

TEMA 1 SOBRETENSIONES. EL FENÓMENO DEL RAYO Y SUS RIESGOS

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de mediana y baja tensión se afectan por las perturbaciones electromagnéticas. El que una condición de perturbación constituya un suceso depende de varios factores. Los más importantes son:

- **El nivel de la perturbación** (*magnitud y forma de onda, rango de frecuencia, contenido de energía, máxima tasa de variación, frecuencia de ocurrencia y duración*).
- **La susceptibilidad del receptor** (*respuesta de frecuencias, condiciones de diseño, presencia de elementos de protección y materiales*).
- **Las condiciones en las cuales se efectúe el acoplamiento** (*por conducción o por radiación, característica del medio de propagación y atenuación*).

Sobre estos aspectos y otros relacionados con la protección contra rayos profundizaremos en el desarrollo de los diferentes temas que aborda el curso.

1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE BAJA TENSIÓN

Todo cambio lento o rápido en las condiciones de operación de un sistema eléctrico origina una redistribución de energía que debe satisfacer las nuevas condiciones del sistema, la redistribución de energía lleva asociada, cambios súbitos en las señales de tensión durante tiempos muy cortos.

Una sobretensión fase-tierra se define como aquel valor de tensión que supera el valor:

$$\sqrt{2} \cdot \frac{U_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (1.1)$$

Los transitorios son fenómenos de cambio del estado estable de los parámetros eléctricos (corriente o tensión) de la onda de trabajo en un tiempo de duración muy corto (del orden de μs) a valores muy altos.

Las sobretensiones se pueden clasificar en:

- Sobretensiones electrostáticas
- Sobretensiones temporales
- Sobretensiones transitorias:
 - Sobretensiones debido a operaciones de conmutación
 - Sobretensiones debido a la interacción entre diferentes sistemas
 - Sobretensiones debidas al LEMP

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

El término *temporal* se utiliza en el análisis de variación de un sistema eléctrico para indicar desviaciones no deseadas de las señales de tensión y corriente que ocurren generalmente a la frecuencia industrial.

El término *transitorio* se utiliza en el análisis de variación de un sistema eléctrico para indicar un evento que es indeseable y de naturaleza no permanente. A él se asocian, también cambios de estado estable de los parámetros eléctricos de tensión y corriente. Los transitorios electromagnéticos pueden clasificarse en dos categorías: transitorios oscilatorios y transitorios de impulso.

Los transitorios oscilatorios, donde generalmente se ubican las sobretensiones asociadas a operaciones de maniobras (en ocasiones DEA), resultan en un cambio súbito de frecuencia no industrial, de las condiciones de estado estable de tensión y puede que también de corriente, o ambos, que incluye tantos valores positivos como negativos. Están descritos por el espectro de frecuencia, su duración y su magnitud. Los rangos de frecuencia se subdividen en altas, medias y bajas frecuencia.

Los transitorios oscilatorios de alta frecuencia (500 kHz - 5 MHz) y duración de microsegundos son generalmente la respuesta de un sistema a un impulso de rayo.

Los transitorios de media frecuencia (5 kHz - 500 kHz) y duración de milisegundos están generalmente asociado a maniobras de la red, aunque pueden deberse también a un impulso de rayo.

Los transitorios oscilatorios de baja frecuencia (menos de 5 kHz) se deben generalmente a maniobras de la red, frecuentemente energización de bancos de capacitores.

El término transitorio de impulso, donde generalmente se ubican las sobretensiones por descarga eléctrica atmosférica, se utiliza para caracterizar un cambio súbito, de frecuencia no industrial, de la condición estado estacionario de tensión y corriente, o ambas, que es generalmente unidireccional en polaridad, positivo o negativo.

Los transitorios de impulso se caracterizan normalmente por su tiempo de subida o frente y de cola. Su origen más común es la descarga eléctrica atmosférica, fenómeno, generalmente, de alta frecuencia.

