

DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

Y

SUS SISTEMAS DE PROTECCIÓN



Capítulo 1

ASPECTOS FÍSICOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

1-1 Introducción

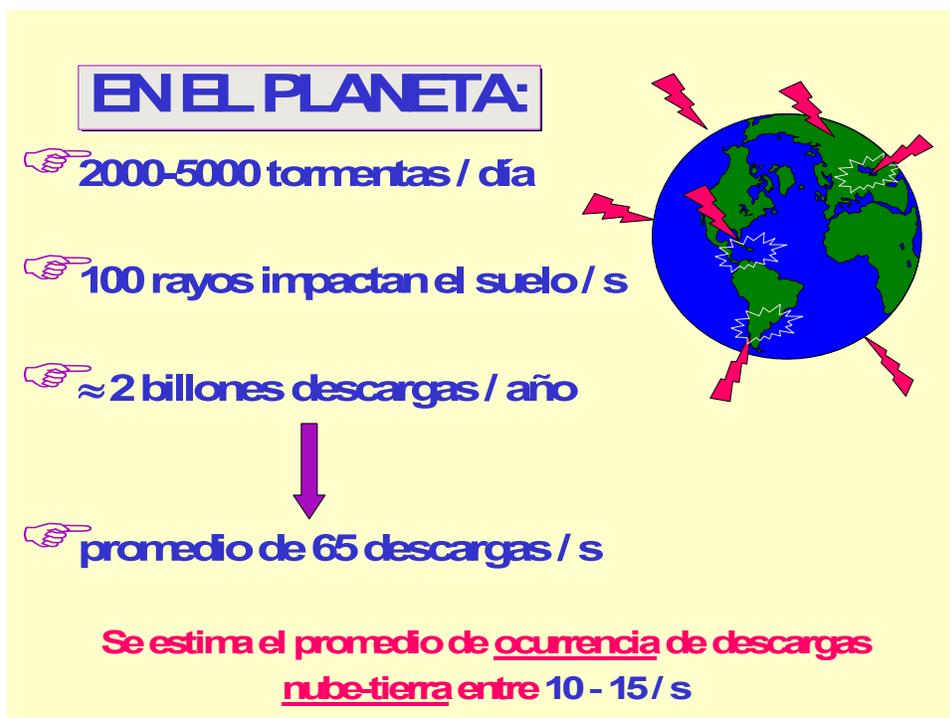
Las descargas eléctricas atmosféricas son fenómenos naturales que han motivado el interés del hombre desde su antigüedad. Han sido diferentes las motivaciones o éstas con el paso del tiempo se han ampliado y la necesidad de conocer este fenómeno a obligado al hombre a estudiarlo y cada día conocerlo mejor hasta acumular un conocimiento del mismo, que al menos aunque no evitarlo, ni prever sus efectos al 100%, sí permite hoy en día lograr prevenir un alto porcentaje de sus efectos nocivos.

Las descargas eléctricas atmosféricas tienen por naturaleza funciones de mucha utilidad, como a través de sus impactos, han ardiado por milenios los bosques secos y la tierra con el abono orgánico producto de estos siniestros, se ha enriquecido nuevamente y restablecido sus potencialidades. Las descargas eléctricas atmosféricas son regeneradoras del ozono en la atmósfera y de esta forma y por su ocurrencia tan grande cada minuto de la vida, son uno de los elementos naturales que ayudan a mantener esta tan importante protección de nuestro planeta.

Pero a su vez, son causas de situaciones devastadoras de destrucción de bienes materiales y daños e inclusive muerte de animales y personas.

Es realmente sorprendente, gracias a los modernos métodos de detección satelital, poder contar hoy, con una exacta estadística de ocurrencias de las descargas y es también posible poder clasificar las descargas por su tipo y magnitud y conocer un sin número de datos de que permiten estudiarlas mejor.

Una de las motivaciones para que el hombre emprendiera ese control y estudio de las descargas eléctricas atmosféricas ha sido la creciente necesidad de tener la adecuada protección, no sólo contra su golpe directo y devastador, sino contra sus efectos secundarios.



1.2. Formación de las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas son fenómenos naturales que obedecen a leyes imprevisibles y no muy bien conocidas aún. A continuación se analizarán brevemente los diferentes tipos de nubes.

1.2.1. Tipos de nubes

Las nubes están constituidas por gotas minúsculas de agua, por copos de nieve y por pequeño cristales de hielo, según la temperatura del nivel atmosférico donde se encuentren. Existen cuatro tipos principales de nubes: **cirros, estratos, nimbos y cúmulos**.

De la combinación de estos tipos fundamentales se derivan las designaciones de otros tipos compuestos. Ver Figura 1.1.

Los cirros (del latín rizos) son nubes formadas por pequeñísimos cristales de hielo. Aparecen a alturas de más de 8 km y tienen el aspecto de filamentos.

Los estratos son nubes bajas, horizontales que se observan principalmente de noche y pueden indicar la proximidad de lluvias. Deben su nombre a que parecen formadas por capas.

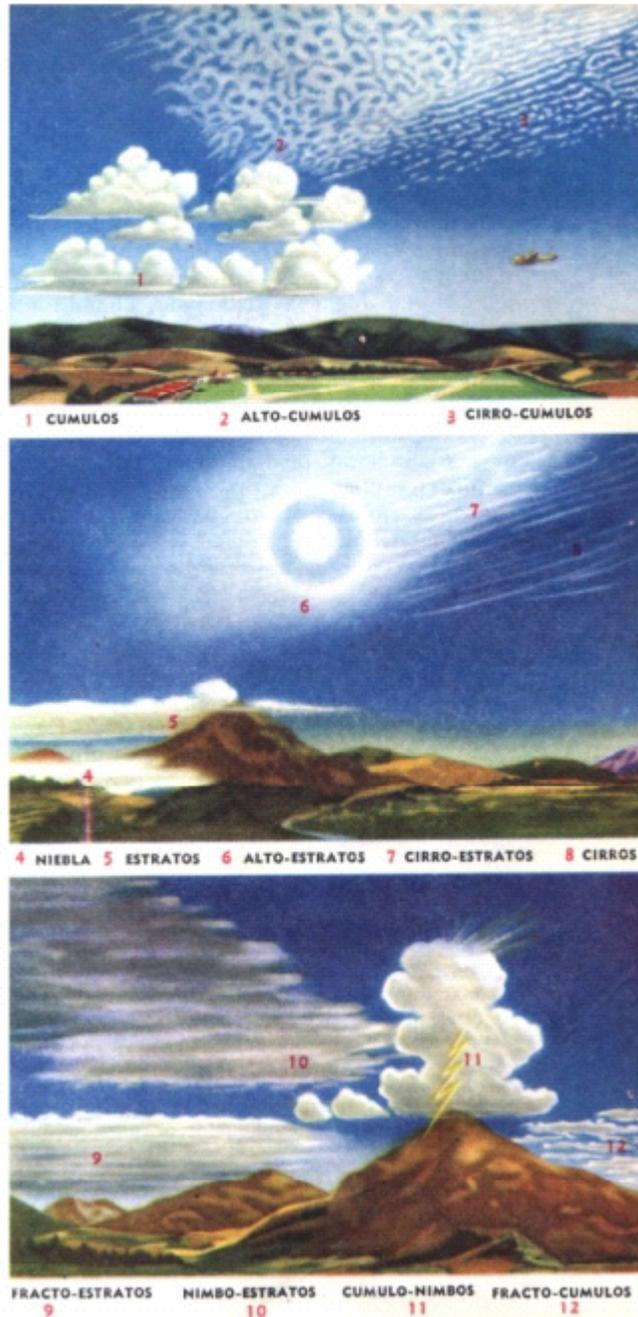
Los nimbos son nubes más bien grises que vienen acompañadas de lluvias y nevadas. Son las nubes que "nublan el cielo" a veces varios días.

Los cúmulos (del latín montón) son nubes de bases planas y macizas, a las que también se les conoce como "balas de algodón". Se forman por las corrientes ascendentes de aire durante el día, especialmente en el verano. Son estas las nubes que producen la mayoría de las turbonadas y descargas atmosféricas, cuando se convierten en **cúmulos-nimbos**. La base de estas nubes, raras veces dista de la superficie de la tierra y los mares, a más de 1 km como promedio.

1.2.2. Estructura eléctrica de las nubes de tormenta

Sobre la formación y concentración de las cargas eléctricas en las nubes se han formulado numerosas teorías. Una de ellas, *Teoría de Simpson*, confirma que el fenómeno de las descargas atmosféricas se debe a la acumulación, en el interior de las nubes, de gotas de agua en estado de vapor, las cuales quedan cargadas eléctricamente.

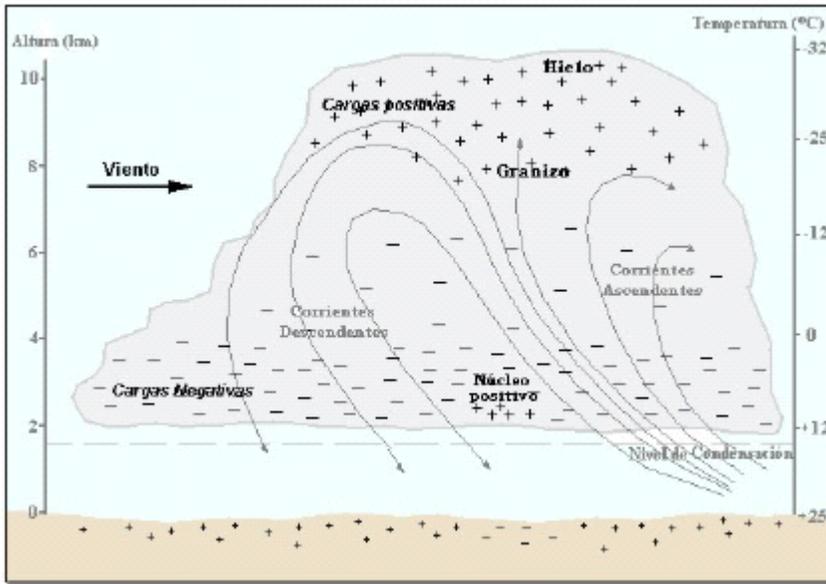
Fig. No 1-1 Tipos de nubes



En la base de las nubes **cúmulos-nimbos** se forman pequeñas gotas de agua condensadas que ganan altura debido a las corrientes ascendentes de humedad. Al llegar a la parte superior de la nube, dichas gotas se convierten en granizos (gotas de agua en estado sólido) por las bajas temperaturas en estas zonas.

Estos granizos comienzan a descender por las corrientes descendentes dentro de la nube. En su recorrido, los granizos tienen múltiples colisiones con las gotas de agua condensadas que ascienden, producto de lo cual se acumulan en la parte inferior de las nubes las cargas negativas, con un pequeño núcleo de cargas positivas. De esta forma la parte superior de la nube queda cargada positivamente. Ver Figura 1.2.

Fig. I.2 Estructura eléctrica de las nubes de tormenta



Como se puede analizar, la estructura eléctrica de las nubes de tormentas son similares a un doble dipolo PN-P. Comportándose la nube como un gran acumulador de carga eléctrica.

1.2.3. Tipos de descargas

Las descargas atmosféricas son procesos transitorios, con una alta corriente de descarga, y cuyo recorrido alcanza varios kilómetros. Más de la mitad de las descargas ocurren completamente dentro de las nubes y se les conocen como descargas intranubes (DIN). Las descargas de *nube a tierra* (DNT) han sido estudiadas con mayor detenimiento por su importancia práctica (peligro para las personas y las instalaciones, daños y disturbios a las comunicaciones, producción de incendios y otros.). Las descargas entre nubes (DNN) y de nubes aire (DNA) ocurren con menos frecuencia y no tienen muchas implicaciones en la vida del hombre.

Fig. I.3 -a

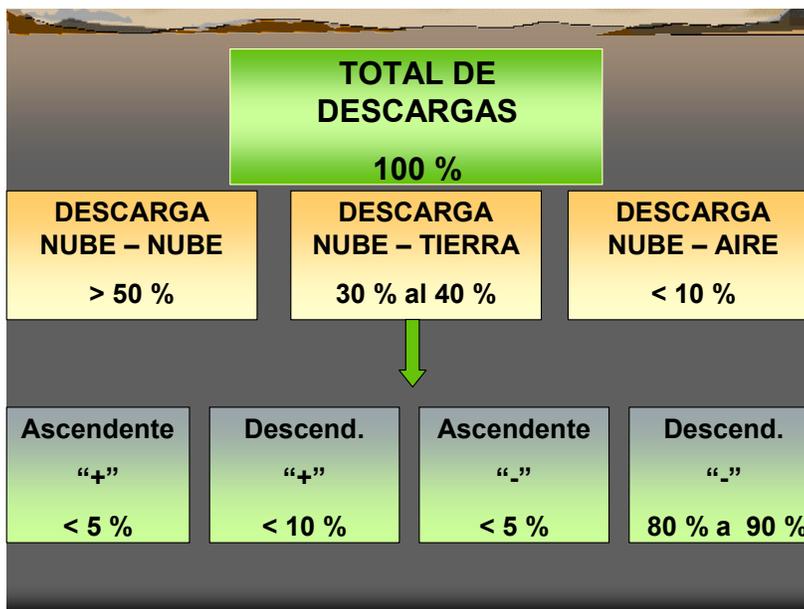
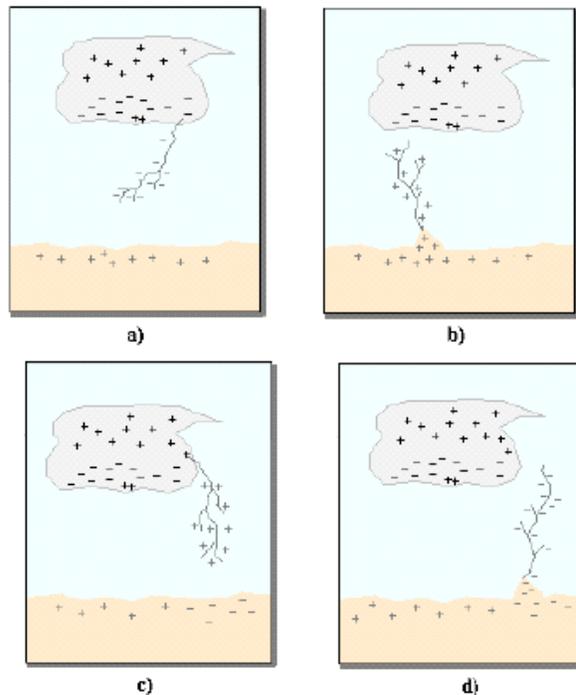


Fig1.3-b Distribución de cargas y clasificación de las descargas entre nube y tierra



- a) Trazador descendente negativo b) Trazador ascendente positivo**
c) Trazador descendente positivo d) Trazador ascendente negativo

Existen cuatro tipos diferentes de descargas (*DNT*), las cuales se identifican por la forma como se inicia la descarga. Cerca del 90 % de éstas se inician por un trazador descendente negativo (ver figura 1.3 .a), mientras que menos de un 10 % de las descargas se inician con un trazador descendente positivo (ver figura 1.3.c). Las descargas DNT también pueden iniciarse por trazadores ascendentes desde la tierra, (figura 1.3b y 1.3d), pero ocurren raras veces y en estos casos los trazadores se originan desde picos de montañas, elevaciones o estructuras construidas por el hombre.

En la siguiente tabla se muestran las magnitudes fundamentales del rayo:

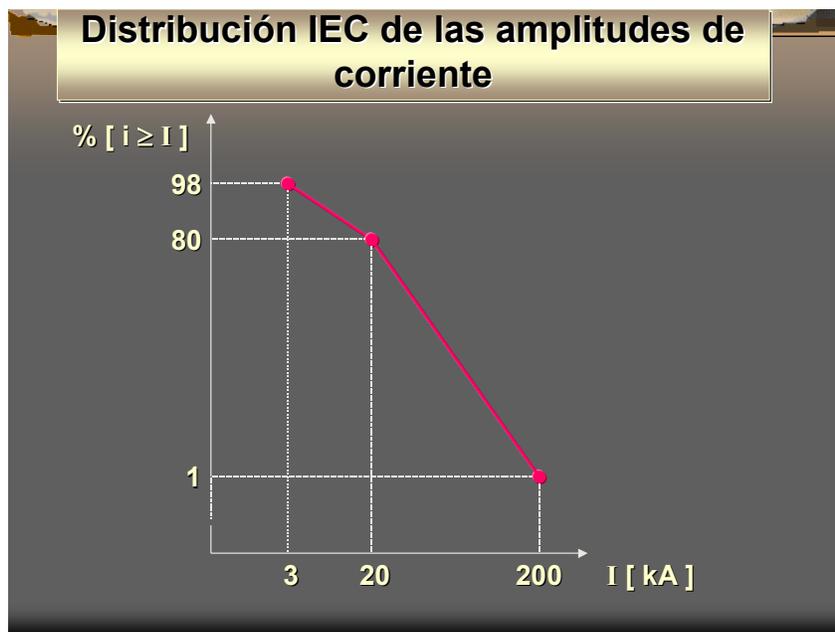
Tabla 1.1 Magnitudes fundamentales del rayo

Símbolo	Parámetros	90% Ipico	50% Ipico	Máxima observ.	No de observ.
I_M	Corriente de pico	2 – 8 kA	10 – 25 kA	230 kA	4150
dI/dt	Pendiente de frente de corriente medido entre 0.1 y 0.9 del valor pico.	2 kA/ μ seg.	8 kA/ μ seg.	50 kA/seg.	40
	Corriente de cola	60 A	250 A	1450 A	
	Duración total de las descargas del trueno.	0.01 – 0.1 seg	0.1 – 0.3 seg.	1.5 seg.	100
	Duración de una sola descarga	0.1 – 0.6 mseg.	0.5 – 3 mseg.	400 mseg.	150
	Intervalo de tiempo entre dos descargas sucesivas.	5 – 10 mseg.	30 – 40 mseg.	500 mseg.	525
T_H	Intervalo de tiempo entre el inicio y el valor medio en recaida de la corriente pico.	10 – 25 μ seg.	28 – 42 μ seg.	120 μ seg.	425
T_M	Tiempo de subida.	0.3 – 2 μ seg.	1 – 4 μ seg.	10 μ seg.	45
	Número de pulsos por descarga	1 - 2	2 - 4	34	500

La siguiente curva de la Fig. 1.4 ofrecida por la IEC brinda la forma promedio con la que se comportan las descargas, de ella es significativo ver que descargas de valores de 200 kA son extremadamente escasas 1% o menores y que además, estas grandes descargas están normalmente asociadas a los lugares donde la incidencia de los días tormentas al año es muy preponderante y la ocurrencia de rayos también.

