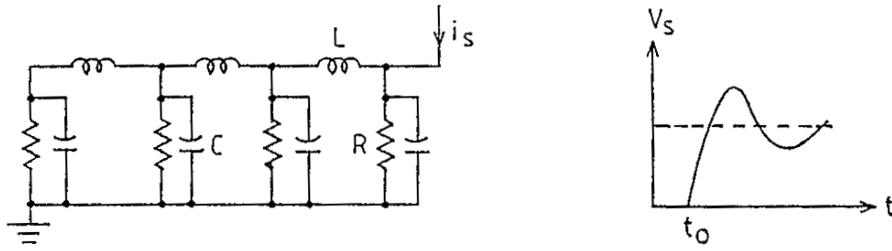


Figura 9.39: Respuesta a transitorios electrodo enterrado horizontalmente (L alta, C alta).

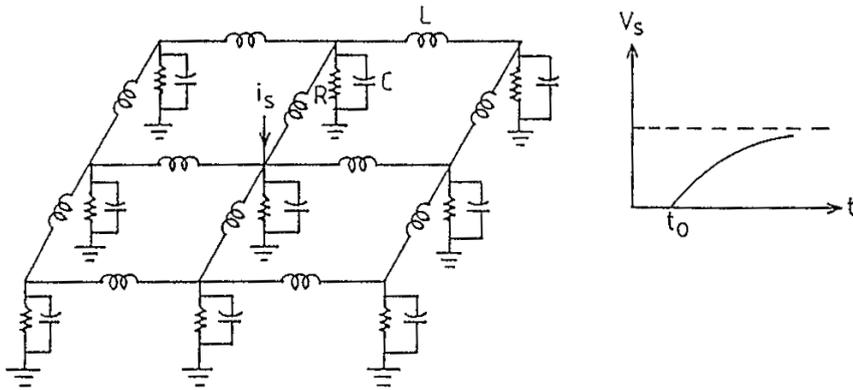


Figura 9.40: Respuesta a transitorios malla de tierra enterrada (L baja, C alta).

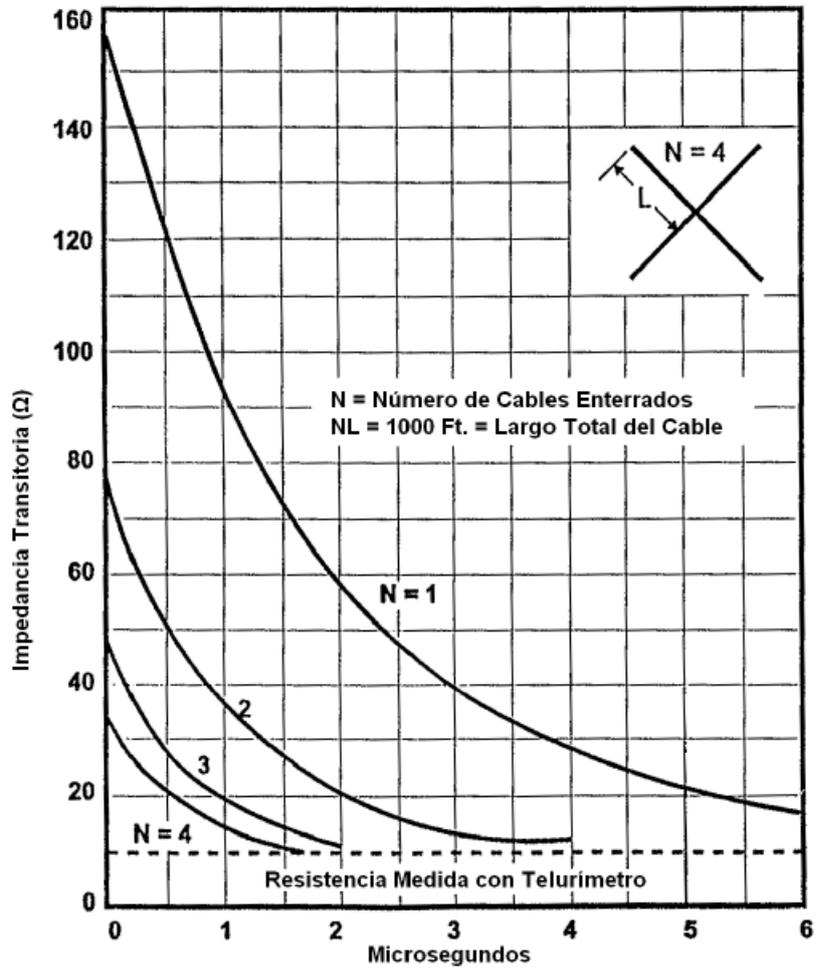


Figura 9.41: Comportamiento dinámico de electrodos horizontales.

es fundamentalmente capacitiva, ya que hay muchos conductores en paralelo, lo que disminuye la inductancia, y se forma un gran plano de tierra, aumentando la capacidad.

9.9. Interacción entre los distintos tipos de puestas a tierra. Coordinación de tierras

Un sistema a proteger tiene tierras de distintos usos, como ya se mencionó. La figura 9.42 muestra la necesidad de coordinación de dichas puestas puestas a tierra. En en una estructura a proteger se pueden presentar los siguientes

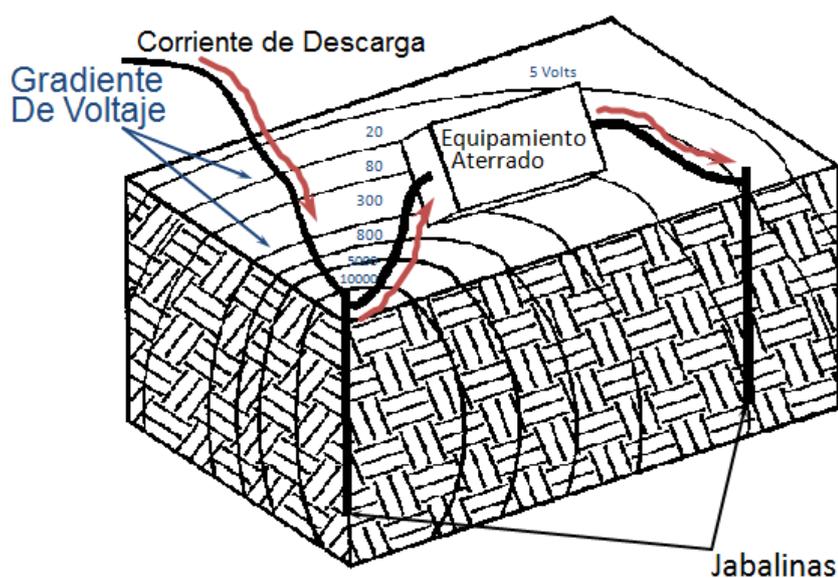


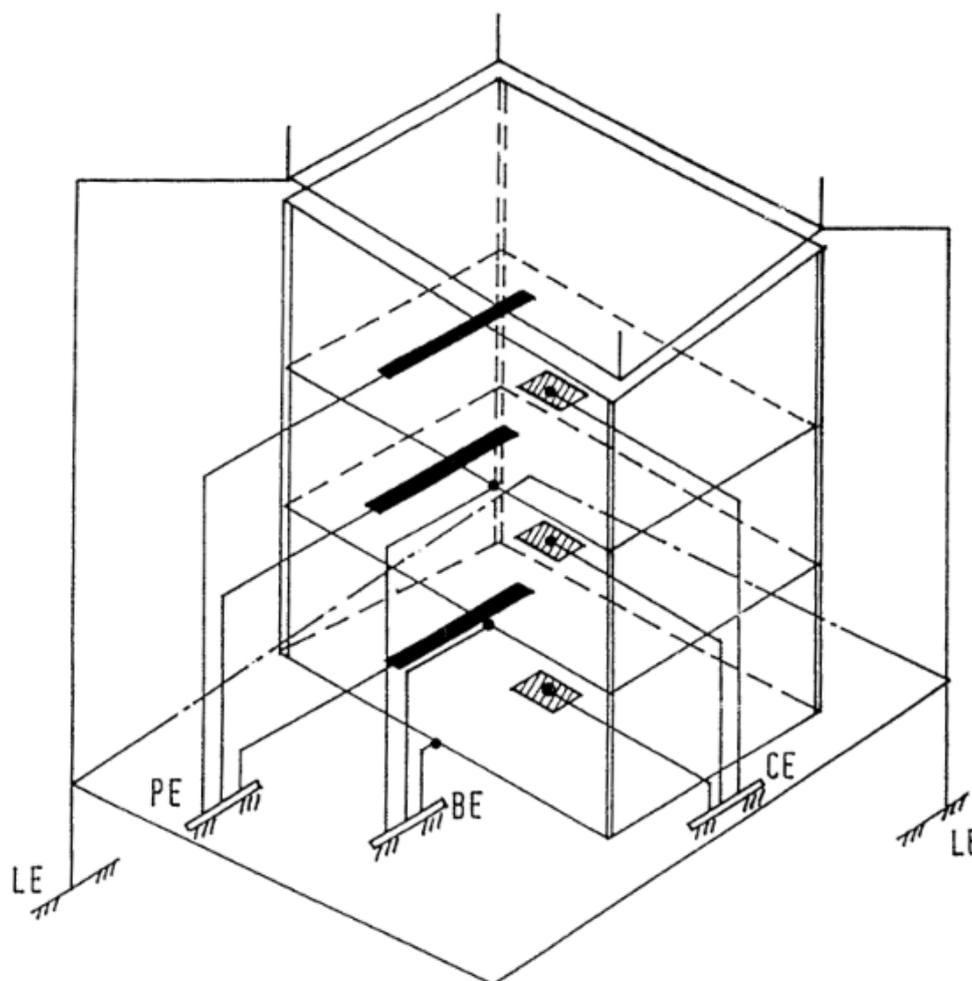
Figura 9.42: Origen de lazo (Loop) de Tierra.

casos en relación al conexionado de tierra:

- Sistema con puesta a tierra separadas (figura 9.43).
- Sistema con puestas a tierra unidas (figura 9.44).
- Sistema con puesta a tierra de electrónica y señal totalmente aislada (figura 9.45).

Como caso particular se estudiará más adelante un sistema con una antena, donde la tierra de electrónica y de referencia de RF está integrada a la tierra de descargas atmosféricas.

Se trata de ver entonces qué características tienen las distintas opciones presentadas. Es de particular interés estudiar los problemas que se presentan en la interacción entre la tierra del sistema eléctrico y la tierra de descargas atmosféricas.



LE = Descargas de Rayos a Tierra
PE = Tierra de Potencia y Protección
BE = Tierra del Edificio
CE = Referencia de Señal

Figura 9.43: Puesta a tierra en edificios. Tierras separadas.

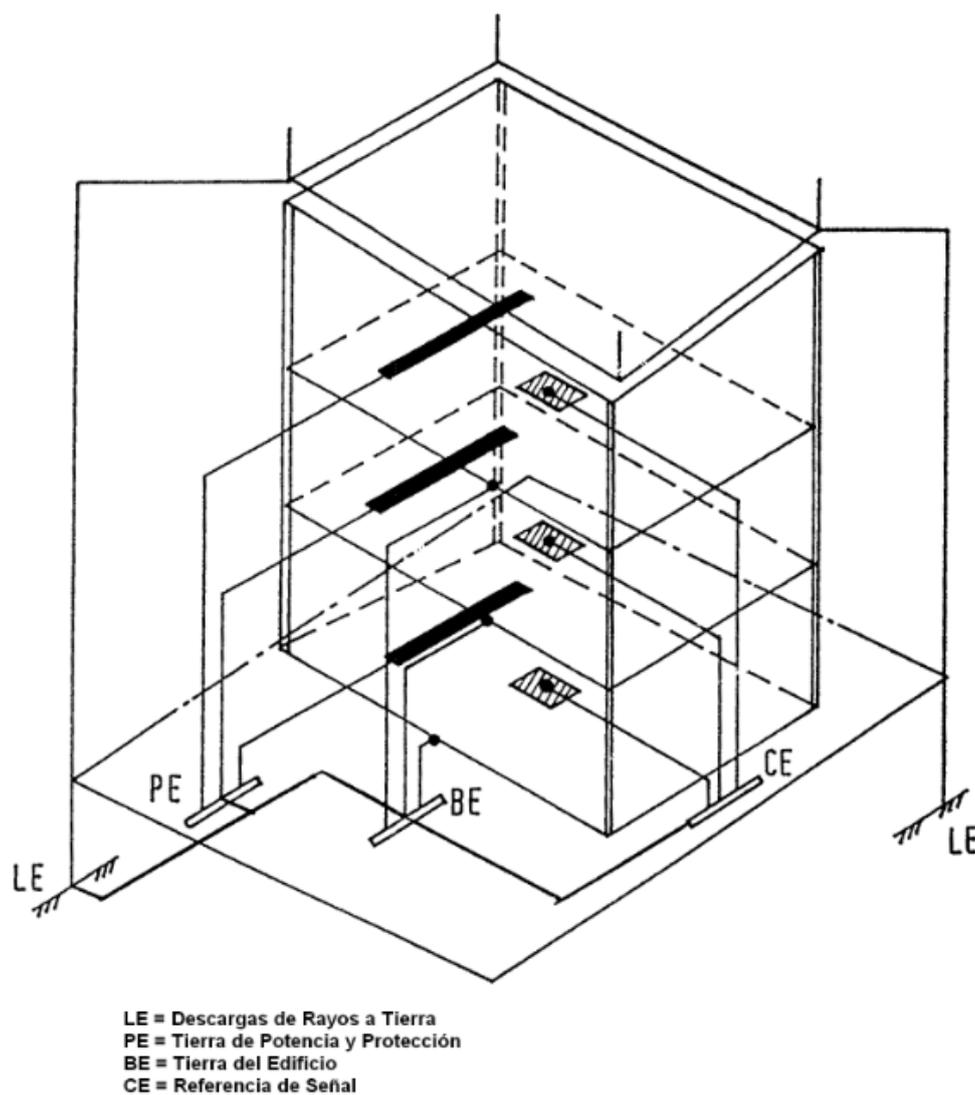


Figura 9.44: Puesta a tierra en edificios. Tierras conectadas o tierra común.

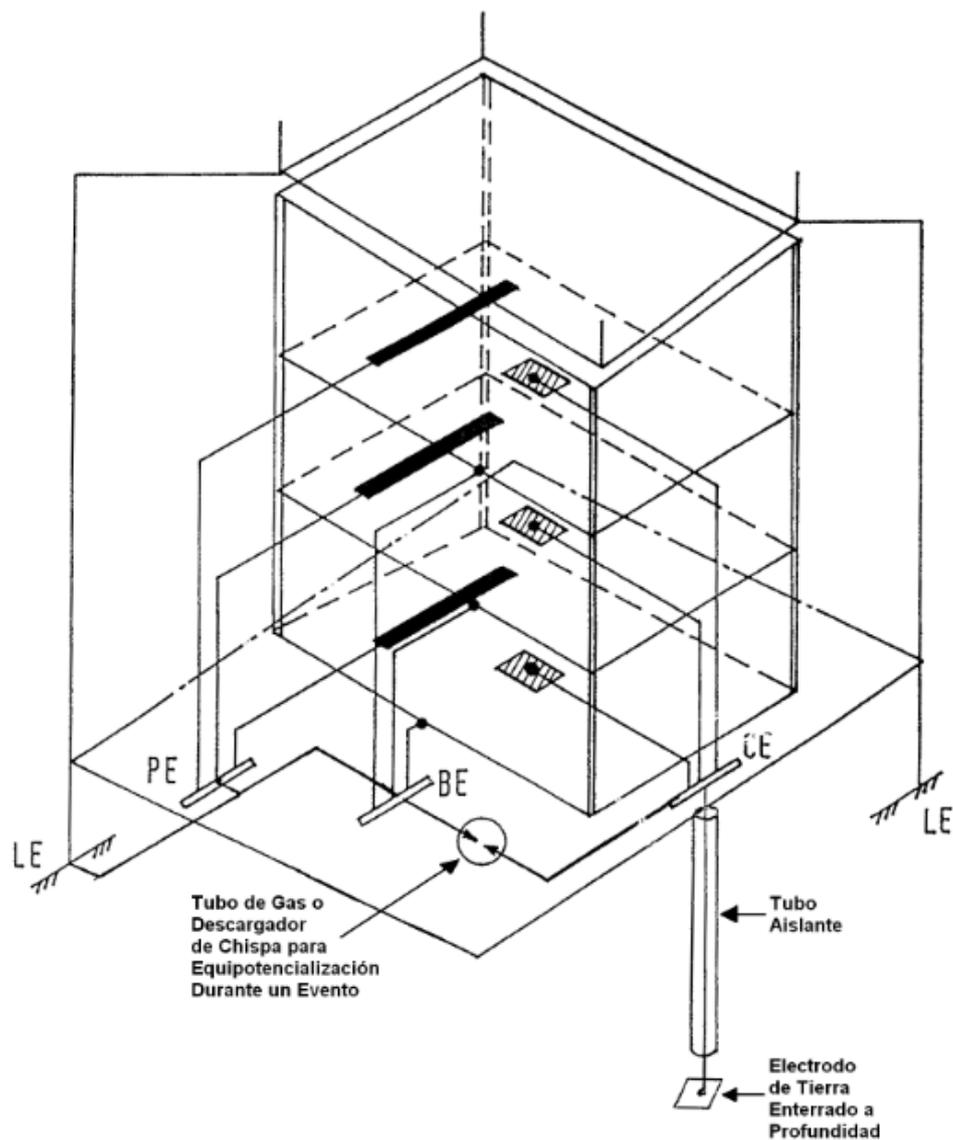


Figura 9.45: Puesta a tierra en edificios. Tierra común y tierra dedicada aislada con protección.

1. **Tierras Separadas:** Existe un riesgo grande de descarga lateral entre los objetos vinculados a la tierra de descargas y objetos aterrados a la tierra del sistema, debido a la diferencia de tensión entre los conductores de descarga de rayo y los conductores de protección del sistema eléctrico (ver punto 1 en figura 9.46). Existe además riesgo de descarga entre encapsulado y líneas, debido al aumento de potencial de la puesta a tierra de potencia (ver punto 2 en figura 9.46). Este aumento es en general suficiente como para producir la descarga entre conductores de línea - neutro y la tierra de potencia (ver punto 3 en figura 9.46) ya que es imposible mantener una separación efectiva entre las puestas a tierra.

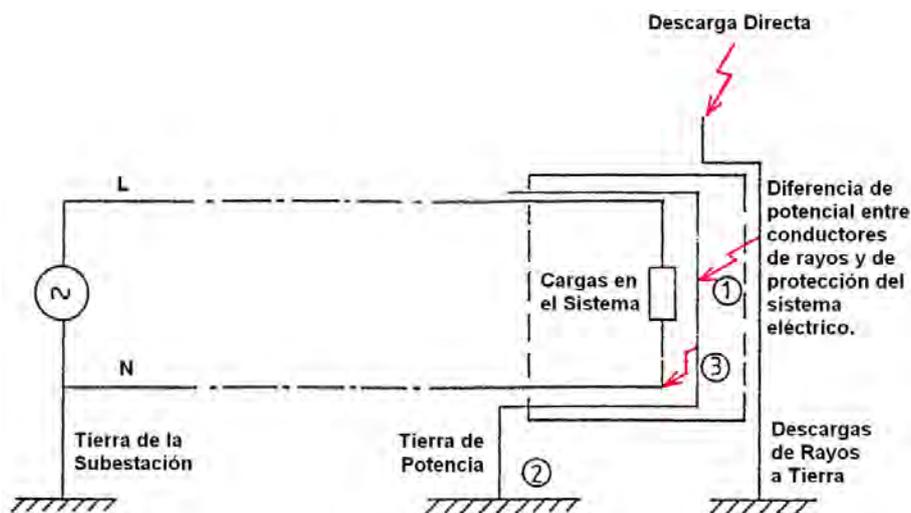


Figura 9.46: Conexión de la tierra de rayos y la tierra del sistema eléctrico
Tierras separadas.

2. **Tierras unidas (figura 9.47):** Se atenúa fuertemente la diferencia de potencial entre los distintos tipos de tierra durante un evento y por lo tanto la probabilidad de descarga lateral y diferencias de potencial en el terreno. Queda solamente el riesgo de descarga entre el encapsulado y la línea o el neutro de la alimentación (ver punto 3 en figura 9.47). la diferencia de potencial es algo mayor que en el caso anterior; en los dos casos es necesario conectar protecciones que la limiten. La impedancia total de puesta a tierra es menor, lo que atenúa el GPR.

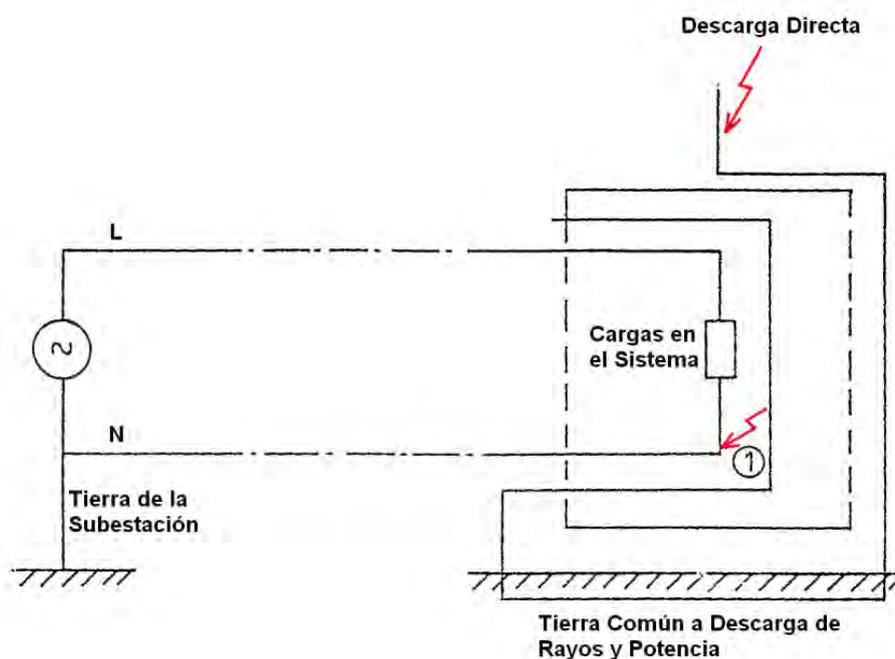


Figura 9.47: Conexión de la tierra de rayos y la tierra del sistema eléctrico
Tierras unidas.

Un problema que surge desde el punto de vista del mantenimiento de una instalación eléctrica consiste en que los diferentes servicios pueden estar a cargo de diferentes responsables, que por lo tanto pueden objetar la unión de tierras.

Existen diferentes maneras de abordar el tema:

- No unir las puestas a tierra: No es recomendable debido a las altas diferencias de tensión en tierra. Además el suelo es conductor; la aislación no es posible.
- Unir las puestas a tierra de forma coordinada manteniendo cada sistema con su toma de tierra y si alguna puesta a tierra no se puede conectar directamente, puede realizarse a través de descargadores de sobretensión. (ver tierra de electrónica en la figura 9.45).
- Utilizar una única puesta a tierra para todos los sistemas.

Un ejemplo de conexionado mediante descargadores de sobretensión son las cañerías de gas, que poseen protección catódica.

9.9.1. Propósito de cada sistema de tierra

A continuación se describen las configuraciones de sistemas de puesta a tierra, su propósito y los efectos esperados frente a una descarga atmosférica o falta en cada tipo.

1. *Tierra de descarga atmosférica*

a) **Propósito:** Dispersar en tierra la carga cuando los captores son alcanzados por los rayos.

b) **Efectos:**

- Problemas de seguridad personal (voltajes de toque y paso) por tensiones inducidas en las bajadas y por la elevación del potencial de tierra (GPR).
- Ruptura de aislaciones en equipos, debido a tensiones de transferencia causadas por la elevación del potencial de tierra, en la tierra del sistema eléctrico.
- Posibles descargas a la estructura, incluso con riesgo de incendio, por sobretensiones transitorias debido a la elevación del potencial de tierra (GPR), y a la diferencia de potencial de tierra (GPD), si la ejecución no se realiza correctamente.
- Perturbaciones y daños en el sistema de potencia y en equipos electrónicos y de señales debido a ruido y sobretensiones inducidas o caídas de tensión causadas por GPR y GPD. Subida de tensión $GPR = I_L Z_L$ siendo Z_L la impedancia de la puesta a tierra de rayos.

2. Tierra del sistema eléctrico y de equipos conectados al mismo

a) **Sistema eléctrico**

1) **Propósito:**

- Suministrar un camino de corriente de secuencia cero para mantener la tensión del sistema en estado normal durante desbalances o faltas.
- Limitar la subida de tensión durante faltas de líneas a tierra.
- Permitir la implementación de protecciones contra fugas a tierra o corrientes residuales.

2) **Configuraciones básicas:**

- Sistema IT: fue el sistema más usado por UTE, con la salvedad de que no lo maneja estrictamente como sistema IT, ya que no vigila el aislamiento del sistema. Lo utiliza para mantener el servicio con la primera falla, pero no repone el aislamiento del sistema antes de que se produzca la segunda falla; dejando de ser un sistema IT después de la primera falla de aislamiento. En la actualidad, UTE lo sustituye por el sistema TT. En las instalaciones interiores, se aplica cuando debe mantenerse el servicio frente a la primera falla (como hospitales), y en la primera interrupción de servicio que se puede realizar se detecta y se arregla la falla de aislamiento.
- Sistema TT: Sistema en el que se distribuyen los tres conductores de fase más el conductor de Neutro. La conexión a tierra de la instalación del sistema a proteger es una tierra independiente de la tierra del neutro del transformador de la subestación.
- Sistema TN-S: Sistema en el que se distribuyen los tres conductores de fase más el conductor de neutro y el conductor de protección. La puesta a tierra de protección del sistema está unida al neutro.
- Sistema TN-CS: Una variante usada en grandes instalaciones. Se distribuye fases y neutro, se aterriza localmente el neutro y de ese punto se distribuye separadamente neutro, tierra de protección eléctrica (conductor con aislamiento) y eventualmente tierra para estructuras metálicas (conductor sin aislamiento). Ver figura 9.48.

b) Tierra de equipos

1) Propósito:

- Esencial para la seguridad personal.
- Reducción de la tensión de contacto y de la tensión de transferencia.

2) Efectos:

- Circulación de corrientes de falla. Las corrientes de falla llegan a valores altos en un sistema TN ya que el circuito de falla involucra resistencias bajas. En el sistema TT dichas corrientes son mucho más bajas (de algunos amperes) porque el circuito de falla se cierra a través de las resistencias de las puestas a tierra de neutro y de protec-

ción.

- Necesidad de cuidar las relaciones de puesta a tierra del sistema y la tierra de protección. Puestas a tierras separadas y unidas. Relación entre las resistencias de las puestas a tierra en cada caso.

3) Ejemplos de conexión:

- Tablero de entrada monofásico.
- Tablero de entrada trifásico principal, se diferencia el neutro y tierra conexión de 5 hilos. Ver figura 9.48.

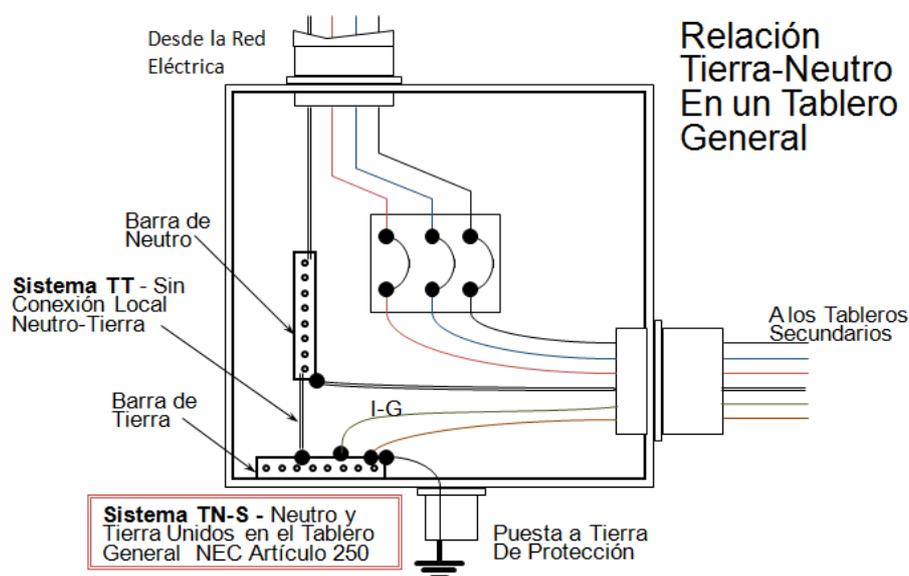


Figura 9.48: Ejemplo de cableado de neutro y tierra.

- Tablero secundario: diferenciación de tierra y tierra aislada (hilo verde). Ver figura 9.49.