1.1.1 SOBRETENSIONES ELECTROSTÁTICAS

Son impulsos de corriente que recorren un objeto cualquiera conectado a tierra cuando éste entra en contacto (directo o indirecto) con otro cuyo potencial respecto a la tierra del anterior es elevado.

Las cargas electrostáticas proceden del intercambio de electrones entre los materiales o entre éstos y el cuerpo humano. La combinación de materiales sintéticos (como plásticos, tela, etc.) y un ambiente seco favorece la ocurrencia de las sobretensiones electrostáticas.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Las perturbaciones generadas por los distintos tipos de descargas electrostáticas son de alta frecuencia, que se producen por conducción, pero se acoplan por radiación fácilmente a otros dispositivos.

El caminar sobre suelo de moqueta (intercambio de electrones entre el cuerpo y el tejido) o el frotamiento de la ropa con la silla al estar sentado son fuentes de este fenómeno.

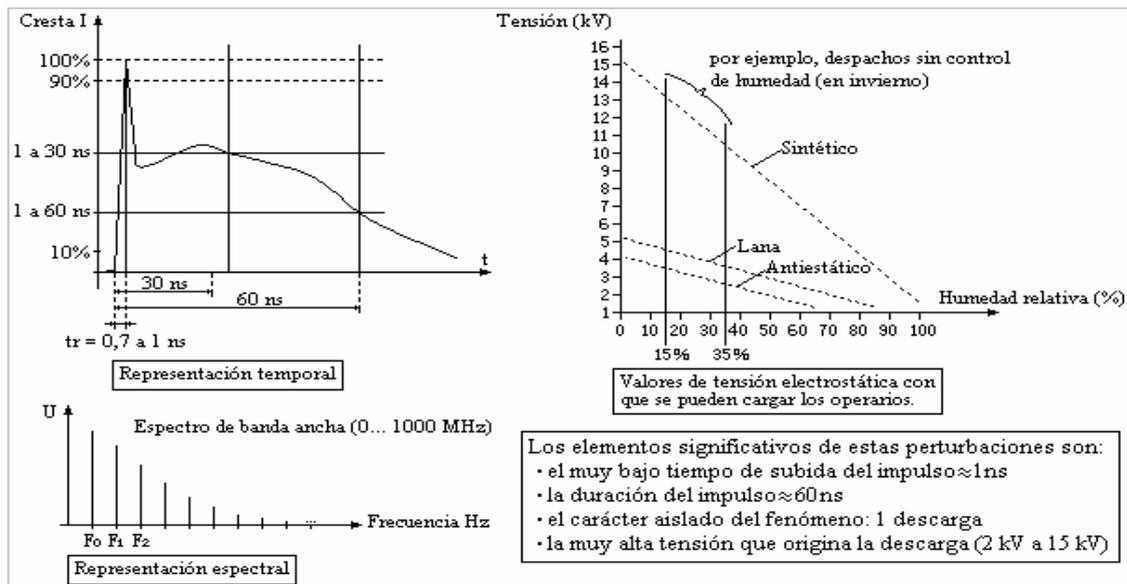


Figura 1.1 Generalidades de las descargas electrostáticas.

1.1.2 SOBRETENSIONES TEMPORALES

Una amplia cantidad de fenómenos, a veces resultantes de operaciones del sistema, o por condiciones accidentales (fallas), pueden producir sobretensiones que ocurren a la frecuencia del sistema. Los equipos generalmente se diseñan para soportar el efecto de altas sobretensiones temporales, certificada según un ensayo de tensión de corta duración.

Las sobretensiones temporales se definen como sobretensiones de corriente alterna de una significativa duración y amplitud que pueden aparecer, generalmente, son originadas por fallas a tierra, resonancia, ferro resonancia o pérdida súbita de carga.

SOBRETENSIONES TEMPORALES DEBIDO A FALLAS ENTRE EL SISTEMA DE MEDIA TENSIÓN Y TIERRA.