Expresándolo de otra forma, en lugares de un bajo nivel isocerámico es extremadamente difícil que caiga un rayo de estas magnitudes, aunque nada prescribe que no pueda ocurrir.

Fig1.4



Pero estas curvas no responden a lugares tropicales, son provenientes de zonas no tropicales

Algunos aspectos importantes a considerar referente a la magnitud de la corriente del rayo

La hipótesis de la variación temporal de los parámetros del rayo se fundamenta en los principios científicos, planteados por C.T.R Wilson en 1920 y Whippel en 1929, sobre el Circuito Eléctrico Global y la contribución dominante, por una superposición de efectos, de las tres mayores zona de convección profunda tropical del planeta: Sur América Tropical, Centro de África y el continente Marítimo (Sureste de Asia y Australia).

El planteamiento, por tanto, de que sobre el planeta existe una distribución no uniforme de la actividad eléctrica atmosférica, al clasificar las zonas de convección profunda tropical como las de mayor actividad, data de principios del siglo pasado. **Sin embargo, cuando los investigadores infirieron los parámetros del rayo para su uso en ingeniería, generalizaron los datos de mediciones locales de latitudes norte para todo el planeta.**

La actividad eléctrica atmosférica y en consecuencia los parámetros de la descarga no pueden ser inferidos globalmente para todas las regiones del planeta por mediciones realizadas en una parte de éste.

Las diferentes regiones del mundo tienen distintas actividades eléctricas, los parámetros del rayo no son necesariamente iguales, de hecho no lo son, en países de climas templados que en países tropicales y normalmente se asocian las mayores corrientes de retorno de los

rayos , a aquellas zonas donde la incidencia de actividad eléctrica es mayor o sea, donde los niveles ceráunicos son superiores.

Los parámetros de amplitud de la corriente de retorno del rayo (*Lightning Peak Current Amplitude*) y su forma de onda son los más importantes para aplicaciones en ingeniería.

La descarga de retorno es la etapa del fenómeno que tiene mayor aplicación en la ingeniería del diseño y protección de sistemas eléctricos y electrónicos, ya que presenta las mayores magnitudes de corriente eléctrica entre el centro de carga de la nube y tierra. Además, es el suceso óptico más brillante y visible del rayo, donde se produce el mayor calentamiento del canal (aprox. 28 000°C) generando un fuerte gradiente térmico entre éste y el aire que lo circunda, produciendo la onda de choque que normalmente se escucha en una tormenta y que se conoce como trueno.

La descarga de retorno tiene un espectro electromagnético típico, el cual se usa en los sistemas de medición y localización. La amplitud de la corriente de retorno del rayo puede ser estimada mediante mediciones indirectas, o a través de mediciones directas.

Las mediciones indirectas involucran la inferencia del valor pico de la corriente a partir de las mediciones de los campos eléctricos y magnéticos de la descarga. El método más común es el empleado en los Sistemas de Detección y Localización de rayos y consiste en medir los campos eléctricos y magnéticos radiados por la descarga de retorno. Las formas de onda de interés están en el rango de las altas y las muy altas frecuencias y se registran, en ocasiones, a cientos de kilómetros.

Las mediciones directas de la corriente del rayo se han realizado por instrumentos colocados en las torres de transmisión, por impactos en estructuras o cercanos a ellas, por estaciones de mediciones directas como la de Canadá, Alemania, Sudáfrica, Suiza, Brasil y Colombia y estaciones como la de Alabama y la Florida que tienen colocados instrumentos asociados a cohetes iniciadores de rayo.

Existe un grupo limitado de mediciones directas de la distribución del pico de corriente puesto que los experimentos resultan difíciles de efectuar. Las obtenidas por la utilización de cohetes iniciadores de rayos estiman adecuadamente el pico de las descargas consecutivas pero no dan información sobre la corriente del primer golpe.

Ambos métodos de medición presentan varias limitaciones prácticas. Aunque, las mediciones directas de la corriente del rayo son la mejor fuente de datos que se tiene hasta la actualidad.

Una distribución, obtenida desde mediciones directas, ampliamente difundida en la literatura y aplicada a los estudios de protección contra rayos de los sistemas eléctricos es la debida a R.B. Anderson y A.J. Eriksson (1978). Constituye una adecuación de la distribución de Popolansky, tomando mediciones realizadas en torres hasta de 60 m de altura.

Esta versión es una distribución log-normal. En este caso $I_m = 31 \text{ kA}$ y $\sigma_{\text{Log } I_r} = 0.32$.

La ecuación práctica que representa la distribución es la siguiente:

$$P(I_r) = \frac{1.0}{1.0 + \left(\frac{I_r}{I_m}\right)^{bc}}$$

Donde:

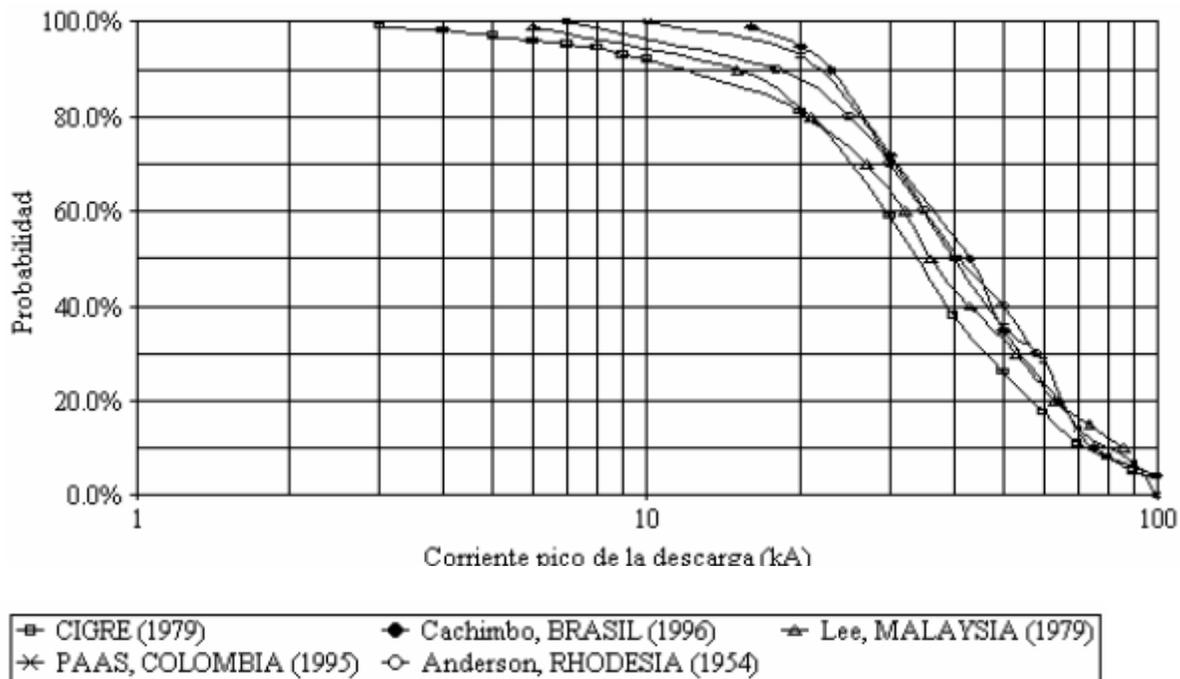
P (Ir): Probabilidad de que cualquier rayo exceda la magnitud de corriente Ir.

Ir: Magnitud de la corriente del rayo en kA.

Im (31 KA): Mediana de la distribución.

Esta distribución, ampliamente difundida, para estimar la magnitud de corriente de la descarga principal corresponde a investigaciones realizadas en Suiza, Polonia, Suecia, Noruega, Gran Bretaña, Australia y EUA (regiones de latitud norte). Y por tanto en países de latitudes no tropicales. Su utilización en Cuba y otros países tropicales, puede conducir a serios errores en los diseños de protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

A continuación le exponemos otras mediciones realizadas en zonas tropicales que arroja una distribución relativamente uniforme y que de hecho nos puede servir mejor a los efectos de asumir criterios en la mayoría de nuestros países latinos.



Los valores picos en estas distribuciones son mayores a los obtenidos en latitudes norte.

Los parámetros de distribución log-normal de las curvas de corriente de retorno del rayo mostradas en la figura se dan en la tabla siguiente

Parámetros de distribución log-normal para cada una de las curvas de corriente de retorno del rayo.

Parámetros	Cigre	Brasil	Malasia	Colombia	Rodesia
Media (kA)	34.8	46.7	41.4	52.4	33
Mediana (kA)	20	43	36	50	32.5
$\sigma \ln I$	1.22	0.63	0.78	0.75	0.67

Los estudios reportados en Colombia, Brasil, Malasia, Rodesia reportan aproximadamente una probabilidad del 50 % de que las corrientes del rayo superen los 40 kA, en zonas tropicales. El 25 % sobrepasa los 60 kA, o sea, la curva de la Figura 1-4 en este caso sufriría ciertas variaciones que habría que adecuar a nuestro entorno.

A la hora de clasificar la forma de la componente de impulso, las normas ANSI/IEEE C62.41 y la IEC 61312 asumen diferentes consideraciones.

La ANSI/IEEE C62.41 cuando define las formas de onda características para pruebas no diferencia entre eventos de maniobra y eventos debidos a rayos y establece para sus diseños una forma de onda de 8/20 μ s lo que significa que la magnitud de corriente aumentará al 90 % de su valor pico en 8 μ s y luego caerá a un valor medio en 20 μ s, ver figura 1.17a. Por la ANSI/IEEE C62.41 el peor caso de un impacto directo de rayo podría inducir 100 kA con forma de onda 8/20 μ s de energía, en una fase de corriente alterna

El rayo no solo consiste en una corriente de impulso de valores elevados sino que también debido a las descargas sucesivas, tiene un contenido energético considerable. Se ha observado que la forma de onda de 8/20 μ s no simula los efectos de corriente continua asociados al evento del rayo. A diferencia de la forma de onda 8/20 μ s, la forma de onda 10/350 μ s incorpora un tiempo de ascenso rápido con un relativo largo tiempo de cola, lo cual la hace más representativa de un evento tipo rayo. La forma de onda 10/350 μ s alcanza el 90 % de su valor pico en 10 μ s y cae a la mitad de su valor en 350 μ s, ver figura 1.17b.

Estos factores antes mencionados son los que determinan sobre los protocolos de fabricación de los descargadores o supresores de sobrevoltajes transitorios conducidos, dependiendo de la filosofía europea y la filosofía norteamericana, lo cual estudiaremos más adelante, una de las razones más poderosas para no mezclarlos a la hora de su coordinación energética.

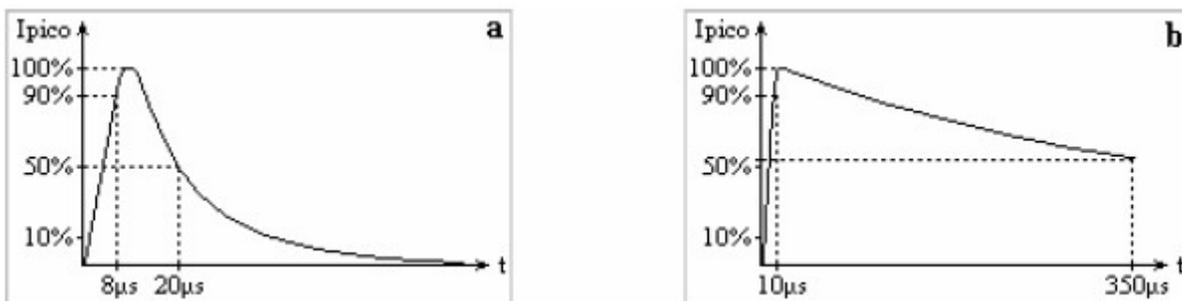


Figura 1.17 Formas de onda de corriente de impulso más utilizadas.

Muchos fabricantes de dispositivos de protección interna indican altas corrientes pico de impulso como una medida de confiabilidad o esperanza de vida del mismo.

La corriente pico de impulso es sólo un elemento que fija la robustez de un dispositivo de protección interna, el tiempo de duración de la prueba de corriente de impulso y el nivel de tensión de protección son indicadores adicionales de qué tan bien maneja la energía de un rayo un dispositivo de protección interna.

Es necesario considerar entonces que para eventos relacionados con el impacto directo de un rayo se utilice una forma de onda de 10/350 μ s y la forma de onda 8/20 μ s se utilice para representar maniobras en la red o efectos de una descarga atmosférica lejana.

Particularmente para Cuba, esto es un aspecto fundamental teniendo en cuenta la inferencia de que se somete a valores severos de la corriente del rayo.

TIPOS DE DAÑOS

La descarga del rayo puede causar daños en dependencia de las características del objeto que se va a proteger (tipo de construcción, contenido y aplicación, tipo de servicio y medidas de protección aplicadas). Estos se clasifican en:

D1: Daños a los seres vivos. (debido a las tensiones de contacto y de paso)

D2: Daños físicos. (debido a los efectos mecánicos, térmicos, químicos y de explosión)

D3: Fallos de los sistemas eléctricos y electrónicos. (debido a los efectos electromagnéticos)

TIPOS DE PÉRDIDA

Cada tipo de daño y combinaciones de ellos pueden producir una pérdida resultante. El tipo de pérdida que puede ocurrir depende de las características del propio objeto y de su contenido, y se clasifican como:

Edificaciones:

L1: Pérdida de vidas humanas.

L2: Pérdida del servicio público.

L3: Pérdida del patrimonio cultural.

L4: Pérdida del valor económico (la edificación y su contenido, el servicio y la pérdida de la actividad).

Servicios:

L' 2: Pérdida del servicio público.

L' 4: Pérdida del valor económico.

TIPOS DE RIESGO

El riesgo R es el valor de una pérdida anual promedio probable. Estos se definen para una edificación y para un servicio como sigue:

Edificaciones:

R1: Riesgo de pérdida de vidas humanas.

R2: Riesgo de pérdida del servicio público.

R3: Riesgo de pérdida del patrimonio cultural.

R4: Riesgo de pérdida del valor económico.

Servicios:

R'2: Riesgo de pérdida del servicio público.

R'4: Riesgo de pérdida del valor económico.

Para evaluar los riesgos R1, R2, R3, y R4 para edificaciones y R'2 y R'4 para servicios, se definirán y calcularán los componentes pertinentes del riesgo (riesgos parciales que dependen de la fuente y del tipo de daño).

La metodología asociada a estos criterios es en extremo tediosa y difícil de manejar, pero en la mayoría de los casos donde no se requieran exigencias extremas, existe un "Software de cálculo de riesgos", que nos permite una evaluación bastante fiel, (aunque no con la exactitud que aportaría la aplicación tácita de la metodología y todas sus aristas), pero sin necesidad de desgastarnos en los laberintos de esa aplicación, obtenemos resultados de aceptable precisión. Este programa lo adjuntaremos al material entregado.

La siguiente lámina representa la hoja principal de dicho programa de muy fácil aplicación y que nos ofrece una evolución del riesgo a que nuestra instalación está sometida, con este dato y la aplicación de la metodología evaluativa de los niveles de protección determinamos la necesidad o no de proteger, en caso afirmativo de que se requiera proteger y el nivel de protección que se demande, se aplicarán los métodos de diseño adecuados.

IEC Risk Assessment Calculator - Version 1.0.3
 Fichero Opciones Librería Ayuda

<p>Dimensiones de la estructura:</p> <p>Longitud de la estructura (m): 20</p> <p>Anchura de la estructura (m): 20</p> <p>Altura del plano del tejado (m)*: 40</p> <p>Altura del mayor saliente del tejado (m)*: 40</p> <p>* Medido desde la tierra</p> <p>Área de colección (m2): 55,239 m2</p>	<p>Líneas de conducción eléctrica:</p> <p>Línea eléctrica:</p> <p>Línea que llega a la estructura: Cable enterrado</p> <p>Tipo de cable externo: No apantallado</p> <p>Existencia de transformador MT/BT: Sin transformador</p> <p>Otros servicios aéreos:</p> <p>Número de servicios conducidos: 0</p> <p>Tipo de cable externo: No apantallado</p> <p>Otros servicios enterrados:</p> <p>Número de servicios conducidos: 0</p> <p>Tipo de cable externo: No apantallado</p>	<p>Tipos de las pérdidas:</p> <p>Tipo 1 - Pérdidas de vidas humanas:</p> <p>Riesgos especiales para la vida: Problemas de ev.</p> <p>Por incendios: Comercios, coleg</p> <p>Por sobretensiones: No aplica</p> <p>Tipo 2 - Pérdidas de servicios esenciales:</p> <p>Por incendios: No hay servici</p> <p>Por sobretensiones: No hay servici</p> <p>Tipo 3 - Pérdidas de patrimonio cultural:</p> <p>Por incendios: Sin valor histó</p> <p>Tipo 4 - Pérdidas económicas:</p> <p>Riesgos económicos especiales: Sin riesgos espe</p> <p>Por incendios: Propiedad come</p> <p>Por sobretensiones: Iglesia, prisión, z</p> <p>Por tensión de paso/contacto: Ganado en el int</p> <p>Riesgo tolerable de pérd. económ.: 1 en 1000 años</p>
<p>Características de la estructura:</p> <p>Riesgo de incendio y daños físicos: Normal</p> <p>Eficacia del apantallamiento: Media</p> <p>Tipo de cableado interno: No apantallado</p>	<p>Medidas de protección:</p> <p>Clase de SPCR: Nivel IV</p> <p>Protección contra incendios: Sin medidas</p> <p>Protección contra sobretensiones: Sin protección</p>	
<p>Influencias ambientales:</p> <p>Situación respecto a los alrededores: Estructura aislada</p> <p>Factor ambiental: Urbano</p> <p>Nº de días de tormenta: 30 days/year</p> <p>Densidad anual equivalente de rayos: 3.0 flashes/km2</p> <p>Ver mapa isocerámico: Ver Mapa</p>		