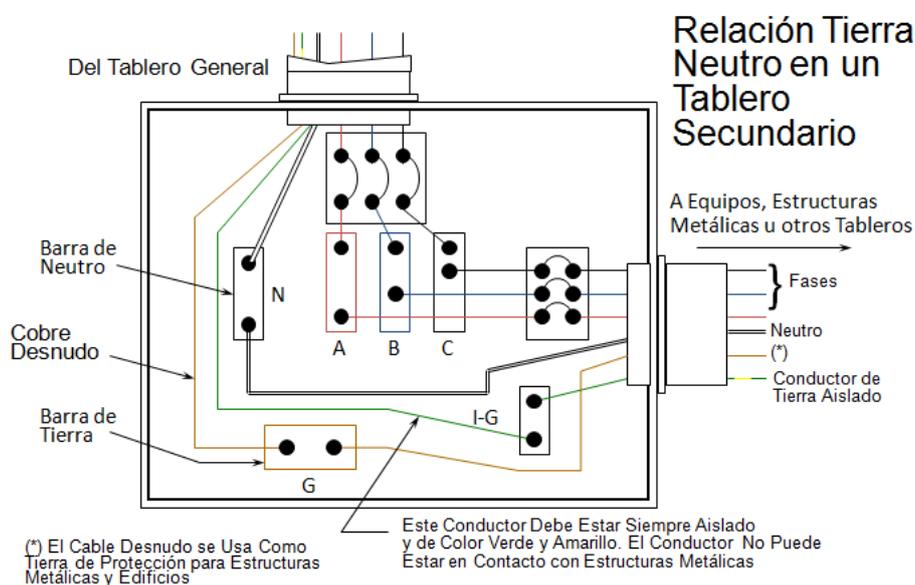


Figura 9.49: Ejemplo de cableado de neutro y tierra.

c) Tierra de electrónica o señal

1) Propósito:

- Tierra de electrónica y señal propiamente dicha: suministra una referencia de potencial estable para la operación del sistema de señales.
- Tierra de blindaje o de guarda. Reduce el ruido mediante blindaje electromagnético y permite el drenaje de carga electrostática.

2) Configuración básica:

- Según esquema, depende del equipo y es un tema de diseño.

3) Efectos:

- En este caso importa cómo una buena ejecución de esta tierra disminuye los efectos de la actuación de las otras protecciones.
- Fuentes y mecanismos de perturbaciones en la tierra de señal:
 - Tensiones parásitas provocadas por la intercepción de corrientes parásitas por parte de la toma de tierra de señal. Su mitigación implica:
 - Reducir área de toma de tierra de señal.

- Usar punto de tierra común de blindajes y de señal.
- Tensiones inducidas por campos magnéticos en “loops” de tierra.
 - Punto de tierra único con conductores de tierra y de señal torneados.
- Tensiones desarrolladas por campos electromagnéticos en conductores largos de tierra que actúan como antena.
 - El largo de los cables debe ser 1/20 de la longitud de onda de las interferencias electromagnéticas que se quieren evitar.
 - La longitud de onda para 300 Mhz es 1m. Un cable de 25 cm a esta frecuencia se comporta como un circuito abierto.
 - La única forma de tratar estas situaciones es a través de planos de tierra o múltiples puestas a tierra, lo cual puede aparecer en contradicciones de las dos primeras soluciones.
- Tensiones inducidas por proximidad de cables de potencia.
 - Se reducen esencialmente mediante la adecuada disposición de los caminos del cableado.
 - Separación de las trayectorias de las tierras de señal y cables de potencia, incluyendo el neutro y la tierra.
 - Apantallamiento o blindaje de conductores de tierra de señal.
 - Mantener el trazado de los cables de tierra de señal ortogonal al trazado de los cables de potencias y sus cables de tierra.

d) Tierra estructural

1) Propósito:

- Evitar descargas o altas tensiones en objetos metálicos, para evitar daños estructurales.

2) Configuraciones básicas:

- Puesta a tierra del hierro estructural en uno o varios puntos.

3) Efectos:

- Como forma loops puede actuar como un halo.

- En los casos en que las puestas a tierra están todas unidas a un punto, esta tierra no debe bajar al punto de menor impedancia, debido a que puede actuar como antena radiante de perturbaciones originadas por la corriente del rayo hacia el interior del edificio.

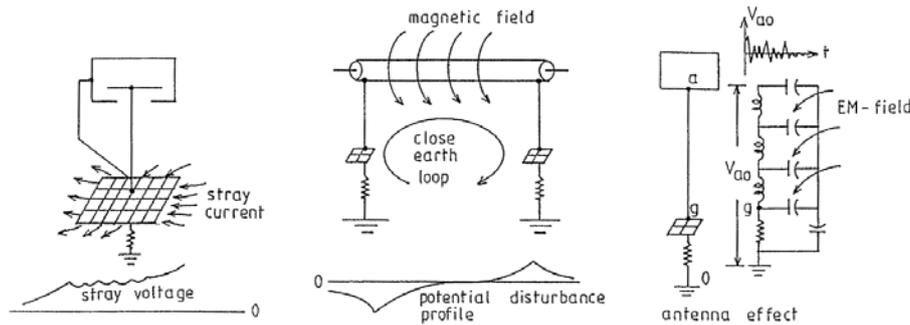


Figura 9.50: Fuentes y mecanismos de interferencias por aumento de potencial de tierra.

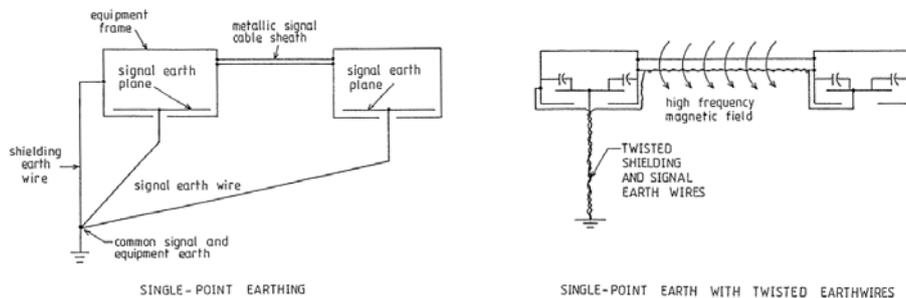


Figura 9.51: Métodos de mitigación de interferencias por aumento de potencial de tierra.

9.9.2. Coordinación de tierras

Lograr una coordinación entre las impedancias de tierra en una puesta a tierra combinada permite reducir la influencia:

- del rayo en la electrónica, logrando que $Z_e > Z_L$.
- de una falta eléctrica en la electrónica, logrando que $Z_e > Z_g$.
- de una corriente de descarga en el sistema eléctrico, logrando que $Z_g > Z_L$.

Un sistema coordinado requiere simplemente que $Z_e > Z_g > Z_L$.

No es posible que estas puestas a tierra estén aisladas, ya que la tierra es conductora, por lo tanto se van a desarrollar GPD entre estas tierras.

Existen las siguientes alternativas para realizar las conexiones:

1. Todas las tierras unidas mediante un cableado que respete la condición de coordinación, lo que presenta como ventaja una resistencia mucho menor, por lo que se reducen las GPD, pero presenta como desventaja que las corrientes parásitas, de descarga o de falla del sistema de potencia pueden afectar a la electrónica.
2. Tierras aisladas: son imposibles de realizar.
3. Tierra aislada únicamente para la electrónica. Usada en subestaciones o en lugares donde se prevé que las corrientes parásitas son altas y hay baja tolerancia en térmicos de EMC.

9.9.3. Complemento de la coordinación de tierras

Una vez lograda la coordinación de tierras se completa el segundo nivel de protección. La instalación debe completarse con la instalación de dispositivos descargadores o limitadores de sobretensiones (arresters) para la protección contra GPR remotos o impulsos de corrientes de descargas atmosféricas transferidos desde el exterior. Ver capítulo 10.

9.10. Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento

El escenario a considerar incluye una torre con varias antenas de recepción y transmisión con bajadas por cable coaxial, un recinto rodeado por una cerca metálica y una caseta que contiene equipo de radiofrecuencia, equipo de computación, equipo telefónico y entrada de alimentación eléctrica de alterna.

La electrónica está directamente expuesta al rayo a través de las bajadas de las antenas.

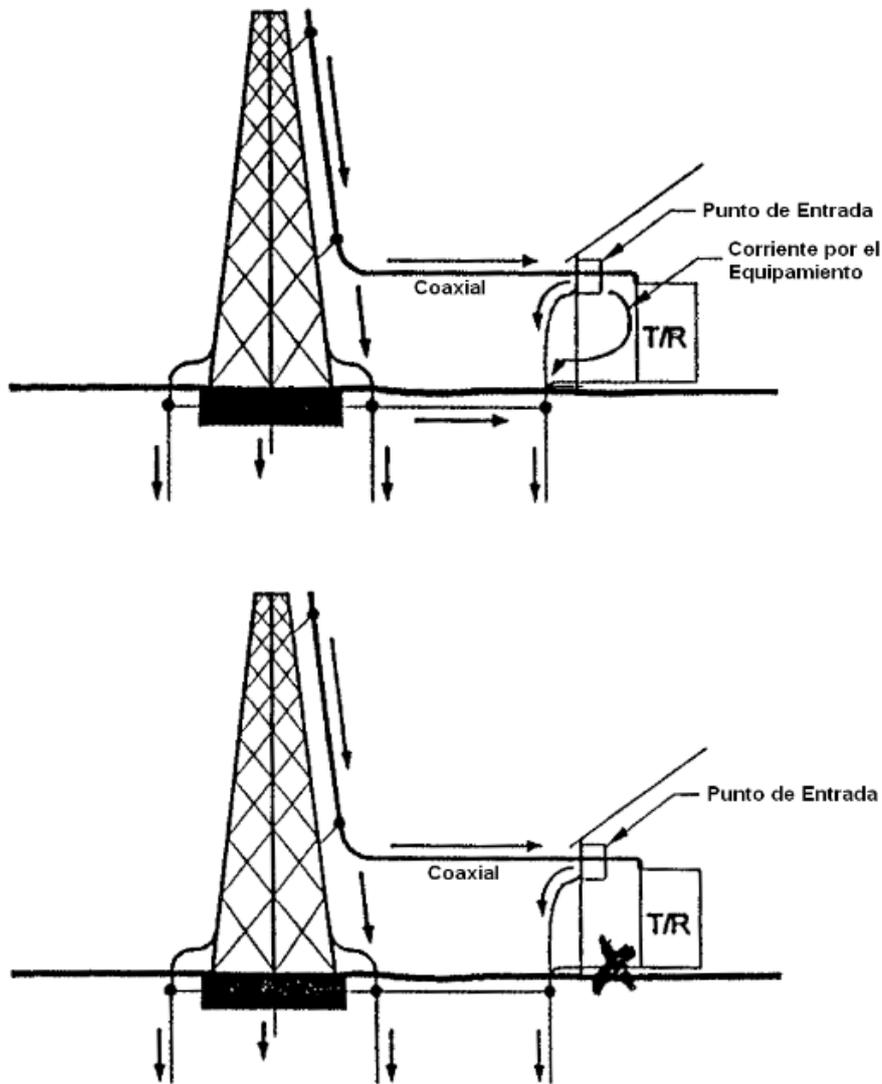


Figura 9.52: Puesta a tierra de equipos.

9.10.1. Descargas atmosféricas

Se utiliza la propia estructura metálica de la torre como elemento de bajada a tierra.

Como puesta a tierra se utiliza la tierra Ufer (fundación de la torre) con radiales y electrodos verticales alejando la descarga de la caseta. Alrededor de la caseta se instala un sistema perimetral de puesta a tierra. Se realiza una conexión equipotencial entre la torre y la caseta mediante conductores

9.10 Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento 272

entre las dos puestas a tierra (caseta y torre) según figuras 9.52, 9.53 y 9.54.

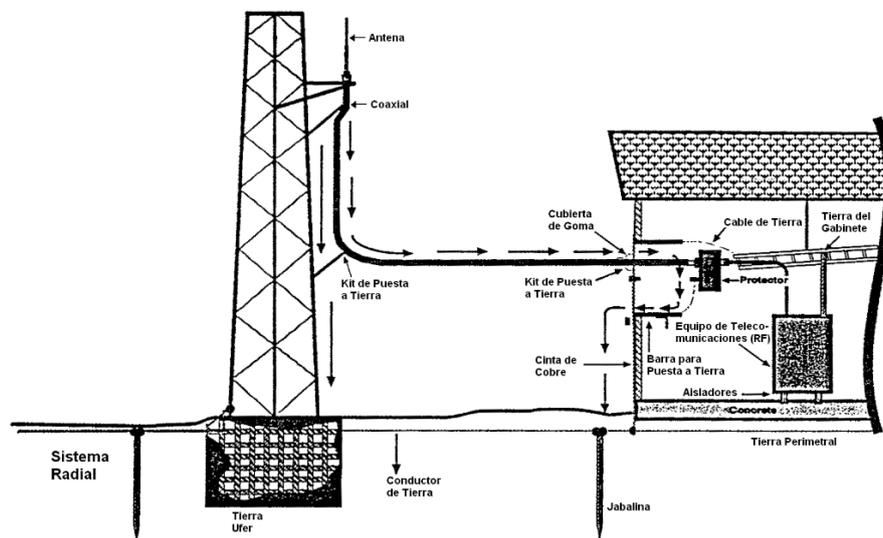


Figura 9.53: Bajada y puesta a tierra de elementos activos expuestos (Antena).

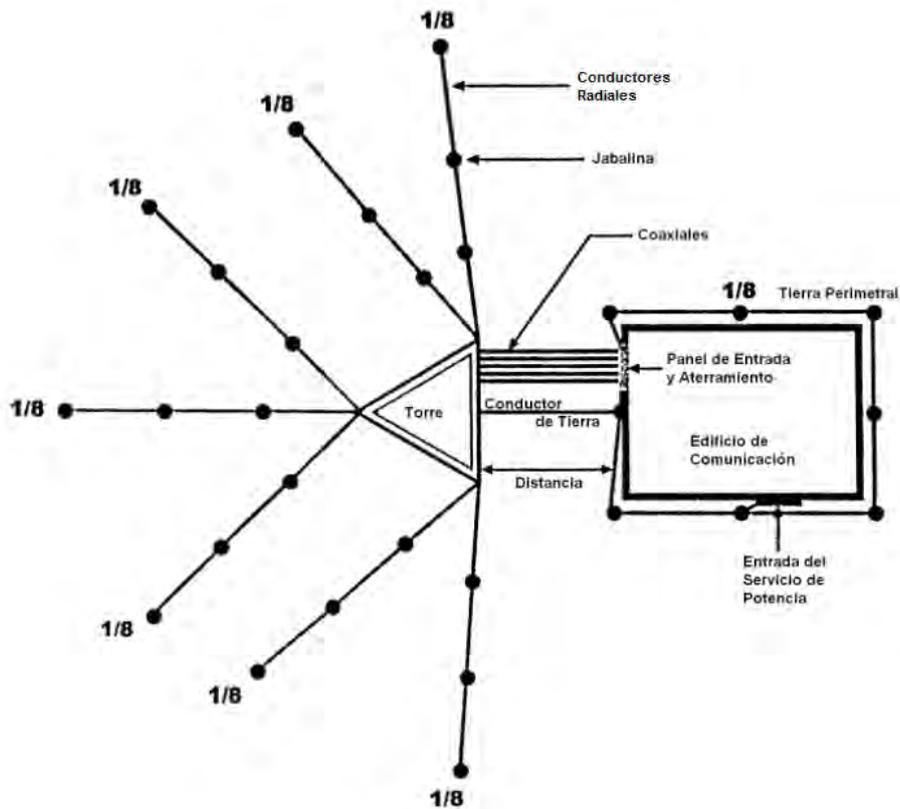


Figura 9.54: Ejemplo implementación de puesta a tierra para una torre.

9.10.2. Descargas atmosféricas a través de los coaxiales

Si bien la torre es el conductor de bajada natural previsto los cables coaxiales llevan una parte significativa de la corriente de un rayo. Esto se debe a las tensiones desarrolladas por las inductancias, de los conductores, la mutua y la de transferencia, suficientes para que se produzca una descarga de la torre a los cables, estableciéndose así caminos de la corriente a tierra, en el peor caso enteramente a través del equipo de RF.

No sólo se desarrollan sobretensiones en los extremos del coaxial; debido a la forma de la torre y a la no linealidad de la inductancia con el largo de los coaxiales la distribución de tensión a lo largo de los conductores no es la misma (suponiendo coaxial y torres unidos arriba por una unión o una descarga y abajo a través de la puesta a tierra del coaxial o de componentes del equipamiento). Por lo tanto existe además riesgo de descarga lateral entre el coaxial y la torre en los alrededores de la mitad de la altura del conjunto.

Como el conductor exterior del coaxial en general debe conectarse a tie-

rra, esta conexión debe hacerse de manera de reducir al máximo tanto las posibilidades de descargas entre torre y coaxial como la corriente de rayo que el coaxial pueda conducir al equipo de RF.

La conexión a tierra de los coaxiales debe hacerse por lo tanto en por lo menos tres puntos: en el extremo superior de la torre, al pie de la torre y al entrar a la caseta. Para torres altas debe agregarse una conexión a la torre cada 50 metros aproximadamente.

En la figura 9.55 se pueden observar diversas maneras de de ingreso de los coaxiales a la caseta.

La conexión a tierra a la entrada de la caseta requiere especial cuidado para que la corriente de descarga a tierra no genere sobretensiones a la entrada del equipamiento. Existen accesorios como los paneles de entrada (bulkhead panel) y los conductores de cinta que permiten disminuir la inductancia de estos conductores a límites adecuados.

El bulkhead es conectado a tierra y se realiza una puesta a tierra al rededor de la caseta, como se puede observar en la figura 9.53.

9.10 Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento 275

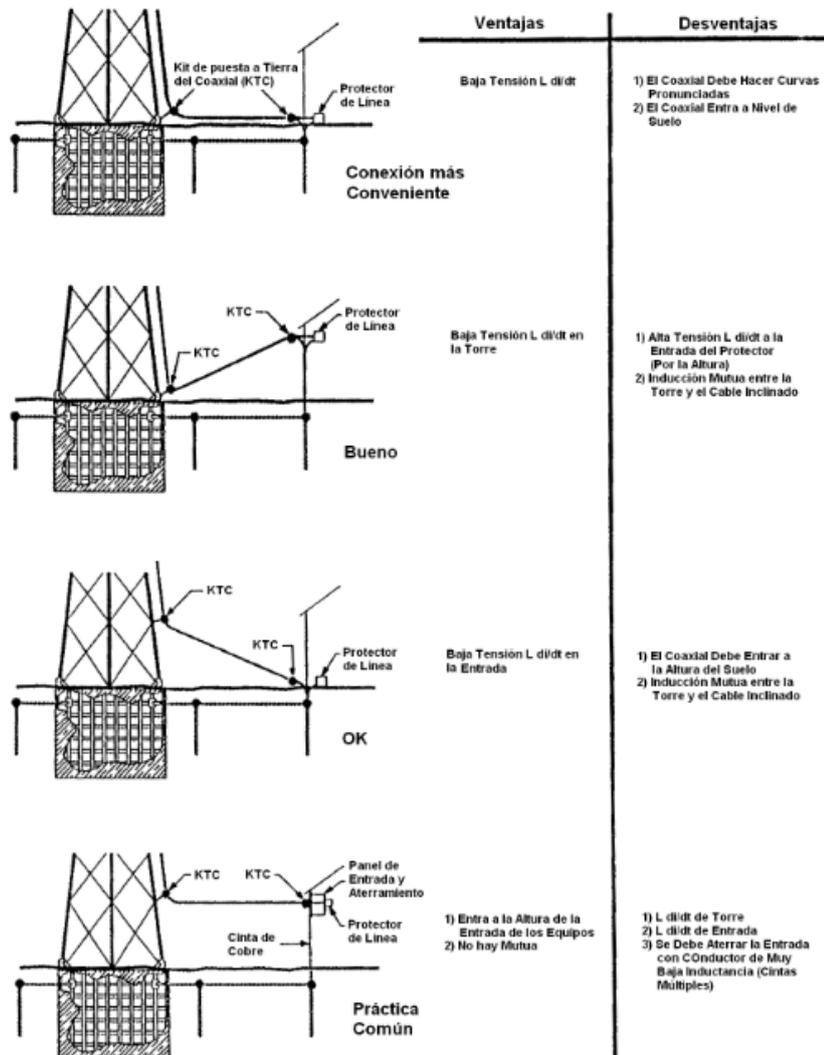


Figura 9.55: Formas de entrada de coaxiales a una caseta de equipos de RF.

9.10.3. Puesta a tierra del equipamiento de comunicaciones

A pesar de las conexiones realizadas en el exterior de la caseta, en el interior circulan corrientes como las indicadas en la figura 9.56, que pueden dañar el equipamiento. Se describe entonces paso a paso un procedimiento para eliminar la circulación de corriente de rayo por el equipamiento.

9.10 Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento 276

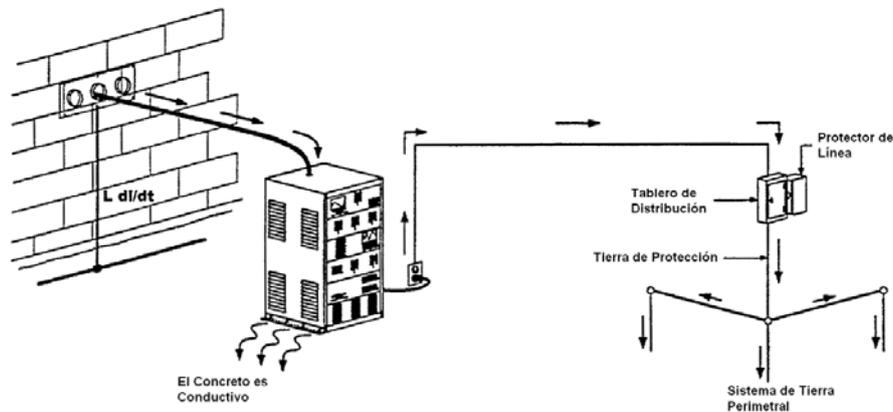


Figura 9.56: Caminos de la corriente del rayo en el interior de la instalación.

La figura 9.56 muestra que la corriente del rayo puede encontrar una inductancia alta entre el panel de entrada y tierra; en es caso una parte importante de la corriente por el coaxial pasa a través del equipo al piso y a la tierra de potencia de la instalación. Un eventual protector de línea de alimentación es inoperante ante este evento.

Se instala entonces un panel metálico (bulkhead) al cual se conectan los conductores externos de los coaxiales (figura 9.57). El panel se conecta a la tierra exterior mediante cintas de baja inductancia, de manera que la mayor parte de la corriente circule a tierra por ellas.

El panel tiene soportes para instalar protectores de coaxiales, que permiten conectar el conductor exterior al panel (y por lo tanto a tierra) y proteger el conductor central contra sobretensiones (ver capítulo 12).

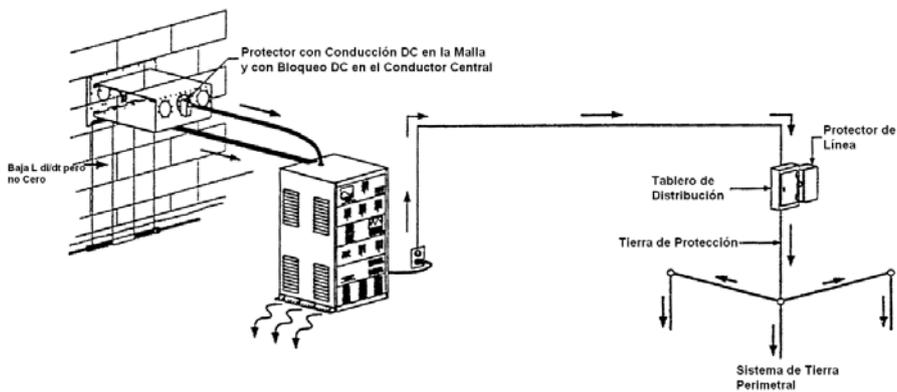


Figura 9.57: Entrada con bulkhead. Persisten los lazos de tierra través del equipo.

9.10 Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento 277

El siguiente paso es aislar el equipo de tierra, eliminando de esta manera un camino de la corriente a tierra a través del equipo (figura 9.58). Se mantiene el camino de la sobrecorriente a través de la tierra la alimentación eléctrica. El paso final consiste entonces en alimentar el equipo a través de un protector contra sobretensiones aterrado en el bulkhead junto a los de los coaxiales, logrando de esta manera un punto único de tierra (figuras 9.59, 9.60).

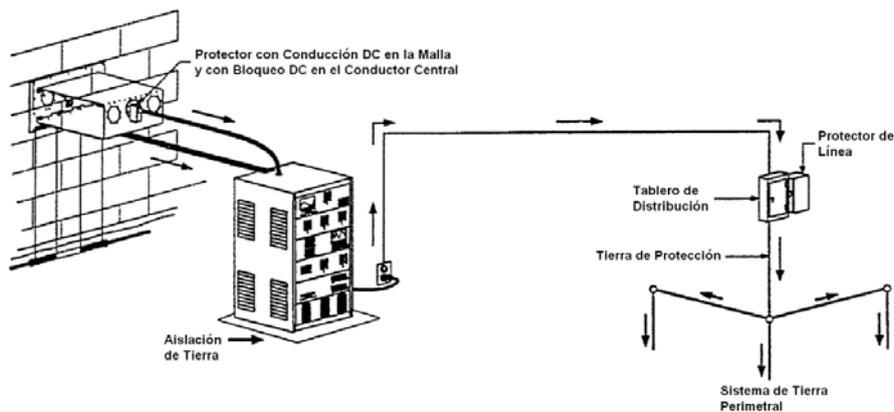


Figura 9.58: Aterramiento de equipo.

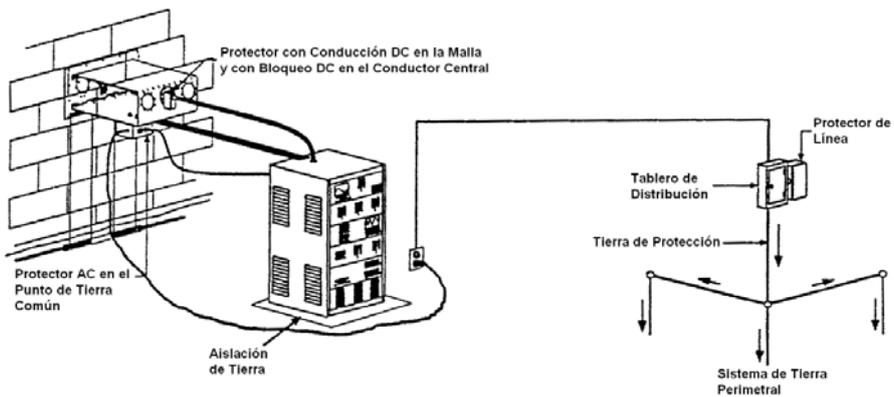


Figura 9.59: Alimentación del equipo desde un protector aterrado en el bulkhead, único punto de tierra.

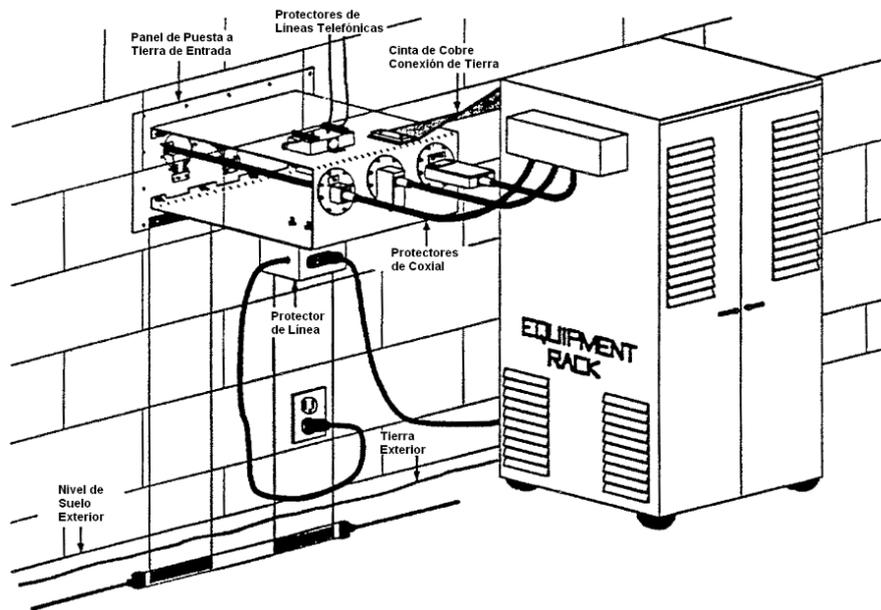


Figura 9.60: Panel de entrada con una única referencia de tierra.

Si no es metálica, en el interior de la caseta se puede instalar un anillo superior en cinta (halo) al que se conectan todas las estructuras metálicas como forma de disminuir los campos electromagnéticos creados por la corriente de rayo en el interior del recinto (figura 9.61).

El aterramiento del halo debe realizarse a la tierra perimetral en un punto alejado de la bajada del panel de entrada, para evitar que funcione como antena emisora de los mismos campos que intenta amortiguar.

Se ha elegido un caso en que el punto de tierra único es fácilmente implementable. En general no es así, pero el procedimiento para ejecutar una conexión correcto que impida circulación de corriente por el equipamiento a proteger es similar.