Cuando ocurre una falla entre un sistema de media tensión y tierra, en dependencia de sus configuraciones respectivas de puesta a tierra, la corriente de falla en media tensión fluye en uno o más electrodos de tierra y genera sobretensiones debido a acoplamiento por tierra en los sistemas de baja tensión.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Los parámetros fundamentales que influyen en el valor y la duración de las sobretensiones temporales debido a fallas entre media tensión y tierra son los siguientes:

Configuración de los electrodos de tierra de las redes de media y baja tensión:

- Uno dos o tres electrodos de tierra distintos.
- Electrodos de puesta a tierra comunes o electrodos de puesta a tierra separados para redes de media y baja tensión.
- Los valores y el número de electrodos de tierra del sistema de distribución de baja tensión.

Tipo de puesta a tierra del sistema de media tensión:

- Aislado.
- Solidamente puesto a tierra.
- Puesto a tierra a través de impedancias.
- Sistema resonante.

Método utilizado para limpiar la falla en media tensión:

- Aislado, resonante o por impedancias: Tiempos largos.
- Solidamente puesto a tierra: Tiempo muy corto.
- Puesto a tierra a través de baja impedancia: Tiempo corto.

OCURRENCIA DE SOBRETENSIONES TEMPORALES DEBIDO A FALLAS A TIERRA EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN

- En las subestaciones de media tensión y baja tensión: en el aislamiento del equipamiento de baja tensión entre las partes vivas y las partes conductoras expuestas si no hay puesta a tierra común de los sistemas de media y baja tensión.
- En las instalaciones eléctricas de baja tensión: en el aislamiento del equipamiento de baja tensión entre las partes vivas y las partes conductora expuestas si el neutro no está conectado al electrodo local de tierra.
- Entre la tierra local de la instalación de baja tensión y una tierra remota, esforzando el equipamiento usado fuera del edificio o en la entrada de servicio el cual puede que no esté conectado al terminar de puesta tierra principal.

OCURRENCIA DE SOBRETENSIONES TEMPORALES DEBIDO A FALLAS A TIERRA EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN

- En sistemas TN, la falla a tierra puede producir sobretensiones comparables a aquellas que ocurren en circuito donde la falla es entre fase y neutro.
- En sistemas TT, la corriente de falla puede circular entre el conductor de protección y dos electrodos de tierra.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Las consecuencias de las fallas a tierra, en particular las sobretensiones que afectan a los supresores de sobretensión, están determinadas por la localización de la falla y en un sistema TT por la impedancia a tierra de los electrodos.

Si el supresor de sobretensión se selecciona con una máxima tensión de operación continua (MCOV de las siglas en inglés *Maximun Continuos Operate Voltage*, U_c) menor que el valor producto de la sobretensión por falla a tierra, la corriente que circula y el coeficiente negativo de temperatura que tienen los materiales de los que están contruidos, los lleva a ruptura térmica.

Los dispositivos de protección contra sobretensión al nivel actual de la tecnología, como los que se aplican para protección contra descarga atmosférica y por conmutación, no tienen la capacidad requerida para limitar las sobretensiones temporales. Por tanto cuando se seleccione la tensión máxima de operación para los supresores de sobretensión en una instalación específica se debe tomar en consideración la probabilidad de ocurrencia de sobretensiones temporales en el sitio y su magnitud.

1.1.3 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS

1.1.3.1 SOBRETENSIONES DEBIDO A OPERACIONES DE CONMUTACIÓN

Generalmente cualquier operación de conmutación, falla, interrupción, entre otras en una instalación eléctrica es seguida por un fenómeno momentáneo en el cual ocurre una sobretensión. El cambio repentino en el sistema puede iniciar oscilaciones amortiguadas de relativa alta frecuencia (determinada por la frecuencia de resonancia de la red), hasta que el sistema se estabilice de nuevo al estado estable. La magnitud de las sobretensiones por conmutación dependen de los parámetros del circuito, del tipo de circuito y del tipo de operación de conmutación (cerrar, abrir, reencendido).