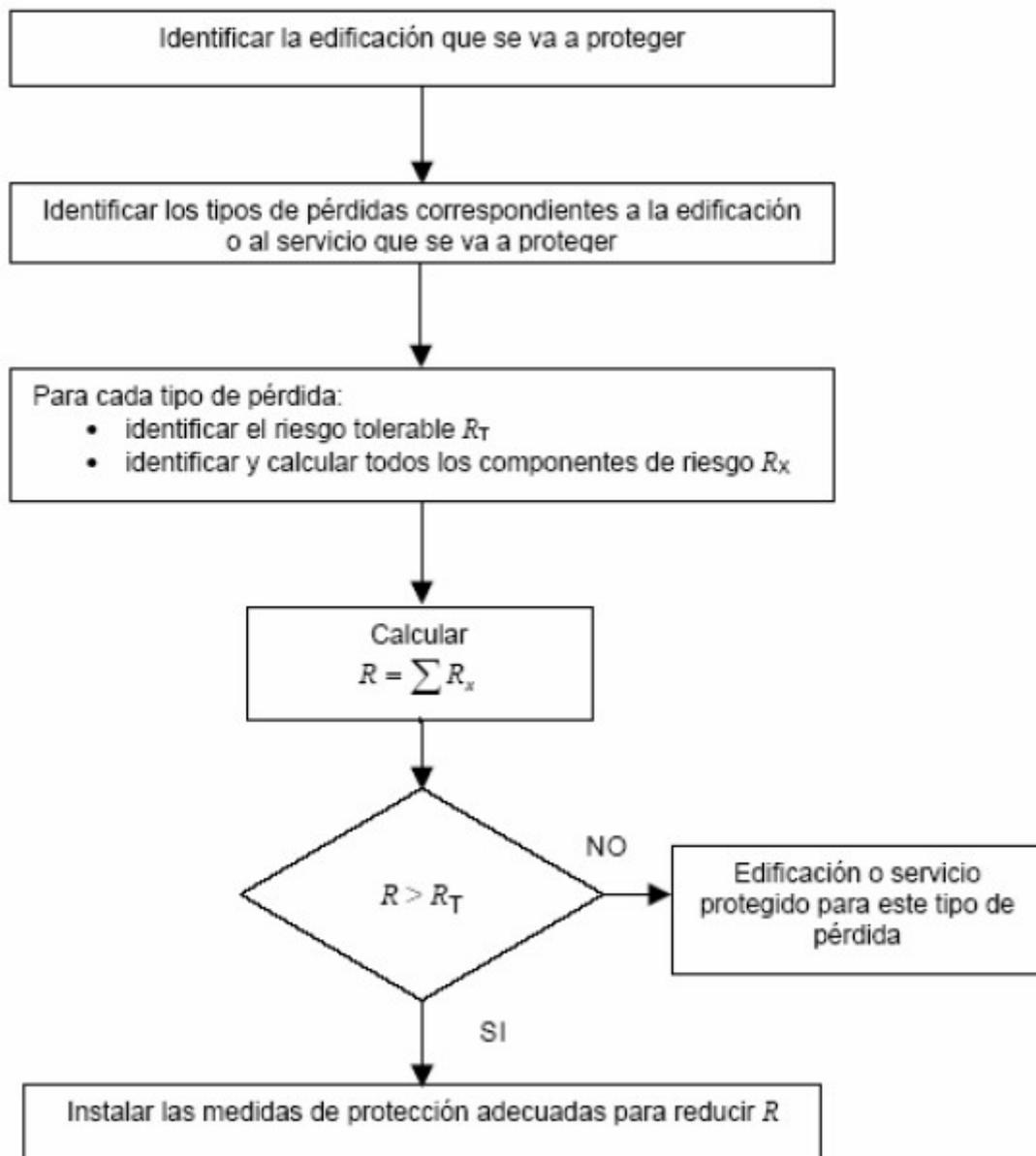
Riesgos calculados:

Riesgo: ... Riesgo imp. ... Riesgo imp. ... Riesgo ...

Este cálculo del índice de riesgo pretende orientar en el análisis de criterios que determinan el riesgo.

Inicio Adobe Reader 8.1 Microsoft Office ... Microsoft PowerPoint ... IEC Risk Assessment ... 1:28

PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA NECESIDAD DE PROTECCIÓN



LPS EN ESTRUCTURAS NUEVAS Y EN ESTRUCTURAS EXISTENTES

El LPS integrado a una nueva estructura, permite:

- Considerar el tipo y la localización del LPS en el diseño inicial.
- Aprovechamiento de las partes conductoras de la estructura.
- Facilidad de construcción.
- Mejoramiento del aspecto estético.
- Mayor efectividad de la protección.
- Minimizar costos y esfuerzos.

El LPS añadido a una estructura existente, trae consigo:

- Mayores costos y esfuerzo para asegurar la conformidad con la norma.
- Adaptación del tipo y la localización del LPS a las características de la estructura

LPS EXTERNO

FUNCIONES Y COMPOSICIÓN

- Interceptar las descargas directas de rayo a la estructura, incluyendo las descargas laterales mediante un **SISTEMA DE CAPTURA**.
- Conducir de manera segura la corriente del rayo desde el punto de impacto hasta tierra mediante un **SISTEMA DE DERIVADORES**.
- Dispersar la corriente del rayo en el terreno sin causar daños térmicos o mecánicos ni chispas peligrosas que puedan iniciar fuego o explosión mediante un **SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

El LPS Externo puede ser:

- **NO AISLADO:** Generalmente está unido a la estructura a proteger.
- **AISLADO:** Se conecta únicamente a los elementos estructurales y a la red de unión equipotencial a nivel del terreno. Se usa cuando los efectos térmicos y de explosión en el punto de impacto o en los conductores que llevan la corriente del rayo, pueden causar daño a la estructura y su contenido.

Ejemplos de estructuras donde se aplica el LPS Externo Aislado:

- Con cubierta combustible.
- Con paredes combustibles.
- En áreas con riesgo de incendio o explosión.
- Donde se prevean cambios en la estructura, el contenido o el uso, que impliquen modificaciones al LPS.

1-3. Efectos de las descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas producen varios efectos que repercuten sobre la vida del hombre, para su mejor comprensión primeramente se estudiarán los efectos generales que estas producen y luego, cómo se evidencian sobre las instalaciones, las líneas aéreas, las líneas soterradas y sobre los seres vivos.

El rayo es esencialmente una descarga eléctrica cuya energía se transforma, total o parcialmente en calor. Los fenómenos de origen térmico son los más importantes entre los que se manifiestan en una descarga directa y son los que generalmente producen mayores daños.

1.3.1. Efectos generales

Las descargas atmosféricas producen varios efectos de carácter general, ellos se pueden clasificar en:

- Térmicos.
- Eléctricos.
- Dinámicos.
- Acústicos.
- Químicos

1.3.1.1. Efectos térmicos

El rayo es esencialmente una descarga eléctrica cuya energía se transforma, total o parcialmente en calor. Los fenómenos de origen térmico son los más importantes entre los que se manifiestan en una descarga directa y son los que generalmente producen mayores daños.

Calentamiento de partes conductoras

En un conductor de resistencia R, recorrido por una corriente de rayo $I = f(t)$, se disipa una energía igual a:

$$W = R \cdot \int I^2(t) dt \approx R \cdot I_M^2 \frac{T_H}{1.4}$$

[1.1]

La brevedad del fenómeno hace que se pueda considerar la transformación de la energía en calor como **adiabática**, del cual resulta un calentamiento según:

$$A = \frac{K \cdot \rho}{S^2 \cdot c \cdot d} \int I^2(t) dt \approx \frac{K \cdot \rho}{S^2 \cdot c \cdot d} I_M^2 \frac{T_H}{1.4}$$

[1.2]

Donde:

ρ --- Resistividad del terreno; (Ω -m).

S --- Sección de la parte conductora por donde circula la corriente del rayo; (m²).

c --- Capacidad térmica del material conductor; (J / kg K).

d --- Masa volumétrica del material conductor; (kg /m³).

K --- Coeficiente de correlación que toma en cuenta, entre otros el efecto pelicular.

A --- Calentamiento resultante en el material conductor; (A²s/mm⁴).

Valores característicos de los materiales por donde frecuentemente circula la corriente producida por las descargas:

Tabla 1.2

Material conductor	c (J/kgK)	d (kg/m ³)	K
Cobre	380	8.96 x 10 ³	0.017 x 10 ⁶
Hierro	437	7.90 x 10 ³	0.098 x 10 ⁶

Este calentamiento se traduce en un incremento de la temperatura del material conductor. Si el incremento de ella es demasiado importante puede provocar la fusión del conductor. Normalmente, para una descarga de valor pico igual a 300 kA y valor medio en su recaída igual a 200 μs, la elevación de temperatura en un conductor de 60 mm² de sección será del orden de 20 – 50°C para el cobre y de 20 - 140°C para el hierro. Estos valores son perfectamente admisibles y no justifican el empleo de mayores secciones.

Perforación de una superficie

Este efecto se produce en el punto de impacto del rayo sobre una superficie metálica o cuando la corriente del rayo encuentra discontinuidades de resistencia.

La energía disipada será:

$$W = u \cdot \int Idt = u \cdot q$$

[1.3]

Donde:

u --- Caída de voltaje en la superficie; (V).

q --- Carga del rayo; (coulomb).

Esta energía vaporiza el material formando un hueco cuyo diámetro depende del espesor. Cuando la superficie golpeada es mala conductora eléctrica, los efectos son mucho más importantes.

Destrucción de los materiales no conductores

El efecto térmico producido en las artes por donde circula la descarga es mucho más importante y puede provocar la combustión en el caso de los materiales inflamables. Sin llegar a la combustión por este efecto, si el material heterogéneo presenta zonas de humedad (postes de madera, árboles y otros) al evaporarse, estas zonas pueden crear estallidos.

1.3.1.2 Efectos eléctricos

Los efectos eléctricos de las descargas atmosféricas se expresan fundamentalmente en forma de sobretensiones, cuyas causas asociadas con este fenómeno son:

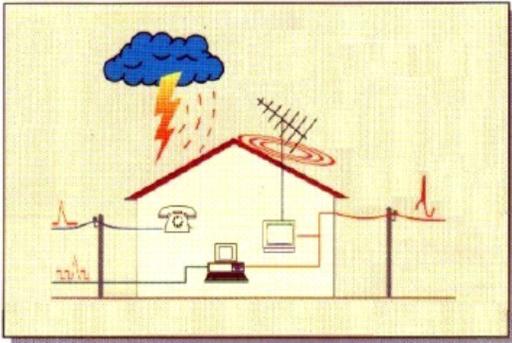
- El paso de una gran corriente en un medio resistivo y/o inductivo.
- La inducción electromagnética.

La descarga de un rayo sobre cualquier conductor, tanto en las líneas eléctricas, como en líneas de datos, provoca transitorios que se caracterizan por su corta duración, crecimiento rápido y valores de cresta elevados (varios centenares de kV).

Esta descargas se propagan en un radio de varios kilómetros y su dispersión en la tierra eleva su potencial, induciendo fuertes sobretensiones en los cables soterrados y aumentando la tensión de las tomas de tierra.

Las sobretensiones pueden acceder a los sistemas de una instalación por las formas mostradas en la figura siguiente:

Figura 1. 5 Formas de acceso de las sobretensiones

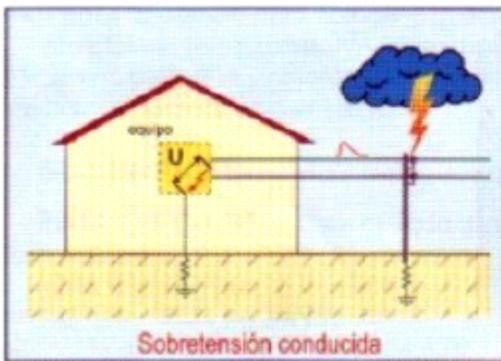


1. Las líneas de alimentación eléctrica.
2. Las líneas de transmisión de datos (telefónica e informática).
3. Las líneas de alta frecuencia (antenas).
4. Los conductores de conexión a tierra.

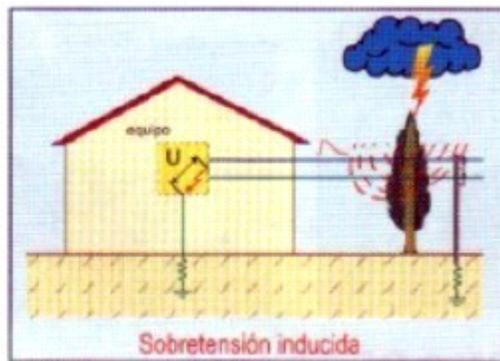
Las sobretensiones producidas por fenómenos atmosféricos llegan hasta la instalación de tres formas fundamentales, ver Fig. 1-5:

- a- Sobretensiones conducidas.
- b- Sobretensiones inducidas.
- c- Aumento del potencial a tierra.

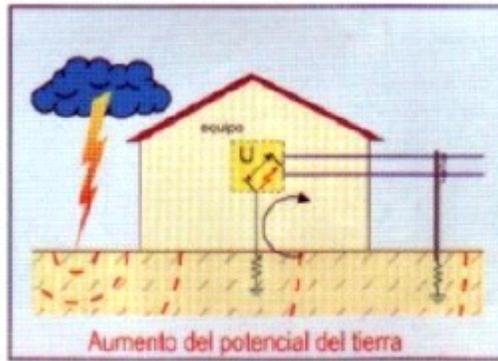
Fig. 1-6 Tipos de sobretensiones producidos por la corriente del rayo. **a)** Conducido, **b)** Inducido, **c)** Aumento del potencial de tierra.



a)



b)



c)

Sobretensión conducida: El rayo puede caer directamente en las líneas aéreas propagándose la onda escarpada de voltaje a lo largo de varios kilómetros. Llega al consumidor y se deriva a tierra a través de sus equipos produciéndoles averías o su total destrucción.

Sobretensión inducida: La radiación emitida por el impacto del rayo sobre un objeto (poste, árbol, pararrayos u otros) próximo a la línea eléctrica o de transmisión de datos, induce corrientes transitorias en éstas, transmitiéndolas al interior de las instalaciones. Ello puede provocar averías o destrucción de los equipos conectados a estas líneas. Vea las sobretensiones por inducción electromagnética.

Sobretensiones producidas por inducción electromagnética

Las descargas atmosféricas, aún cuando se producen alejadas de las instalaciones, e incluso las descargas entre nubes, pueden producir sobretensiones inducidos electromagnéticamente con efectos significativos.

Estas descargas se comportan como un emisor de radiaciones electromagnéticas cuyo espectro se extiende desde muy baja frecuencia hasta los 1000 MHz y es causa de perturbaciones a las transmisiones radioeléctricas. Por otra parte, las descargas atmosféricas ocasionan una amplitud máxima al campo eléctrico que puede alcanzar 300 V/cm/kA a 30 m de distancia. Si el valor de este campo sobrepasa el gradiente disruptivo del aire (3–5 kV/cm), ocurrirá un arco de ruptura, por ejemplo: entre dos conductores, uno referido a tierra y el otro aislado.

1.3.1.3 Efectos dinámicos

A la hora de analizar los efectos dinámicos producidos por las descargas atmosféricas es preciso diferenciar entre:

- Los efectos dinámicos directos (producidos por la descarga).
- Los indirectos (provocados por la onda de presión).

Fuerzas electrodinámicas

El canal del rayo o cualquier conductor recorrido por la corriente del rayo, creará un campo electromagnético, cuya componente magnética desarrollará en los conductores vecinos una fuerza electromagnética. Esta fuerza, despreciable generalmente en las aplicaciones electrotécnicas, se convierte en importante generadora de grandes estragos cuando la corriente en juego es del orden de las desarrolladas por el rayo. Se consideran muy en particular dos casos:

- Conductores paralelos.
- Conductores acodados.

Fuerza de interacción entre dos conductores paralelos recorridos por fracciones de la corriente del rayo

Estas fuerzas se ponen de manifiesto, fundamentalmente, entre los **bajantes** del sistema de pararrayos y partes conductoras paralelas a ellos. La magnitud de estas fuerzas está dada por la expresión:

$$F = \frac{2,04 \cdot I \cdot I' \cdot l \cdot 10^{-8}}{a} \quad [1.4]$$

Nota: Esta expresión es válida considerando una permeabilidad del vacío de

$$\mu_v = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

y una permeabilidad relativa del aire de

$$\mu_r = 1.02$$

Donde:

F --- Fuerza electrodinámica entre las partes conductoras; (kgf).

l --- Longitud entre los dispositivos que soportan o fijan a las partes conductoras; (m).

a --- Distancia entre los ejes longitudinales de los conductores; (m).

I, I' -- Corrientes que circula por las partes conductoras paralelas; (A).

El sentido de esta fuerza resulta, generalmente, de atracción ya que el sentido de circulación de las corrientes coincide.

Fuerza de interacción que se ejercen entre las diferentes partes de un conductor acodado y recorrido por la corriente del rayo

Las fuerzas mutuas que ejercen entre sí las partes del conductor en la vecindad de un codo son tanto más importantes cuanto más cerca se sitúan de este codo (teóricamente infinita para un codo de radio nulo), surgen fuerzas de repulsión importantes en las partes con diferentes trayectorias que son las que determinan la prescripción que no se permiten ángulos inferiores a 90° en los bajantes de los pararrayos, ni radios menores de 20 cm ya que estas fuerzas pueden llegar a dañar al conductor mecánicamente.

Onda de choque

El canal por donde se establece el **rayo** es llevado a una temperatura del orden de 30 000 K en un tiempo muy breve, acarreado una sobrepresión del aire debido a lo cual se produce una onda de choque (el trueno) susceptible de producir ligeros estragos a cortas distancias (tejas arrancadas de los tejados, ramas de árboles rotas y otros).

1.3.1.4. Efecto acústico

Se identifica por el trueno, es un fenómeno espectacular pero carente de peligro.

1.3.1.5. Efecto químico

El rayo produce ozono (O₃) y libera nitrógeno en la atmósfera, fenómeno en el que recaen las principales ventajas de las descargas atmosféricas. Este hecho está asociado a varias de las teorías del surgimiento de la vida en el planeta.

1.3.2. Efectos sobre las instalaciones

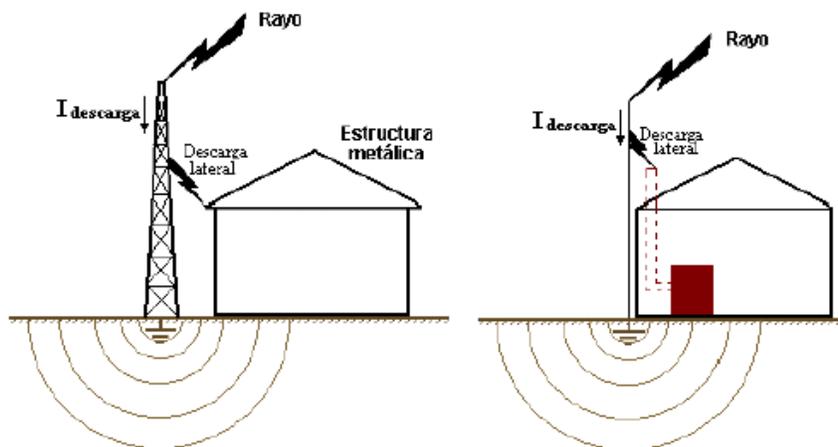
Las descargas atmosféricas tienen su mayor influencia en las instalaciones sobre las estructuras. En ellas se evidencian los fenómenos térmicos, dinámicos y eléctricos descritos anteriormente. Los efectos eléctricos se traducen en sobretensiones y “efectos de contorno” (condición previa a la ruptura del arco eléctrico), las cuales se evidencian de dos formas:

- Efecto de contorno entre un conductor y una masa metálica adyacente.
- Efecto de contorno entre una masa metálica a diferentes potenciales debido a la elevación del gradiente de potencial de tierra.