9.10 Implementación de un sistema particular de tierras: Torre con antenas y recinto con equipamiento 279

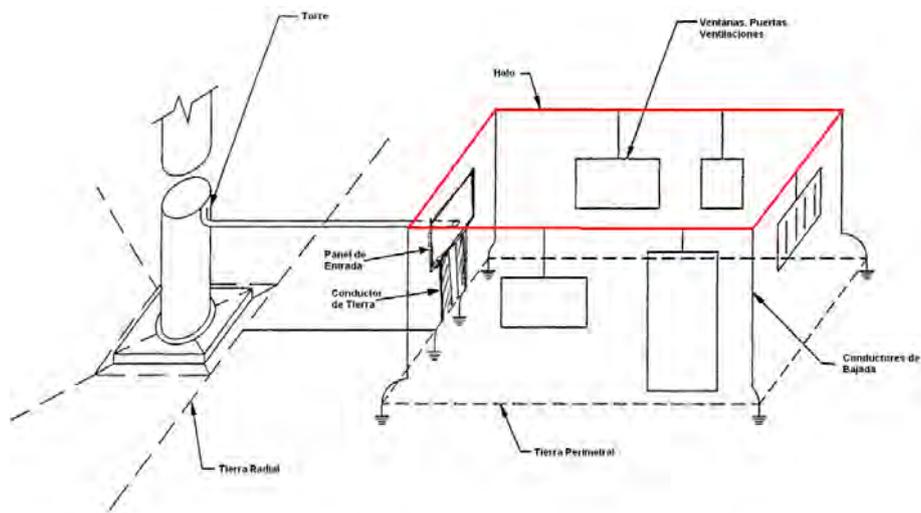


Figura 9.61: Halo.

Capítulo 10

Propagación a tierra de una descarga en una instalación con integración de funciones

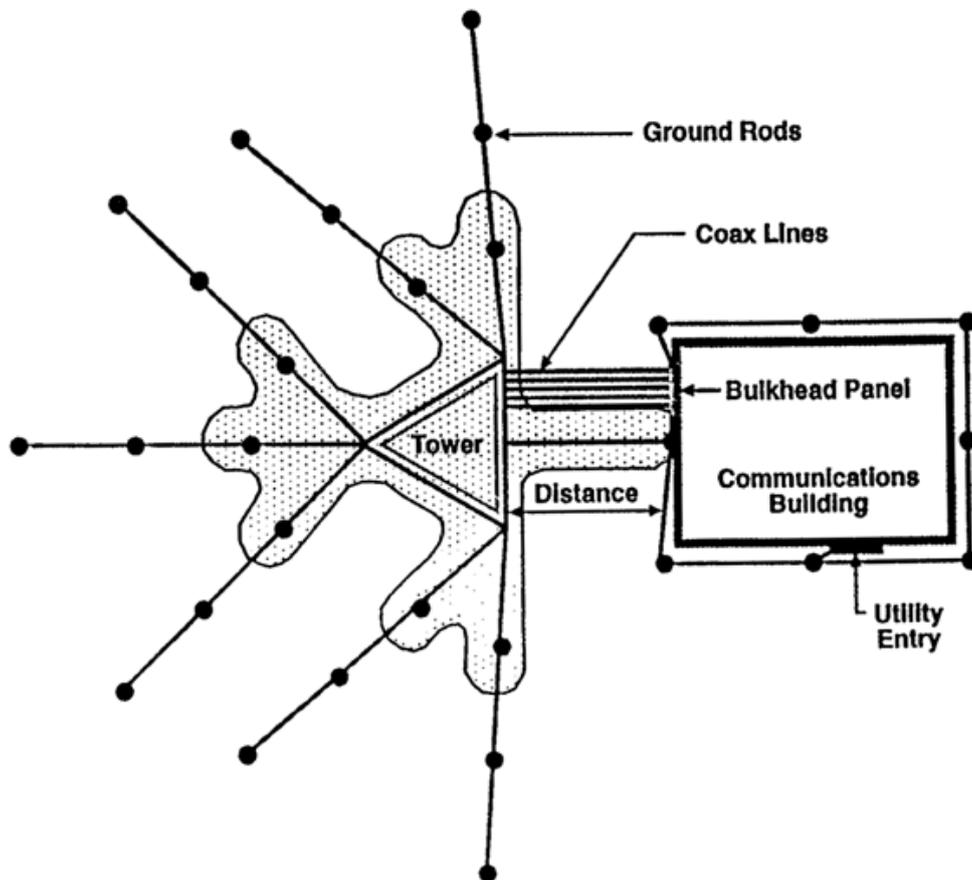


Figura 10.1: Propagación en Tierra de una Descarga (1).

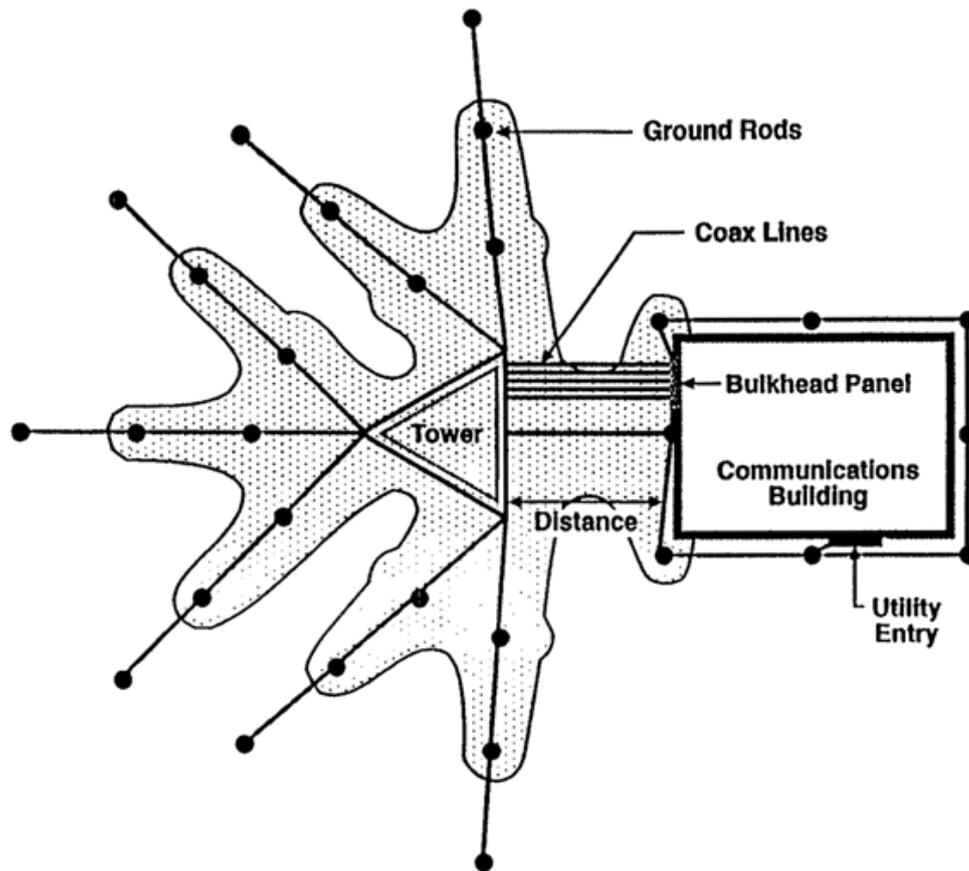


Figura 10.2: Propagación en Tierra de una Descarga (2).

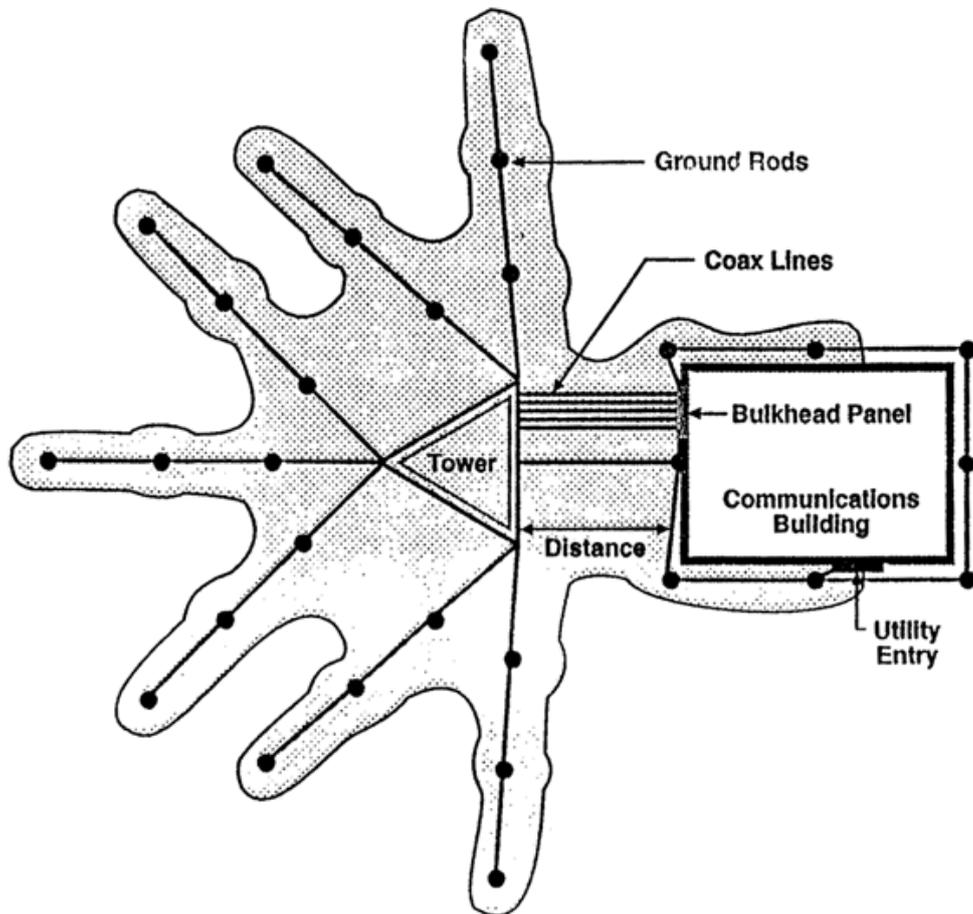


Figura 10.3: Propagación en Tierra de una Descarga (3).

Capítulo 11

Dispositivos de Supresión de Sobretensiones Transitorias. Componentes, Circuitos y Sistemas.

El presente capítulo describe los distintos dispositivos protectores, capaces de suprimir o atenuar sobretensiones transitorias y su instalación correcta.

Las sobretensiones pueden provenir de descargas atmosféricas locales, que elevan el potencial del sitio, o de descargas lejanas que se propagan por líneas de potencia, cañerías, líneas de comunicaciones u otros elementos conductores que vinculan lugares alejados. También pueden provenir de maniobras o accidentes en la red eléctrica.

Las sobretensiones causadas por descargas suelen tener valores de pico más altos pero conllevar menor energía.

Se describen dispositivos que cortan la corriente, abriendo de alguna forma el circuito, y otros que la fijan en algún valor tope.

Se compara su rapidez, y su robustez y su durabilidad. Como estas características no se dan conjuntamente no hay un dispositivo protector mejor que los demás. Deben adecuarse:

- a las solicitaciones esperadas,
- al equipo a proteger,
- y frecuentemente deben combinarse entre sí para obtener rapidez y robustez, para proteger al equipo sin romperse ellos mismos.

Las características de los protectores son tan importantes como su correcta instalación; como regla general lo más cerca posible del equipo a proteger.

Debe quedar claro que, salvo casos muy excepcionales, los circuitos protectores *no* pueden usarse solos. Deben estar precedidos de:

- captosres naturales o artificiales, previstos y dimensionados para el impacto directo
- caminos a tierra que puedan desviar la mayor parte de la energía
- buenas puestas a tierra para descargas del tipo en consideración.

Recíprocamente, debe decirse que por mejores que sean los captosres, las bajadas y las puestas a tierra, casi siempre se necesitan dispositivos protectores pues no es posible desviar toda la energía.

El protector ideal no carga el circuito o sistema en funcionamiento normal, limita las sobretensiones y desvía la corriente a tierra.

Los descargadores de sobretensión tienen, entre otras, las siguientes exigencias:

- Minimizar la influencia en la operación normal del sistema.
- Tener definida la máxima potencia o energía que pueden disipar y en qué condiciones.
- Tener definida la máxima I_{Pico}/U_{pico} que soportan.
- Tener definida la máxima tensión que aparece en sus bornes, cuando actúan frente a una determinada perturbación.

Para poder seleccionar un descargador debe definirse:

- El tipo de evento (forma de onda) que puede esperarse en el punto de instalación del descargador y la magnitud del mismo.
- Qué elementos se quieren proteger y las características de los mismos.

Como ya se vio en el capítulo de evaluación de riesgo, los descargadores son ensayados bajo las formas de onda representativas de las perturbaciones a las que pueden quedar sometidos. Las dos formas de onda típicas definidas por la IEC 61643-12 para los ensayos de descargadores de alimentación son:

1. **Para impacto directo:** Los descargadores deben ser capaces de soportar las corrientes directas de rayo y se ensayan para una onda de corriente $10/350 \mu s$.
2. **Impacto indirecto:** Los descargadores deben ser capaces de soportar las corrientes inducidas y son ensayados con una onda combinada de corriente y tensión:

- Corriente: 8/20 μs .
- Tensión: 1,5/50 μs .

Básicamente, los descargadores deben ser dimensionados para no romperse para las formas de onda representativas de las perturbaciones que se esperan en el punto de instalación y para que la tensión que queda sobre ellos cuando actúan, sea inferior a la que dañaría el equipo protegido. Es decir, deben limitar la tensión sobre el equipo que protegen sin romperse ellos mismos.

En la figura 11.1 se indican tres tipos de instalación:

1. **Instalación ideal:** No presenta ingreso de ningún servicio exterior que pueda generar sobretensiones en los equipos.
2. **Instalación real:** Instalación con ingreso de los siguientes servicios exteriores, pudiéndose producir sobretensiones entre los servicios y el plano de tierra de la instalación:
 - Alimentación eléctrica.
 - Alimentación telefónica.
 - Alimentación de red de datos.
3. **Instalación con descargadores:** Para limitar las sobretensiones que puedan aparecer entre los servicios entrantes y el plano de tierra, se instalan descargadores al ingreso de cada servicio, acercándose a la situación ideal.

11.1. Tipos de protección

Se distinguen dos tipos de protección según la conexión de los descargadores: conexión paralelo (shunt) y conexión serie.

11.1.1. Protección shunt

Los descargadores se instalan en paralelo con la carga a proteger. Existen dos tipos de descargadores tipo shunt:

- **Crowbar:** Cuando se produce la actuación del descargador, la tensión entre sus bornes baja a cero o cerca de cero; se cortocircuita la entrada/salida.

Dentro de este tipo de descargadores se encuentran los de tubo de gas y los de tiristores.

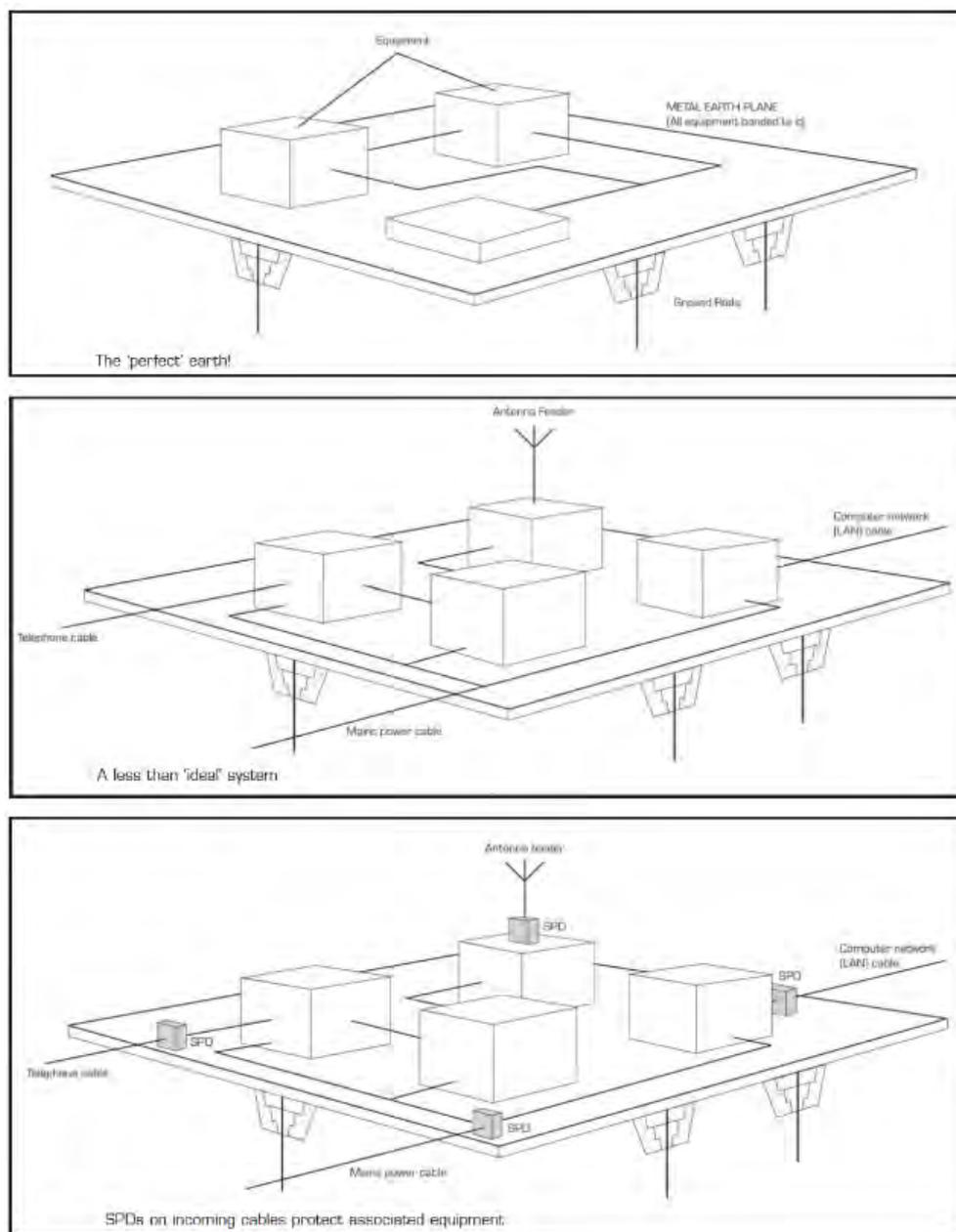


Figura 11.1: Protección contra sobretensiones transitorias.

- **Ventaja:** En general son muy robustos ya que la energía que disipan es baja porque dejan una tensión (U_p) muy baja durante la descarga. La corriente de fuga en ausencia de perturbación es prácticamente nula.
- **Desventajas:** Llevan a cero la señal, introduciendo errores en transmisión de datos o dejando dispositivos inactivos. No son dispositivos de encendido rápido.

En la figura 11.2 se indica el tipo de respuesta de un descargador tipo Crowbar.

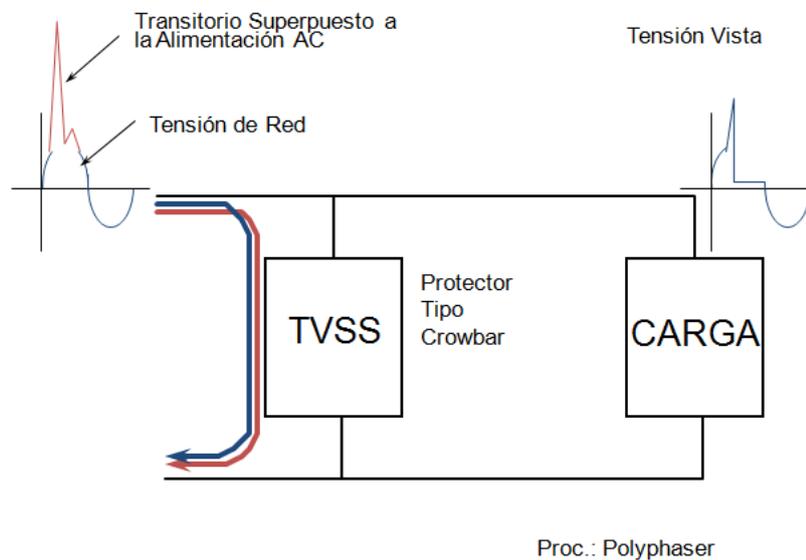


Figura 11.2: Respuesta Crowbar.

- **Clamp:** Cuando se produce la actuación del descargador, limitan la tensión entre sus bornes a un cierto valor U , mayor que la tensión de funcionamiento normal.

Dentro de este tipo de descargadores se encuentran los Zeners, SADS (Silicon Avalanche Diode) y los Varistores de óxido metálico (MOV).

- **Ventaja:** Cuando estos descargadores actúan, no cortan la señal (no llevan a cero la tensión). Son dispositivos de actuación rápida.
- **Desventaja:** Disipan más energía, ya que aparece una tensión entre sus bornes, y por lo tanto se van degradando más que los crowbar.

En la figura 11.3 se indica el tipo de respuesta de un descargador tipo Clamp.

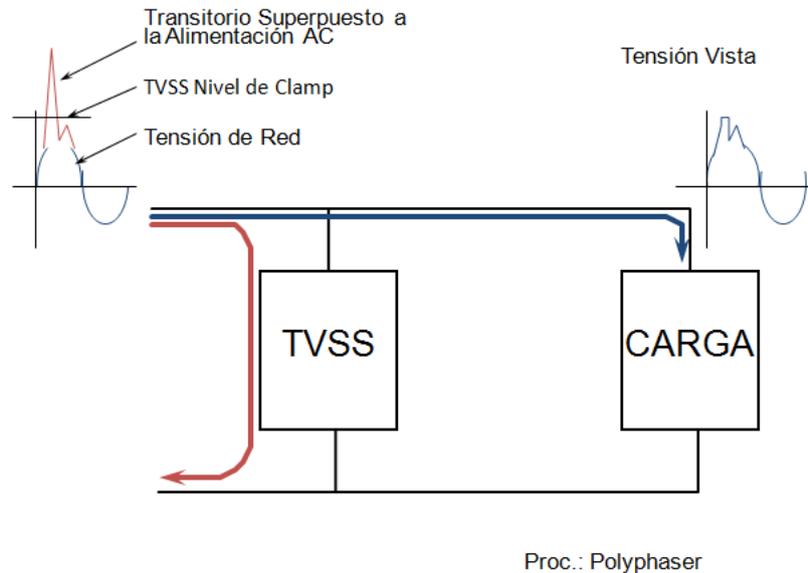


Figura 11.3: Respuesta Clamp.

Los descargadores **Crowbar** no pueden ser utilizados para la protección de redes de potencia, pues ante una sobretensión, producen un cortocircuito y por lo tanto corrientes muy elevadas. En estas redes se utilizan descargadores tipo **Clamp** o combinación de ambos tipos.

11.1.2. Protección serie

Consiste esencialmente en un inductor con núcleo de aire que, si la corriente de descarga aumenta linealmente, intercala en el camino de la descarga una diferencia de potencial constante. Otros tipos de protección serie son: una resistencia o inductancia serie combinada con algún tipo de protector shunt, transformadores que no permiten el pasaje de las sobretensiones en modo común o descargadores para coaxiales que aíslan el equipo protegido para la corriente de rayo y permiten la conducción de la señal. En los dos últimos ejemplos la protección está dada por la aislación galvánica.

11.1.3. Tolerancias según la amplitud de la tensión de servicio

Para los descargadores que se instalen en el sistema de alimentación existen dos tipos de exigencias que deben compararse: una desde el punto de vista de los equipos y otra desde el punto de vista de la red. Estas son la tolerancia máxima de los equipos a las variaciones de tensión de la alimentación y las variaciones de tensión máximas de una red eléctrica. Estas variaciones máximas de la red son las que garantiza el proveedor del servicio eléctrico. Esto es parte de la calidad de servicio. Se asegura que las perturbaciones de determinada magnitud no duran más que un cierto tiempo, más corto cuanto mayor es la solicitud. Estas exigencias deben compararse a la hora de dimensionar la protección del equipamiento.

La zona rayada en la figura 11.6 muestra dónde se requiere protección contra sobretensiones de la red, pues lo que garantiza el proveedor rompería el equipo.

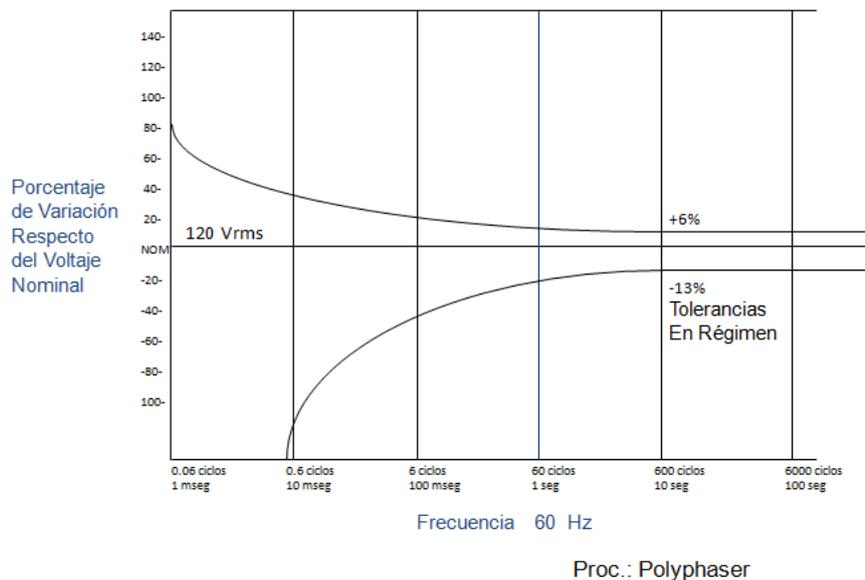


Figura 11.4: Criterio de tolerancia en la alimentación del equipamiento - curva original de CBEMA.

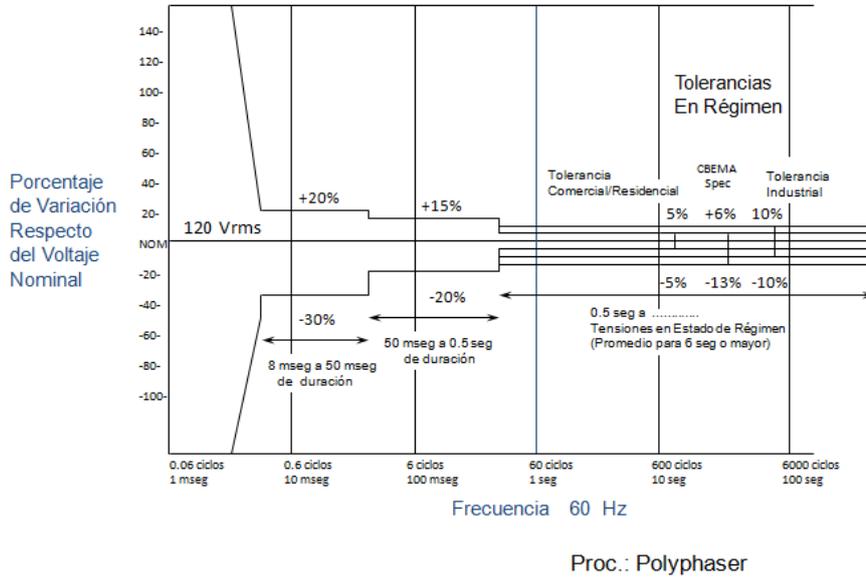


Figura 11.5: Ejemplo de variaciones maximas de tensión de una red eléctrica.

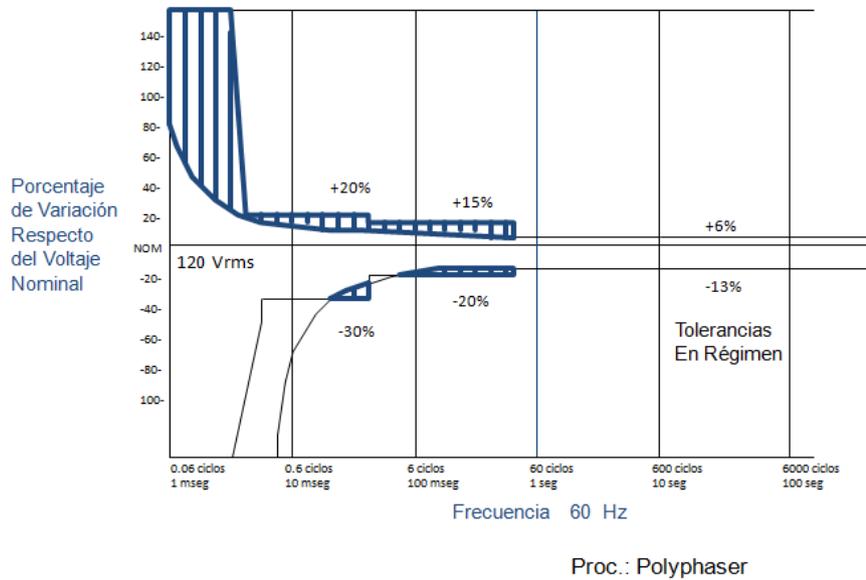


Figura 11.6: Comparación de la tolerancia de la red con la tolerancia de los equipos.