En la mayoría de los casos el máximo de la sobretensión de conmutación está en el orden de dos veces la amplitud de la tensión del sistema, pero valores mayores pueden ocurrir, especialmente cuando se conmutan cargas inductivas (motores, transformadores) o cargas capacitivas. También la interrupción de corrientes de cortocircuito puede causar altas sobretensiones.

Realizando detalladas mediciones en instalaciones eléctricas y su respectiva evaluación estadística puede ser estimada la magnitud de la sobretensión debido a operaciones de conmutación. A través de estas mediciones puede ser evaluada la frecuencia de la ocurrencia de sobretensiones transitorias que dependan de ciertos periodos de tiempo durante un año, de ciertos días de la semana o determinados momentos del día. Si existen características tiempo-dependientes como estas, la ocurrencia de los transitorios puede ser inferida de eventos que ocurren dentro de la instalación eléctrica, ya sea por operaciones de conmutación programada o por operar equipos eléctricos que puedan crear interferencia debido a su diseño específico.

Estas consideraciones hacen necesaria examinar la probabilidad de que un supresor de sobretensiones diseñado con la intención de mitigar las sobretensiones pueda ofrecer una efectiva limitación de sobretensión. Después se debe determinar que el mismo tenga la capacidad necesaria

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

de acuerdo a los niveles y duración de las corrientes que estén involucradas en las sobretensiones probables en esas localizaciones. Se denominan bajo este término, entre otros, los fenómenos provocados por la puesta en marcha o el apagado de equipos eléctricos.

Resumiendo las sobretensiones debido a operaciones de conmutación pueden ocurrir debido a:

- Puesta en marcha de motores / transformadores.
- Cebadores para el alumbrado público.
- Conmutación de redes de alimentación.
- Energización de un circuito inductivo.
- Funcionamiento de un fusible o de un disyuntor.
- Interrupción de una corriente de corto circuito.
- Caída de líneas.
- Contacto falso o intermitente.

Estos fenómenos van a generar sobretensiones transitorias de varios kV con tiempos de subida del orden del microsegundos que van a afectar a los equipos de las redes sobre los cuales el sistema perturbador está conectado.

1.1.3.2 SOBRETENSIONES DEBIDO A LA INTERACCIÓN ENTRE DIFERENTES SISTEMAS

Este tipo de sobretensiones son las que ocurren por interacciones entre dos sistemas diferentes, como la de un sistema de energía de corriente alterna y un sistema de comunicaciones y transmisión de datos, durante el flujo de corrientes asociadas a sobretensiones en uno de los dos.

Las interacciones de sistemas ocurren en la interfase de dos sistemas diferentes, como la de un sistema de energía que esté proveyendo a un equipo la electricidad que necesita, y un sistema de comunicaciones que este proveyendo al equipo las señales que va a procesar. Este equipo multipuerto puede estar expuesto a sobretensiones que ocurren no solo en el modo diferencial de cada uno de los puertos sino también entre los terminales de referencia de los dos puertos.

Un ejemplo típico donde ocurre conexión a un sistema de energía y a un sistema de comunicación es la computadora personal (PC) con conexión de módem o una máquina de fax. Aunque cada uno de los sistemas de energía y de comunicación puede incluir protección contra sobretensiones, la corriente que fluye en el sistema bajo sobretensión causa un cambio en el potencial de su punto de referencia mientras que el punto de referencia que no está bajo sobretensión permanece sin cambio. La diferencia de potencial entre los dos puntos de referencia aparece a través de los dos puertos de la PC/módem. Según la naturaleza de la PC/módem y su inmunidad (puede estar constituida por piezas de distintos fabricantes), esta diferencia de potencial puede tener consecuencias dañinas o molestas.

El caso más crítico es cuando la entrada de alimentación (línea de c. a) está en el extremo opuesto al puerto de entrada de la línea de comunicación (módem, fax), ya que es cuando pueden ocurrir las mayores sobretensiones (ver figura 1.2). Con el fin de eliminar este tipo de sobretensión se fabrican

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

dispositivos que brindan doble protección (alimentación y comunicación), ya que al disminuir el espacio de aire entre protectores, se elimina la sobretensión.