Los efectos de contorno entre conductores y partes metálicas adyacentes ocurren cuando la parte metálica que deriva a tierra la descarga, se encuentra próxima a partes metálicas que no constituyen caminos deseados de las descargas y que pueden o no estar aterrados, y en caso de estarlo, no forman parte de superficies equipotenciales.

Estas son las llamadas descargas laterales. Ellas pueden producir daños considerables sobre el equipamiento y el personal que labora en la instalación por su efecto térmico y dinámico. Ver figura 1-6:

Fig1.7 Efecto de contorno entre un conductor del rayo y una masa metálica adyacente

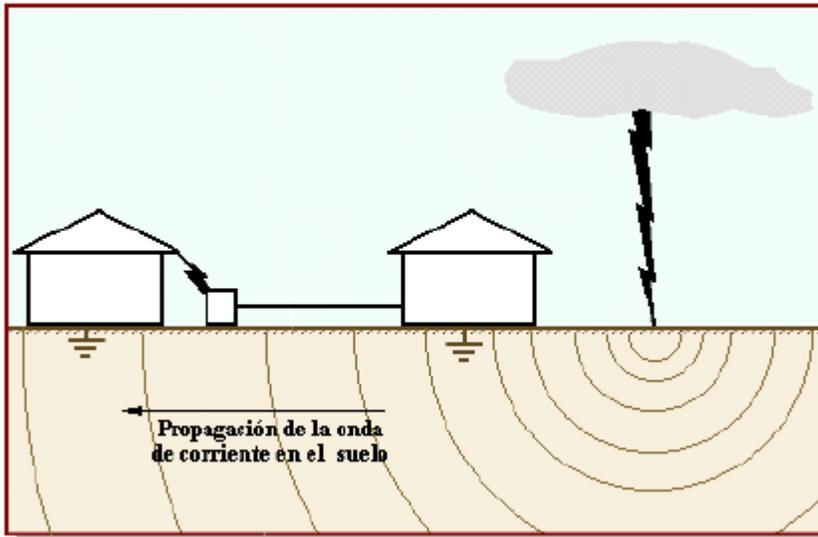


El **efecto de contorno** entre masas metálicas a diferentes potenciales por aumento del gradiente de las tomas de tierra se produce a consecuencia del no logro de la necesaria **equipotencialidad** de las diferentes tomas de tierra existentes en la instalación. Ver Figura1-7.

La inducción electromagnética y sus consecuencias eventuales aparecerán si una estructura metálica no está conectada a tierra mientras que los equipos de su interior, sí lo están.

Fig. 1-8 Efecto de contorno entre masas metálicas expuestas a potenciales

diferentes por elevación del gradiente de tierra



1-3-3. Efecto sobre las líneas aéreas

Las líneas aéreas están sometidas a los efectos térmicos y mecánicos de las descargas, pero sobre todo son considerables sus efectos eléctricos. Estos efectos pueden ser considerados directos o indirectos en correspondencia de a la forma en que la descarga afecte a la línea.

Descarga directa del rayo sobre la línea aérea

Las descargas atmosféricas que impactan a las líneas pueden afectar a un conductor o a las torres y aisladores. Cuando la descarga es directa, en las líneas se engendra una onda de voltaje de frente escarpado que se propaga a ambos lados del punto de impacto (ver Figura 1.9)

$$U(t) = Z \cdot \frac{I(t)}{2}$$

[1.5]

Donde:

Z ---- Impedancia del conductor a la onda: (Ω).

I(t) --- Magnitud de la corriente de la descarga: (A).

U(t) – Onda de voltaje propagado en ambas direcciones del punto de impacto; (V).

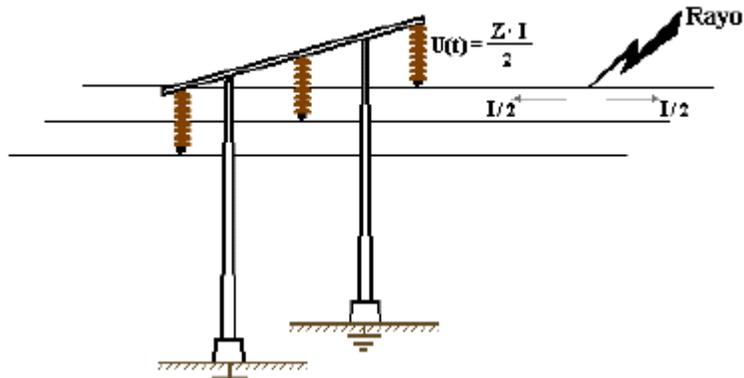
En este caso se pueden presentar dos situaciones:

Si U(t) sobrepasa el voltaje de estimulación del aislador, una parte de la onda será conducida por la torre a tierra, si ella es metálica, o si U(t) no sobrepasa el voltaje de estimulación del aislador, la onda se propagará amortiguándose, debido a la impedancia de la línea, hasta su extremidad.

La caída de una descarga atmosférica sobre un aislador de una línea aérea es un fenómeno de poca ocurrencia que provoca en la mayoría de los casos la destrucción total del aislador.

El impacto de la descarga sobre la estructura da lugar a un fenómeno similar de “**efecto de contorno**” de los aisladores que el producido por la sobretensión.

Fig. 1-9 Impacto de un rayo sobre los conductores de líneas aéreas



Efecto indirecto de las descargas en las líneas aéreas

Las descargas atmosféricas aún cuando no impactan directamente las líneas aéreas provocan un efecto electrostático que acarrea una concentración de cargas en la línea debajo de una nube cargada, incrementándose así su potencial. El efecto electromagnético de las descargas provoca igualmente, un acrecentamiento del potencial de las líneas.

1.3.5 Efecto sobre las líneas soterradas

En el análisis de las líneas soterradas que se encuentran en contacto directo con el terreno se distinguen dos casos:

- Los cables armados, enfundados en una cubierta metálica exterior, cuya función principal es de protección mecánica pero que juegan igualmente un papel de blindaje para el cable.
- Los cables blindados en los cuales cada elemento que lo constituye está estrictamente protegido por una pantalla equipotencial.

Por otra parte los cables sin aislamiento crean un camino preferencial para la corriente del rayo, provocando en la zona de difusión de la corriente un potencial de tierra que incrementa el campo eléctrico en el suelo, obteniéndose así una concentración de las corrientes y los efectos térmicos respectivos.

Si este campo sobrepasa el valor disruptivo del campo del terreno, la ruptura de este último refuerza aún más la concentración de la corriente ya mencionada; además, como consecuencia de la sobretensión entre el alma del cable y la envoltura que conduce la corriente del rayo, se puede producir una ruptura del aislamiento de los diferentes cables que conforman el conductor. En los cables aislados el revestimiento aislante soportará la totalidad del potencial, el que si sobrepasa el valor de ruptura del aislante acarreará su perforación y algunas veces también la de su envoltura metálica.

1.3.6 Efecto sobre las personas

El rayo elige a sus víctimas con una efectividad azarosa y casi casual. Los principales desórdenes clínicos debido al rayo se relacionan con aquellos provocados por las corrientes eléctricas asociadas a él.

Se ha comprobado que la mayor parte de la corriente del rayo no atraviesa a las personas, sino que circula por el exterior del cuerpo. Por esta razón, a pesar de los enormes valores de potencia de estas descargas, se ha comprobado que sólo 1 de cada 6 personas expuesta a una descarga atmosférica, muere.

Aunque el cuerpo humano no admite más de 5 mA en régimen permanente, la brevedad del fenómeno conduce a aceptar como límite para la afectación cardíaca: entre $1.16 \div 1.85$ amp. para un tiempo de exposición a la descarga de $t = 10$ ms.

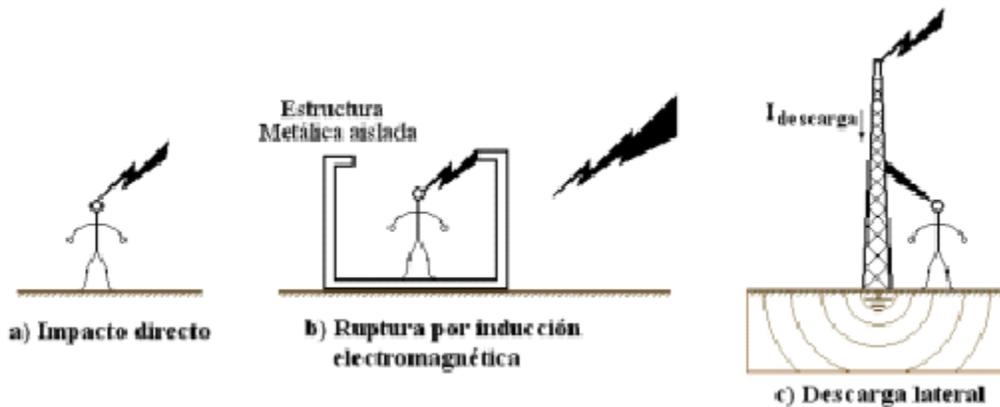
Considerando que la resistencia entre dos puntos externos del cuerpo humano es superior o igual a 500Ω , en estas condiciones el voltaje de paso crítico estará alrededor de $500 - 1000$ V.

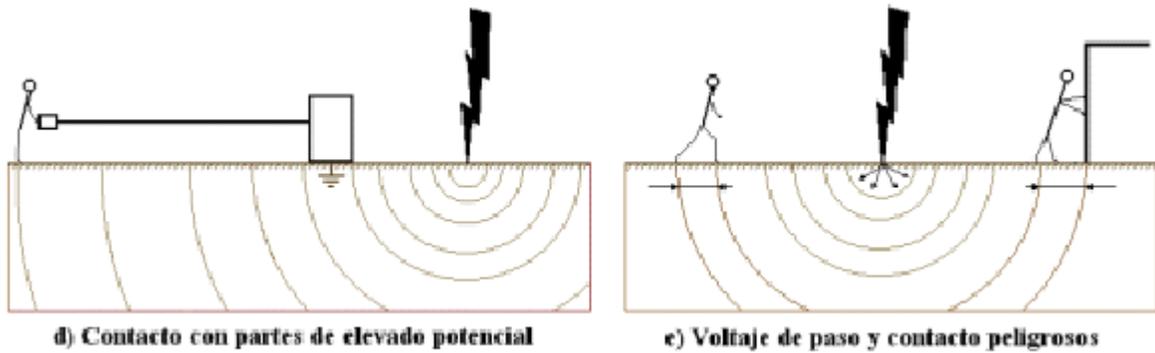
Las principales lesiones causadas por este fenómeno están asociadas con: paro cardíaco (como la primera causa de muerte), lesiones en el sistema parasimpático, dolores musculares, sensación de hormigueo en las extremidades, quemaduras principalmente externas, parálisis, pérdidas del conocimiento y la memoria a corto plazo, pérdidas del equilibrio y del sentido del humor, entre otras.

Según la forma en que una persona puede ser afectada por las descargas atmosféricas, se pueden identificar tres vías, ver figura 1.9.

1. Caída directa sobre el cuerpo, (a).
2. Descarga entre la persona y una estructura metálica con potencial elevado (b, c, d).
3. Aparición de diferencias de voltaje importantes entre partes del cuerpo, voltaje de paso y de contacto, (e).

Figura 1.10 Como frecuentemente las descargas afectan a las personas





1.4. Guía para la evaluación del riesgo de impacto de descargas atmosféricas y selección del nivel de protección para una instalación.

La guía que a continuación se ofrece permite considerar diferentes criterios para la evaluación del riesgo de daños debido a las descargas atmosféricas y determinar así el nivel de protección requerido.

Únicamente se tratan aquí los daños causados por el impacto directo del rayo sobre la instalación a proteger y el paso de la corriente por el sistema de protección. En numerosos casos, la necesidad de protección es evidente, por ejemplo:

- Zonas de conglomeración de personas.
- Necesidad de continuidad de los servicios o producción.
- Zonas de gran densidad de impactos de descargas atmosféricas.
- Edificios muy altos y aislados.
- Edificios que contienen materiales explosivos o inflamables o patrimonio cultural irremplazable.

En esta guía se propone una evaluación de los riesgos teniendo en cuenta la probabilidad de impacto y los siguientes factores:

1. Ocupación humana y riesgo de pánico.
2. Valor de los materiales contenidos en el edificio.
3. Consecuencias que tendría sobre el entorno los daños al edificio.
4. Naturaleza de la estructura del edificio.
5. Entorno del edificio.

En ciertos casos, algunos factores no pueden ser evaluados y pueden prevalecer sobre todo otras consideraciones. Por ejemplo, la necesidad de evitar riesgos para la vida o de proveer a los ocupantes de un edificio de una protección completa, incluso, aunque su índice de riesgo no indicase la necesidad de protección. Entonces, se pueden tomar medidas de protección más severas que las que resultan de aplicar esta guía.

La selección de un nivel de protección adecuado, para la concepción de un sistema de protección contra las descargas atmosféricas de una instalación se basa en la frecuencia e impactos de rayos prevista sobre la estructura o la zona a proteger y de la frecuencia anual aceptable de rayos establecida para esa zona.

Determinación de la frecuencia esperada de impactos directos de rayos

sobre una estructura

La frecuencia anual media de impactos directos sobre una estructura se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$N_d = 1,1 \cdot N_g \cdot A_e \cdot C_e \cdot 10^{-6} \quad [1.6]$$

Donde:

1,1 ----Factor de seguridad ligada a la evaluación de impactos.

N_g --- Densidad anual de impactos de rayos en la región; (número de impactos/año.km2).

A_e --- Superficie de captura equivalente de la estructura aislada; (m2).

C_e --- Coeficiente relacionado con el entorno.

La densidad de impacto de **rayos** sobre el terreno se determina según:

*Relación empírica entre los días tormentas y el número total de rayos a tierra.
(Diferentes ecuaciones propuestas)*

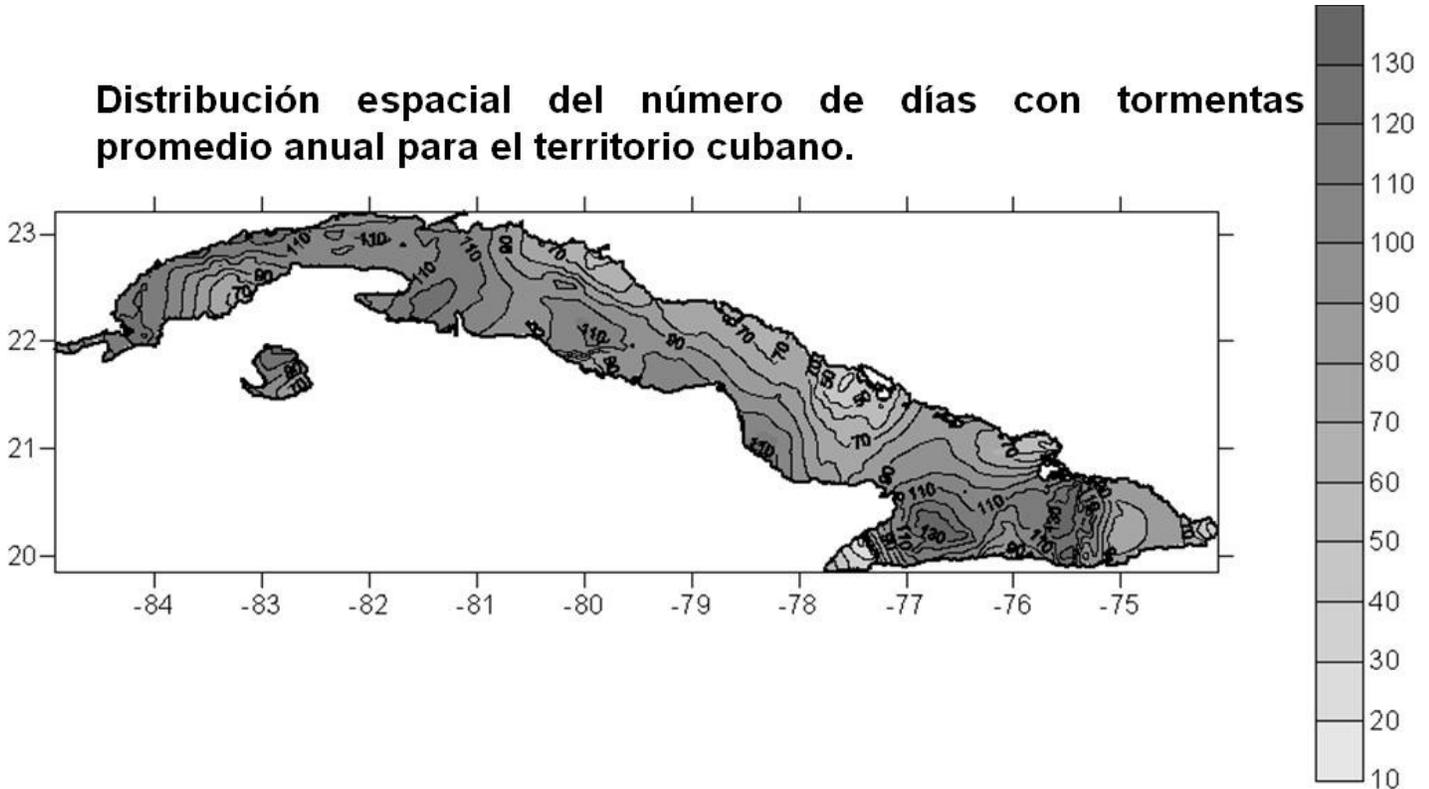
Ecuación propuesta	Autor	Lugar	Ng para Td=100
$0.04 \cdot (Td)^{1.25}$	CIGRE/IEEE	Sur África	12.65
$0.023 \cdot (Td)^{1.3}$	Andersson	Inferencia global latitud norte	9.16
$0.1 \cdot (Td)$	IEC actual	USA	10
$0.024 \cdot (Td)^{1.12}$	De la Rosa	Montaña México	4.17
$0.03 \cdot (Td)^{1.12}$	Dinitz/M.G	Brasil	5.21
$5.4 \cdot 10^{-7} \cdot LAT^{1.6} \cdot Td^{2.5}$	H. Torres	Colombia	8.15

$N_g = 0.1 T_d$ Esta es una ecuación muy usada, o sea, una de las más difundidas, aunque según el área geográfica en que se viva y las experiencias personales pueden ser asumida otra de las presentadas en la anterior tabla