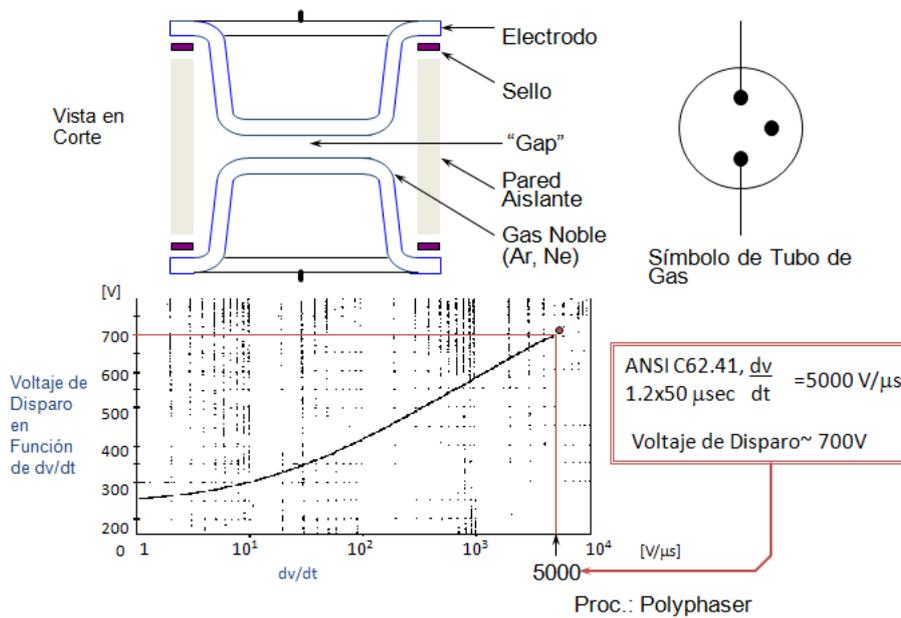


Figura 11.7: Tubo de Gas.

11.2. Componentes básicos

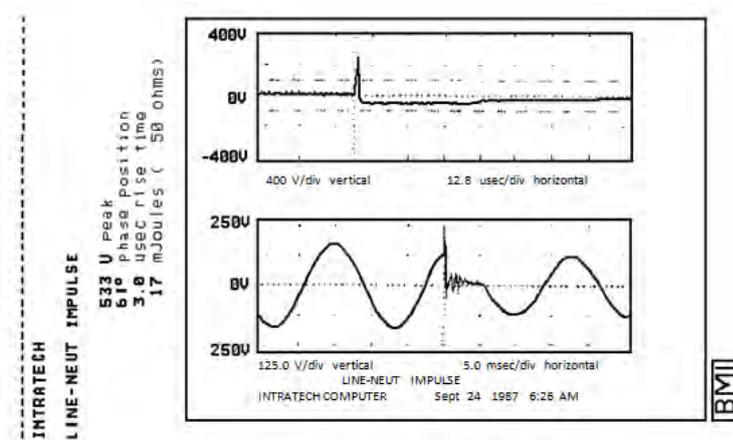
11.2.1. Tubos de gas

El tubo de gas se encuentra formado por dos electrodos y un gap lleno de gas noble. En la figura 11.7 se muestra la estructura de un tubo de gas.

Cuando se establece una determinada sobretensión entre sus terminales, salta una chispa haciendo que el gas conduzca. El menor valor de tensión que puede producir la conducción de un tubo de gas es del orden de los 90 V; pero debe tenerse presente que cuando se habla de un tubo de gas de 90 V, significa que el mismo va a disparar cuando se le aplica entre sus bornes una tensión que crece linealmente y llega a los 90V con una pendiente de 100 V/s. Para los transitorios de rayo la velocidad de crecimiento de la tensión en los bornes del descargador es mucho mas rápida.

Para variaciones $\frac{dv}{dt}$ altas se obtienen tensiones de protección (U_P) mucho mas altas que la tensión nominal del tubo (tensión a la que dispararía con una velocidad de crecimiento de $100 \frac{V}{s}$).

En la figura 11.7 se puede observar la estructura de un tubo de gas y la curva de disparo en función de $\frac{dv}{dt}$ para un tubo de gas de 270 V. De la curva de disparo se observa que con un $\frac{dv}{dt} = 5000 \frac{V}{\mu s}$ para una onda de tensión $1,2/50 \mu s$ se obtiene una tensión de protección $U_P = 700V$.



Impulso – Tubo de Gas

Proc.: Polyphaser

Figura 11.8: Forma de onda de un tubo de gas.

Resulta razonable considerar que la tensión de disparo para sobretensiones de rayo será por lo menos $3U_n$ del tubo de gas. Entonces para un tubo de 90 V, debemos considerar una tensión de disparo de 270 V para sobretensiones de origen atmosférico.

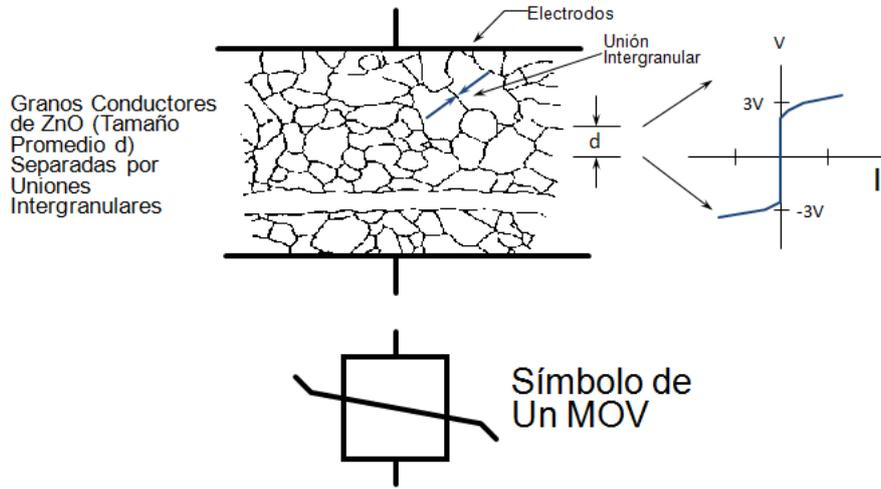
La figura 11.8 muestra la forma de onda de la tensión entre los bornes de un tubo de gas cuando éste actúa frente a una sobretensión transitoria.

11.2.2. Varistores

Están compuestos por una gran cantidad de granos de óxido con aditivos, formándose entre dichos granos una superficie de contacto en la que se establece un *potencial de contacto* de $\pm 3V$. En la figura 11.9 se muestra la microestructura de un varistor y la curva de cada juntura, y en la figura 11.10 se muestra la curva de la tensión en bornes de un varistor en función de la corriente que circula entre sus terminales.

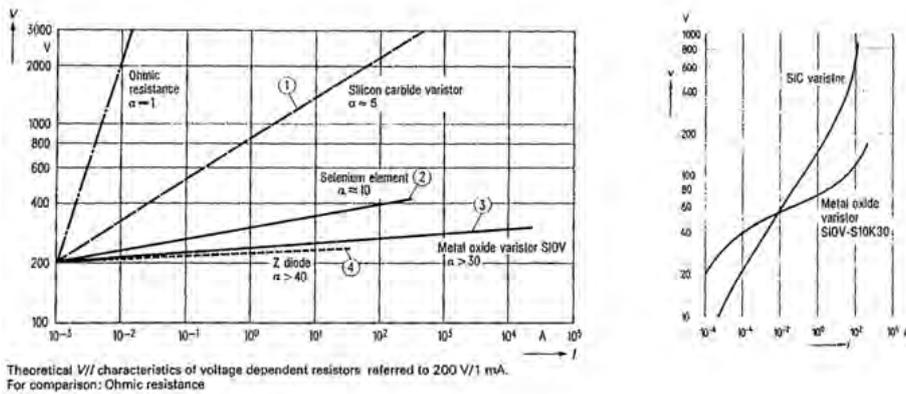
Por construcción, los MOVs presentan una capacidad en paralelo, que puede generar problemas cuando se quiere proteger circuitos o dispositivos de alta frecuencia.

La tensión del varistor depende entonces de la cantidad de juntas en serie que se encuentren entre los bornes del dispositivo. En los MOV para alta tensión se utilizan granos más chicos para que no se requiera un espesor muy importante para alcanzar los niveles de tensión requeridos. Por otra parte



Proc.: Polyphaser

Figura 11.9: Metal oxide varistor (MOV): Esquemático de la micro estructura.



Proc.: Polyphaser

Figura 11.10: Características de Clamps.

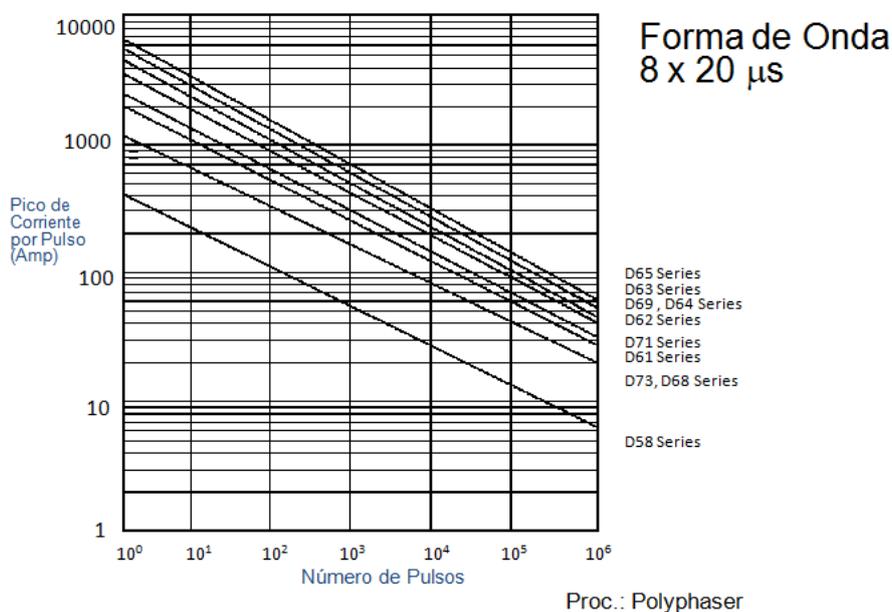


Figura 11.11: Rating de un Varistor.

la máxima potencia que puede disipar un MOV sin dañarse depende de su diámetro.

Para dimensionar un varistor hay que tener presente que cada juntura se comporta como una resistencia no lineal. Cuando la diferencia de tensión entre granos es:

- $< \pm 3V$: entonces la resistencia aumenta.
- $> \pm 3V$: entonces la resistencia comienza a bajar con el aumento de la diferencia de tensión.

La característica tensión corriente de un varistor responde a una expresión del tipo $I = kU^\alpha$ siendo $\alpha \approx 20 - 30$. En la figura 11.10 se muestra dicha característica en escala logarítmica.

La curva que se presenta en las hojas de datos de un varistor es como la presentada en la figura 11.13. Esta curva está en escala logarítmica, lo que permite visualizar la subida de la tensión con la corriente.

Debido a que los MOVs tienen cierta dispersión en sus características, los fabricantes deberían dar en principio las curvas extremas. En el caso del varistor puede observarse que presentan una sola curva y que la misma tienen un pliegue en 1 mA. Esto se debe a que el valor de referencia de 1mA indica el límite entre la no conducción y la conducción del varistor; por lo que a su

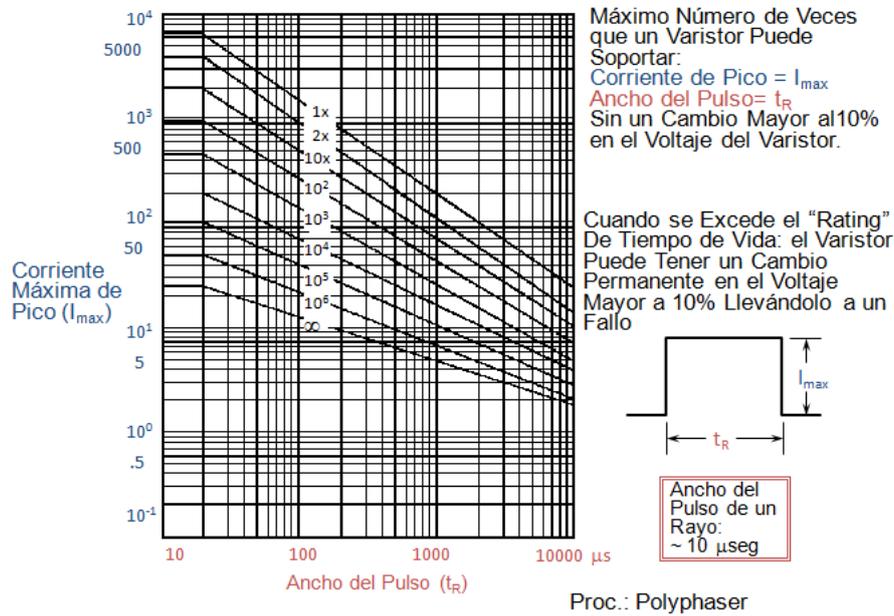


Figura 11.12: Rating de tiempo de vida de un Varistor.

izquierda (en la zona de no conducción) interesa conocer la mínima tensión a la que el dispositivo va a actuar y a su derecha interesa conocer la tensión máxima (U_{max}) que queda establecida entre bornes del varistor (tensión de protección), por lo que se toma una de las curvas extremas para cada zona.

La tensión nominal (U_{nom}) de un varistor es la tensión máxima de alterna que puede aplicarse entre sus bornes sin que aparezca una corriente que lo ponga en riesgo.

Los MOVs más utilizados en instalaciones eléctricas para instalación en los sistemas de alimentación son los de tensiones nominales de 250 a 275 V. De las curvas presentadas en la figura 11.13, se puede observar que cuando a un varistor de 250V se le aplica una tensión de 1000 V en bornes, circula por él una corriente de 10 kA.

La figura 11.11 muestra la cantidad de pulsos de corriente de tipo 8/20 μs que soporta un varistor sin dañarse, según el valor de pico de la corriente. El varistor se degrada porque para pulsos de alto valor de pico se sueldan los granos y como consecuencia disminuye la tensión que soporta entre sus bornes sin conducir.

Frente a otras sobretensiones de mayor duración (por ejemplo sobretensiones de maniobra o temporarias) que provoquen la actuación del varistor en varios ciclos consecutivos, puede producirse la avalancha térmica y el varistor se extropea.

Cuando estos dispositivos integran un descargador de sobretensión, están provistos de un dispositivo que desconecta el varistor por encima de cierta temperatura y un relé de señalización indica que el descargador se encuentra fuera de servicio.

El varistor es más robusto que el zener, pero éste tiene una limitación de tensión más precisa. Cuando dispara la tensión se mantiene prácticamente constante con la corriente.

En la figura 11.12 se indican las características que dan los fabricantes para cada varistor.

11.2.3. MOVs y tubos de gas combinados

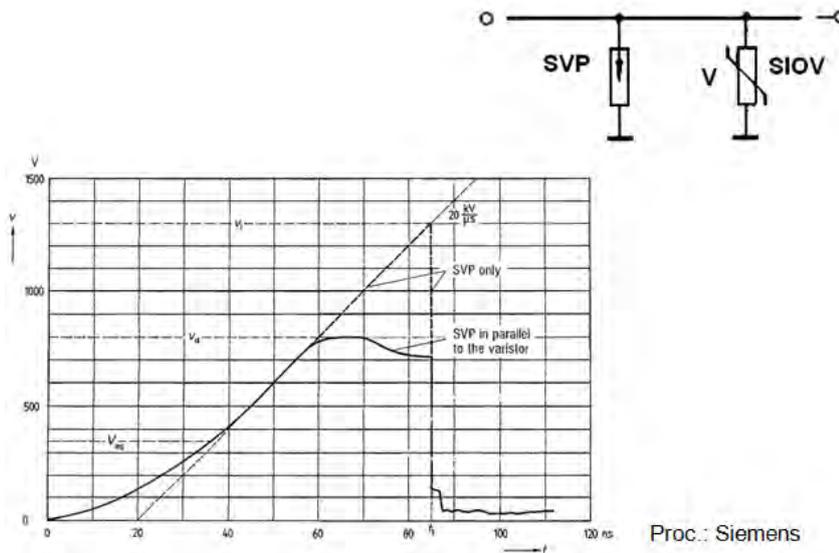


Figura 11.15: Combinación de tubo de gas y varistor.

En muchas ocasiones para poder minimizar los niveles de tensión de protección (U_P), se pueden efectuar protecciones combinando descargadores tipo MOV y tubos de gas y pueden conectarse de la siguiente manera:

- Conexión en paralelo.
- Conexión en paralelo con impedancia intermedia.
- Conexión en serie.

En la figura 11.15 se puede observar un primer circuito. El tubo de gas, frente un impulso de $20kV/\mu s$, dejaría pasar un pico de tensión de 1300 V. Instalando un tubo de gas en paralelo con un MOV, el MOV permitiría limitar el pico de tensión a 900 V para el mismo impulso de tensión.

Si el transitorio es corto, el tubo de gas puede no disparar ya que la tensión que queda establecida es la del MOV. Si el transitorio es largo puede que el tubo de gas actúe y arrase la señal y además se establece un corto circuito, impidiendo que el MOV se rompa por calentamiento. Estamos pues combinando un protector que dispara antes (el MOV), impidiendo que se rompa el equipo, y otro más lento pero más robusto, que protege a su vez el MOV.

Cuando se instala un MOV en serie con un tubo de gas, mientras no circula corriente por ambos descargadores la tensión entre los bornes del MOV es prácticamente nula y toda la tensión queda establecida entre los bornes del tubo de gas. El tubo de gas disparará cuando la tensión entre sus bornes coincida con su tensión de disparo. Una vez producido el disparo del tubo de gas circulará una corriente por ambos descargadores, provocando que se polarice el MOV, momento en el que comenzará a actuar el MOV estableciendo su tensión de protección. A partir de ese momento la tensión en bornes del descargador (MOV + GAS) es la tensión en bornes del MOV. Se impide el arrasamiento.

La protección en serie no tiene mayores ventajas desde el punto de vista de la tensión de protección, ya que el equipamiento verá la sobretensión hasta que el tubo de gas dispare, por lo que puede decirse que la tensión de protección es la tensión de protección impuesta por el tubo de gas. La ventaja es que el tubo de gas limita la corriente por el MOV; puede decirse que el MOV no funciona todo el tiempo, por lo que tendrá menor deterioro. Por otro lado cuando el TG dispara, el MOV limita la corriente que circulará y no quedará establecido un cortocircuito. Cerca de equipos finales, como la señal es más lenta esta configuración será mas útil, ya que el pico de tensión por la demora en el disparo del tubo de gas será menor.

11.2.4. Dispositivos semiconductores

Se enumeran a continuación las principales características de los diodos zener, tiristores y SADs.

1. Diodos Zeners: (comparados con los MOVs)

- Menor U_P .
- Respuesta en tensión mas plana (mayor α).

- Se construyen con mayor potencia de pico que un zener común, por ejemplo 1500 W.
- Menos robustos que los MOV frente a sobrecargas, ya que de excederse la temperatura de juntura el semiconductor se estropea. Nunca se debe superar la potencia máxima.
- Si no se sobrepasa la potencia máxima no tienen la degradación que tienen los MOVs.
- Son utilizados en circuitos de señal junto con SADs en serie y en paralelo.

2. Tiristores:

- Poseen una tensión en conducción de 1 a 2 V.
- Poseen pérdidas muy bajas en conducción.
- El tiempo de encendido es del orden de los ns.
- Manejan poca corriente.

3. Diodos de Avalancha (SAD)

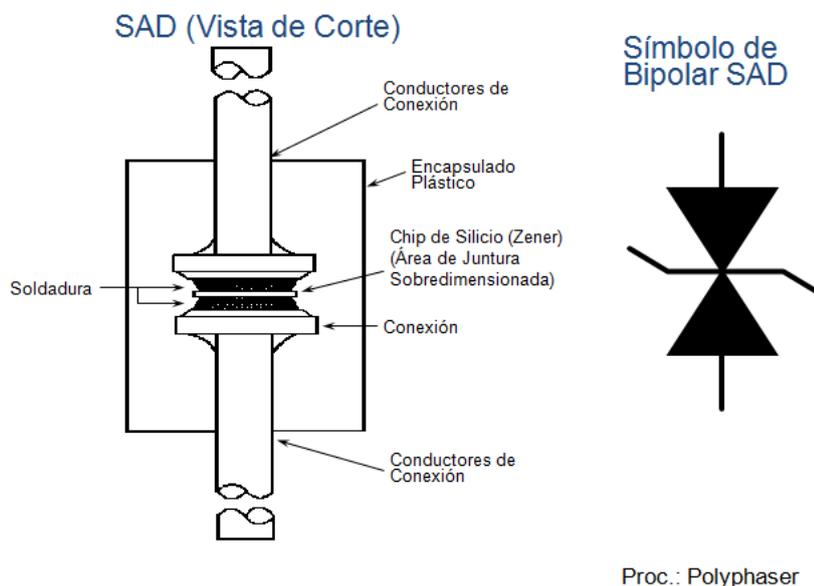


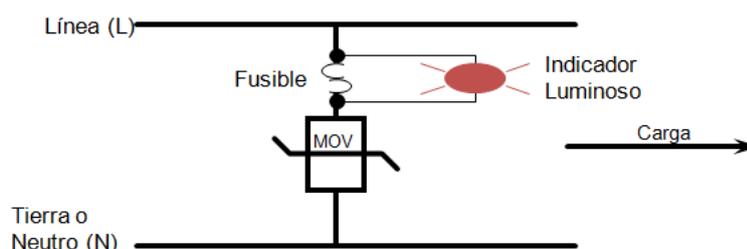
Figura 11.16: Diodo de Avalancha (Silicon Avalanche Diode (SAD)).

11.3. Circuitos de protección para sistemas de alimentación (CA y CC)

En los sistemas de alimentación se utilizan diferentes disposiciones de componentes, según si el sistema es de CA o CC y según el esquema de conexión a tierra. Entre otras se pueden utilizar MOVs entre fases y entre fase y tierra o MOVs y tubos de gas combinados. En los circuitos con fem (L-L o L-N) deben utilizarse dispositivos tipo clamp, para evitar que frente a la actuación del protector quede establecido el cortocircuito en la línea. En los circuitos sin fem (N-T) podría utilizarse clamp o crowbar.

El análisis de la conexión de descargadores según el sistema de conexión a tierra se realiza al final del presente capítulo.

En la figura 11.17, se muestra la conexión simple de un varistor con fusible de protección.



- **Ventaja:**
 - Alta Capacidad de Disipación de Energía

- **Desventaja:**
 - Voltaje de “Clamp” Sube con la Corriente- Típicamente 10-12%

Proc.: Polyphaser

Figura 11.17: Aplicación de varistores: Protector simple.

En las figuras 11.18 y 11.19 se muestra una protección tipo serie - clamp. La figura presentada corresponde a una implementación típica para 200 A, en la que se identifican los siguientes elementos:

- Varistores clase I, conectados entre fase y tierra.
- Inductancias de 0,1 y 0,01 Hy, en serie con cada fase.
- Varistores clase II, conectados entre fase y tierra.

11.3 Circuitos de protección para sistemas de alimentación (CA y CC) 302

- Detectores de varistores dañados.
- Relés de alarma.



Protector
Alimentación
C.A. 380V
200A, 3F

Proc.: Polyphaser

Figura 11.18: Protector alimentación CA.

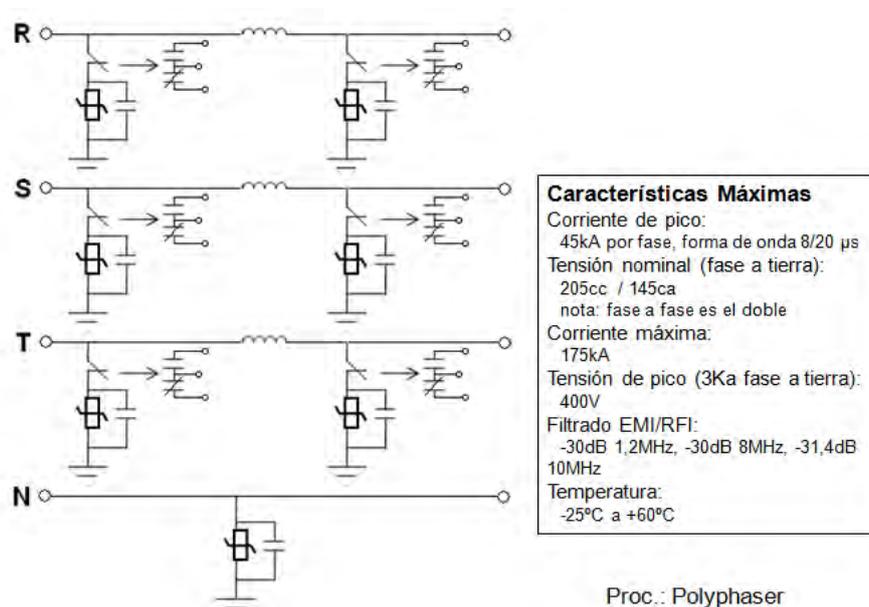


Figura 11.19: Circuito protector alimentación CA.

11.4. Circuitos de protección para Telefonía y Datos

11.4.1. Características de la protección de sistemas telefónicos

La protección más común en telefonía es el tubo de gas; el que sustituyó los botones de carbón, que eran bastante ruidosos y requerían mantenimiento. En realidad su finalidad era proteger al personal en caso de contacto con líneas de potencia.

Si cada línea lleva un tubo a tierra, inevitablemente frente a una perturbación que llegue p. ej. a dos líneas, uno de los tubos disparará antes que el otro, creándose una tensión diferencial grande, que rompería los equipos. Se usan entonces tubos de tres elementos u otros dispositivos.

Es conveniente que los pares telefónicos tengan protección adicional en el mismo tablero de entrada y que vayan, si es posible, blindados.

Las líneas telefónicas presentan mayor impedancia que las de potencia, por lo que en general crean menos riesgo.

11.4.2. Centrales telefónicas

Las centralitas telefónicas presentan los problemas esperables en un equipo que tiene: alimentación eléctrica, conexión a equipos lejanos (la central o concentrador de telefonía pública) y eventualmente conexiones largas a equipos locales. Pueden venir sobretensiones de los equipos lejanos (públicos o del propio usuario) o de las conexiones cuando están expuestas. Además del servicio telefónico de voz, pueden transferir datos como es el caso de conexiones ADSL. Cuando se usa fibra óptica porque el volumen de datos lo justifica, se tiene una natural aislación galvánica, por lo que el riesgo de recibir sobretensiones a través de estas conexiones es nulo.

Para la protección de la central se usan en general tubos de gas, pero presentan el inconveniente de ser “dispositivos crowbar”. Un arrasamiento de la tensión hace que se pierdan ráfagas de datos que pueden ser largas. En la actualidad se recomiendan MOVs.

Deben tenerse presentes las siguientes características de las centrales telefónicas y de los equipos terminales asociados, las que influyen en su vulnerabilidad frente a perturbaciones:

- **Centrales Telefónicas:** Las centrales telefónicas presentan múltiples entradas y tienen en general asociada una UPS. Es común que la central esté asociada a antenas. La telefonía en general vincula puntos distantes que no se pueden poner a una misma tierra. En la central hay una aislación dada por la etapa de DC que los teléfonos comunes no la tienen a causa de la alimentación a través de la misma línea.
- **Equipo terminal:** El equipo terminal está alimentado localmente, por lo que podrá presentar problemas vinculados con la referencia de tierra local.

En relación a la puesta a tierra de las centrales telefónicas, se recomienda que los gabinetes se conecten a la misma tierra que la instalación (eventualmente con patas aislantes). Pueden utilizarse pisos elevados anti estáticos y puestos a tierra. Esto no sólo mejora los problemas de estática sino que forma un plano de tierra.

Un problema común es la interferencia entre líneas que llevan corrientes grandes (como pueden ser las de descargas) y líneas “limpias”. Para prevenir esta interferencia, las líneas de señal se deben llevar por conductos metálicos puestos a tierra.

En las siguientes figuras se muestran señales típicas de telefonía y un esquema típico de servicio entrante de telefonía.

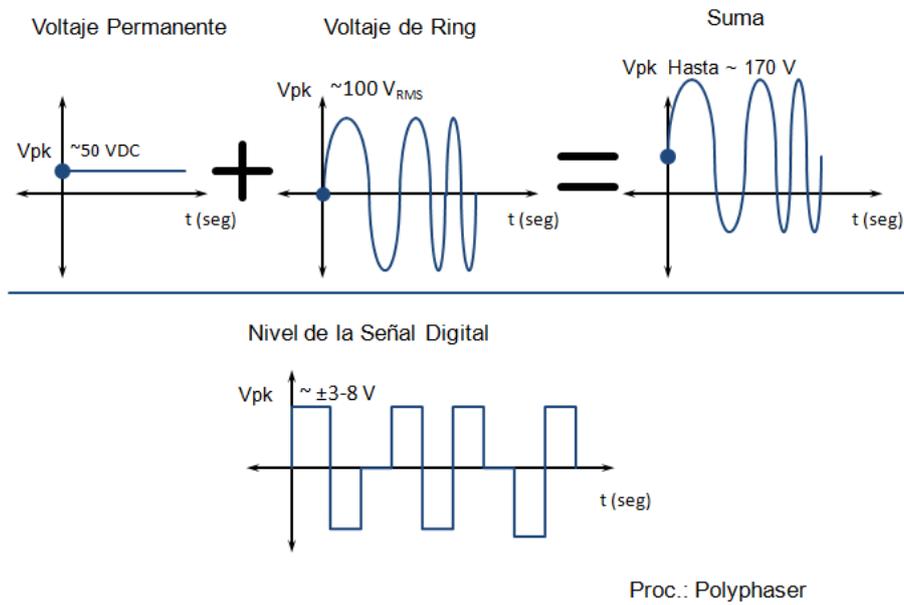


Figura 11.20: Señales típicas de telefonía.