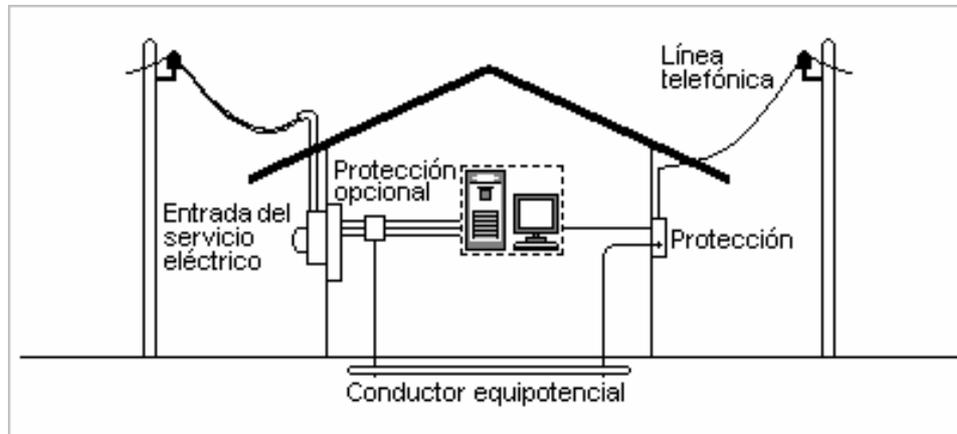


Figura 1.2 Ejemplo de interacción entre diferentes sistemas.

1.1.3.3 SOBRETENSIONES DEBIDAS AL LEMP

LEMP: Lightning Electro-Magnetic Pulse.
Impulso Electromagnético del Rayo.

De acuerdo con su origen las sobretensiones producto del LEMP pueden ser:

Externas. Generadas por descargas de rayo que impactan las líneas entrantes o el terreno cercano y son transmitidas a los sistemas eléctricos y electrónicos mediante dichas líneas.

Internas. Generadas por descargas de rayo que impactan la estructura o el terreno cercano.

De acuerdo con los mecanismos de acoplamientos las sobretensiones producto del LEMP pueden ser:

Conducidas e inducidas: Transmitiéndose a los aparatos mediante el cableado de conexión.

Debidas al campo electromagnético radiado: Actuando directamente sobre los aparatos.

El campo electromagnético radiado puede deberse a:

- La propia corriente de la descarga que fluye a través del canal del rayo.
- La corriente parcial del rayo que circula por los conductores (ej.: en los conductores de bajada de un LPS externo o en el blindaje espacial externo).

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

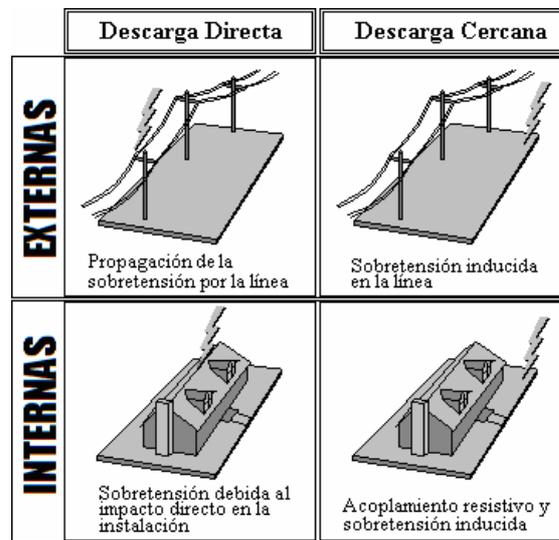


Figura 1.3 Clasificación de las sobretensiones debidas al LEMP respecto a su origen.

1.1.3.3.1 MECANISMOS DE ACOPLAMIENTOS

Mecanismos de acoplamientos:

- Acoplamiento resistivo.
- Acoplamiento por campo magnético (inductivo).
- Acoplamiento por campo eléctrico (capacitivo).