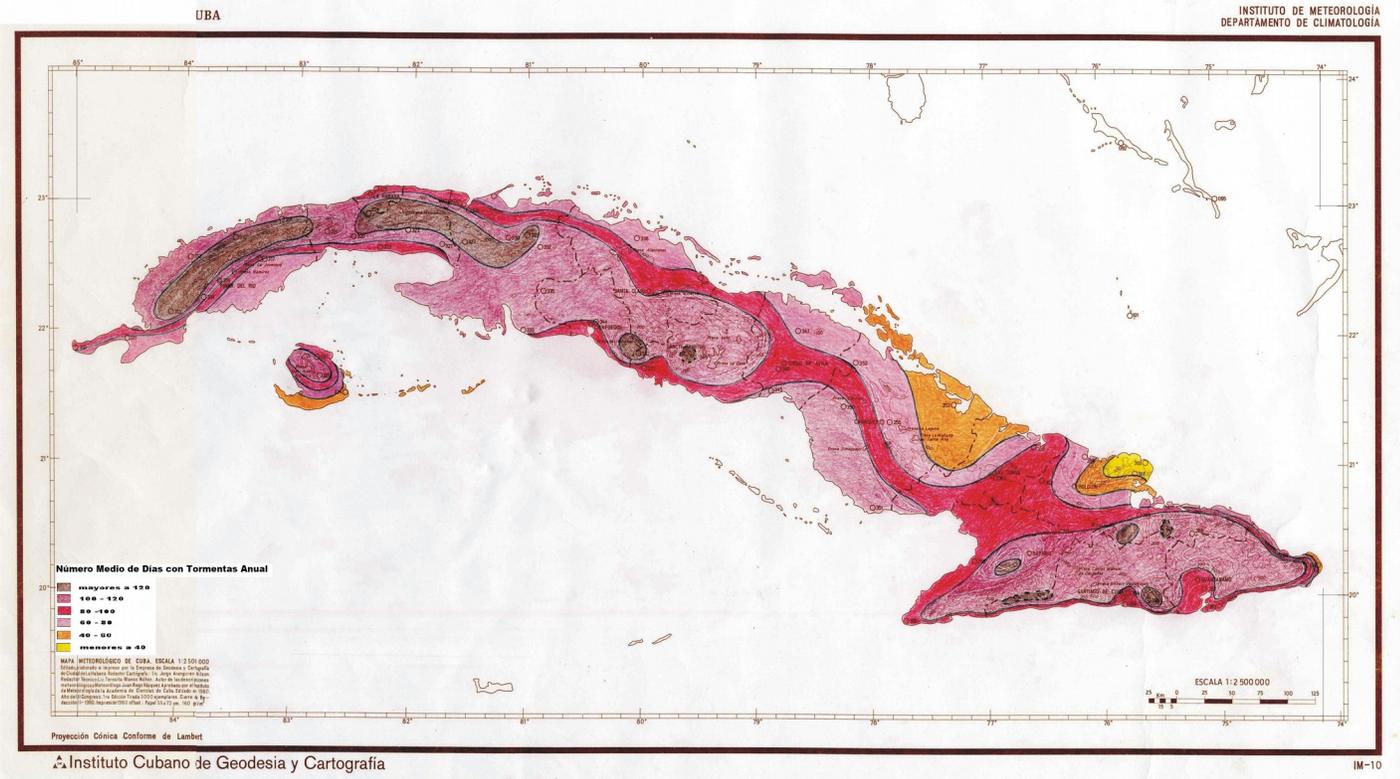
Otra forma de enfoque para calcular N_g por puede ser:

$N_g = aTd^b$ donde $a = 0.04$ y $b = 1.25$ que arroja valores mayores de incidencia de rayos sobre el terreno y responde al usado o recomendado por la IEEE, aunque los ensayos responden al territorio de Sur África en la tabla, esta es un área de alta incidencias de rayos.

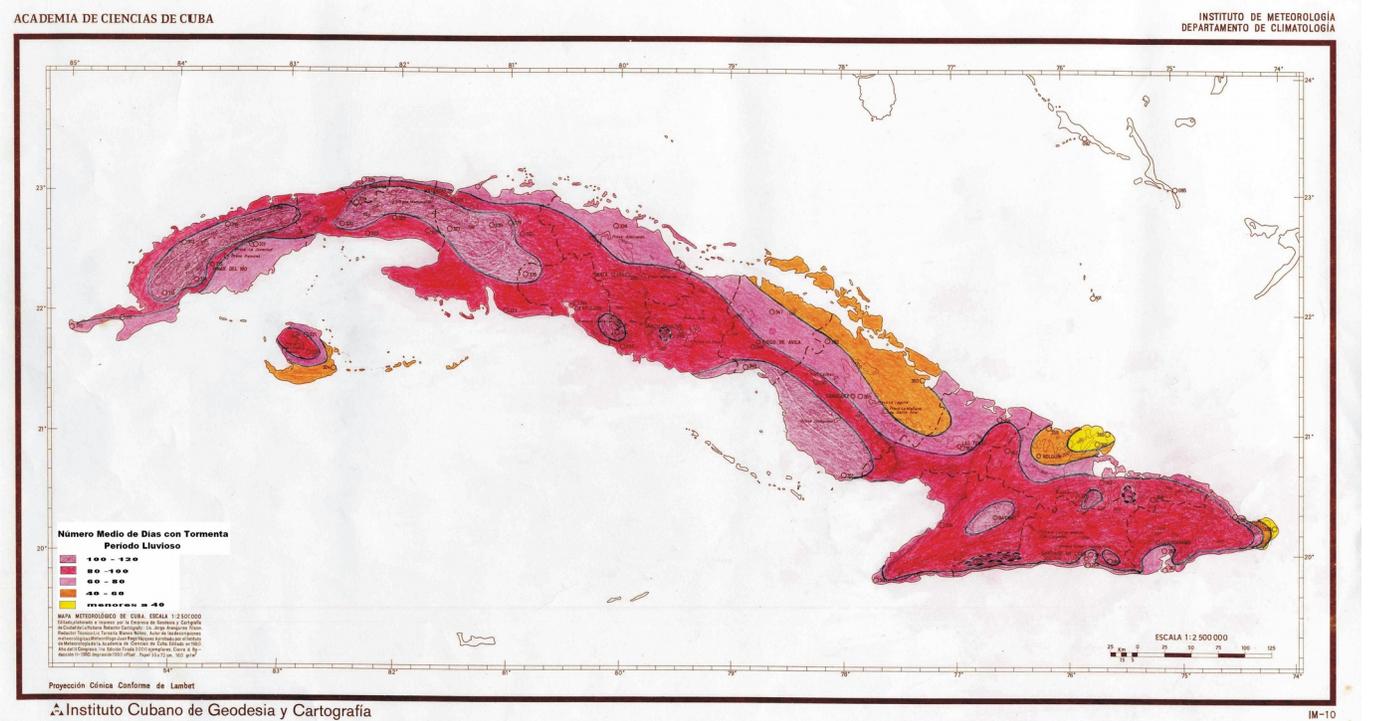
Fig 1.11 Mapa isoceráunico nuevo de Cuba



Número medio con Tormentas Anuales.



Número medio, de días con tormenta en períodos lluviosos



La superficie de captura equivalente se define como la superficie sobre el suelo que tiene la misma probabilidad anual que la estructura, de recibir el impacto directo de un rayo.

Para determinar este indicador, se consideran dos aspectos generales:

- Para instalaciones con bases rectangulares de altura regular, ver figura 1-12a:

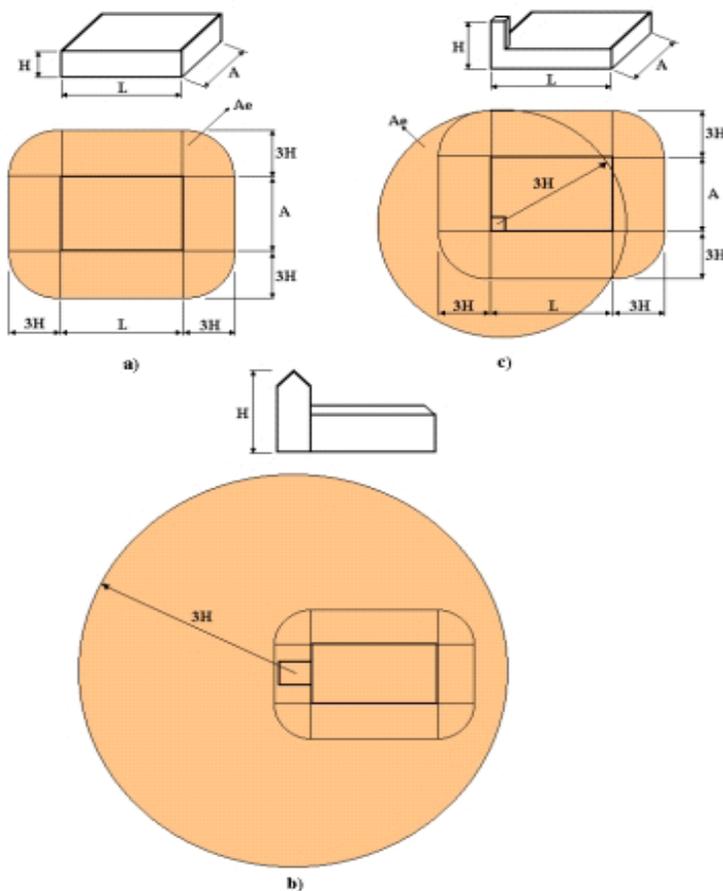
$$A_e = L \cdot A + 6 \cdot H(L + A) + 9 \cdot \pi \cdot H^2 \quad [1.8]$$

- Para instalaciones que tengan una parte prominente, ver figura 1.12b y 1.12,c.

$$A_e = 9 \cdot \pi \cdot H^2 \quad [1.9]$$

Fig 1.12 Casos a considerar en la determinación de la superficie de captura Equivalente.

- a) Instalaciones rectangulares,
b) y c) edificaciones con parte prominente.



Cuando la superficie de captura equivalente de una estructura cubre completamente otra estructura, esta última no se tendrá en cuenta. Si se cubre la superficie de captura de varias estructuras, la superficie de captura común correspondiente se considera como una única superficie de captura.

La topografía del lugar y los objetos situados en el interior de una distancia 3H a la estructura influyen de forma significativa en su superficie de captura. Este factor se tiene en cuenta a través del coeficiente C_e (ver tabla 1.3).

Tabla 1.3. Determinación del factor C_e

Situación relativa de la estructura	C_e
Estructura situada en un espacio donde hay otras estructuras o árboles de la misma altura o más alto	0.5
Estructura rodeada de estructuras más bajas	0.75
Estructura aislada	1
Estructura aislada situada sobre una colina o promontorio	2

Frecuencia aceptable de impacto de rayos sobre una estructura

Los valores de frecuencia aceptable de rayos se estiman a través del análisis del riesgo de daños teniendo en cuenta los factores apropiados, tales como:

- El tipo de construcción.
- El contenido de la estructura.
- La ocupación de la estructura.
- La consecuencia sobre el entorno.

Dicho valor se obtiene según la siguiente expresión:

$$N_c = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{C} \quad [1.10]$$

Donde:

C ---- Factor que toma en cuenta los cuatro elementos anteriormente mencionados.

N_c --- Frecuencia aceptable de impacto de rayos sobre la estructura.

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \quad [1.11]$$

Donde:

C_1 ---- Factor que toma en cuenta el tipo de material de la instalación, ver tabla 2.4.

C_2 --- Factor que considera la naturaleza del contenido de la instalación en cuanto a su grado de inflamabilidad, ver tabla 2.5.

C_3 --- Factor que toma en cuenta la ocupabilidad de la instalación, ver tabla 2.6.

C_4 --- Factor que considera las consecuencias sobre el entorno, ver tabla 2.7.

Tabla 1.4 Factor que toma en cuenta el tipo de material de la instalación, C1

Material de las estructuras	Material del tejado		
	Metal	Común	Inflamable
Metal	0.5	1	2
Común	1	1	2.5
Inflamable	2	2.5	3

Tabla 1.5 Factor que considera la naturaleza del contenido de la instalación, C2

Sin valor o no inflamable	0.5
Valor común o normalmente inflamable	2
Gran valor o particularmente inflamable	5
Valor excepcional, irremplazable o muy inflamable, explosivo	10

Tabla 1.6 Factor que toma en cuenta la ocupabilidad de la instalación, C3

No ocupada	0.5
Ocupada normalmente	3
De difícil evacuación o riesgo de pánico	7

Tabla 1.7 Factor que considera las consecuencias sobre el entorno, C4

Sin necesidad de continuidad en el servicio y alguna consecuencia sobre el entorno	1
Necesidad de continuidad en el servicio y alguna consecuencia sobre el entorno	5
Consecuencias para el entorno	10

Selección del nivel de protección

Antes de pasar a determinar el nivel de protección es necesario evaluar si se requiere o no implementar un sistema de protección contra las descargas atmosféricas.

- ✓ Si $N_c \geq N_d$; no es necesario.
- ✓ Si $N_c < N_d$; es necesario.

Para la selección final del nivel de protección es necesario determinar el valor de eficiencia del sistema requerido:

$$E = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad [1.12]$$

Donde:

E ---- Valor de eficiencia del sistema de protección requerido por la instalación.

En la tabla se muestran los diferentes niveles de protección en dependencia de los valores de E.

Tabla 1.8 Nivel de protección requerido en función del valor de E

Eficiencia calculada E	Nivel de protección
$E > 0,98$	Nivel I + medidas complementarias
$0,95 < E \leq 0,98$	Nivel I
$0,80 < E \leq 0,95$	Nivel II
$0 < E \leq 0,80$	Nivel III

1-5 Situación de ocurrencia de DEA en Cuba

Fig 1-13 Comportamiento de la DEA en Cuba

⋮

EFECTO EN EL SISTEMA ELECTRICO

En Cuba esa importancia es singular por dos aspectos:

- Número promedio anual de días tormentas (Td) : el Td mínimo es 40 (4.02 rayos/km²/ año), el máximo es 140 (19.2 rayos/km²/año) y el promedio anual es 100 (12.7 rayos/km²/año). Estos valores se encuentran entre los más altos reportados en la región caribeña y en el ámbito internacional.

El rayo y sus efectos

Como se puede apreciar por la lámina anterior y la presentada al comienzo de este trabajo, el número de descargas en la superficie terrestre es extremadamente alto y ésta es una de las causas para considerarlo un fenómeno importante, en América Latina en general, se considera que estos valores son relativamente altos, por lo que es importante tenerlos en consideración.

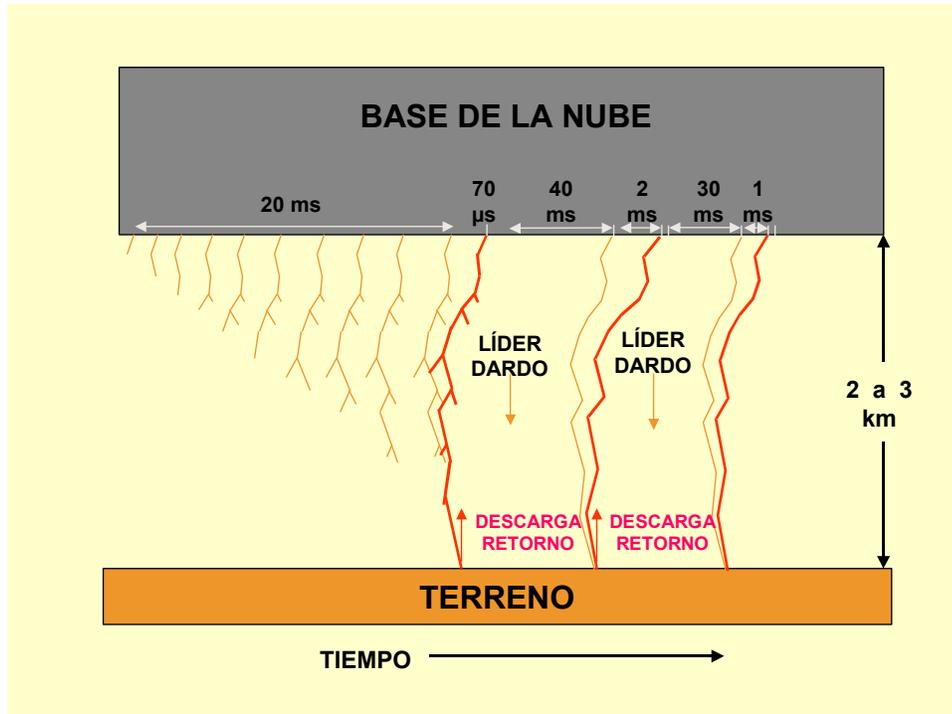
El rayo puede alcanzar temperaturas de 30 000 grados Celsius, temperatura cuatro veces superior a la temperatura del sol, el diámetro de una descarga del rayo puede estimarse en unos pocos centímetros y su longitud de descarga vertical puede alcanzar de 5 a 7 Km y de 8 a 16 Km las descargas horizontales, el voltaje entre tierra y nube puede llegar a cientos de millones de voltios.

1.6 Descargas eléctricas atmosféricas múltiples

Aunque quizás no se razone, es un fenómeno que puede percibirse a través del breve parpadeo que acompaña a las descargas eléctricas atmosféricas, del 75 al 80 % de las descargas tienen más de un impacto y se les denomina descargas múltiples o descargas sucesivas. La lámina presentada a continuación de la ICE así lo demuestra, las descargas sucesivas pueden ser un número indefinido que oscila normalmente entre 0 a 3 descargas

hasta inclusive 30 descargas. Las descargas de retorno que aparecen dibujadas, se representan con el color rojo, para significar que son las de más alto poder, por ser precisamente la tierra el mayor portador de estas cargas negativas.

Fig 1-14



SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

2-1 Introducción. El descubrimiento por Benjamín Franklin de que las descargas eléctricas atmosféricas tendían a escoger como puntos de descargas las zonas más elevadas y punzantes y que era factible encausarlas hasta la masa terrestre evitando el daño a las persona o animales que estuviesen bajo su radio de protección, para lograrlo es famosa la anécdota de que empujó un papalote con un hilo metálico en momentos de inminentes descargas por condiciones de tormenta y logró que a través del mismo se realizara una descarga probando su teoría. A partir de entonces, se concibió el famoso pararrayo Franklin que hoy en día a variado sólo en la calidad de los componentes y sus formas, pero el principio básico, se ha mantenido incólume.

Como es lógico estudios posteriores con el apoyo de novedosos medios técnicos han logrado profundizar en esta teoría y ya en los últimos años obligados por la necesidad de protección de la tecnología digital, se han realizado estudios de variantes de pararrayos que dejaron de ser pasivos para convertirse en activos o de cebado u otras variantes que otorgan a los mismos condiciones especiales, aunque discrepadas mundialmente.