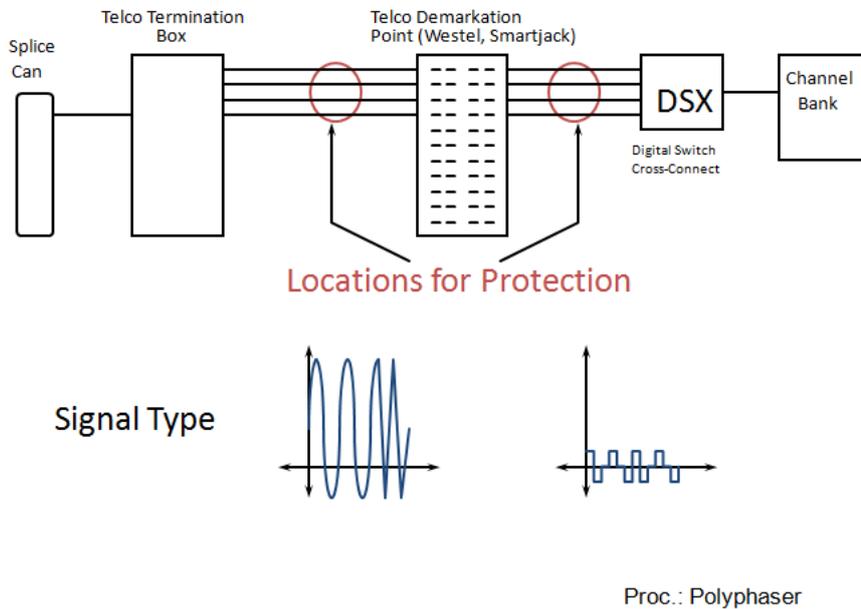
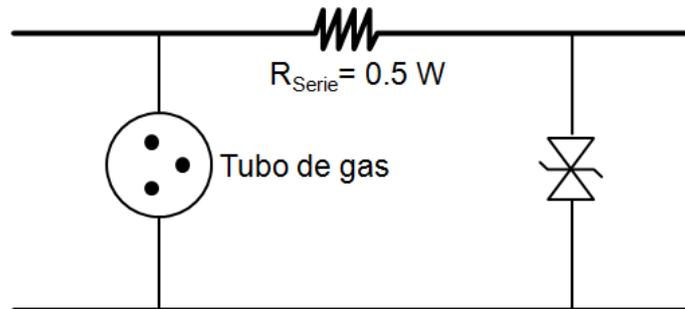


Figura 11.21: Typical Telco T1 service entrance.

A continuación (figuras 11.22, 11.23 y 11.24) se muestran diferentes esquemas de protección para telefonía, el primero es un esquema simple con

combinación de SAD y tubo de gas, el segundo es una protección mediante “matched” MOVs, y por último se muestra un protector combinado que incluye la protección para la línea telefónica y la línea de alimentación que llegan al equipo.

En la figura 11.22 el SAD es la protección rápida que limita la tensión a un valor fijo. Si la sobretensión es larga o demasiado grande el SAD no la soportaría pero el tubo de gas protege tanto al equipo como al SAD.



La tensión del SAD depende del nivel de señal útil

Proc.: Polyphaser

Figura 11.22: Protector para telefonía y datos.

11.4.3. Protección mediante “matched” MOVs (Protección actual)

La figura 11.23 muestra un esquema de protección en modo diferencial y en modo común. Nuevamente, frente a una perturbación de alta energía actuaría el tubo de gas.

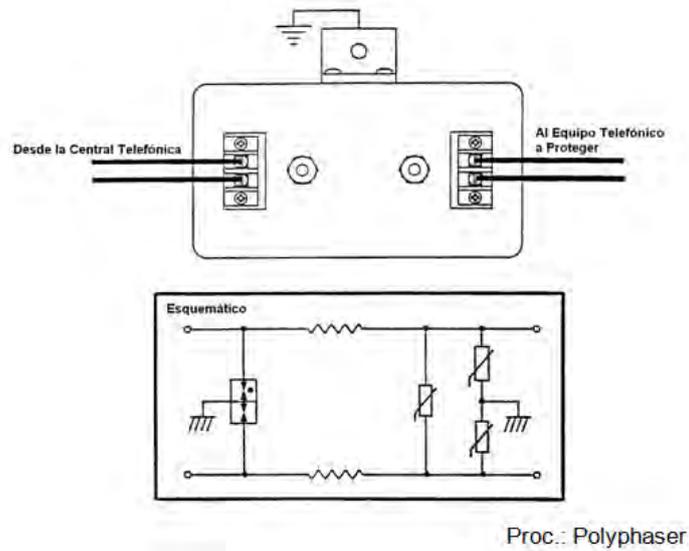


Figura 11.23: Protección del cable telefónico.

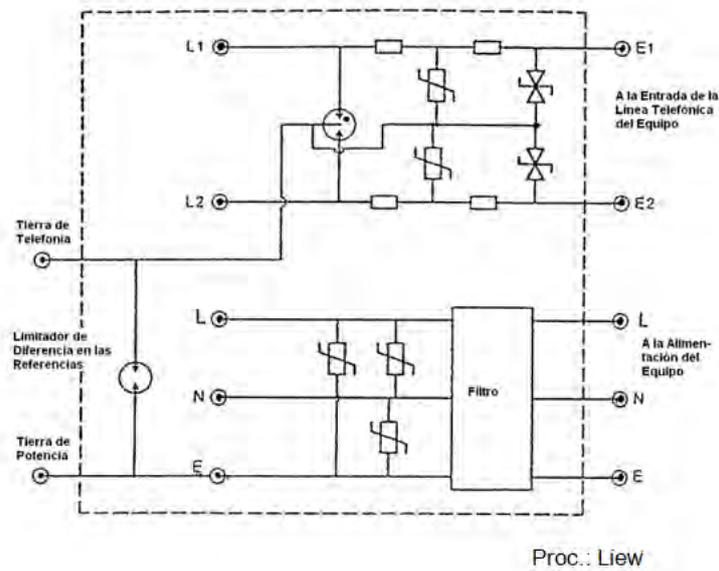


Figura 11.24: Protector combinado.

11.4.4. Protección de tres etapas, para señal

En la figura siguiente se muestra el esquema general de un descargador de tres etapas:

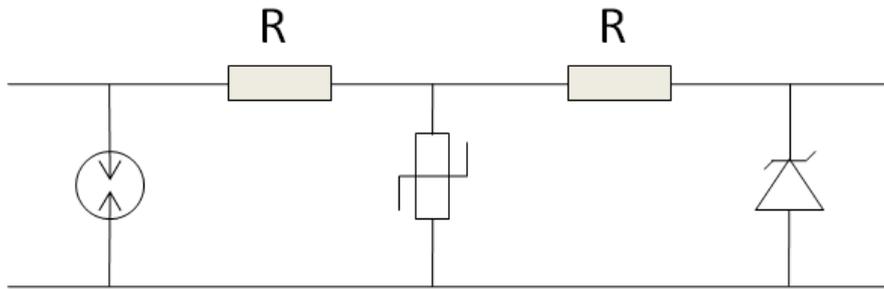


Figura 11.25: Protección tres etapas.

Para comprender su funcionamiento y cómo deben seleccionarse los componentes, suponemos que a la salida del descargador de señal se quiere no sobrepasar los 15 V, entonces contra el equipo se debe instalar un zener.

Si tuviésemos solo el zener y en la entrada del descargador aparece una perturbación del tipo onda combinada, al llegar a la tensión del zener, éste entrará en conducción y descargará la corriente, pero se romperá. Para evitar esto se deberá instalar una resistencia (R) o una inductancia (L) y delante de la resistencia se deberá instalar un MOV. La resistencia deberá ser calculada tal que cuando el zener llegue al 10% de la potencia máxima, se tenga una diferencia de tensión (ΔV) en el MOV, tal que la corriente por el MOV llegue a un valor \gg que la corriente del zener (i_{zener}).

$$i_{maxzener} = \frac{P_{max}}{V} = \frac{0,1 \times 1500}{15} = 10A$$

$$R(10A) > U_{MOV}$$

Además se debe tener en cuenta que las corrientes de fuga del MOV son del orden de los μA , entonces se deberá utilizar un MOV grande para que con 15 V no tenga fuga, por ejemplo un MOV de 35 V.

Si es una instalación muy expuesta y hay riesgo de que el MOV se dañe, se debe poner otra etapa, también coordinada con la anterior (intercalando una R o una L) pero con un tubo de gas; para que cuando el tubo de gas dispare, ya no circule corriente por los otros elementos y toda la perturbación será descargada por el tubo de gas. A partir de ese momento la señal se cortocircuita.

En una protección con este esquema, el tubo de gas protegerá al resto de los elementos y el elemento más débil será el que comience a conducir y a hacer circular una corriente que hará actuar los dispositivos más robustos instalados aguas arriba.

Luego, la variante puede ser que la tierra de los descargadores esté conectada a la tierra real, directamente o a través de descargadores, según lo permita el sistema.

En resumen:

Primera etapa: La corriente $8/20\mu s$ circula por el zener, el que disipa mucha potencia elevando su tensión a más de 12 V.

Segunda etapa: $RI + U_z > 30V$, conduce el MOV fijándose la corriente por el zener para limitar U_z .

Tercera etapa: Finalmente con $I_R + 30V > U_G$, conduce el tubo de gas. En esta etapa se pierde la señal.

Para su aplicación en potencia se debe cambiar la resistencia por una inductancia. La caída de tensión depende entonces de la pendiente de la corriente, siendo la protección más rápida cuanto mayor sea dicha pendiente. Si I_{pico} no es suficientemente grande es posible que alguna etapa no conduzca.

11.4.5. Protección de LANs

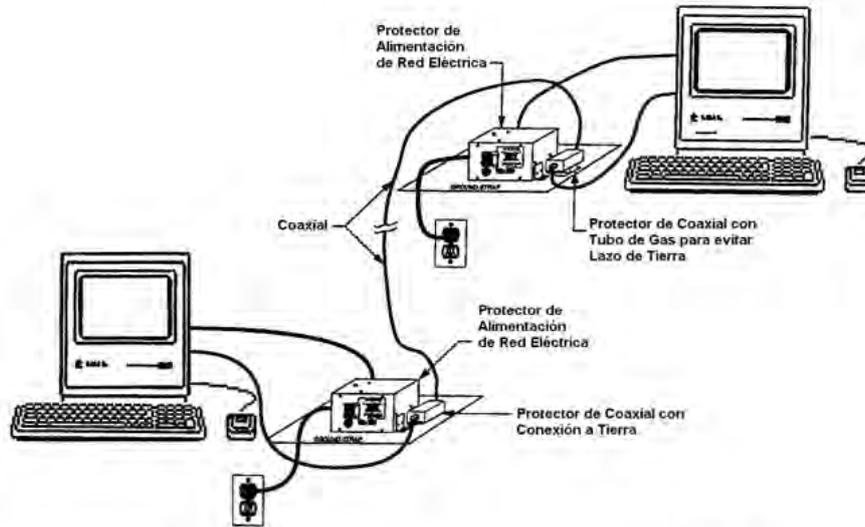
Deben tenerse presente las siguientes características de las LAN, ya que influyen en su vulnerabilidad frente a perturbaciones:

En general los cableados de red LAN tienen recorridos largos.

Los cables coaxiales tienen más problemas de loops de tierra que los cables UTP ya que el coaxial se pone a veces a tierra en dos o más puntos diferentes, y esto puede generar circulación de corriente de tierra por la malla de los mismos. Esto puede evitarse haciendo la conexión a tierra de la malla en un solo extremo.

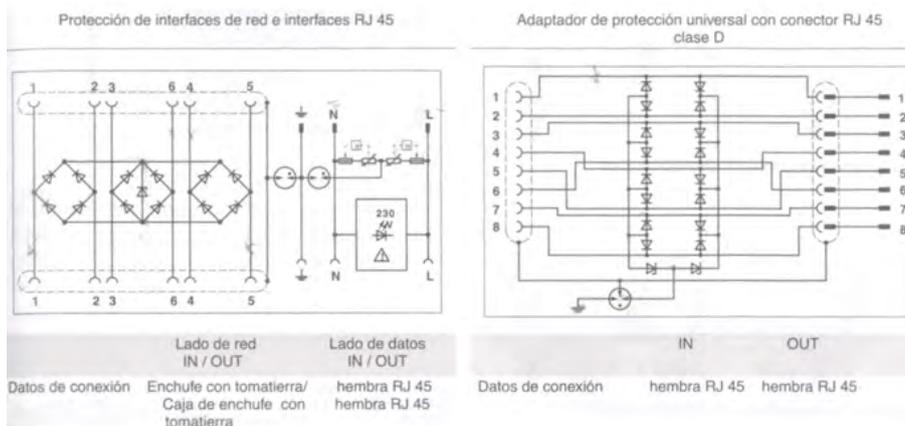
Esto tampoco es evidente cuando el equipo distante tiene otra tierra eléctrica, a la que debería conectarse la malla para evitar tensión entre la misma y la carcasa. Una solución posible es hacer la conexión local de tierra mediante un tubo de gas u otro protector. Normalmente está abierto y no hay loop de tierra, que causa ruido. En caso de evento se evitan sobretensiones peligrosas.

En las figuras siguientes se muestra un esquema de conexionado de equipos con la ubicación de los protectores, el esquema de un protector de UTP combinado (protección de señal y potencia) y por último la hoja de datos correspondiente al protector presentado.



Proc.: Polyphaser

Figura 11.26: Protección de coaxial en LANs.



Proc.: Phoenix Contact

Figura 11.27: Protector de UTP.

Protección de red	Protección de datos	
III / D	C2, C3	C2, C3
250 V AC	6,2 V DC	11 V DC
16 A/30 °C	1,5 A/25 °C	1,5 A/25 °C
2,5 kA/2,5 kA	350 A/2,5 kA	350 A/2,5 kA
6 kV	–	–
≤ 1,3 kV/≤ 1,5 kV	–	–
–	2,5 kA	2,5 kA
–/≤ 1,1 kV	≤ 14 V/≤ 1,5 kV	≤ 30 V/≤ 500 V
≤ 1,1 kV/650 V	≤ 42 V/≤ 50 V	≤ 37 V/≤ 70 V
≤ 25 ns/≤ 100 ns	≤ 500 ns/≤ 100 ns	≤ 500 ns/≤ 100 ns
–	≤ 0,8 dB/≤ 1 dB hasta 100 MHz	1 dB hasta 100 MHz
–	≥ 100 MHz	> 100 MHz
-40 °C ... +80 °C	-40 °C ... +80 °C	-40 °C hasta +80 °C
IP 20	IP 20	IP 20
IEC 61643-1:1998-02		
E DIN VDE 0675-p.6:1998-11/A1:1996-03/A2:1996-10		
IEC 61643-21:2000-09		IEC 61643-21:2000-09

Proc.: Phoenix Contact

Figura 11.28: Protector de UTP.

11.4.6. CATV (Community Antenna TeleVision)

El equipo de CATV presenta casi todos los problemas a la vez. Por naturaleza hay equipos lejanos entre sí y trabaja a altas frecuencias.

Usa coaxiales, en los que las perturbaciones viajan a distinta velocidad por centro y malla.

Frecuentemente equipos remotos son alimentados a través del propio coaxial.

Es necesario usar “tierras condicionales” para evitar loops de tierra y dar seguridad a personas y equipos y protectores de RF (que se presentan en lo que sigue) que separan la corriente de alimentación (DC) para implementar protecciones distintas para DC y RF.

11.4.7. Cámaras de seguridad

Es un problema de interés por la multiplicidad de dificultades. Se combina exposición a impacto directo con conexiones remotas para alimentación de potencia y señal con distintas referencias de tierra. Es natural que las cámaras remotas estén lejos y a veces a la intemperie.

Pueden ser objeto de impacto o también pueden ser alcanzadas desde el edificio donde está el switcher, a través del coaxial o de los cables de control. Se enumeran algunas consideraciones referidas a la protección de las cámaras de seguridad:

1. Si está alimentada localmente se produce diferencia de potencial entre el coaxial y caja, pudiendo perjudicar a la salida de video.
2. Si se está alimentando de forma remota y puesta a tierra en forma local también aparecen diferencias grandes.
3. Si se pone a tierra locamente, los cables actúan como antena, y se crean potenciales grandes en el switcher y en la cámara.
4. Lo mas seguro parece poner a tierra tanto remota como localmente, e idealmente unir ambas tierras. Pero eso crea un extenso loop que capta interferencia, sobre todo de la frecuencia de red y entonces se produce un zumbido conocido como "hum". Por lo tanto, en caso de unir tierra o de conectar a tierra en ambos lados, se usan protectores, como p. ej. tubos de gas que se disparan solo si la tensión alcanza cierto nivel y se evita el "hum" en funcionamiento normal.
5. También se debe proteger localmente la alimentación de potencia, en el switcher y en la cámara. En el switcher debe haber protecciones primarias y secundarias.
6. Se debe prever posible descarga lateral entre la bajada a tierra de la cámara y las líneas de señal. Es mejor la bajada con strap, para minimizar la impedancia.

En la figura 11.29 se presenta una protección completa de un sistema de CCTV.

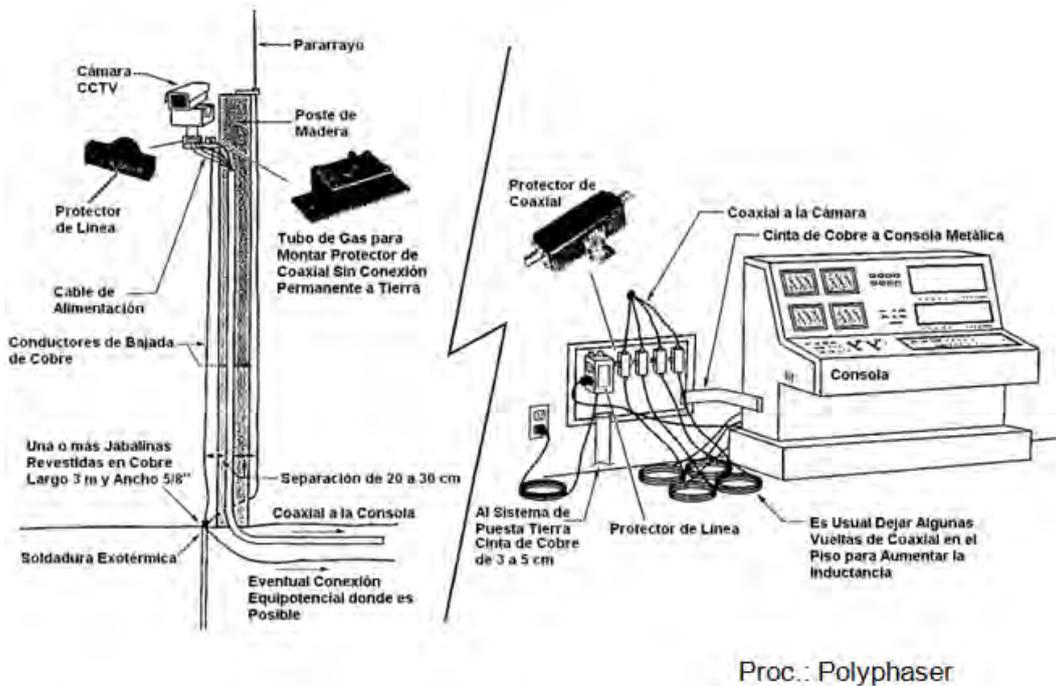


Figura 11.29: Protección de CCTV.

11.5. Equipos de radio frecuencia (RF)

Las antenas tienen, por naturaleza, una exposición directa de su electrónica a los rayos ya que normalmente los transmisores se encuentran en los sitios más altos y en ellos puede haber preamplificadores o repetidores. El motivo para instalar elementos activos en la torre es amplificar la señal recibida antes de que ingrese más ruido al circuito. Esto puede mejorar drásticamente la relación señal/ruido del sistema completo. A veces el preamplificador puede ser también convertidor de frecuencia.

Estos equipos asociados a las antenas poseen alimentación de continua y dicha alimentación suele ir por el mismo coaxial, entre centro y malla. Cuando cae un rayo en la antena, una parte importante de su energía va por el coaxial, que ofrece baja impedancia y el preamplificador puede recibir sobretensiones importantes. Si la antena está bien aterrada y el preamplificador tiene protección a la entrada, su riesgo no es tan grande. El coaxial conduce y se crea diferencia de potencial entre malla y centro debido a que la onda se propaga a distinta velocidad por el centro y por la malla. Por lo tanto no solo la malla debe estar aterrada en lo alto de la torre, a su pie y en la entrada de la caseta (ver figura 11.30), sino que además debe haber protección al

modo diferencial entre centro y malla. La conexiones a tierra de la malla se hacen mediante grounding kits entre ésta y la torre o entre dicha malla y las puestas a tierra, como se muestra en la figura. La protección del conductor central se realiza mediante protectores shunt a las frecuencias de descarga entre malla y conductor central, instalados en ambos extremos.

La onda de sobrecorriente entra a la alimentación de DC y a los equipos de RF. Si la fuente de DC (que está en la caseta) tiene una protección tipo "crowbar", la tensión se arrasa y se crea un escalón que se propaga ahora hacia el preamplificador, que a esa frecuencia no tiene impedancia adaptada. Las ondas viajeras pueden llegar a tensiones grandes.

La única forma es entonces separar la alimentación DC y RF, protegiendo cada una y recombinarlas. Hay dispositivos que hacen esto.

Por encima de los 18 GHz, el equipo suele llevar un convertor de frecuencia en la misma parabólica. La potencia le llega por uno o dos coaxiales, así como las señales de ida y de vuelta y la señal de control para el AFC (Automatic Frequency Control). Los problemas que se plantean para la protección de este equipo, son los mismos que para el preamplificador.

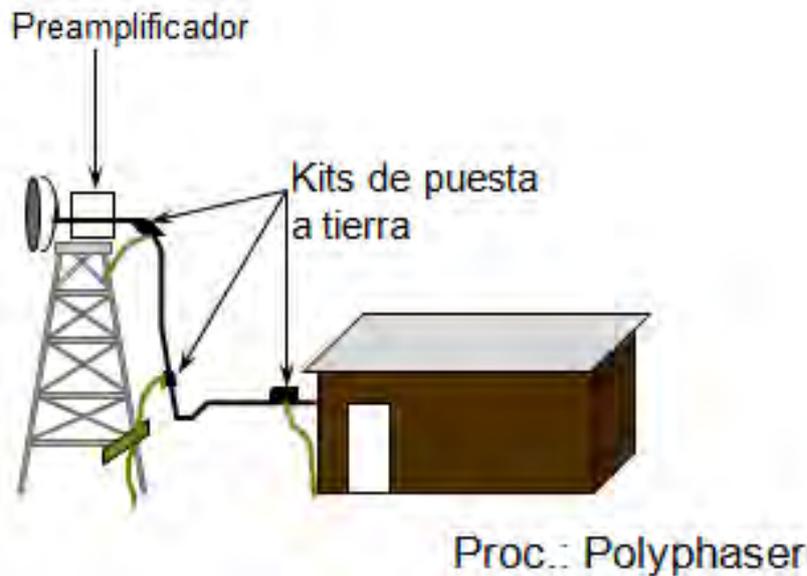


Figura 11.30: Protección de sistemas de Radio Frecuencia (RF).

11.5.1. Características generales de las protecciones para RF

Como se comentó en el punto anterior, sobretensiones en modo común se pueden transformar en sobretensiones diferenciales por la propagación en los coaxiales.

Como la frecuencia del rayo es muy inferior a la de trabajo, se puede proteger con pasabajos. Es conveniente que el protector tenga bloqueo de continua.

Se puede usar stubs de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda, sintonizados a la frecuencia de trabajo y para que sean vistos como un circuito cerrado a tierra para la frecuencia de la perturbación. La señal, en cambio, los ve como circuitos abiertos por ser de $\frac{1}{4}$ de onda. En la figura 11.31 se indica un esquema de un protector de RF.

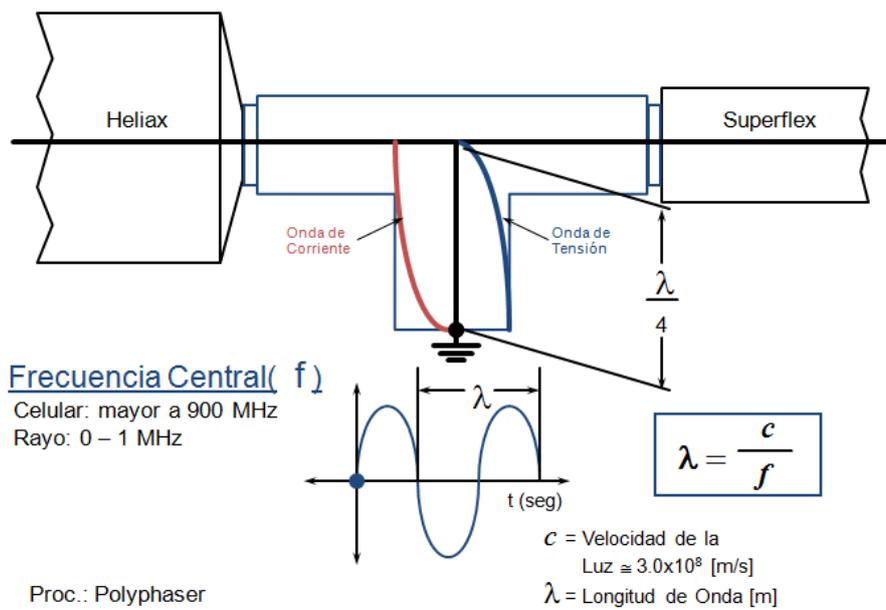


Figura 11.31: Protector para RF: cortocircuito en $\frac{1}{4}$ de onda.

Desventajas: Los stubs de $\frac{1}{4}$ de onda perturban las mediciones con barridores; se hace necesario sacarlos.

Existen protectores con tubos de gas y con continuidad de DC. Estos protectores tienen gran ancho de banda, en general innecesario, pero comparten la energía del rayo con el equipo antes que el tubo dispare. Si el equipo tiene un buen camino a tierra, es posible que el tubo no dispare.

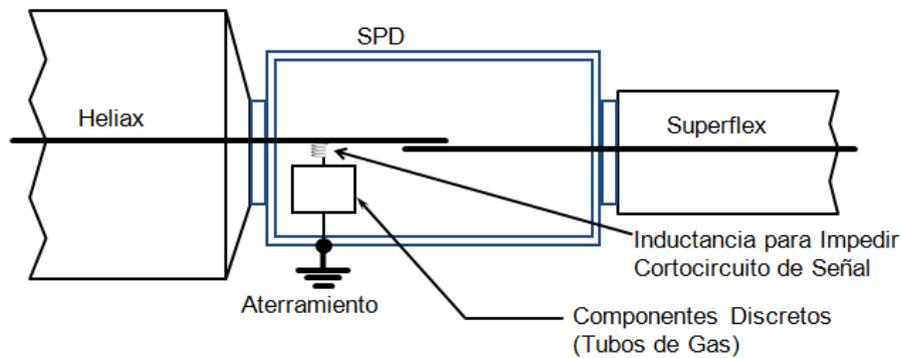
El mejor esquema para la protección es separar DC y RF, protegerlas

cada una y recombinarlas.

En algunos casos es necesario proteger los equipos en dos lugares: en lo alto de la torre y abajo.

En las figuras siguientes se muestra el esquema de un protector con el conductor central aislado y sintonizado para la señal y en las figuras 11.33 y 11.34 se establece una comparación de las respuestas en tiempo y en frecuencia, para los protectores con bloqueo de CC y $1/4$ de onda.

La diferencia de frecuencias entre la perturbación causada por la descarga y la señal permite que la señal pase por el gap sin atenuación (por acoplamiento capacitivo) en tanto que la sobretensión ve un circuito interrumpido o abierto.



Proc.: Polyphaser

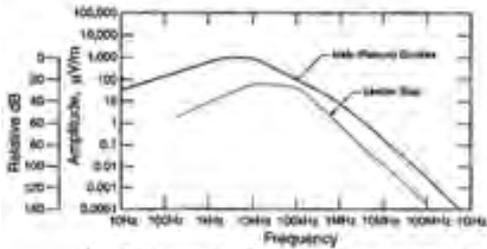
Figura 11.32: Antena con preamplificador, coaxial y receptor en la caseta.