ACOPLAMIENTO RESISTIVO

Debido al aumento del potencial eléctrico de edificios o estructuras interconectadas eléctricamente mediante líneas aéreas o soterradas de energía o comunicaciones.

Es la causa más común de los transitorios electromagnéticos, y afectan tanto a los cables soterrados como a las líneas aéreas. Ocurren cuando un rayo impacta a tierra y sube el potencial eléctrico de edificios o estructuras interconectadas eléctricamente. Ejemplos de estas interconexiones son:

- Alimentadores de subestación a edificio.
- Alimentadores de edificio a edificio.
- Líneas telefónicas dentro de un edificio.
- Cables de comunicación o transmisión de datos entre edificios.

Los transitorios acoplados resistivamente pueden ocurrir cuando existen tierras independientes en estructuras separadas solo unos metros.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

En la figura 1.4a se observa un ejemplo de este caso. El aumento de potencial del sistema de puesta a tierra está determinado por la corriente del rayo y por la impedancia de puesta a tierra. En el primer momento el potencial del electrodo a tierra está determinado por la impedancia local, por ejemplo 10Ω . Esto significa que una alta tensión se produce entre el sistema de puesta a tierra y las instalaciones eléctricas dentro del edificio, con una alta probabilidad de causar daños en el aislamiento o problemas en la operación de los supresores.

Después de estos eventos pueden fluir impulsos de corrientes hacia varios sistemas, mayormente determinados por su impedancia a tierra. De esta forma se producen sobretensiones en el sistema de alimentación de energía y en otros servicios (sistemas de telecomunicación, datos y señales, etc.). Además se transfieren sobretensiones a otros edificios estructuras o instalaciones. Por ejemplo, se pueden afectar todas las instalaciones de energía que se alimentan del mismo transformador de distribución del que recibe energía la afectada inicialmente.

Cuando un rayo cae directamente al suelo la corriente de la descarga del rayo puede elevar el potencial de tierra varios kV como consecuencia de la corriente que circula por el terreno, causando sobretensiones en los sistemas que tengan su referencia de tierra en las cercanías del punto de impacto, ver figura 1.4b.

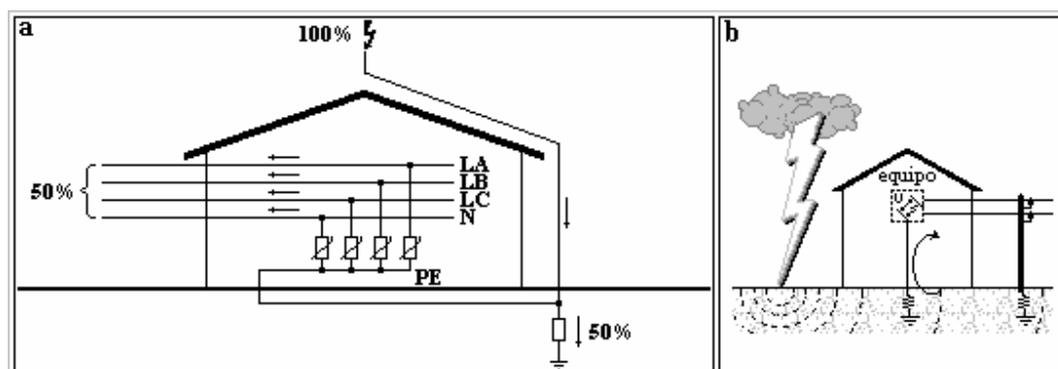


Figura 1.4 Acoplamiento resistivo debido al impacto de un rayo en el pararrayo de una instalación (a).
Acoplamiento resistivo por la caída de un rayo a tierra en la vecindad de un sistema (b).

ACOPLAMIENTO POR CAMPO MAGNÉTICO (INDUCTIVO)

Debido a los altos campos electromagnéticos causados por la corriente del rayo, acoplamientos inductivos y capacitivos a sistemas eléctricos cercanos al camino de un rayo también pueden causar sobretensiones importantes, especialmente en sistemas de datos y electrónicos causando fallas y/o errores.