MÉTODOS PARA LA UBICACIÓN DE LOS CAPTADORES PASIVOS

Los métodos para la ubicación de los sistemas pasivos son los siguientes:

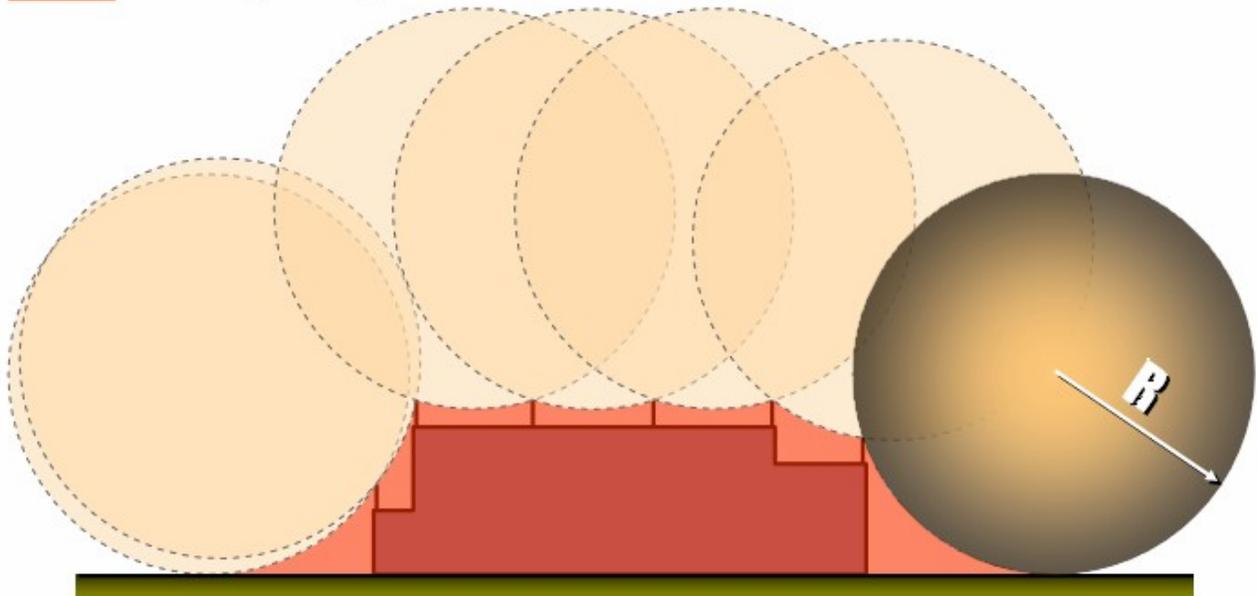
- Método de la esfera rodante
- Método del ángulo de protección
- Método de la malla

MÉTODO DE LA ESFERA RODANTE

Consiste en hacer rodar una esfera, de radio R , sobre la estructura a proteger, considerándose como protegidos aquellos puntos que se encuentran en la zona definida por la superficie de la esfera y la superficie exterior de dicha estructura. Los puntos en que la esfera toca a las diferentes partes de la estructura y el suelo son susceptibles de ser alcanzadas por las descargas.

La esfera rodante es un corolario del método electrogeométrico. El cual fue concebido para el diseño de la protección contra impacto directo del rayo en líneas y torres de transmisión (para la ubicación de los cables de guarda).

Zona protegida



A pesar de ser un método aproximado, es el más exacto hasta la actualidad para la ubicación de los sistemas de captura pasivos o convencionales.

El radio R se define como:

$$R_{esfera} = 10 \cdot (I)^{0.65}$$

Donde:

I: Valor mínimo de la corriente del rayo para cada nivel de protección (kA).

R: Valor del radio de la esfera rodante correspondiente a la corriente mínima del rayo para cada nivel de protección (m).

Valores mínimos de la corriente del rayo y radios de la esfera rodante para cada nivel de protección.

Criterio de Intercepción	Nivel de protección			
	I	II	III	IV
Corriente pico mín. (I) [kA]	2,9	5,4	10,1	15,7
Radio de la esfera (R) [m]	20	30	45	60

Profundidad de penetración

Como se muestra en la figura siguiente la profundidad de penetración es la distancia p que penetra la esfera por debajo del punto de contacto de la misma con un grupo de puntas o cables tendidos. Para que una configuración de captura pasiva garantice la protección adecuada, la parte inferior de la esfera no puede tocar la superficie a proteger, o lo que es lo mismo $p < x$.

Queda entonces determinado que las mallas de Faraday, no pueden colocarse sobre las cubiertas, sino que deben estar separadas de las mismas y que su altura de separación depende de la relación entre p y x .



Las expresiones 1 y 2 establecen la relación entre la profundidad de penetración (p) y la distancia de separación entre puntas o lados de una malla (d). La primera se utiliza para el cálculo de p en función de d y R , y la segunda para el cálculo de d en función de p y R .

Expresión No1

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Expresión No2

$$d = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot p - p^2}$$

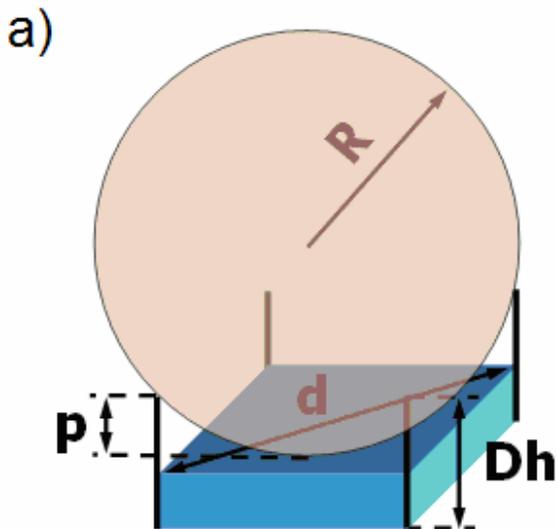
Donde:

p: Profundidad de penetración.

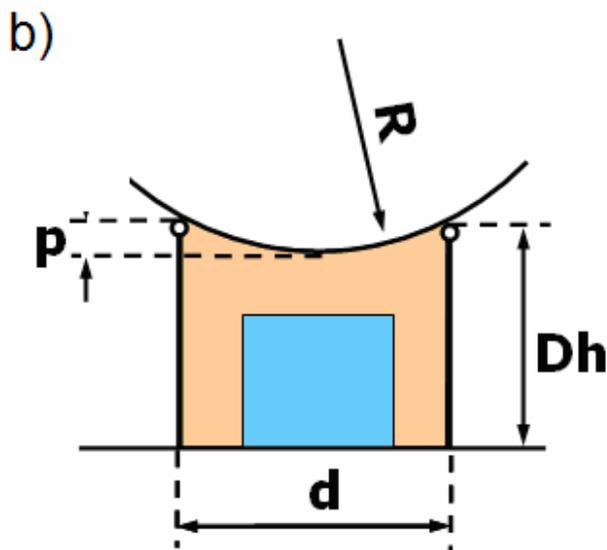
R: Radio de la esfera rodante.

d: Distancia entre dos puntas o hilos paralelos.

Las figuras a) y b) muestran las dos variantes más comunes, reflejando como la distancia d puede ser la diagonal en caso de un arreglo rectangular de puntas o la longitud del lado más corto en caso de una malla.



Arreglo para 4 puntas



Arreglo para un malla o cable tendido

La tabla que se muestra a continuación muestra para diferentes separaciones la profundidad de penetración por niveles de protección.

Profundidades de penetración para diferentes distancias de separación entre puntas.

Distancia entre puntas (m)	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN (M)			
	I (20 m)	II (30 m)	III (45 m)	IV (60 m)
1	0,01	0,00	0,00	0,00
2	0,03	0,02	0,01	0,01
3	0,06	0,04	0,03	0,02
4	0,10	0,07	0,04	0,03
5	0,16	0,10	0,07	0,05
6	0,23	0,15	0,10	0,08
7	0,31	0,20	0,14	0,10
8	0,40	0,27	0,18	0,13
9	0,51	0,34	0,23	0,17
10	0,64	0,42	0,28	0,21
11	0,77	0,51	0,34	0,25
12	0,92	0,61	0,40	0,30
13	1,09	0,71	0,47	0,35
14	1,27	0,83	0,55	0,41
15	1,46	0,95	0,63	0,47
16	1,67	1,09	0,72	0,54
17	1,90	1,23	0,81	0,61
18	2,14	1,38	0,91	0,68
19	2,40	1,54	1,01	0,76
20	2,68	1,72	1,13	0,84

Ha existido por mucho tiempo ciertas discrepancias en cuanto al radio de protección de un Pararrayo Franklin. Se recomienda guiarnos por los datos que aportan las siguientes curvas de la IEC de la figura 2-4, que nos muestran como el ángulo de protección varía con la altura

Espacio protegido por una punta captadora en función del nivel de protección

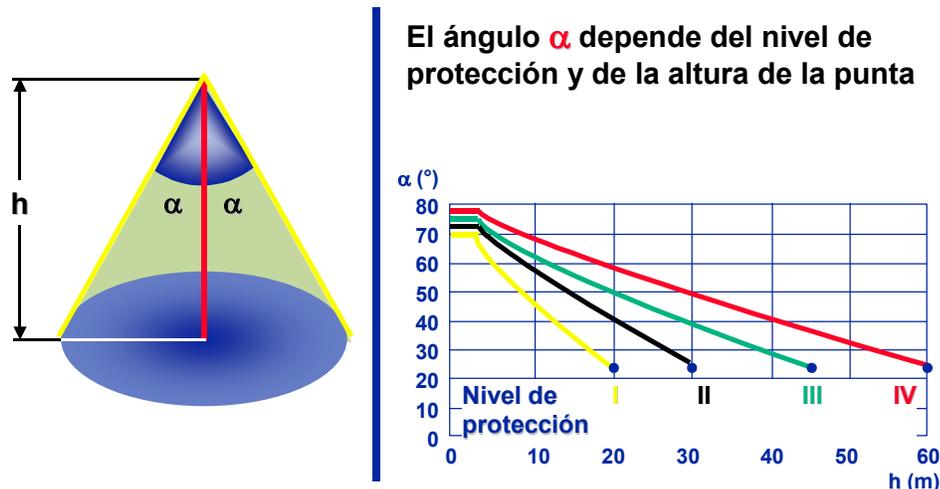


Fig. 2-4

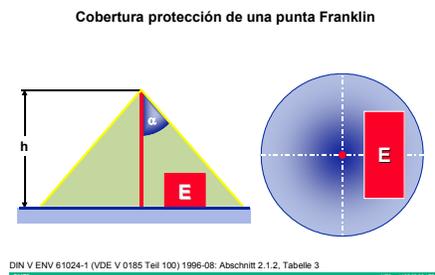
ENV 61024-1 : Anexo B, Tabla 3
S1189

1189.ppt / 02.02.98 / ESC

Se observa, como los valores que en etapas anteriores hemos usado considerando sólo el nivel de protección y fijando 45° para el primer nivel y 60° para el segundo nivel, son sólo casos particulares. Lo que sucede es que estos ángulos coinciden con las alturas que normalmente tiene asignadas estas puntas en la mayoría de los inmuebles, por ejemplo, para una altura de unos 10 metros (muy común), la punta tiene un ángulo de protección con respecto a la vertical de 45 grados para I Nivel y 60 grados para II Nivel, pero para alturas superiores eso no se cumple.

Cualquier otra relación entre la altura y el nivel de protección para definir el ángulo a usar se puede obtener por esta vía. La figura a continuación define la cobertura de protección de una punta, sólo que no se le pone valor al ángulo por la variación que sufre ante diferentes condiciones.

Fig. 2-5

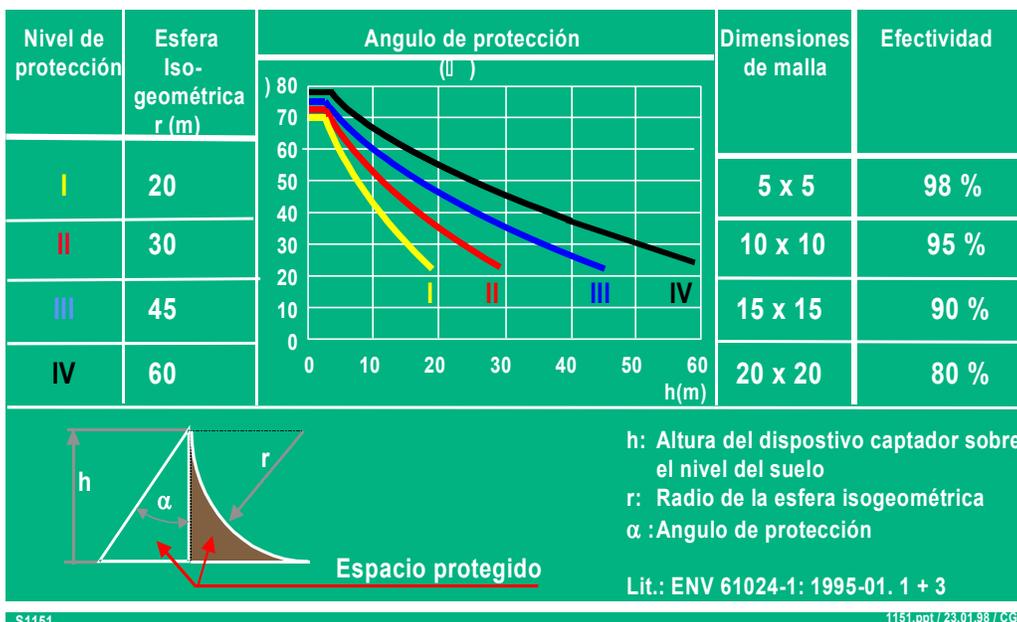


2-3 Método de la Malla o Jaula de Faraday y los ángulos de protección asociados

Es conocido que la forma de la que mejor se protege del efecto de un campo magnético es estando dentro de una Jaula de Faraday, si se considera la malla, se observa que los objetos que estén bajo ella se encontrarán protegidos por un principio semejante. Las cuadrículas de la malla son las que varían de tamaño, siendo menores a medida que el nivel de protección es más exigente, las cuadrículas de 5 metros están relacionadas con el primer nivel de protección, la dos figuras expuestas brindan los datos para el tamaño de las cuadrículas en dependencia del Nivel de protección, el lugar geométrico que abarca su radio de protección y la efectividad que ofrece, además facilita los radios de la esfera iso-geométrica para cada nivel.

Fig. 2-6

**Determinación del dispositivo captador (Malla)
en función del nivel de protección**



En esta gráfica se muestra que las Jaulas de Faraday no sólo protegen lo que está exactamente debajo de ella, sino que de forma perimetral existe un ángulo de protección de la envolvente que depende de la altura y el nivel de protección que se requiera.

Volumen protegido por una malla captadora

α depende de la altura y del nivel de protección

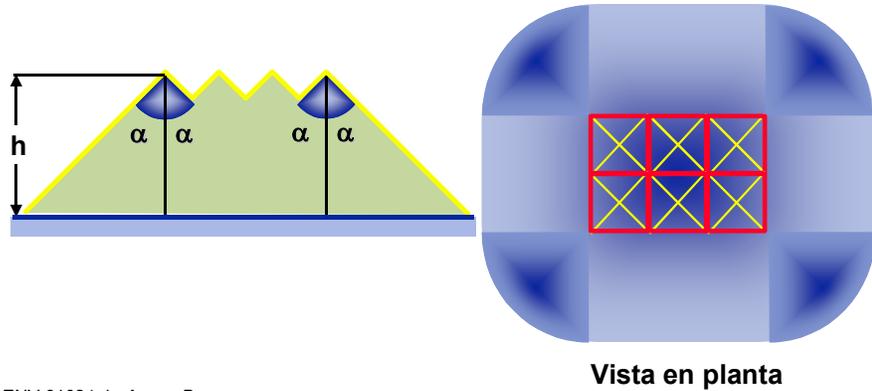


Fig. 2-7

ENV 61024-1 : Anexo B

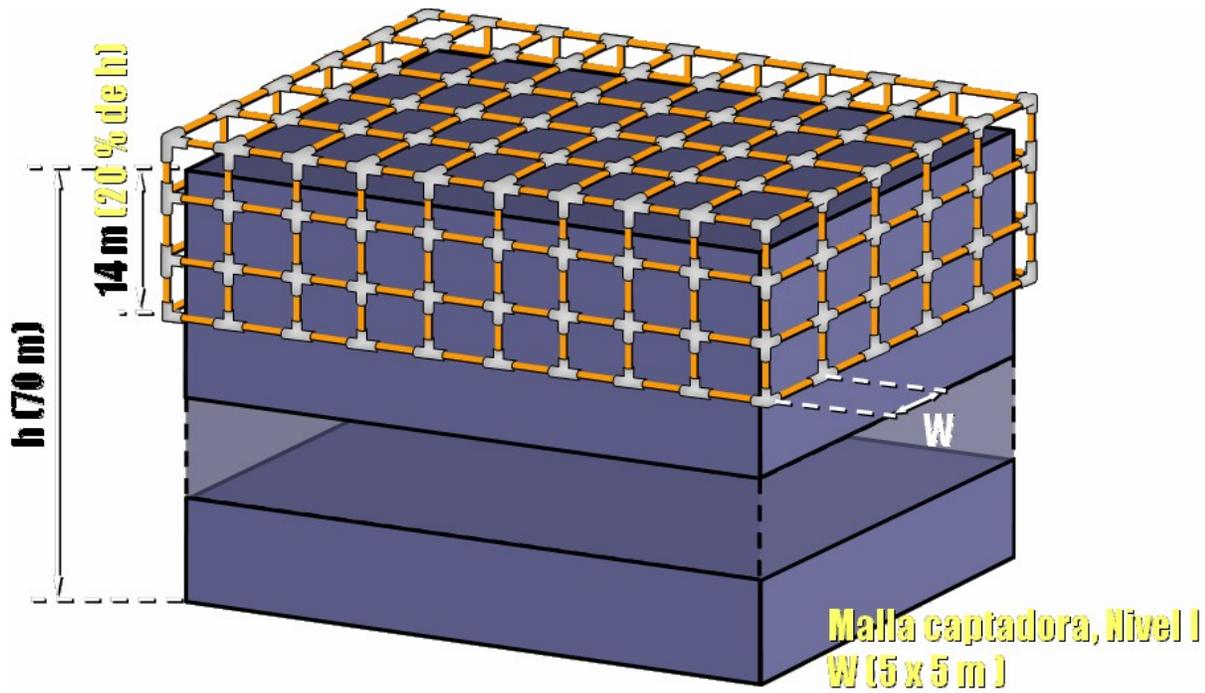
S1184

1184.ppt / 23.01.98 / ESC

CAPTADORES EN LOS LATERALES DE ESTRUCTURAS ALTAS

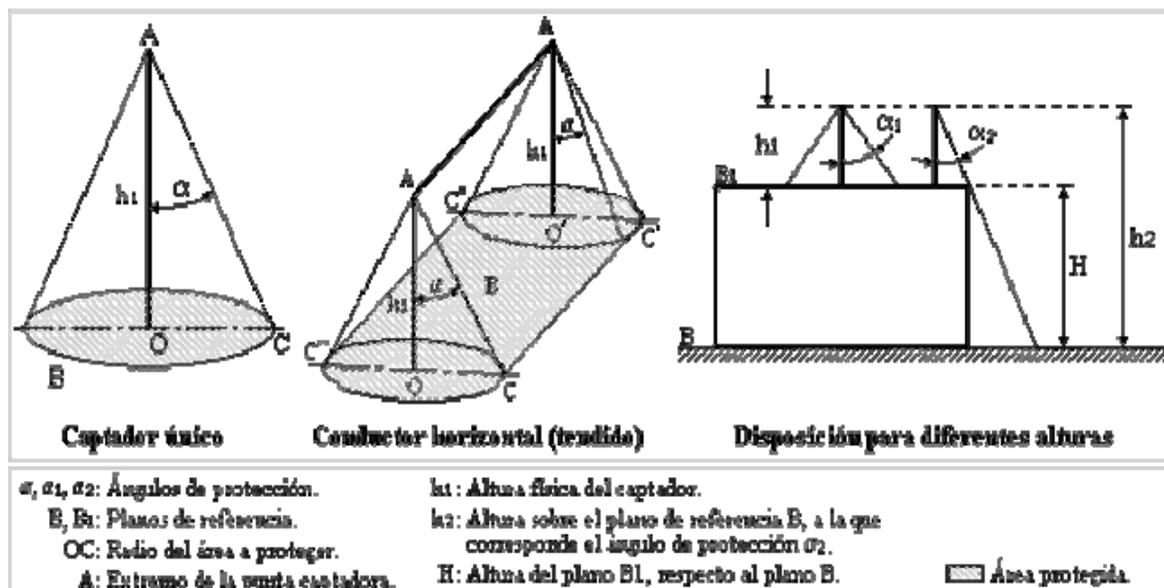
Se utilizan para proteger la parte superior de las estructuras mayores de 60m de altura y los equipos instalados en ésta, donde pueden ocurrir descargas en los laterales, especialmente en las puntas, esquinas y bordes de las superficies.