Las limitaciones del protector de la figura 11.32 son:

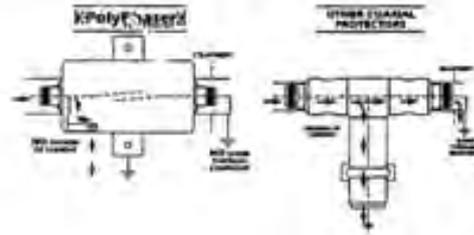
- Limitada vida útil de los componentes discretos
- Sin indicación cuando los componentes discretos fallan
- Limitada en potencia por pérdidas de inserción
- No permite alimentación en CC

The proper way to provide protection is to have a gas tube which will fire when the ringing voltage arrives from the antenna. The ringing is stopped by the crowbar action of the gas tube. To make sure that the gas tube fires, regardless of the electrical characteristics of the input to your equipment, a capacitor (or stripline coupling) is used. This is the basis of

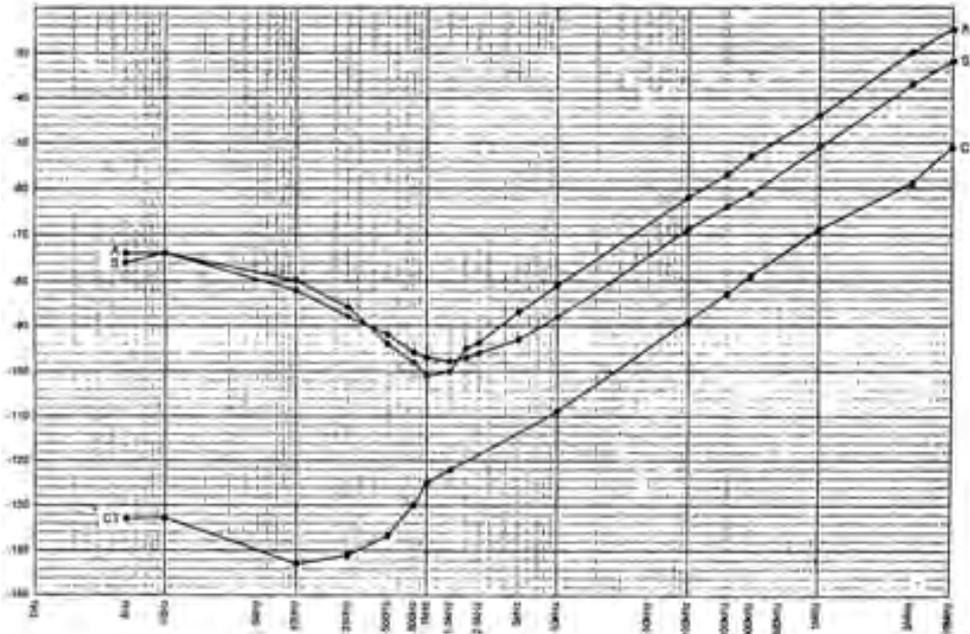
our later U.S. patent. Since the crowbar action of the gas tube is broadband and the energy present is so reduced, no ringing occurs. This is the only way to prevent the "or frequency" ringing from reaching the front end of your equipment. No amount of filtering can help when the desired frequency range is contaminated with the ringing voltage.



Amplitude spectra of the radiation component of lightning discharges.



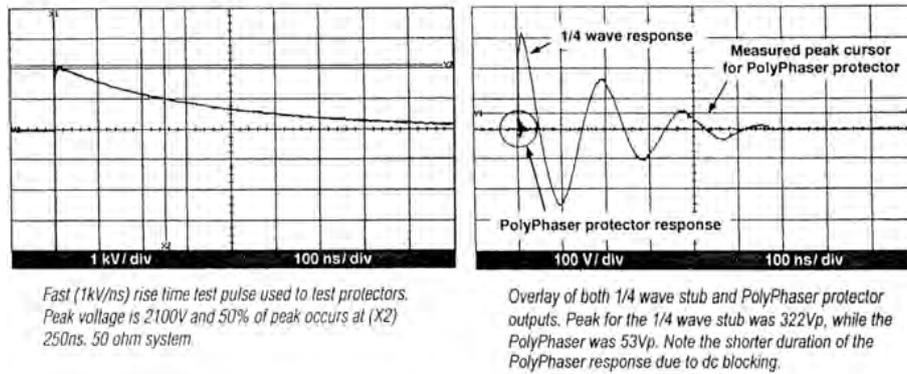
CT = POLYPHASER®
 A = 1/4 λ device
 B = 1/4 λ device



Comparison of Protector Low Frequency Attenuation

Proc.: Polyphaser

Figura 11.33: Comparación de protector con bloqueo de CC y protector 1/4 de onda.

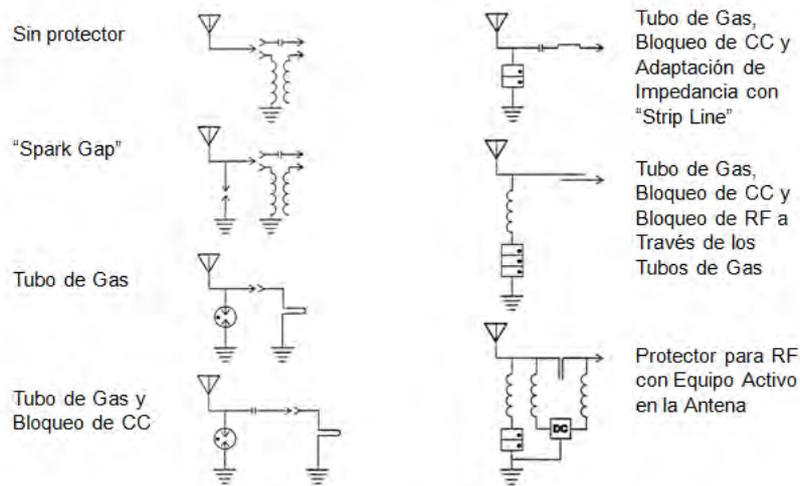


Proc.: Polyphaser

Figura 11.34: Comparación de protector con bloqueo de CC y protector 1/4 de onda.

11.5.2. Otras protecciones

En la figura 11.35 se pueden observar las evoluciones que se han introducido en la protección en RF.



Proc.: Polyphaser

Figura 11.35: Evolución de protectores para RF.

11.5.3. Protección de sistemas con alimentación de potencia a través del coaxial

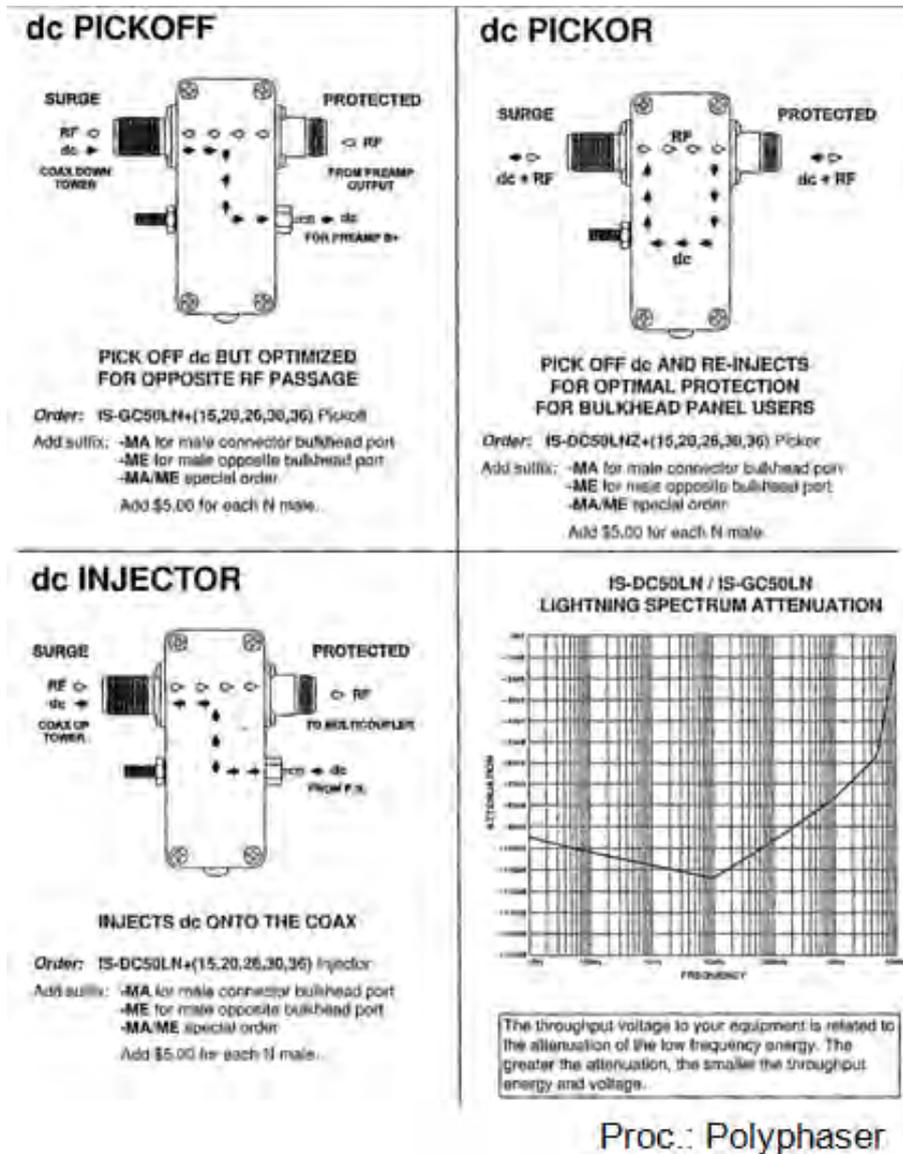


Figura 11.36: Protectores que combinan señal de RF con alimentación en CC a equipo activo en la antena.

11.6. Conexión de los descargadores de sobretensión

En la figura 11.37 se muestra un esquema de conexión unifilar de un descargador de sobretensión.

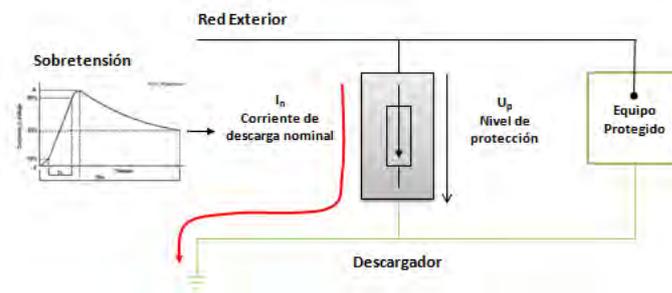


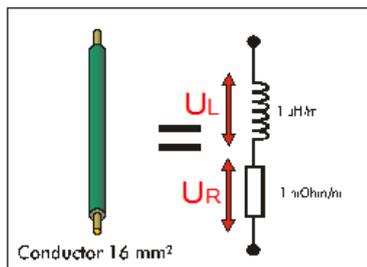
Figura 11.37: Conexión de descargadores de sobretensión.

Para que la instalación de un descargador de sobretensión cumpla la función de protección esperada, deben considerarse los siguientes pasos en el diseño de su conexión:

1. Determinar el camino de descarga a tierra, durante la actuación del descargador.
2. Identificar los conductores que pueden causar diferencias de potencial adicionales al nivel de protección (U_p), en los terminales del equipamiento.
3. Establecer la ruta de los conductores que llegan al equipo de forma tal que no se formen loops en los que se produzca tensiones inducidas.
4. Realizar la conexión equipotencial entre el equipo y el SPD, atendiendo para este conductor a lo indicado en el punto 2.
5. Evaluar la distancia entre el descargador y el equipo teniendo en cuenta el fenómeno de oscilación.
6. Realizar la selección del descargador de acuerdo a los requerimientos de coordinación.

Los dos primeros puntos son importantes a efectos de la protección de equipos y personas frente a sobretensiones. En efecto, como se vio en el capítulo 5 (Evaluación del riesgo - Formas de onda standard), se puede considerar que la onda combinada es un modelo representativo. Cuando el descargador actúa se lo puede considerar un circuito cerrado. Si pasa por él la onda de choque $8/20 \mu s$ la caída de tensión se debe más a la inductancia que a la resistencia. La inductancia depende del camino definido por la corriente.

En la figura 11.38 se muestra un ejemplo en el que circula una corriente de descarga $8/20 \mu s - 10 kA$, por un conductor de dos metros de largo y $16 mm^2$ de sección. Considerando que la resistencia del conductor es $1 m\Omega/m$ y la autoinductancia es de $1 \mu H/m$, la caída de tensión resistiva llega solo a 20 V y la caída de tensión inductiva llega a 2500 V, siendo mucho mayor que la primera y mayor que la tensión residual de un descargador de sobretensión para la protección primaria de una alimentación de AC. En general para corrientes de descarga del tipo onda de choque, puede despreciarse la caída de tensión resistiva.



Diferencia de potencial
con una corriente 8/20 -
10 kA en un conductor
de 2 m:

$$U_R \sim 20 \text{ V}$$

$$U_L \sim 2500 \text{ V}$$

Figura 11.38: Influencia del largo de la conexión.

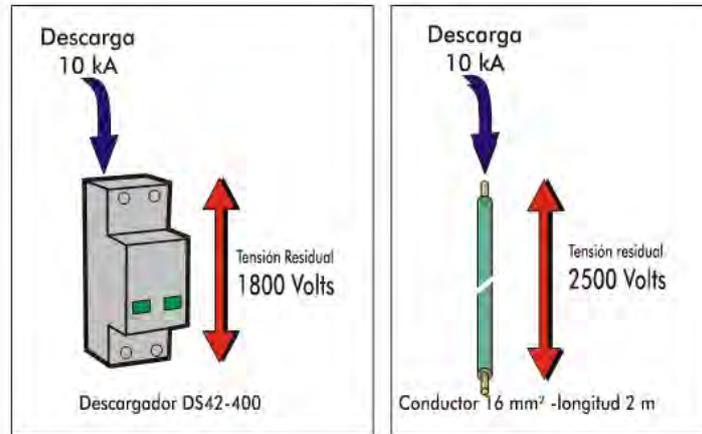


Figura 11.39: Influencia del largo de la conexión.

En la figura 11.40, se muestra un ejemplo de conexión de un descargador de sobretensión en que los conductores de conexión entre los bornes del descargador y fase/tierra causan diferencias de potencial que se suman al nivel de protección del descargador, quedando establecida sobre el equipo una diferencia de potencial de 6800 V en lugar de 1800 V, como se lograría con una correcta conexión del descargador.

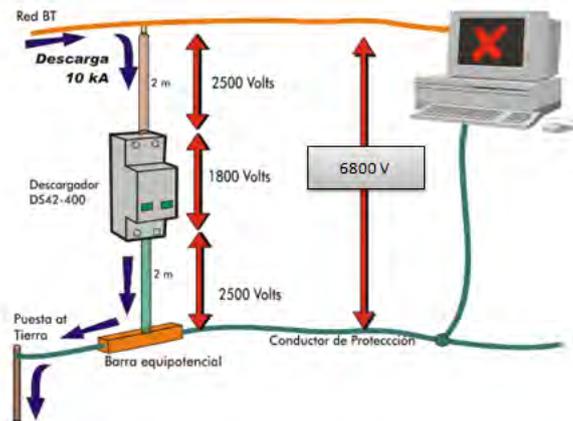


Figura 11.40: Influencia del largo de la conexión.

El punto 3 se refiere a las situaciones que están representadas en las figuras 11.41 y 11.42. En la primera se muestra una conexión en la que se suma al nivel de protección una diferencia de potencial U_r debido al acoplamiento electromagnético producido en el loop formado por los conductores de fase

y tierra. Una forma de reducir dicha tensión U_r es reduciendo el área del loop. En la segunda figura se muestra otro caso en el que puede generarse una diferencia de potencial adicional por acoplamiento entre las partes de la instalación no protegidas y las partes protegidas. Esta inductancia mutua puede reducirse separando los conductores protegidos de los no protegidos, limitando las áreas del loop y/o seleccionando correctamente el ángulo de cruce entre los conductores protegidos y los no protegidos.

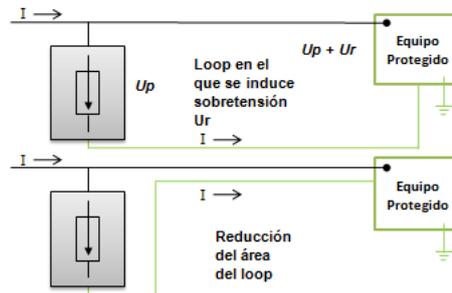


Figura 11.41: Ruta de los conductores.

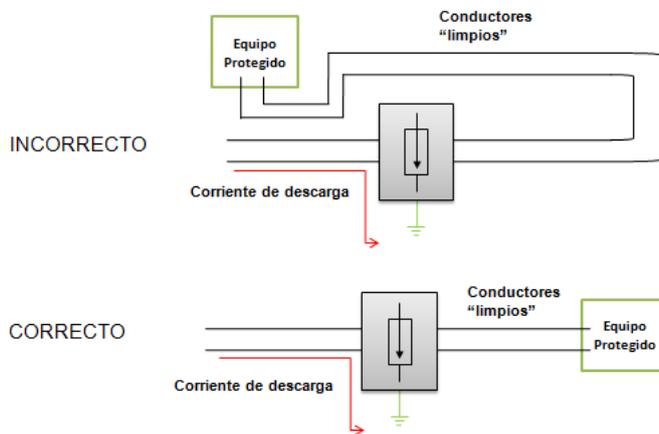


Figura 11.42: Ruta de los conductores.

El punto 4 indica que debe asegurarse que la masa del equipo a proteger este referida al borne de tierra del descargador y que dicha conexión sea equipotencial.

Si se instala un descargador pero no se realiza dicha conexión, sino que el equipo se conecta a otra referencia de tierra, nada asegura que la diferencia

de potencial entre por ejemplo los bornes de fase y tierra del equipo coincida con la tensión U_p del descargador conectado entre fase y tierra (nivel de protección del descargador).

Que la conexión sea equipotencial implica que el potencial entre las partes conectadas sea “esencialmente igual”.

La norma IEC 60364 define conexión equipotencial como la conexión eléctrica que pone masas y elementos conductores extraños a un potencial esencialmente igual.

Para que dicha condición se cumpla debe evitarse la circulación de corriente por el conductor de conexión equipotencial y en caso de que ello no sea posible, la geometría y dimensiones del mismo deben disminuir las diferencias de potencial causadas por la posible circulación de corriente.

En la figura 11.43 se muestran esquemáticamente las reglas de conexión presentadas y en la figura 11.44 una posible ubicación y conexión de un descargador de alimentación en un tablero de tipo industrial.

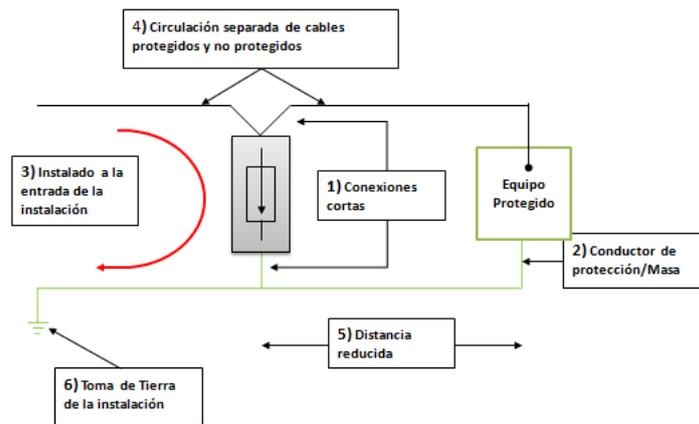


Figura 11.43: Conexión de descargadores de sobretensión.

Instalación Industrial

Ubicación y conexión del
descargador en el tablero

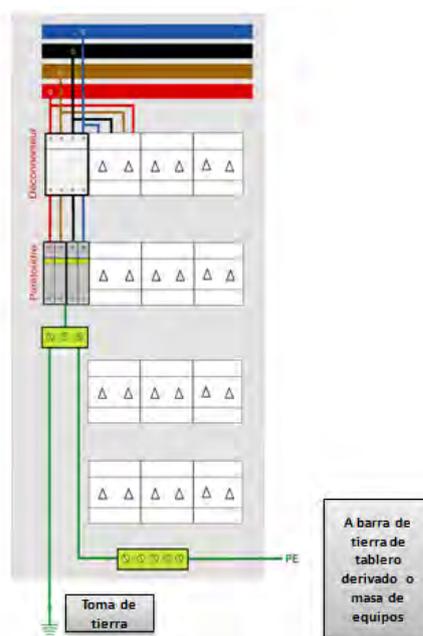


Figura 11.44: Ubicación y conexión del descargador en el tablero.

El punto 5 tiene en cuenta la influencia del fenómeno de oscilación en la distancia de protección.

En general por razones de compatibilidad electromagnética no es suficiente con instalar el descargador cerca del equipo a proteger, sino que es mejor instalar el dispositivo de protección en la entrada de la instalación ya que de esta forma se disminuye el nivel de las perturbaciones electromagnéticas en el interior y se protege dicha instalación (mitigación de descargas entre conductores, etc.). Si el equipo está fuera de la distancia de protección del descargador puede ser necesario instalar otro descargador cerca del equipo.

La distancia de protección está relacionada con la posibilidad de que se generen oscilaciones de tensión por la interacción del impulso de tensión que aparece en bornes del descargador, la inductancia de las líneas que lo conectan con el equipo a proteger y el propio equipo. Estos fenómenos dan como resultado una diferencia de potencial en bornes del equipo mayor que la esperada cerca del descargador y por tanto el equipo puede no quedar protegido.

Considerando que la línea tiene una resistencia R y una inductancia L y que la carga puede en general representarse por una Capacidad C , estamos frente a un circuito serie R, L, C con una fuente de tensión de alta pendiente de subida. La tensión a la que queda sometido el equipo depende de la frecuencia de dicha fuente y del largo de los conductores. Dependiendo del

valor de R , las oscilaciones entre L y C incrementan el valor de la tensión que recibe el equipo, dependiendo dicho valor de varios parámetros. Con equipos que presentan alta impedancia de carga, en la práctica, la tensión no llega a duplicarse.

La norma IEC 61643 presenta como ejemplo un descargador de Óxido de Zinc, conectado a una carga de $5 \eta F$ con una distancia de conexión de 10 m, al que llega una perturbación caracterizada por una fuente de corriente de 5 kA y forma de onda 8/20 μs . Si el nivel de protección del descargador es de 1200 V, en esas condiciones de instalación la tensión en el equipo supera los 2000 V.

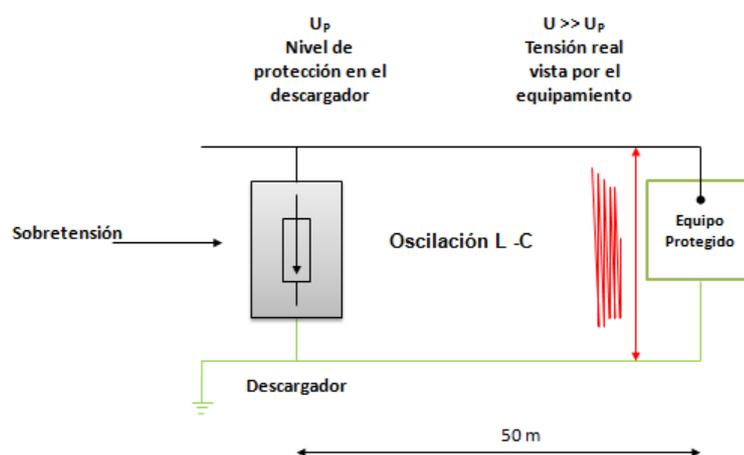


Figura 11.45: Distancia entre descargador de sobretensión y equipo.

El punto 6 considera la situación en la que es necesario instalar un descargador cerca del equipo, adicionalmente al que se instala en la entrada de la instalación. La selección de los descargadores y la distancia de conexión entre ellos debe realizarse teniendo en cuenta las reglas de coordinación.

La coordinación entre descargadores se logra cumpliendo el criterio de energía, el que se basa en la máxima energía que soporta el segundo descargador.

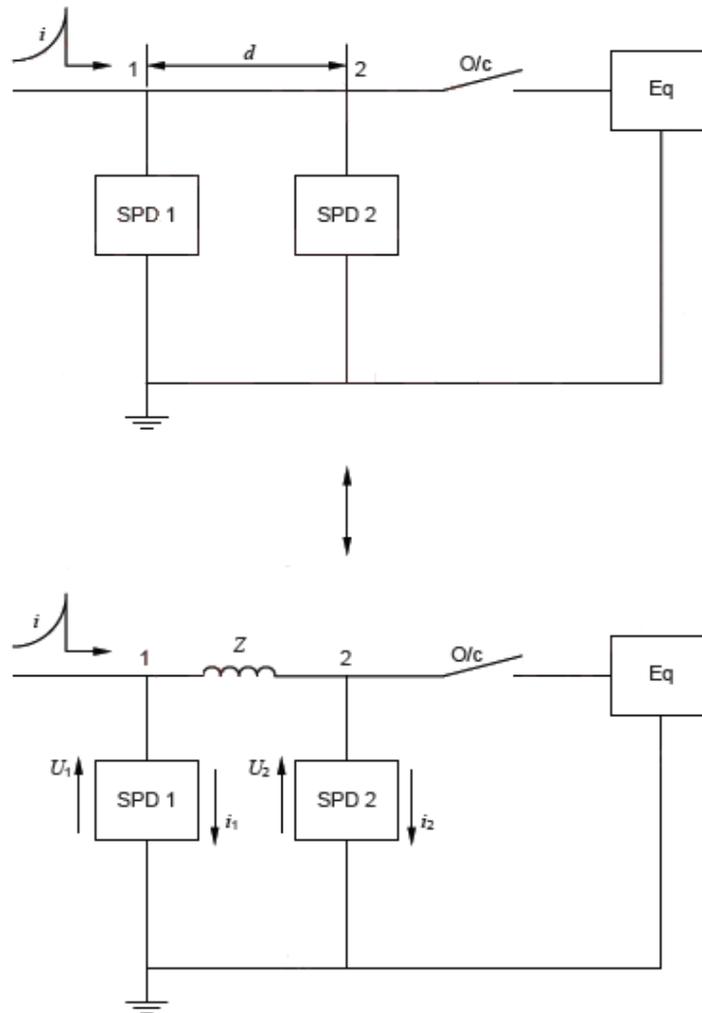


Figura 11.46: Coordinación de dos SPDs - Esquema eléctrico según IEC 61643-12.

La impedancia entre los dos descargadores (en general una inductancia) puede ser un componente específico (resistencia o inductancia) intercalado en la línea para facilitar el reparto de energía entre los dos descargadores o corresponder simplemente a la impedancia del cable que conecta los descargadores. En este último caso la impedancia de la conexión puede considerarse de $1 \mu\text{H}/\text{m}$.

Observaciones:

1. El valor de $1 \mu\text{H}/\text{m}$ combina la inductancia de los conductores de ida y

vuelta (fase-tierra o fase-fase).

2. Si los conductores tienen rutas cercanas, el área del loop es muy chica y la inductancia puede llegar a $0,5 \mu H / m$.

El problema de la coordinación puede resumirse como primera aproximación, planteando las siguientes preguntas:

- ¿En caso de que ingrese una sobrecorriente i , qué parte circulará por el SPD1 y qué parte por el SPD2?
- ¿Los SPD soportan el stress producido por la circulación de dicha corriente?

Se alcanza una buena coordinación seleccionando apropiadamente los SPDs, de forma tal que la corriente i_2 se reduzca a un nivel aceptable, teniendo en cuenta la impedancia del cable entre los descargadores. Al bajar el nivel de i_2 también se reducirá la tensión residual hasta el valor requerido para la protección del equipo.

Para resolver la coordinación entre descargadores no es suficiente analizar la misma en términos de corriente, sino que debe analizarse en términos de energía. Para asegurar la coordinación entre los descargadores debe cumplirse el siguiente requerimiento, llamado criterio de energía:

- Se logra la coordinación de energía si para todos los valores de corriente entre 0 e I_{max_1} (I_{peak_1}) la parte de la energía disipada por el SDP2 es menor o igual que la máxima energía que soporta (E_{max_2}).

Los estudios de coordinación pueden ser complejos (deben conocerse las curvas de los descargadores, tenerse en cuenta las dispersiones de las características de los componentes, modelar el esquema de conexión, etc.). Si todos los descargadores a coordinar son del mismo fabricante, lo más sencillo es consultar al fabricante sobre la distancia que debe preverse o la impedancia que debe instalarse para una apropiada coordinación.

Como la máxima energía que soporta un descargador depende en algunos casos de la forma de onda utilizada en el ensayo realizado para su determinación, la coordinación es establecida para determinadas formas de onda, utilizándose los valores de energía (E) dados por el fabricante.

De acuerdo a la norma IEC 61643, para definir la energía que soporta un descargador es necesaria la definición de los siguientes valores:

- E_{max_s} : Para formas de onda de corriente de corta duración, por ejemplo 8/20 (utilizada en los ensayos de descargadores Clase II).

- E_{max1} : Para formas de onda de corriente de larga duración, por ejemplo 10/350 (utilizada en los ensayos de descargadores Clase I).

Como se verá mas adelante, la norma IEC 61643 “Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Selection and application principles”, define tres clases de descargadores según las ondas de ensayo que se utilizan para determinar sus prestaciones, considerando que son las adecuadas para la zona de la instalación en que se prevee la conexión de cada clase de descargador.

Para coordinar entonces dos descargadores hay que considerar los dos casos: coordinación con formas de onda de corta duración y coordinación con formas de onda de larga duración. La primera es mas fácil de lograr ya que un parámetro importante para la coordinación es la caída de tensión en la impedancia de coordinación, la que será mayor cuanto más rápido se produzca el crecimiento de la corriente.

11.7. Concepto de zonas de protección - IEC 62305

La norma IEC 62305 establece las siguientes zonas de protección:

- **LPZ0:** Zona expuesta a perturbaciones electromagnéticas no atenuadas, causadas por el rayo y se divide en $LPZ0_A$ y $LPZ0_B$.
 - $LPZ0_A$: Zona expuesta a las descargas directas de rayo. Puede tener que transportar la totalidad de la corriente del rayo. El campo electromagnético no está atenuado.
 - $LPZ0_B$: Zona no expuesta a las descargas directas del rayo. El campo electromagnético no está atenuado.
- **LPZ1:** Zona no expuesta a las descargas directas del rayo. La corriente que circula en todas las partes conductoras de esta zona será pequeña comparada con la zona 0_B . El campo electromagnético puede estar atenuado, dependiendo de las medidas de apantallamiento.
- **LPZ2, LPZ3, ..., LPZi:** Se definen en forma análoga.

En la figura 11.47 se indican las diferentes zonas de protección contra el rayo (LPZ).