Con la descarga del rayo fluye una gran corriente a la que se asocia un campo electromagnético variable. Si hay cables eléctricos de potencia o señal dentro del campo magnético de dicha corriente, en ellos se induce una tensión. Este efecto de inducción es causado por descargas entre nubes sobre una línea eléctrica o de telecomunicaciones, o al impacto directo en el pararrayos de un edificio en

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

el cual el conductor de bajada del mismo corre paralelo a cables eléctricos de fuerza, alumbrado o señal, tal y como se muestra en la figura 1.5.

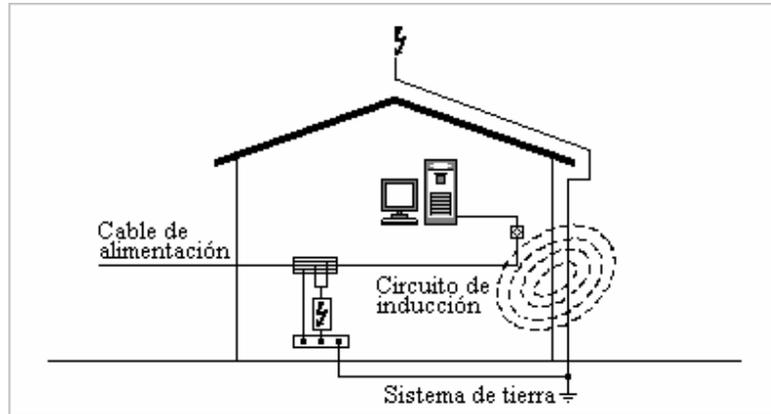


Figura 1.5 Acoplamiento inductivo debido al impacto directo en el pararrayos de una edificación.

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

$$U = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{di_L}{dt} \cdot l \cdot \ln \frac{d+b}{d} \quad (1.2)$$

Donde:

μ_0 : Permeabilidad magnética del aire, Vs/Am.

D, b, l: Dimensiones descritas en la figura 1.6.

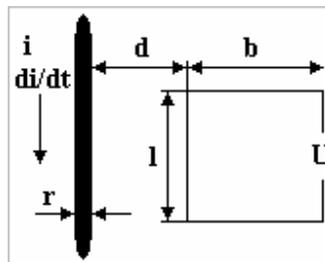


Figura 1.6 Dimensiones del lazo creado por instalaciones en una estructura lxb.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Como

$$\frac{di_L}{dt} = 2\pi \cdot d \cdot \frac{dH}{dt} \approx 2\pi \cdot d \cdot \frac{H_m}{T_L} \quad (1.3)$$

$$\ln \frac{d+b}{d} \approx \frac{b}{d} \quad (\text{para } d \gg b) \quad (1.4)$$

Sustituyendo 1.3 y 1.4 en 1.2, tenemos que:

$$U = \mu_0 \cdot S_{lb} \cdot \frac{H_m}{T_L} \quad (1.5)$$

Donde:

S_{lb} : área del lazo, m².

H_m : intensidad del campo magnético en la estructura, A/m.

T_L : tiempo de frente de la corriente del rayo o de la onda de campo magnético, s.

En caso de una descarga directa puede ser estimada mediante la expresión:

$$U = \frac{\mu_0 \cdot I_L}{40 \cdot T_L} \cdot I \cdot \ln \left(\frac{d+b}{d} \right) \quad (1.6)$$

Donde:

D , b , l y T_L corresponden a los parámetros definidos anteriormente.

I_L : Es la corriente del rayo, kA.

ACOPLAMIENTO POR CAMPO ELÉCTRICO (CAPACITIVO)

Todo conductor se acopla capacitivamente (capacitancias parásitas) con el resto de los conductores (y también con tierra). Cuando aparece una diferencia de potencial, estas capacidades se cargan y más tarde se descargan por los conductores, provocando corrientes nocivas, ver figura 1.7.