Se plantea en estos casos que el 20 % superior de la altura de la estructura debe llevar protección, como se muestra en la figura, debiéndose trabajar con la arquitectura en el la simulación de esa malla y esos bajantes a través de artificios estéticos.



Se necesita además para estos casos, que los bajantes de pararrayos hacia la masa terrestre, ubicados a distanciamientos según la tabla 2-1 que se muestra posteriormente y que establece las distancias según el nivel de protección, en todo el perímetro deberán además ser unificados entre si, o sea unidos perimetralmente, formando así una prolongación de la malla para formar un revestimiento Faraday de la edificación. Erróneamente se piensa que edificaciones altas brindan protección a todo lo circundante, cuando en realidad si no se toman estas medidas mencionadas, puede no estar protegida ni la misma estructura contra impactos laterales.

Cuando un pararrayo está sobre la cubierta este tendrá el ángulo de protección alfa de las figuras 2-6 y 2-4., acorde a la altura efectiva de la punta del pararrayo con respecto a dicha cubierta, ya que la cubierta en este caso se considerará una extensión del suelo. Los pararrayos de colocados en los bordes tendrá un cono irregular, cuyo ángulo será hacia la cubierta el correspondiente a esa altura y hacia el suelo uno mucho más cerrado, referido a la altura de la punta hasta el suelo, lo cual se aprecia en la figura a continuación mostrada. Este criterio es algo muy importante a tener en consideración, a la hora de replantearnos un conjunto de pararrayos para la protección de una determinada instalación. Para poder tener una claridad bien estructurada del lugar geométrico protegido, debemos hacer un replanteo en elevación y en planta de los conos de protección de cada uno, tal y como se muestra en la figura.

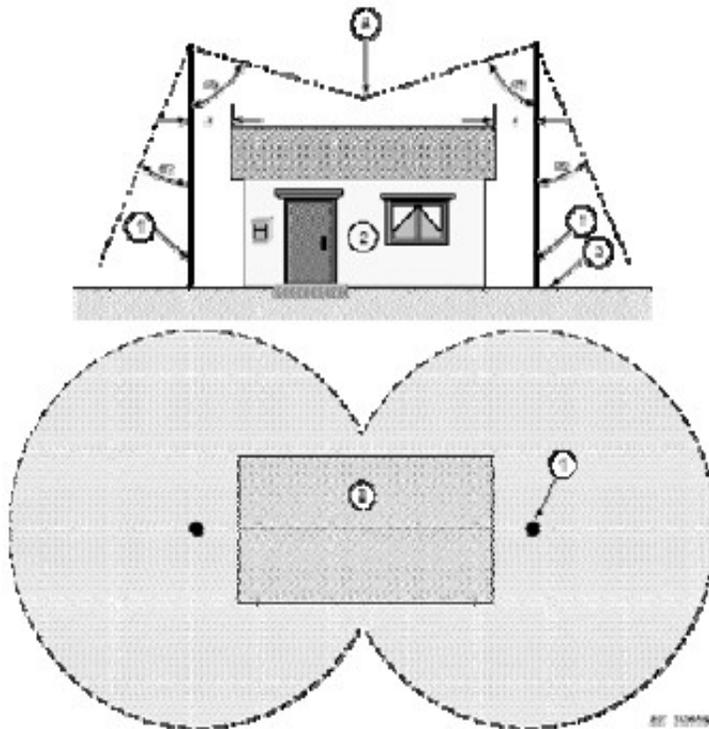


Para el uso de sistemas de captación aislados a través de mástiles, se debe tener en consideración el lugar geométrico que son capaces de proteger, proyectando sus ángulos según las curvas dadas, y refiriendo como ya dijimos la cubierta del objeto a proteger como una extensión del suelo y por lo tanto representativo de una altura mucho menor y un ángulo diferente, tal y como se aprecia en la Figura A a continuación mostrada.

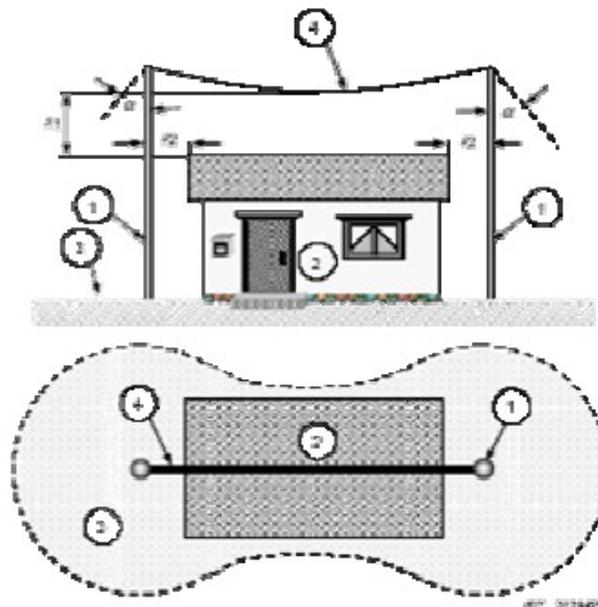
Existe una diferencia cuando el lugar geométrico definido por los mástiles está provisto del hilo de guarda entre mástiles, donde varía la forma del lugar geométrico. En la figura superior se observa semejante criterio, pero para un objeto suficientemente largo, y este

ejemplo a continuación mostrado, en la figura B, es relativo a un objeto de menor dimensión donde los conos de protección de los mástiles llegan a interactuar entre ellos

Usando dos mástiles aislados y el método del ángulo de protección Figura A

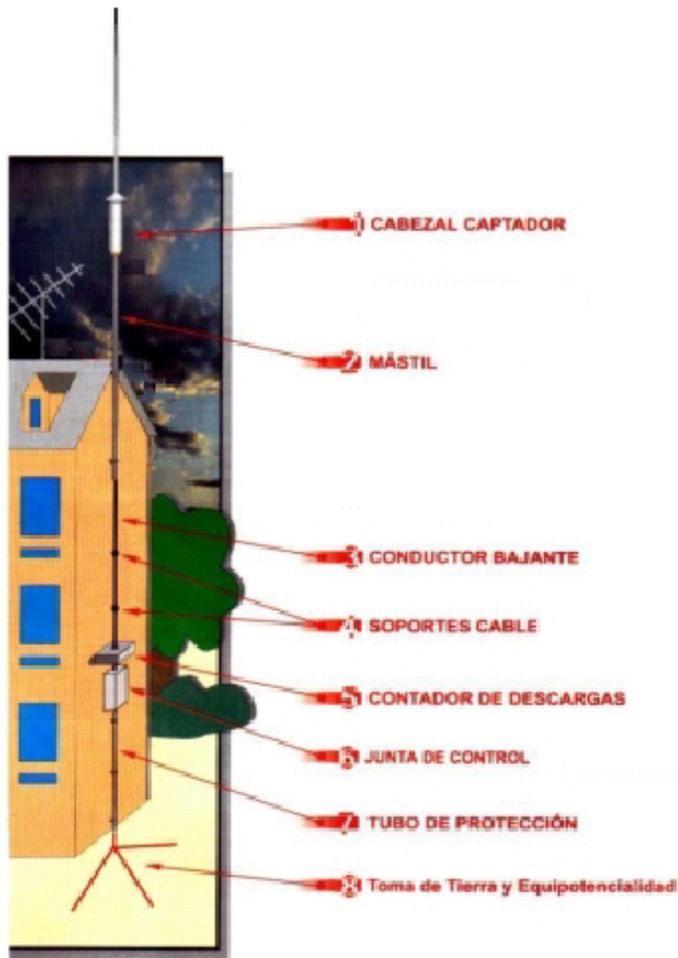


Dos mástiles aislados interconectados por un conductor horizontal Figura B



2-2 El pararrayo Franklin Convencional.

Figura 2-1 Partes de un pararrayo



Un sistema de pararrayo esta compuesto por los siguientes elementos (ver figura 2.1).

1. Pararrayo o cabezal captador: Es el elemento encargado de captar la descarga, en dependencia de su tipo, así será denominado el sistema (Punta Franklin, capacitivo, radioactivo u otro). Se acopla al mástil asegurando un correcto contacto eléctrico con el bajante.

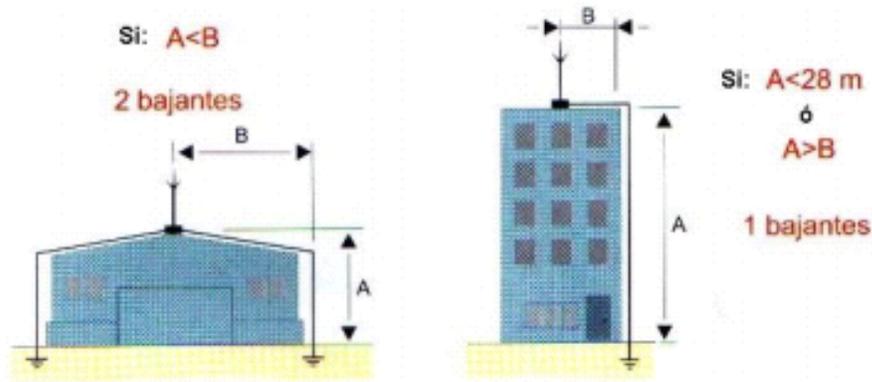
2. Mástil: Elemento alargable y adaptable para lograr la altura necesaria al cabezal captador y así cubrir el radio de acción de la zona a proteger. Deberá estar correctamente colocado o empotrado mediante 2 ó 3 anclajes según su longitud y así ofrecer una adecuada rigidez al sistema.

3. Bajante: Es el elemento conductor destinado a encaminar la corriente del rayo desde el cabezal captador hasta la toma de tierra. Podrá ser de tipo pletina, trenza plana, cable trenzado o redondo, y la sección mínima ha de ser de 50 mm².

Cada pararrayo deberá tener al menos un bajante. En caso de que la instalación tenga más de 28 m de altura o ésta sea menor que la proyección media de la edificación, se deberán utilizar dos bajantes, lo cual se explica gráficamente en la figura siguiente:

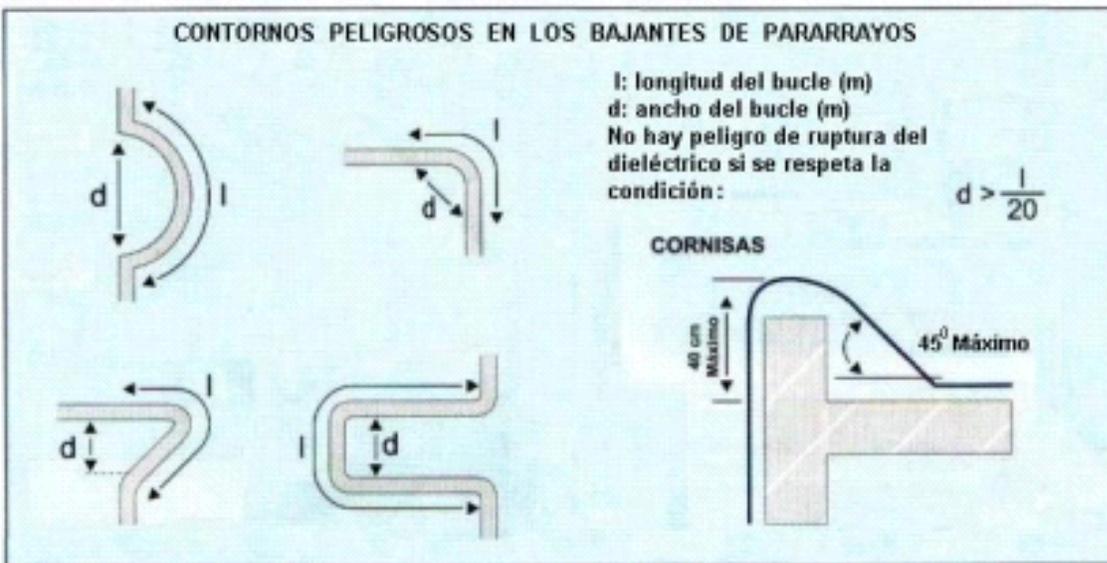
Figura 2-2 Número de bajantes por pararrayo

Para el caso de los pararrayos activos se suele usar el criterio expuesto a continuación



El trazado del bajante debe ser lo más rectilíneo posible utilizando el camino o trazado más corto, evitando acodamientos bruscos o remontes. Los radios de curvatura no serán inferiores a 20 cm (Fig. 2-3). La trayectoria del bajante debe ser elegida de forma que evite el cruce o proximidad con líneas eléctricas o de señales.

Figura 2-3



Cuando un conjunto de puntas Franklin protegen una instalación, el **número de bajantes** está en dependencia de la longitud perimetral de la instalación, debiéndose colocar según lo especificado en la tabla siguiente **y está en dependencia del nivel de protección exigido** para el objeto de obra en cuestión:

Tabla 2-1

**Distancia media de los derivadores
en función del nivel de protección**

Nivel de protección	distancia media en metros
I	10
II	15
III	20
IV	25

UNE 21.185 y ENV 61024-1 : Tabla 5

S1167

1167.ppt / 27.01.98 / ESC

4. Grapas: Se utilizan para fijar el conductor de bajada en toda su trayectoria para contrarrestar los esfuerzos electrodinámicos producto de la descarga. Sea cual sea el tipo de soporte utilizado, se ubicarán a razón de **tres grapas por metro** y no deberán estar en contacto directo con material inflamable.

5. Contador de impacto: Dispositivo encargado de indicar el número de impactos de descargas directos recibidos por la instalación de protección. Se instala encima de la junta de descarga. No es indispensable su utilización.

6. Junta de control: Elemento que permite la desconexión del bajante con la **toma de tierra** con el fin de efectuar mediciones de la resistencia. Cada bajante deberá tener una de estas juntas ubicadas a 2 m por encima del suelo.

7. Tubo o perfil de protección: Es un tubo metálico de 2 m de largo aproximadamente puede ser rajado longitudinalmente o conectado eléctricamente por ambos extremos al conductor bajante, se usan perfiles como una viga canal o un angular invertido contra la pared o estructura, cuyo objetivo es evitar los choques mecánicos contra el conductor del bajante, el hecho de evitar que el tubo tenga un contorno metálico cerrado y no unido al conductor bajante, es para evitar que la gran corriente de rayo que pasa por el cable

bajante, provoque en el tubo metálico una corriente inducida que pueda crear una fuerza de oposición, que surgiría basada en la ley de Lenz. Todos los elementos citados deben quedar firmemente fijados a la estructura de la instalación y deberán cumplir los requerimientos antes expuestos sobre los bajantes.

8. Toma de tierra: Es el elemento encargado de derivar la corriente de la descarga en el terreno. Existen varias configuraciones para su realización dependiendo de la construcción y los materiales empleados, lo cual ya ha sido estudiado y que para los efectos de esta aplicación según la norma vigente en Cuba que es un país de alta incidencia de rayos, es de 10 OHMS, no obstante, algunos fabricantes de pararrayos activos piden valores de 5 OHMS o menores.

Este pararrayo Franklin basa su principio de funcionamiento en la ionización del aire que se produce en la punta del pararrayo (Efecto Corona) ante la carga electrostática elevada del aire, que precede a las descargas propiciando un camino de encuentro con el trazador descendente del rayo. Para que sea efectivo, el mismo debe colocarse como es lógico, en la zona más elevada de un lugar que requiera ser protegido, este pararrayo suele usarse no sólo en forma unitaria para un punto en específico, sino que puede conjugarse en un sistema de puntas semejantes que serían necesarias cuando el área a proteger es suficientemente grande para requerirlo.

El número y disposición de las puntas de pararrayos las cuales se unen entre sí, dependen de las características físicas del lugar, o sea, su altura, su forma, el área a proteger y el nivel de protección seleccionado para el lugar.

En el caso de las Jaulas de Faraday y sobre todo, en aquellas de grandes cubiertas, es necesario colocar adecuadamente en sus ramas, juntas de expansión o dilatación para que absorban las dilataciones por la incidencia del sol, no ponerlas y mantener la necesaria rigidez sin la cobertura de dilatación, puede dar al traste con la rotura prematura o deformaciones.