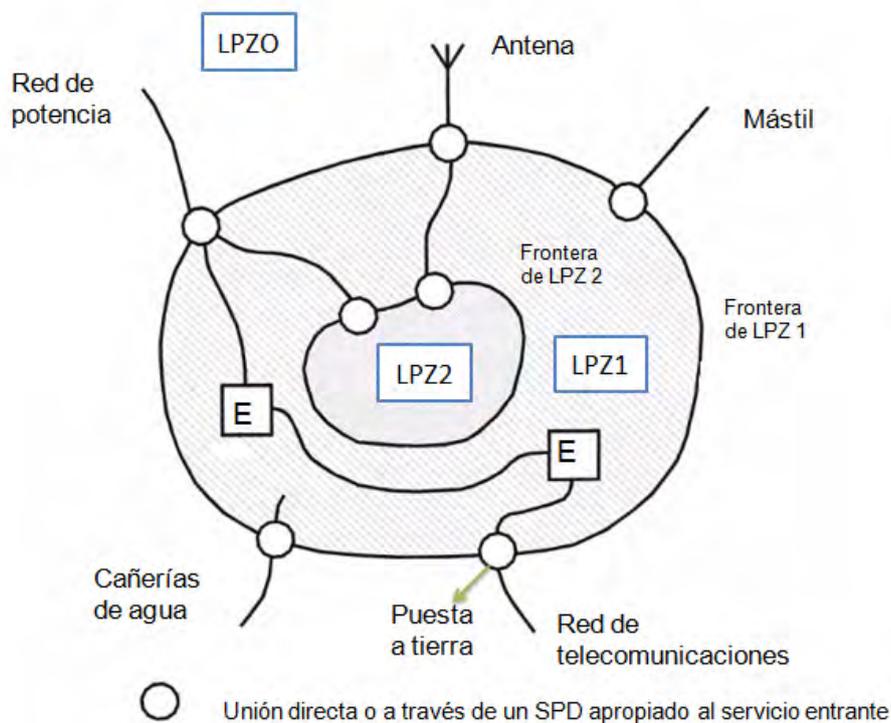


Figura 11.47: Concepto de zona de protección contra el rayo (LPZ).

En la figura 11.48 se indican las diferentes zonas de protección contra rayos y la compensación de potencial en el interior de una edificación.

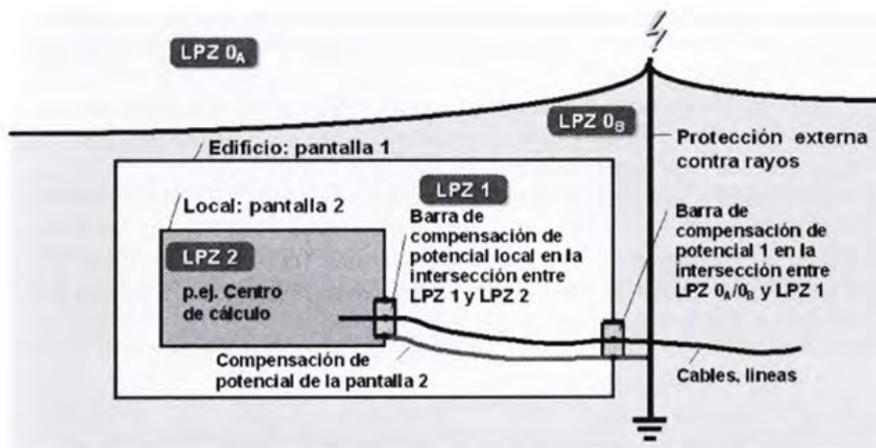


Figura 11.48: Zonas de protección contra rayos y compensación de potencial.

11.7.1. Medidas de protección en cada límite de zona

- Identificación o construcción de las Zonas.
- Compensación de potencial en el cruce de zona.
 - Conductor de la protección externa contra rayos.
 - Estructura metálica del edificio.
 - Instalaciones metálicas.
 - Instalaciones eléctricas de baja tensión y de datos.

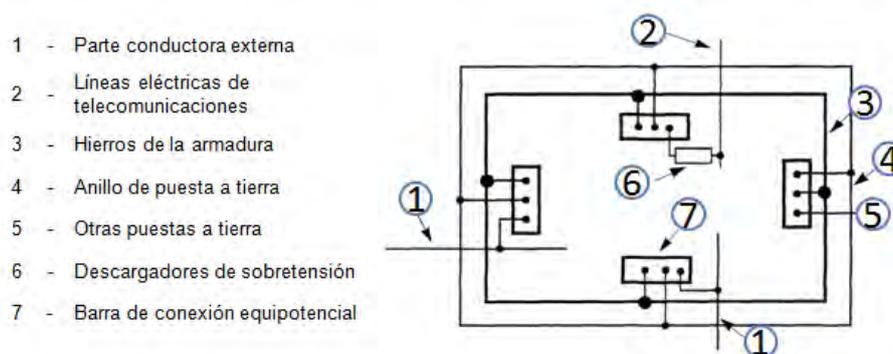


Figura 11.49: Medidas de protección.

11.8. Etapas para el diseño de una protección - IEC 62305

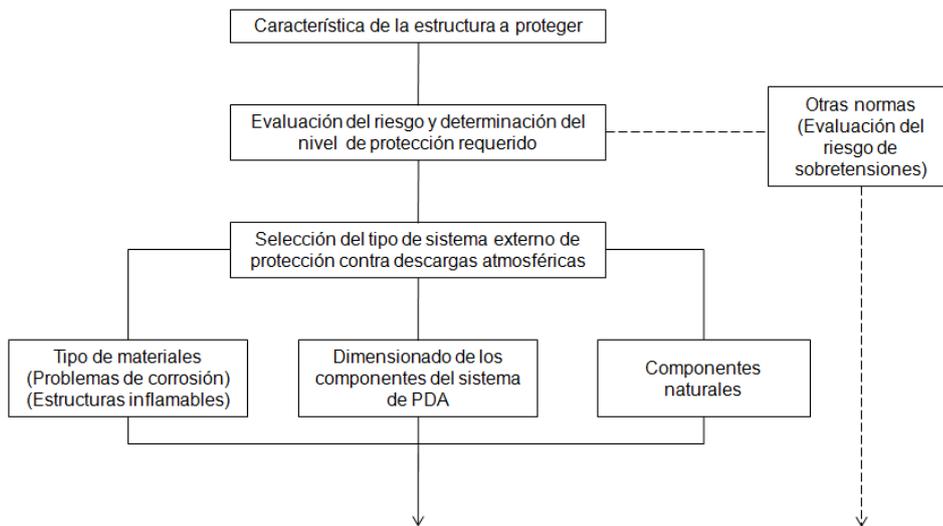


Figura 11.50: Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Etapa 1.

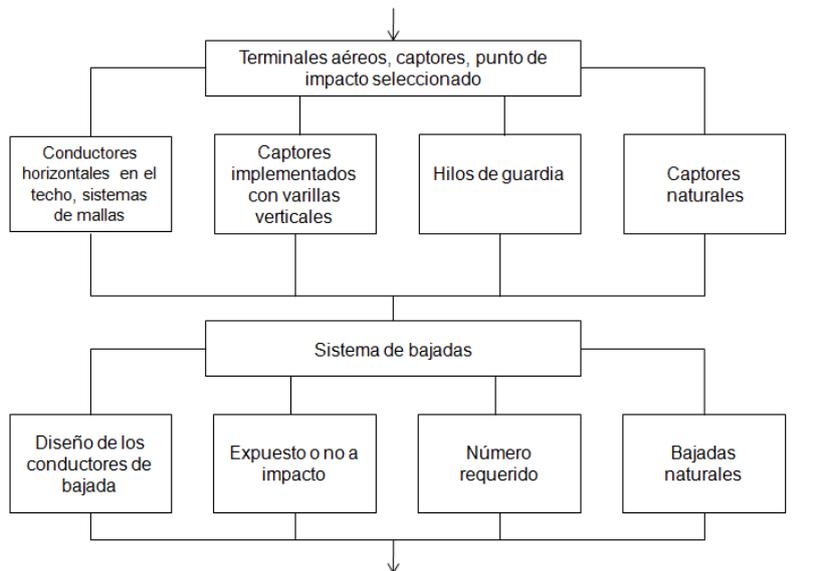


Figura 11.51: Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Etapa 2.

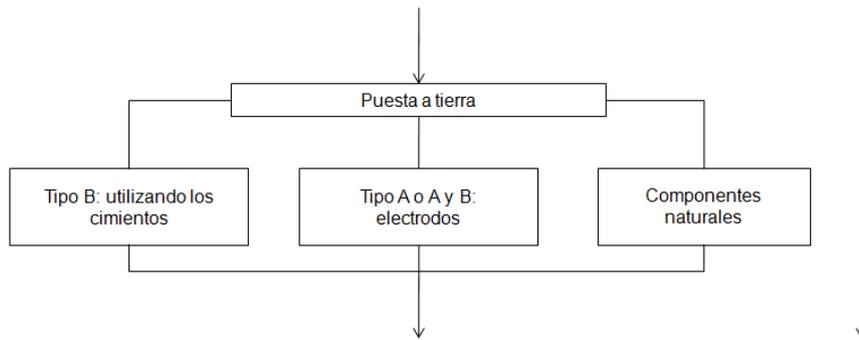


Figura 11.52: Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Etapa 3.

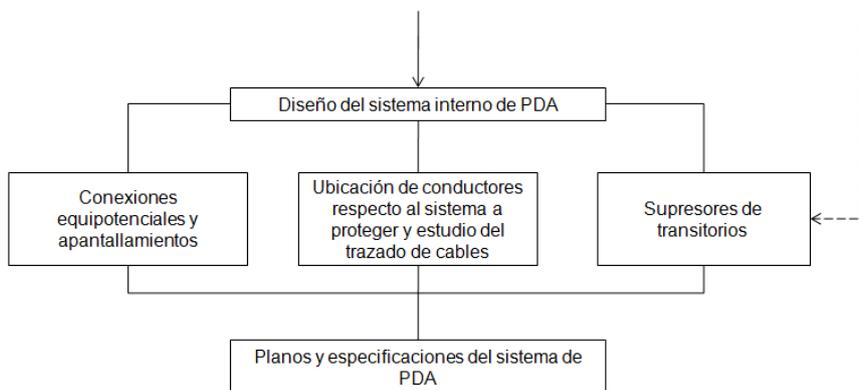


Figura 11.53: Diseño de un sistema de PDA adaptado de la IEC 62305: Etapa 4.

11.9. ANEXO 1 : Distribución de corriente entre varistores en paralelo.

Coordinación de los SPD basados en ZnO y ensayados para Clase I y II

- **Datos:** $U_{res}(I)$ dada por el fabricante y medida utilizando la forma de onda $8/20 \mu s$.
- **Consideraciones:**
 - El ejemplo se presenta para explicar la coordinación entre dos descargadores construidos en ZnO y se analiza solo desde el punto de

vista del reparto de corrientes. Se presentan dos casos, con varistores del mismo diámetro y con varistores de diámetros diferentes.

1. **Dos varistores del mismo diámetro:** Que tengan el mismo diámetro implica que tienen la misma corriente nominal de descarga y soportan la misma energía, por lo que también soportarán la misma I_{max} y la misma I_{imp} , pero tienen diferente nivel de protección U_{p1} y U_{p2} porque pueden tener diferente espesor.

En la figura 11.54 se muestran dos posibles curvas correspondientes a varistores con las características indicadas.

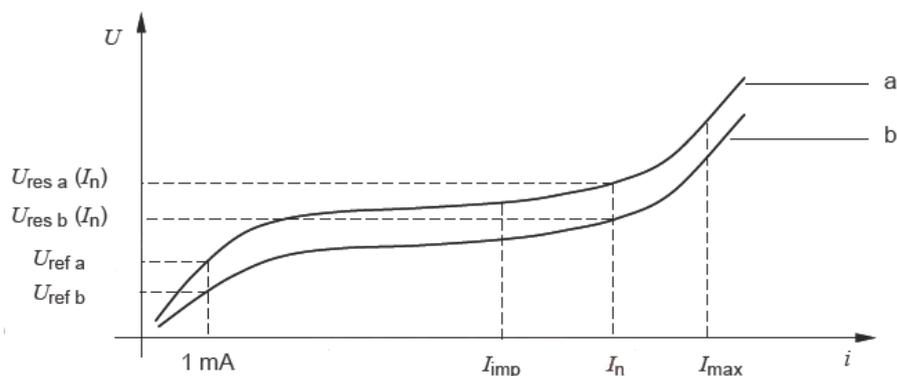


Figura 11.54: Dos varistores de ZnO con la misma corriente nominal de descarga.

Mientras no aparece una sobretensión/sobrecorriente, los varistores estarán sometidos a la tensión normal del sistema. Si están correctamente seleccionados no se producirá el disparo de los mismos y conducirán solamente la corriente de fuga (aproximadamente 1 mA).

Cuando los varistores quedan sometidos a la perturbación, comenzará a conducir primero el varistor que tenga menor U_p y puede realizarse el análisis modelando la perturbación como una fuente de corriente i .

Vamos a analizar dos casos:

- a) $U_{p1} > U_{p2}$. En este caso la curva (a) corresponde al SPD1 y la curva (b) al SPD2. Comenzará a conducir primero SPD2, circulando

una corriente i_2 prácticamente igual a i y la tensión seguirá la curva inferior. Cuando la caída de tensión en la impedancia Z es suficiente como para aumentar la tensión en el SPD1 hasta un valor superior al umbral de no actuación del varistor, comienza a conducir SPD1 y la corriente i_1 será mayor o menor que i_2 según la caída de tensión (ΔV) en la impedancia Z .

Si ΔV no es suficiente como para causar la conducción del SPD1, toda la corriente i circulará por el segundo descargador (SPD2). Aún en este caso extremo se cumplirá el criterio de energía que establece la norma IEC 61643-12 porque los descargadores son iguales.

La norma IEC 61643-12 indica que para este caso la coordinación puede en general lograrse con una longitud de cable de unos pocos metros (entre 5 m y 10 m), para formas de onda de corta duración.

- b) $U_{p1} < U_{p2}$. En este caso la curva (a) corresponde al SPD2 y la curva (b) al SPD1. Comenzará a conducir primero SPD1, circulando una corriente i_1 prácticamente igual a i y la tensión seguirá la curva inferior. Cuando la tensión de SPD1 sea superior al umbral de no actuación del varistor del segundo descargador, comienza a conducir SPD2, la corriente i_1 pasa a ser igual a $i - i_2$, pero por otro lado al tener circulación de corriente por el segundo varistor (cuya tensión variará sobre la curva superior), la tensión sobre SPD1 será igual a la tensión sobre SPD2 aumentada por ΔV , lo que producirá un aumento de i_1 a un valor mucho mayor que i_2 , y este valor de corriente será menor que la corriente incidente, cumpliéndose el criterio de energía.

En el primer caso discutido, se logra muy poca ganancia al utilizar dos SPD con la misma capacidad de energía soportada, ya que si por el segundo descargador circula la mayor parte de la corriente, la tensión vista por el equipo será prácticamente la misma que si se instalara un solo descargador y por este circulara toda la corriente i incidente.

2. Dos varistores con distinto diámetro:

Vamos a considerar el caso en que $I_{n1} > I_{n2}$ y $E_{max1} > E_{max2}$. Adicionalmente SPD1 y SPD2 pueden tener tensiones residuales tales que

11.9 ANEXO 1 : Distribución de corriente entre varistores en paralelo. 336

$$U_{res1}(I_{n1}) < U_{res2}(I_{n1}).$$

En la figura 11.55, se presentan dos posibles curvas para SPD1 (b y c) y la curva a correspondiente al SPD2. De estas curvas queda claro que cuando circula por SPD2 una corriente I_{n1} mayor que su corriente nominal I_{n2} la tensión residual de SPD2 será mayor que la residual de SPD1.

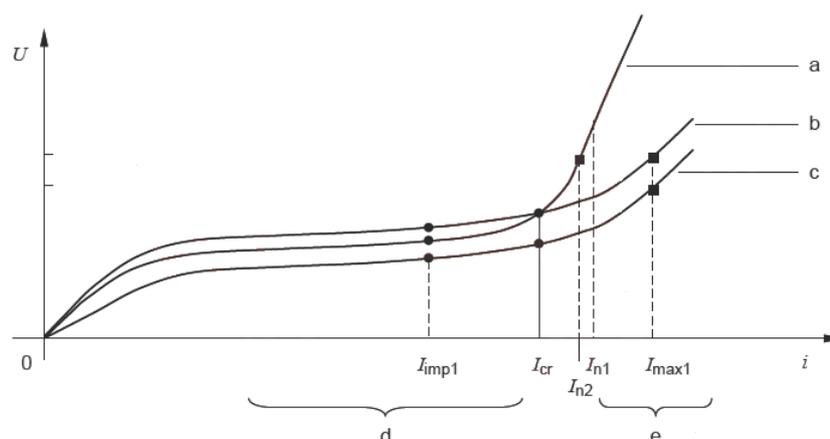


Figura 11.55: Dos varistores de ZnO con diferente corriente nominal de descarga.

Para corrientes menores que la corriente de cruce (I_{cr}) y considerando la curva b para SPD1, según la impedancia entre descargadores y el tipo de perturbación (de corta o larga duración), puede no derivarse suficiente corriente por SPD1 y quedar SPD2 con la mayor parte de la corriente y no producirse coordinación (ver ejemplo 1a)).

El valor de la corriente en el punto de cruce (si existe) debe ser lo menor posible para aumentar la probabilidad de conseguir la coordinación (ver ejemplo 1b)).

11.10. ANEXO 2 : guía de selección e instalación de descargadores según el sistema de conexión a tierra.

11.10.1. Conexión de descargadores en los diferentes sistemas de distribución según su conexión a tierra

En este punto se analiza la conexión de descargadores en los diferentes sistemas de conexión a tierra. Se definen tres sistemas TT, TN e IT, según la conexión a tierra de la fuente de alimentación y de las masas de la instalación de baja tensión.

La primera letra indica la condición de puesta a tierra de la fuente de alimentación (por ejemplo neutro del secundario del transformador (MT/BT) y la segunda letra indica la condición de la puesta a tierra de las masas de la instalación de baja tensión.

En el sistema TT, el neutro del secundario del transformador MT/BT y las masas de la instalación están conectados a tomas de tierra independientes.

En el sistema TN, el neutro del secundario del transformador MT/BT y las masas de la instalación están conectados a la misma toma de tierra.

En el sistema IT, el neutro del secundario del transformador MT/BT está aislado de tierra y las masas de la instalación conectadas a una toma de tierra.

Para el sistema TN, se utiliza una letra adicional TN-S o TN-C, que describen la disposición del conductor de neutro y del conductor de protección.

- **S:** Indica que el conductor de neutro y el conductor de protección están separados.
- **C:** Indica que el conductor de neutro y el conductor de protección están combinados en un mismo conductor.

Las figuras 11.56 a 11.63 muestran la conexión de los descargadores en los diferentes sistemas.

En relación a la coordinación de los descargadores de sobretensión con las medidas de protección contra contactos indirectos que se deben instalar en cada sistema de conexión a tierra, debe tenerse presente que siempre las

medidas de protección de las personas tienen prioridad frente a los demás dispositivos de protección, como por ejemplo los descargadores de sobretensión.

Consideraciones generales para coordinación con RCD (Residual Current Device), fusibles o interruptores

Las posibles interferencias entre el SPD y los demás dispositivos de protección debe analizarse en condiciones normales de funcionamiento del sistema, en condiciones de falla del descargador y en condiciones de operación normal del SPD frente a una perturbación.

Condiciones normales de funcionamiento:

La corriente de operación continua del descargador (I_c) circula en forma permanente entre fases y tierra, por lo que no debe generar potenciales de toque peligrosos para la seguridad de las personas, ni provocar la actuación incorrecta de otros dispositivos.

Cuando se utilizan RCD como dispositivos de protección contra choques eléctricos, en ausencia de falla, las corrientes de fuga a tierra deben ser menores que $\Delta I_n/2$, para que el diferencial no quede en la zona de operación posible (entre $\Delta I_n/2$ y ΔI_n).

Considerando que la corriente I_c aporta a la corriente total de fuga a tierra, la norma IEC 61643-12 indica como referencia que la misma sea menor que un tercio de la corriente nominal residual del RCD ($\Delta I_n/3$).

Condiciones de falla del descargador:

Frente a una falla del descargador, puede no ser deseable que se produzca el corte de la alimentación por la actuación de un dispositivo de protección contra contactos indirectos.

Si el SPD se instala aguas abajo del dispositivo de protección contra contactos indirectos, pueden instalarse (en el SPD o en serie con el mismo) los dispositivos de desconexión necesarios para que no exista interferencia con el dispositivo de protección instalado aguas arriba. Si es posible realizar la coordinación entre el fusible o interruptor de protección del SPD y los dispositivos de protección instalados aguas arriba, frente a una falla del SPD actuará su protección y no se producirá el corte de la alimentación por la actuación del dispositivo de protección contra contactos indirectos.

Coordinación frente a una perturbación:

La capacidad de soportar sobrecorrientes de tipo onda de choque esta especificada solo para los RCD. Las normas de producto correspondientes indican que deben soportar una sobrecorriente residual de 3 kA (8/20 μ s) sin disparar.

La norma de instalaciones interiores de baja tensión IEC 61364, así como la de producto de descargadores IEC 61643-12 recomiendan que el RCD debe ser además del tipo selectivo (tipo S).

El dispositivo de protección contra contactos indirectos no debería operar para la corriente nominal del descargador. Para corrientes mayores que la corriente nominal, aunque el RCD opere, debido a que el tiempo de actuación es mayor que la duración de la perturbación, circulará toda la sobrecorriente antes de que opere, por lo que según el nivel de la perturbación, podría dañarse.

Se analiza a continuación las conexiones recomendadas por la norma IEC 61643-12 para cada sistema de conexión a tierra.

Sistema TT

En este sistema de conexión los dispositivo de protección contra contactos indirectos utilizados son los RCD y para asegurar la protección contra choques eléctricos aún en condiciones de falla del SPD, estos últimos deberían instalarse aguas abajo de la protección diferencial.

Pero si la sobre corriente esperada en ese punto de la instalación puede dañar la protección diferencial, entonces el SPD debe instalarse aguas arriba de la protección diferencial y debe conectarse de forma tal que la protección contra sobrecorrientes (que quede instalada aguas arriba del SPD) actúe como protección contra contactos indirectos frente a la falla del descargador. Puede tener sentido considerar esta situación para los descargadores instalados en los primeros niveles (origen de la instalación y tablero principal) donde las sobrecorrientes esperadas son de mayor magnitud.

Para que los interruptores termomagnéticos instalados aguas arriba de la protección diferencial actúen frente a una falla a tierra, debe asegurarse un valor de la corriente de falla del SPD lo suficientemente alta como para producir la actuación de la protección contra sobrecorrientes en su zona magnética, para lo cual se instalan SPD (en base a varistores) entre línea y neutro y un descargador adicional (en general descargador de gas) entre neutro y tierra. Este descargador debe ser capaz de soportar la suma de las corrientes de descarga de los tres descargadores instalados entre línea y neutro. Con es-

ta configuración si se produce el deterioro de los varistores conectados entre fase y neutro, circulará una corriente de falla a través de conductores, como en un sistema TN. Ver figura 11.59.

Los SPD que se instalan junto al equipamiento, quedarán aguas debajo de la protección diferencial y su esquema de conexión para que el diferencial se desensibilice frente a una corriente de falla del SPD (que se produciría por el deterioro de los varistores) se muestra en la misma figura.

En las figuras 11.56 y 11.58 se muestran dos de las conexiones de descargadores en un sistema TT indicadas en la norma IEC 61643-12, aguas abajo y aguas arriba del interruptor diferencial. La norma también presenta un posible esquema de conexión aguas abajo del RCD, la instalación de SPDs entre fases y neutro y un SPD de mayor capacidad entre neutro y tierra.

En este esquema las conexiones indicadas como 5a y 5b pueden ser opcionales, según la ubicación del descargador, o realizarse ambas. Cuando los descargadores están ubicados muy cerca de la barra PE, solo se realizará la conexión 5b, cuando por el contrario están ubicados cerca de la barra de conexión de la toma de tierra se realizaría solo la conexión 5a. Si no se da ninguna de las situaciones extremas la norma recomienda realizar ambas conexiones a efectos de lograr la mínima diferencia entre las tensiones del borne de tierra del descargador y la barra de protección PE.

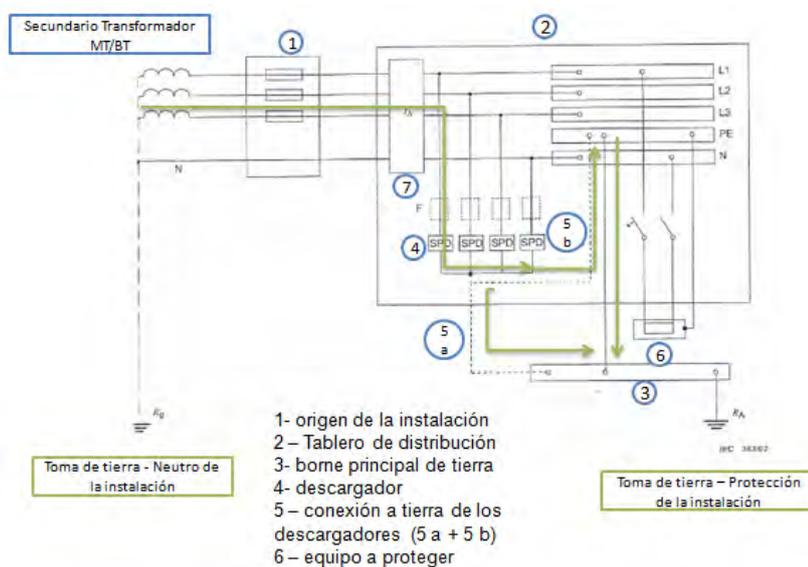


Figura 11.56: Sistema TT aguas abajo de protección diferencial.

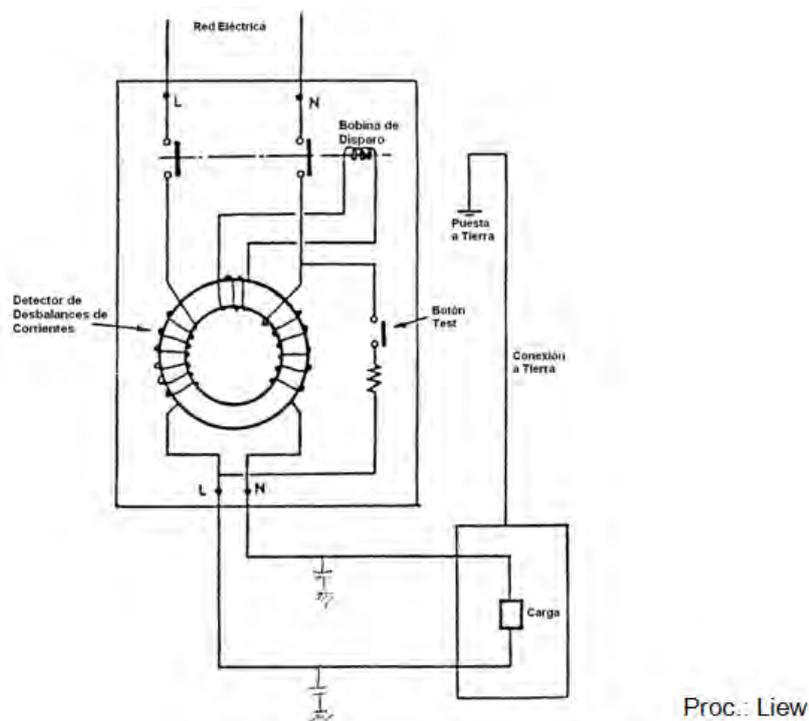


Figura 11.57: Interruptor diferencial.

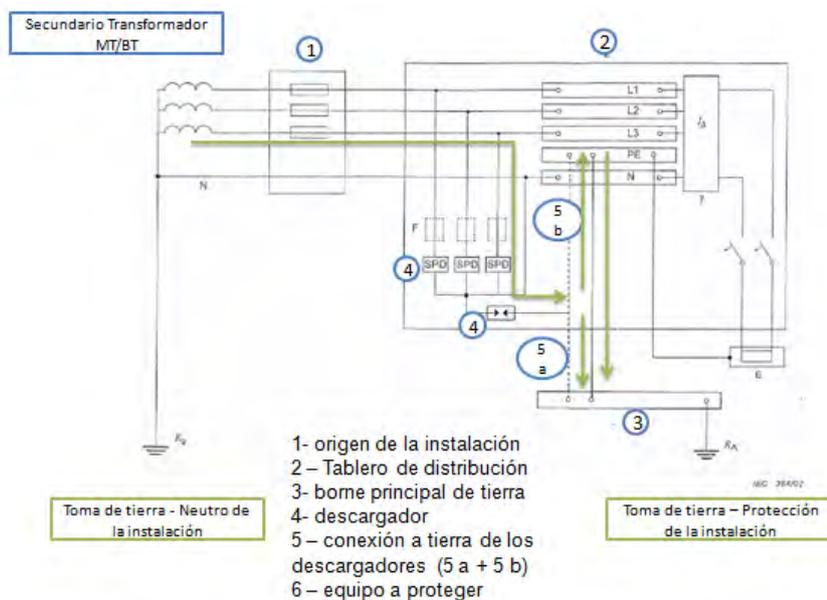


Figura 11.58: Sistema TT aguas arriba de protección diferencial.

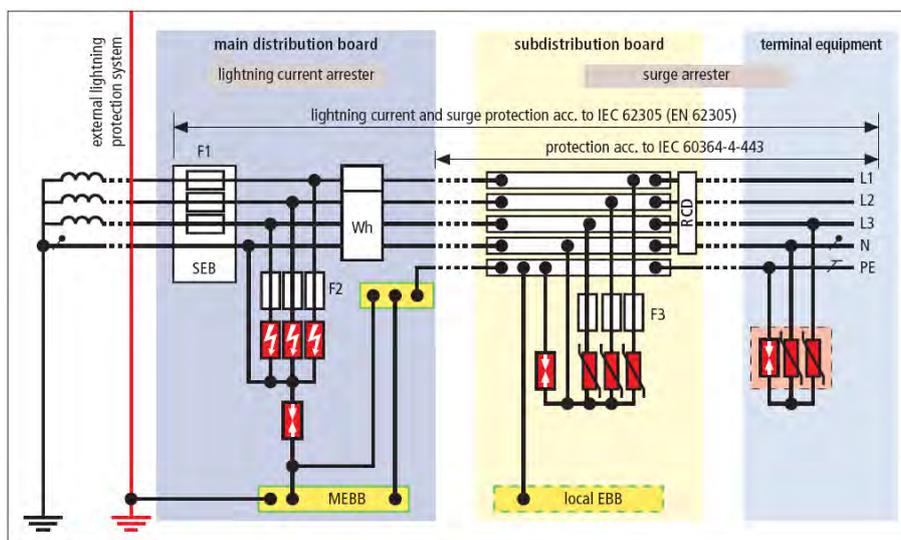


Figura 11.59: Usos de SPDs en sistemas TT.

Sistema TN-C-S

En estos sistemas de conexión en general se utilizan los dispositivos de protección contra sobrecorrientes para la protección contra contactos indirectos, instalándose RCD (Residual Current Device) solamente para el equipamiento en el que hay riesgo de contacto directo.

Los SPD (Surge Protection Device) de los primeros niveles de protección quedarán entonces conectados aguas arriba del RCD y la conexión de los descargadores entre línea - tierra y neutro - tierra ya asegura, por el tipo de conexión a tierra del sistema, que frente a la falla del descargador actuará la protección contra contactos indirectos (protección contra sobrecorrientes). Ver figura 11.59.

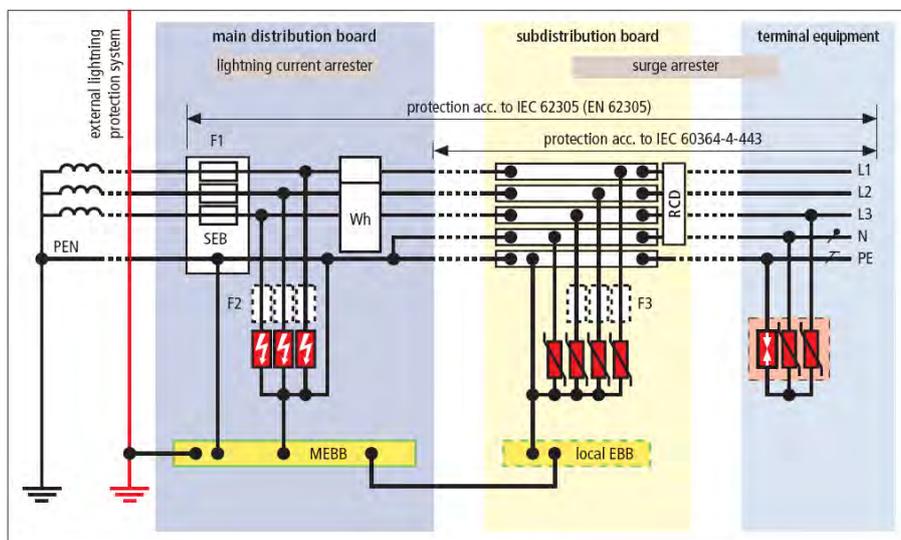


Figura 11.60: Usos de SPDs en sistemas TN-C-S.

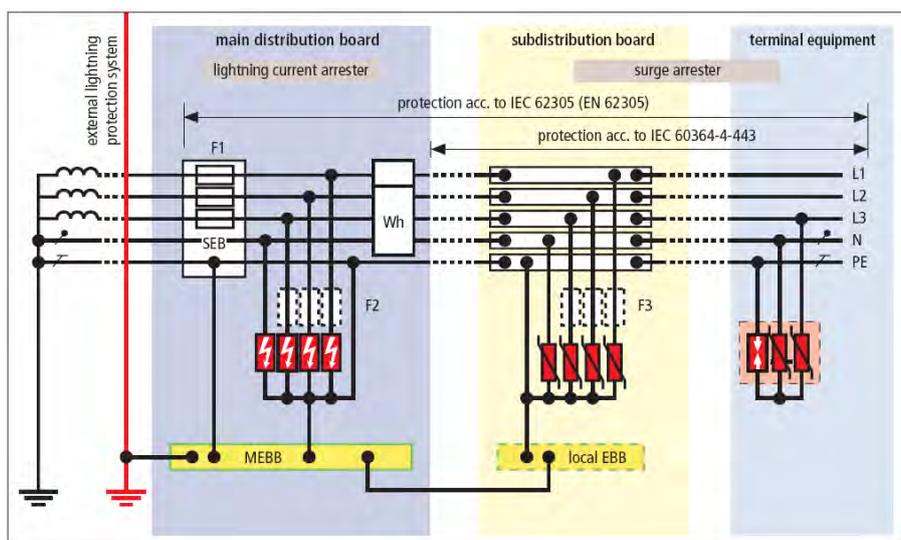


Figura 11.61: Usos de SPDs en sistemas TN-S.

Los SPD que se instalan junto al equipamiento pueden quedar aguas abajo de una protección diferencial y en ese caso el esquema de conexión de los SPD para que el diferencial se desensibilice frente a una corriente de falla del SPD se muestra en la misma figura, siendo el mismo que para el caso del sistema TT.

En la figura 11.62 se muestra la conexión de descargadores en un sistema

TN-C, indicado en la norma IEC 61643-12, siendo válidas las observaciones realizadas para el sistema TT en relación a las conexiones 5a y 5b.

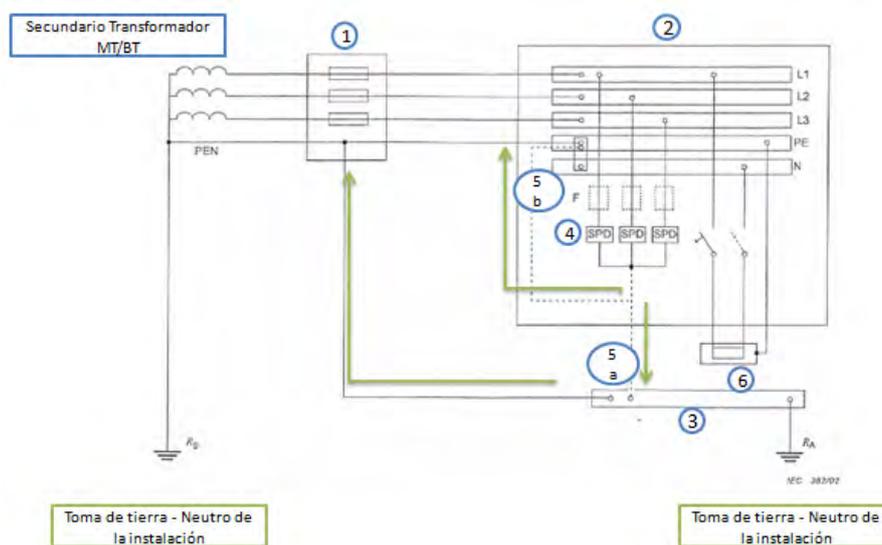


Figura 11.62: Sistema de conexión TN.

Sistema IT

En los sistemas IT, aunque se instalen RCD o dispositivos de protección contra sobrecorrientes, estos no actuarán frente a la primera falla a tierra. En estos sistemas se instalan dispositivos de monitoreo de aislamiento que dan una alarma frente a la primera falla a tierra. A partir de ese momento pasan a operar como un sistema TT o TN sin falla a tierra. Frente a la primera falla el conductor de protección adquiere la tensión de la fase en falta, por lo que todas las masas adquieren el mismo potencial a través de la conexión del conductor de protección y son bajos los riesgos de choque eléctrico.

Debe tenerse en cuenta que cuando la primera falla se produce, las fases sanas quedan a una tensión respecto a tierra igual a la tensión compuesta, por lo que los SPD conectados entre las fases sanas y tierra deberán soportar dicha tensión ($\sqrt{3} \cdot U_o$).

En la figura 11.63 se muestra la conexión de descargadores en un sistema IT, indicado en la norma IEC 61643-12, siendo válidas las observaciones realizadas para el sistema TT en relación a las conexiones 5a y 5b.

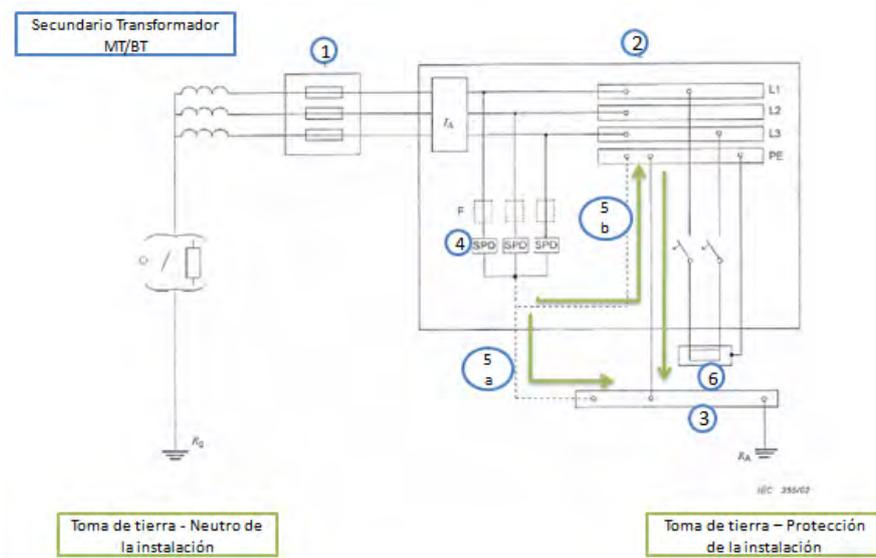


Figura 11.63: Sistema de conexión IT.

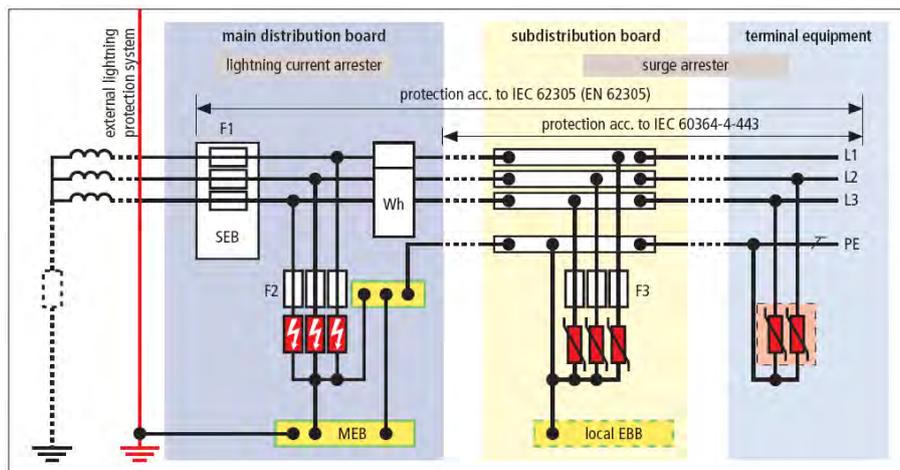


Figura 11.64: Usos de SPDs en sistemas IT sin conductor neutro.

11.10.2. Sobretensiones temporarias en los sistemas de distribución según esquema de conexión a tierra

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta para la instalación de descargadores en el sistema de alimentación, son las sobretensiones que pueden aparecer cuando se produce una falla a tierra, entre las fases sanas y tierra,

las que se mantendrán hasta que actúen las protecciones correspondientes. Estas sobretensiones son llamadas sobretensiones temporarias ya que su duración puede variar de cientos de ms a 5s; cuando la duración es mayor a 5s se consideran sobretensiones permanentes.

Los descargadores deben poder soportar en forma permanente dicha sobretensión sin actuar, por lo que no pueden ser seleccionados teniendo solo en cuenta la tensión nominal del sistema y su rango de variación admitido según el Reglamento de Calidad del Servicio de Distribución de Energía Eléctrica (para BT zona rural -12 % + 6 % y -10 % + 6 % para zona urbana).

Las sobretensiones temporarias pueden ser provocadas por fallas en el sistema de baja tensión, por fallas en el sistema de media tensión ($U_{TOV,LV}$) o por fallas en el sistema de alta tensión ($U_{TOV,HV}$). En el primer caso su valor depende del sistema de conexión a tierra (IT, TN o TT) y en el segundo depende de la vinculación entre la toma de tierra de las masas de media tensión y la toma de tierra del neutro de la instalación de baja tensión.

El caso extremo de sobretensión temporaria por falla en el sistema de baja tensión se da en sistema IT, en el que durante una falla a tierra, la sobretensión entre las fases sanas y tierra es igual a la tensión compuesta. En la Tabla se muestran los valores de las sobretensiones temporarias dadas en la norma IEC 6034-4-44.

Conductores entre los que se genera U_{TOV}	Sistema de distribución	Máximos valores de U_{TOV}
Valores extremos ocasionados por faltas en la red de media tensión cuando existe vinculación entre la puesta a tierra de las masas de MT y la puesta a tierra de neutro de BT		
FASE - TIERRA	TT, IT	$U_0 + 250 \text{ V}$ con duración $> 5 \text{ s}$
		$U_0 + 1200 \text{ V}$ con duración hasta 5 s
NEUTRO - TIERRA	TT, IT	250 V con duración $> 5 \text{ s}$
		1200 V con duración hasta 5 s
Valores extremos ocasionados por pérdida del conductor neutro en el sistema de BT		
FASE - NEUTRO	TT, TN	$\sqrt{3} \cdot U_0$
Valores extremos ocasionados por puesta a tierra accidental del conductor de fase		
FASE - TIERRA	IT	$\sqrt{3} \cdot U_0$
	TT	$k \cdot U_0$
Valores extremos ocasionados por cortocircuitos entre línea y neutro		
FASE - NEUTRO	IT, TT, TN	$1,45 \cdot U_0$

Figura 11.65: Valores máximos de sobretensiones temporarias dadas en la norma IEC 60364-4-44.

11.10.3. Selección de descargadores

Los dispositivos de protección contra sobretensiones deben seleccionarse de forma de asegurar el siguiente desempeño:

- Cuando no está sometido a sobretensiones (estado pasivo), no debe influir significativamente en las características del sistema.
- Cuando está sometido a sobretensión (estado activo), debe:
 - Derivar a tierra la corriente de descarga sin dañarse.
 - Limitar la tensión adecuadamente sobre el dispositivo que protege.
- Debe extinguir corriente de seguimiento (si existe).
- La falla del dispositivo no debe generar riesgos en la instalación.

Definición de parámetros utilizados para la selección de descargadores de sobretensión

Se listan a continuación los parámetros básicos que deben definirse para la selección de un SPD.

- I_n : Corriente nominal de descarga, “vida útil”.
 - Valor de pico, 8/20 μs .
 - Perturbación que se espera ocurra con frecuencia en la instalación.
- I_{imp} : Corriente de impulso, “capacidad”.
 - Valor de pico y carga (Q), 10/350 μs .
 - Perturbación que se espera ocurra excepcionalmente.
- I_{max} : Corriente máxima de descarga, “capacidad”.
 - Valor de pico 8/20 μs .
 - Perturbación que se espera ocurra excepcionalmente.
- U_{co}/I_{sc} : Onda combinada.
 - Tensión 1,2/50 μs a circuito abierto y corriente 8/20 μs en cortocircuito.
- U_p : Tensión en bornes del descargador frente a determinadas condiciones de ensayo:
 - Clase I: Determinado para I_{imp} .
 - Clase II: Determinado para I_n .
 - Clase III: Determinado para generador combinado corriente 8/20 - tensión 1,2/50.
- U_c : Tensión máxima de funcionamiento continuo.

Descargadores de alimentación

1. Parámetros estado pasivo

- a) Sistema de conexión a tierra y modo de protección que requiere el equipo:
 - Modo de protección: L-L, L-T, L-N o N-T o combinado.
 - Tipo de descargador: Clamping, switching o combinado. Serie o paralelo.
- b) Tensiones máximas en el sistema de potencia:
 - $U_c > U_{TOV}$
- c) Corriente de carga máxima en el sistema:
 - $I_L > I_{LS}$
- d) Interferencias con otras características del sistema:
 - I_c : Corriente de operación continua.

2. Parámetros estado activo

- a) Tipo y magnitud de las perturbaciones esperables en el punto de conexión del SPD:
Clases de ensayos de impulso:
 - Clase I:
 - Z0/Zxx.
 - Nivel de protección a I_n o I_{imp} (el que sea máximo).
 - Clase II:
 - Z1/Z2.
 - Nivel de protección a I_n .
 - Clase III:
 - Z2/Z3.
 - Nivel de protección a U_{oc}/I_{sc} .
- b) Nivel de inmunidad del equipo:
 - $U_p < U_w$
 - U_w : Nivel de inmunidad del equipo - Tensión soportada de impulso.
- c) Tipo y magnitud de las perturbaciones esperables en el punto de conexión del SPD:
 - I_n : Corriente nominal de descarga.

- I_{max} : Corriente máxima de descarga.
- I_{imp} : Corriente e impulso.
- U_{co}/I_{sc} : Onda combinada.

Selección de SPD para Datos y Telefonía

1. Estado pasivo

Deben considerarse las características de la señal y modo de protección que requiere el equipo:

- Señal: Nivel de tensión - frecuencia - ancho de banda.
- $U_c > U_{cs}$: Para que no cause degradación en la característica de transmisión del SPD.
- Resistencia de aislación: Con U_c aplicada.
- Pérdidas de inserción: db en potencia.
- Modo de protección: L-L, L-T o combinada.
- Tipo de descargador: Clamping, crowbar o switching o combinado. Serie - paralelo.

2. Estado activo

a) Tipo y magnitud de las perturbaciones esperables en el punto de conexión del SPD:

- I_n : Corriente nominal de descarga.
- I_{max} : Corriente máxima de descarga.
- I_{imp} : Corriente de impulso.
- U_{co}/I_{sc} : Onda combinada.

b) Nivel de inmunidad del equipo:

- $U_p < U_w$
- U_p : Es mayor que la máxima medida de limitación de tensión realizada para las formas de onda especificadas por la norma.

Bibliografía

Libros

- [1] Rakov, V. y Uman, M. “Lightning”, 687 pp. Cambridge 2005, UK ISBN 0-521-58327-6.
- [2] MacGorman, D., Rust, W. D. “The Electrical Nature of Storms” 422 pp Oxford Univ. Press, New York 1998 ISBN 0-19-507337-1
- [3] Feynman, Leighton, Sands: “The Feynman lectures on Phisics”, Vol II, Electromagnetismo y Materia. Addison Wesley, 1972
- [4] Uman, M. A. “All about Lightning”, Dover 1986 ISBN 0-486-25237-X
- [5] Uman. M. A. “Lightning”, Dover 1969 0-486-64575-4
- [6] Uman. M. A. “The Lightning Discharge”, Dover 2001 ISBN 0-486-41463-9
- [7] Block, Roger: “The Grounds of Lightning and EMP Protection” PolyPhaser Corp. 1993
- [8] Klinkenberg, Van er Minne: “Electrostatics in the Petroleum Industry” A Royal Dutch/Shell Research and Development Report 1958

Material de cursos y seminarios

- [9] Liew Ah Choy “Lightning and Lightning Protection” Course Material, National University of Singapore, 1998
- [10] Rand, K. and Klobassa, B. “Lightning Protection Course” PolyPhaser Corp., Minden, NV. EEUU, 1998
- [11] Kithil, R. “Certified Lightning Safety Proffesional Course” National Lightning Safety Institute, Louisville CO. EEUU, 2001

Normas y reglamentos

- [12] BS6651 ; “Code of Practice for Protection of Structures against Lightning”. British Standard, (UK) 1992
- [13] IEC 62305-1/2/3/4, “Protection of Structures against Lightning”. International Electrotechnical Commission, 2006
- [14] SABS 0313 “The Protection of Structures against Lightning”. South African Standard, 1999
- [15] NFPA 780 “Standard for the Installation of Lightning Protection Systems”. National Fire Protection Association, EEUU, 2004
- [16] SSCP33 “Code of Practice For Lightning Protection”. Singapore Institute of Standards and industrial Research, 1996
- [17] IEEE C62.41 “Recommended Practices on Surge Voltages in Low Voltages AC Power Circuits”. IEEE - ANSI Standard, 1991
- [18] API/EI 545-A “Verification of Lightning Protection Requirements for Above Ground Hydrocarbon Storage Tanks”. API - EI Standard, 2009
- [19] API Recommended Practice 545 “Recommended Practice for Lightning Protection of Aboveground Storage Tanks for Flammable or Combustible Liquids”. API Standard, 2009
- [20] NFPA 77 “Recommended Practice on Static Electricity”. National Fire Protection Association, EEUU, 2077
- [21] API 2003 RP SEVENTH EDITION “Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents”. API Standard, 2008

Notas de aplicación de fabricantes

- [22] Polyphaser Corp. www.polyphaser.com
- [23] MTL Surge Technologies. www.mtlsurgetechnologies.com

Artículos complementarios

- [24] Mackerras, Darveniza, Liew: "Review of Claimer Enhanced Lightning Protection of Buildings by Early Streamer Emission Air Terminals" IEE Proc. Sci, Meas, Technology, Vol 144, Jan 1997
- [25] Uman, M. A., Rakov, V. "A Critical Review of Nonconventional Approaches to Lightning Protection" American Meteorological Society, BAMS, Dec.2002, pp 1809 -1820.
- [26] Torres Sánchez, H. "Puntas Franklin y Dispositivos no Convencionales de Protección Contra Rayos" ALTAE 2003, San José, Costa Rica, agosto 2003
- [27] Moore, C. B., Aulich, G. and Rison, W. "Responses of Lightning Rods to Nearby Lightning" International Conference on Lightning and Static Electricity, Aerospace Congress and Exhibiton, Seattle, USA, 10-14 de Setiembre, 2001
- [28] Mackerras, D., Darveniza, M., Liew, A. C. "Standard and Non-standard Lightning Protection Methods" Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia - IE Aust. and IREE Aust. Vol 7 N° 2, Junio 1987.
- [29] Cooray, V., Rakov, V., Theethayi, N., "The lightning striking distance - Revisited", Journal of Electrostatics, Nr. 65 (2007) 296-306, www.sciencedirect.com.
- [30] Report of the Federal Interagency Lightning Protection User Group. "The Basis of Conventional Lightning Protection Technology" Junio 2001.
- [31] Block, R. R., "Dissipation Arrays, Do they work?" Mobile Radio Technology, Abril 1988.
- [32] Hartono, Z. A., Robiah, I "Conventional and Unconventional Lightning terminals: An Overview" Forum on Lightning Protection Jaya, Malaysia, Enero, 2004.
- [33] Rodríguez Montes, A. "Pararrayos CTS y CEC, cómo funcionan, implantación y seguimiento", INT, Andorra, www.pararrayos.org.
- [34] Tesla, Nikola. "Lightning Protector" US Patent N° 1,266,175, 14 de Mayo, 1918.

-
- [35] Mousa A. "The Applicability of Lightning Elimination Devices to Substations and Power Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 13, N° 4, Octubre 1998.
- [36] Zipse, Donald W., "Lightning Protection Systems, Advantages and Disadvantages" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30 N° 5, Setiembre / Octubre 1994.
- [37] Mousa A. "Validity of the Lightning Elimination Claim", Power Engineering Society General Meeting, Toronto, 13 - 17 de Julio, 2003.
- [38] Carpenter, R. y Auer, R., "Lightning and Surge Protection of Substations", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, Nr. , Enero - Febrero 1995.
- [39] Rison, William "There Is No Magic To Lightning Protection; Charge Transfer Systems Do Not Prevent Lightning Strikes". New Mexico Institute of Mining and Technology, Langmuir Laboratory for Atmospheric Research. Artículo para NLSI, www.lightningsafety.com. 2002.
- [40] Zipse, Donald W., "Lightning Protection Methods: An Update and a Discredited System Vindicated" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37 N° 2, Marzo - Abril 2001.
- [41] Rand, K. "Lightning Protection And Grounding Solutions For Communication Sites" 90pp. Polyphaser Inc. Material de Curso, 2000.
- [42] Cooray,V. and Zitnik,M, "On Attempts to Protect a Structure from Lightning Strikes by Enhanced Space Charge Generation", 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004.
- [43] Aleksandrov, N. L., Carpenter R. B., Bazelyan, E. M., Drabkin, M. M. y Raizer, Yu. P. "The Effect of Coronae on Leader Initiation and Development under Thunderstorm Conditions and in long Air Gaps", J. Phys. D.: Appl.Phys.34 2001.
- [44] Aleksandrov, N. L., Bazelyan, E. M., Raizer, Yu. P., "The Effect of a Corona Discharge on a Lightning Attachment", Plasma Physics Reports, Vol. 31, No I, 2005.
- [45] Bishop D., "Lightning Devices undergo Tests at Florida Airports", Mobile Radio Technology Mayo, 1990.

- [46] Krider E. P. y Kehoe K. E., "On Quantifying the Exposure to Cloud-to-Ground Lightning", International Conference on Lightning Protection, Francia, Setiembre, 2004.
- [47] Molina, J., Viggiano, D., "Diseño y Adecuación de Sistemas de Protección Contra Rayos", CVIE, 2004.
- [48] Norme Française "Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre á dispositif d'ámorçage" Norme Francaise NF C 17-102, Julio, 1995.
- [49] Aplicaciones Tecnológicas S. A. Folleto del dispositivo Ion-Corona DAT-CONTROLLER. Folleto comercial.
- [50] Gruet, P. "Etude des Paratonnerres á Dispositif d'Ámorçage" 89 pp, Laboratoire d'Évaluation des Equipements Electriques. Direction de la Certification. Institut National de l'Énvironnement Industriel et des Risques (INERIS), Ministère de l'Áménagement du Territoire et de l'Énvironnement, France, Octubre 2001.
- [51] McIvor, S., Carpenter, R., Drabkin, M. "Evaluation of Early Streamer Emission Air Terminals" ITEM 1998.
- [52] Liew Ah Choy "Principles of Lightning Protection", Material del curso "Lightning and Lightning Protection", National University of Singapore 1998.
- [53] Bouquegneau, C. "Laboratory Tests on Some Radioactive and Corona Lightning Rods - Faculté Polytechnique de Mons, Belgium" 18th International Conference on Lightning Protection ICLP, Munich, 16 - 20 de Setiembre, 1985.
- [54] CIGRE. Statement of CIGRE Working Group 33.01 "Lightning". CIGRE 95 SC 33 (WG 01)17 IWD 24 de Mayo, 1995.
- [55] National Lightning Safety Institute (NLSI) "Lightning Protection for Engineers" 216 pp. NLSI 2004. ISBN 0-9759001-0-2.
- [56] Hartono, Z. A., Robiah, I, "A Study of Non- Conventional Air Terminals and Stricken Points in a High Thunderstorm Region" 25th International Conference on Lightning Protection, ILCP, Rhodes, Greece, 18-22 de Setiembre 2000.

-
- [57] Hartono Z. A., I. Robiah, “A Long Term Study on the Performance of Early Streamer Emission Air Terminals in a High Keraunic Region”, Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE 2003), Shah Alam, Malaysia, Agosto 2003.
- [58] Bülent Ozince, EE Turquía. “Lightning Protection on Radar Sites” Comunicación personal a NLSI y NOAA, 16 de Febrero 2004.
- [59] Pedersen, Aage ICLP. “Comments to NFPA’s Proposal of Resigning from Issuing Lightning Standards”. Recomendación a NFPA. 12 de Setiembre, 2000.
- [60] Pedersen, Aage. The result of a Court Case Concerning ESE Devices. 21 de Enero, 2004. Fecha: 23-10-2003 - CV 96-2796 PHX ROS, Heary Bros. Lightning Protection Co., Inc., et al. vs. Lightning Protection Institute, et al..
- [61] United States District Court for the District of Arizona. “Heary Bros. Et al. Plaintiffs, vs National Fire Protection Association, Inc. et al., Defendants. No. CIV 96-2796 PHX/ROS. Injunction and Order Re: Heary Bros. Lightning Protection Inc., Lightning Preventor of America Inc. and National Lightning Protection Corp.” Roslyn O. Silver, U.S. District Judge, 7 de Octubre, 2005.
- [62] United States District Court for the District of Arizona. “Heary Bros. Lightning Protection Inc.; Lightning Preventor of America Inc.; National Lightning Protection Corporation, Plaintiffs, vs National Fire Protection Association, Inc.; Lightning Protection Inst.; Allan P. Steffes; Thompson Lightning Protection Co., Inc.; East Coast Lightning Equipment, Inc., Defendants. No. CIV 96-2796 PHX/ROS. Judgment” Roslyn O. Silver, U.S. District Judge, 7 de Octubre, 2005.