Fig. 2-8 Juntas de dilatación



Cuando en la práctica se enfrenta un proyecto de una gran cubierta plana, que posee sobre ella la instalación de equipos que sobresalen por encima de la misma una determinada altura, como pueden ser los de climatización, se deben instalar puntas Franklin asociadas

específicamente a estos equipos, adicionalmente a las mallas o jaulas de Faraday que puedan existir, lo cual se aprecia en la siguiente figura:

Fig. 2-9

Puntas captadoras para equipos en cubierta



CAPTADORES NATURALES

Se consideran captadores naturales a:

- Las planchas metálicas que cubren la estructura.
- Los componentes metálicos de construcción (cercha, acero de refuerzo interconectado, etc.) por debajo de una cubierta no metálica, si ésta puede excluirse de la estructura a proteger.
- Las partes metálicas (ornamentos, pretilas, tuberías, revestimientos de parapetos, etc). Tabla 6 (IEC 62305-3).
- Las tuberías metálicas y tanques en la cubierta.
- Las tuberías metálicas y tanques que llevan mezclas fácilmente combustible o explosivas.

Si se garantiza:

- Continuidad eléctrica duradera entre las diferentes partes. (Ej.: por medio de abrazaderas, soldadura, corrugación, tornillos, costura o fijación con pernos).
- Espesor $\geq t$ o t' de la Tabla 3 (IEC 62305-3), en dependencia de la necesidad o no de tomar precauciones contra la perforación o la consideración o no de los problemas debido a la existencia de un punto caliente.

Todas las partes metálicas usadas como dispositivos de captación del rayo, tienen que estar

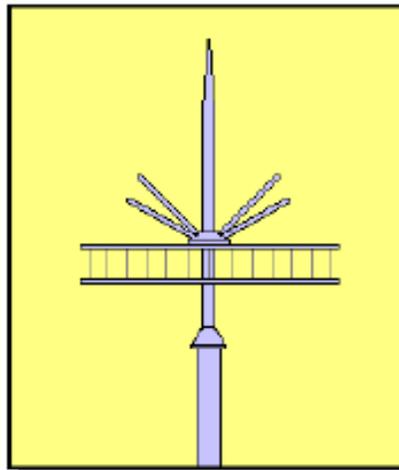
descubiertas o desnudas, permitiéndose sólo un recubrimiento superficial de pintura especial anticorrosiva, 1 mm de asfalto ó 0,5 mm de PVC.

2.5.2.6. Pararrayos capacitivo

Para su actuación, estos tipos de **pararrayos** disponen de excitadores eléctricos que aumentan de forma considerable la cantidad de electricidad y son capaces de dispersar en la atmósfera una cantidad de iones directamente proporcionales al gradiente de potencial que existe entre la tierra y la nube. Simultáneamente, estos sistemas poseen el efecto de protección Franklin, (ver la figura 2.10).

Estas características, unidas a que no requieren para su funcionamiento de ningún tipo de componentes radioactivos o electrónicos, y al hecho de estar confeccionados de acero inoxidable, lo convierten en un sistema de protección fiable, eficiente y económico.

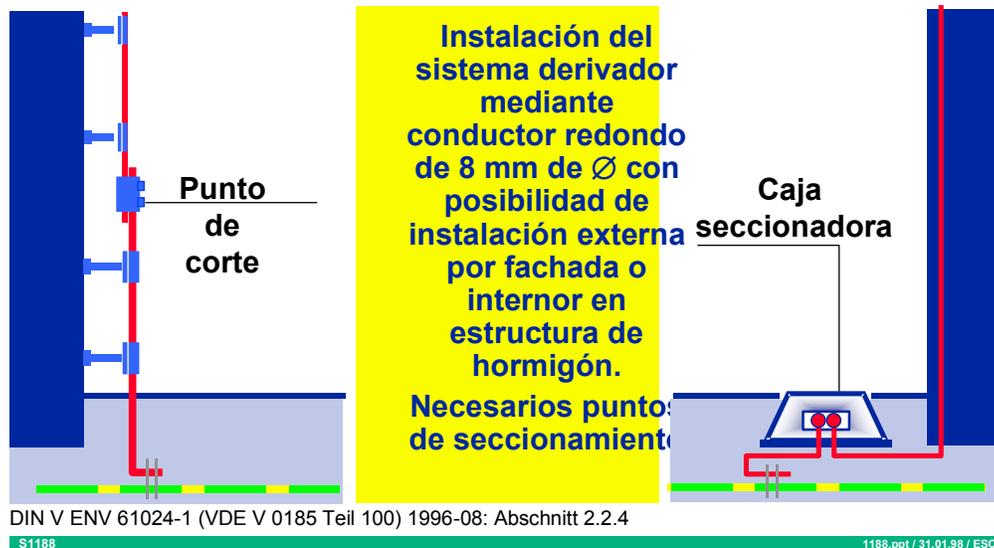
Figura 2. 10: Apariencia física de un pararrayos capacitivo



Es posible utilizar las estructuras metálicas como bajantes de pararrayos en sustitución de la colocación de los bajantes convencionales, lo cual se explicó al desarrollar el uso del sistema UFER en la primera parte de estudio de las tierras.

Figura 2-11

Derivadores o Bajantes Instalación mediante conductor redondo



Pararrayos Activos

Los pararrayos Franklin de probada efectividad, como lo es también la conocida Jaula de Faraday, son pararrayos que defienden el objetivo a proteger con un radio de protección que varía con determinadas condiciones, pero que siempre parten de la punta física del pararrayo.

Clasificación de los pararrayos activos

- Pararrayos radiactivos
- Pararrayos de disparo electrónico
- Pararrayos piezoeléctricos
- Pararrayos de perfil espacial

Aunque con diferentes principios de funcionamiento todos estos tipos de captadores persiguen la finalidad de producir la ionización del aire para generar un trazador ascendente adelantado.

En los pararrayos activos por el contrario, se crea una **ionización adicional** que provoca el lanzamiento de un trazador ascendente. El resultado es evidente, el **radio de protección se multiplica de forma abrupta** y llega a alcanzar en algunos tipos y modelos los 60 metros en primer nivel de protección y hasta 100 metros en 2 niveles para la mayoría de los pararrayos activos.

PARARRAYOS RADIATIVOS

Equipado con fuente radioactiva colocada cerca de la punta. Los materiales radioactivos empleados son partículas débiles alfa de relativa larga vida, como por ejemplo: (^{241}Am , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{85}Kr y ^{60}Co).

Fueron ampliamente utilizados y quizás el más polémico. Actualmente en algunos países se retiran hasta de forma gratuita, reemplazándolos por otras tecnologías que no provocan daños. Ha quedado prohibida en la mayoría de los países la instalación de nuevos pararrayos, y se ha establecido un control sobre los que actualmente prestan servicio

Pararrayo radioactivo.



PARARRAYOS DE CEBADO O DE DISPARO ELECTRÓNICO

Debemos aclarar que existe una discrepancia cada vez más definida a negar este resultado de los pararrayos de cebado, desde un conjunto de Universidades de prestigio internacional, hasta el comité 81 de pararrayos de la IEC, que se ha pronunciado en contra de esas bondades asociadas a este tipo de pararrayos.

No obstante está con normas aprobadas en España y en Francia, que son sus productores y se usan en un conjunto de países, pero en estos no existen normas aprobadas que los respalden, incluyendo a Cuba, no obstante se siguen instalando en todas partes y nuestras experiencias a través de la observación es que si reciben rayos y normalmente son el blanco preferencial de sus impactos.

No se tiene referencia alguna del uso de este tipo de pararrayo para la protección de las instalaciones de alta tensión y media tensión, las cuales siguen usando los métodos tradicionales del pararrayo Franklin.

Estos pararrayos basan su funcionamiento en (cada tipo y marca de fabricación con sus características específicas), la activación de un dispositivo de cebado perfectamente aislado de los poderosos campos electromagnéticos generados por una corriente de rayo, en una cámara que antecede a la punta captadora, el cual se activa por el crecimiento de la carga electrostática de la atmósfera, cuando ésta excede valores superiores a 50 KV/m, momentos antes de la inminente descarga.

Al activarse genera un arco eléctrico interno, o sea, las chispas generadas por los electrodos interiores, que ayudados por el Efecto Venturi del aire, a través de agujeros convenientemente diseñados, salen disparados a la atmósfera como un trazador ascendente positivo que como ya se refirió, llega alcanzar los 60 metros de altura, en el modelo de mayor alcance antes de hacer contacto con el trazador descendente negativo que viene bajando desde la nube.

Tabla 2- 2 Tiempo de anticipación

Modelo de Pararrayos	Tiempo de anticipación Δt (μs)
3000	9
5000	23
7000	38
9000	52

Es a partir de esa punta virtual ubicada a 60 metros para III Nivel de protección por encima de la punta física, que se produce la descarga del rayo. Si el cono de protección logrado a esas alturas se truncara a la altura de la punta real, se obtendría un lugar geométrico parecido a un caldero al revés, cuyo radio es el que los fabricantes declaran como válidos y con los cuales se proyectan las instalaciones.

Esta es una ventaja de increíble valor, pues con un solo pararrayo o dos de ellos concatenados, se logra proteger un área considerable, constituyendo una solución limpia y estética, además, de económica.

La fórmula que rige este comportamiento es:

$$R_p = \sqrt{h(2D - h) + \Delta L} \quad 2-1$$

Par $h \geq 5$ m

Donde: R_p = Radio de protección a nivel del plano horizontal considerado (m).

h = Diferencia de altura entre la punta del pararrayo de cebado y el plano horizontal considerado (m).

D = Distancia de cebado o radio de la esfera ficticia (m).

ΔL = Avance en el cebado, se le conoce como tiempo de adelanto ya que como la velocidad del trazador es de 1m x microsegundo equivalen en distancia o en tiempo $\Delta L = v \cdot \Delta t$ donde el tiempo es unitario.

D : este adquiere valores para los diferentes niveles de protección.

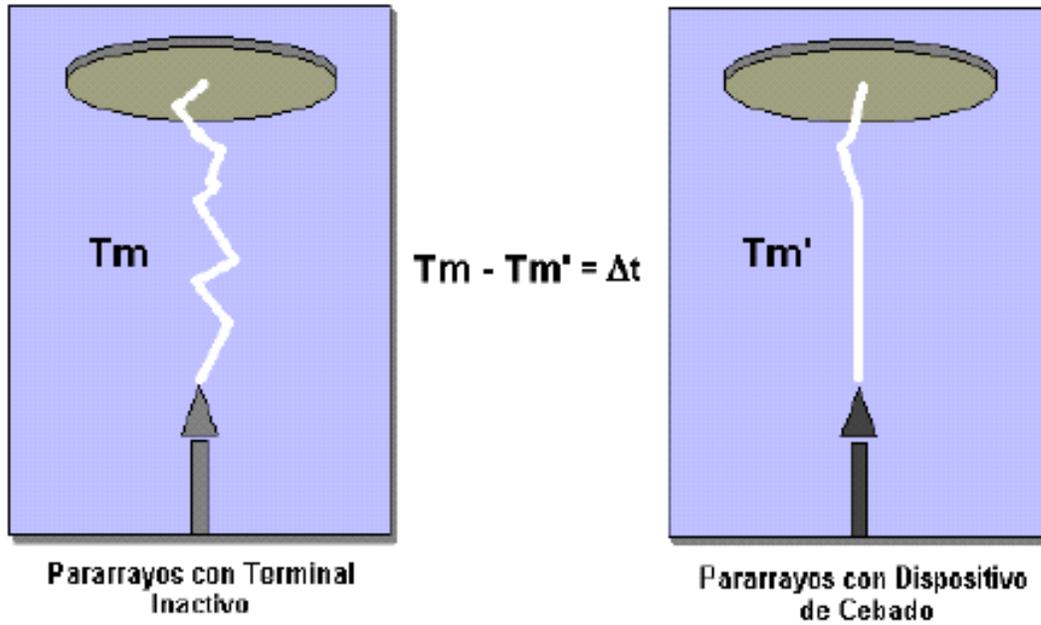
20m Nivel de protección I

45m Nivel de protección II

60m Nivel de protección III

Por otra parte, estos pararrayos poseen un dispositivo de cebado cuyo efecto es elevar artificialmente la altura de alcance del pararrayos y por tanto, un incremento del radio de protección. Esta eficiencia viene dada por un incremento en la creación del trazador ascendente, llamado también como tiempo de anticipación o de adelanto (.t) (ver figura 2.9).

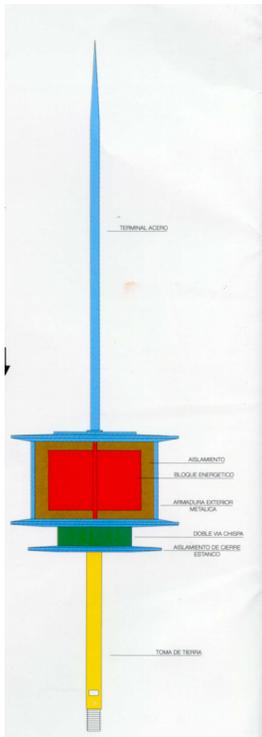
Fig. 2-9 TIEMPO DE ANTICIPACIÓN O DE ADELANTO



A continuación algunos modelos homologados en Cuba

Figura 2-10

Figura 2-11



PARARRAYO PSR-EC-SAC



PARARRAYO SATELIE +

Figura 2-12



PARARRAYO PREVECTRON

TABLA 2- 3 RADIOS DE PROTECCIÓN DEL PARARRAYO SATELITE +

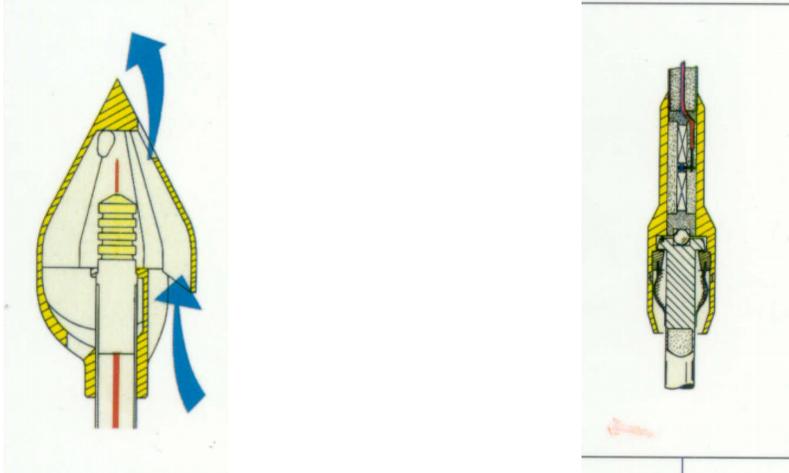
Radios de protección (m)									
Tipo de SATELIT+	h = altura de la punta (m)								
	2	4	5	7	10	15	20	45	60
<i>Nivel 1</i>									
PDC 1000	10	20	26	27	28	30	30	-	-
PDC 2500	17	34	42	43	44	45	45	-	-
PDC 4000	24	46	58	59	59	60	60	-	-
PDC 5000	28	55	68	69	69	70	70	-	-
PDC 6000	32	64	79	79	79	80	80	-	-
<i>Nivel 2</i>									
PDC 1000	15	30	38	40	42	46	49	55	-
PDC 2500	23	45	57	59	61	63	65	70	-
PDC 4000	30	60	75	76	77	80	81	85	-
PDC 5000	35	69	86	87	88	90	92	95	-
PDC 6000	40	78	97	98	99	101	102	105	-
<i>Nivel 3</i>									
PDC 1000	18	37	43	46	49	54	57	68	70
PDC 2500	26	52	65	66	69	72	75	84	85
PDC 4000	33	66	84	85	87	89	92	99	100
PDC 5000	38	76	95	96	98	100	102	110	110
PDC 6000	44	87	107	108	109	111	113	120	120

PARARRAYOS SAINT- ELME (Piezoeléctricos). Este pararrayo está diseñado por la firma Franklin France (ver Fig. 2-13).

Consta de:

- a- Una cabeza captadora, adecuadamente perfilada, buena conductora y estructurada para engendrar una circulación de aire forzada, en su extremo y en su prolongación (Sistema Venturi).
- b- Un asta soporte de cobre tratado o acero inoxidable.
- c- Un transductor (estimulador piezoeléctrico) incorporado en la parte inferior del asta a una distancia relativamente pequeña de la punta. El transductor está formado de cerámicas piezoeléctricas encerradas en un carter aislante. Por el interior del mástil corre un cable de alto voltaje que conecta el transductor a la punta emisora o cabeza captadora.

Fig 2-13 Pararrayo Saint Elme



Principio de funcionamiento: Las cerámicas que constituyen el transductor son estructuras cristalinas en las cuales se ha forzado a los dipolos eléctricos a tener una orientación dada, sometiéndolos inicialmente en su fabricación a un campo intenso de polarización. Estas cerámicas que se utilizan en su acción generadora, tienen la particularidad de generar de 20,000 a 25 000 voltios conectadas en apilados en serie, simplemente modificando la presión, tensiones claramente superiores a aquellas necesarias para la producción de iones que se busca.

El efecto de vibratorio surge de la resonancia del mástil por la acción que facilita la turbulencia por Efecto Venturi en la punta captadora, la bipolaridad de los impulsos piezoeléctricos confiere a esto pararrayos la posibilidad de actuar tanto para rayos positivos, como negativos

Otra peculiaridad de este tipo de pararrayos es que siempre está emitiendo sus impulsos ya que éstos no dependen del campo electrostático de la atmósfera.

CABEZA CAPTADORA

Realmente, lo que se hace para su selección y aplicación es usar las tablas que acompañan la información de los diferentes tipos y modelos y que determinan un radio de protección.

TRANSDUCTOR

TABLA 2-2 DE RADIOS DE PROTECCIÓN DEL PARARRAYO SAINT ELME

Rp(m)	SE 6 $\Delta L = 15$ m			SE 9 $\Delta L = 30$ m			SE 12 $\Delta L = 45$ m			SE 15 $\Delta L = 60$ m		
h(m) \ N p	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
2	13	18	20	19	25	28	25	32	36	31	39	43
4	25	36	41	38	51	57	51	65	72	63	78	85
6	32	46	52	48	64	72	63	81	90	79	97	107
8	33	47	54	49	65	73	64	82	91	79	98	108
10	34	49	56	49	66	75	64	83	92	79	99	109
20	35	55	63	50	71	81	65	86	97	80	102	113
30	35	58	69	50	73	85	65	89	101	80	104	116
60	35	60	75	50	75	90	65	90	105	80	105	120

 Evolución desdeñable

PARARRAYOS DE PERFIL ESPACIAL

Estos pararrayos captan la energía emitida por el trazador descendente del rayo mediante un sistema compuesto por una punta simple (conectada a tierra) y partes metálicas aisladas (con potencial eléctrico ambiental). Justo antes de que se produzca la descarga del rayo, la tensión entre la punta a tierra y las otras partes metálicas aumenta rápidamente a miles de volts.

Cuando el potencial alcanza la tensión de ionización del aire, se producen chispas a nivel del explosor que generan las primeras fases de avance del rayo.