Cuando la carga eléctrica transportada por el líder del rayo se posiciona cerca de la tierra, se producen campos eléctricos muy fuertes (del orden de 500 kV/m).

Su efecto, dentro de las instalaciones, es en general menor que el magnético y el resistivo y puede despreciarse si se considera un mínimo de medidas de protección tales como el apantallamiento de la instalación.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

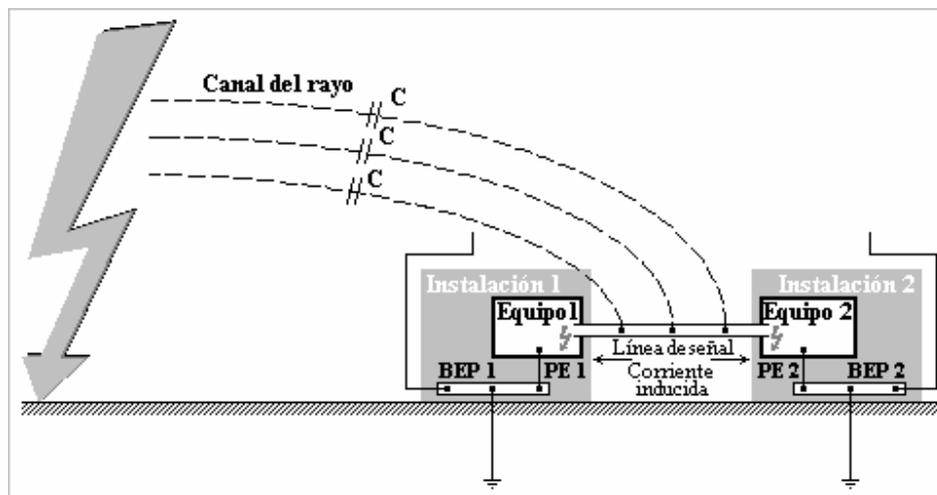


Figura 1.7 Acoplamiento capacitivo.

1.2 PROBLEMAS CAUSADOS POR LAS SOBRETENSIONES

Malfuncionamiento:

Los niveles lógicos o analógicos del sistema son alterados. El sistema puede ser reiniciado y entonces funcionará normalmente.

- Pérdida de datos.
- Funcionamiento erróneo o bloqueo de programas informáticos.
- Errores de transmisión de datos.

Degradación:

Los tiempos de exposición más largos a sobretensiones transitorias de bajo nivel, degradaran los componentes electrónicos.

- Envejecimiento prematuro de componentes.
- Reducción de la vida útil.
- Incremento de la probabilidad de fallas.

Daño:

Las sobretensiones transitorias de mayor nivel pueden causar daño a los componentes, tarjetas electrónicas e interfaces de entrada/salida.

- Destrucción de uniones semiconductoras.
- Destrucción de las metalizaciones de los componentes.
- Destrucción de calles de circuitos impresos y de contactos.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.3 TENSIÓN DE SOPORTE A IMPULSO O NIVEL DE AISLAMIENTO

La tensión de soporte a impulso o nivel de aislamiento, es la tensión asignada por el fabricante a un equipo o a una parte del mismo, que caracteriza a su capacidad de soporte ante ondas tipo impulso típica de 1,2/50 μ s sin daño de su aislamiento tanto interno como externo.

1.8-2.5 KV	Máquinas herramientas Motores Bombas	
1.5-1.8 KV	Máquinas con electrónica Variadores de frecuencia	
1.0-1.5 KV	Ordenadores personales Módems Robótica Máquinas con PLC	
0.5-1.0 KV	Informática profesional Equipos médicos Instrumentación Equipos de precisión Centrales de alarma	

Figura 1.8 Valores ilustrativos de la tensión de soporte a impulso o nivel de aislamiento de diferentes receptores eléctricos.

En temas posteriores se profundizará sobre este aspecto.

1.4 EL FENÓMENO DEL RAYO

Debido a que nuestra sociedad es cada día más dependiente de la red de energía eléctrica y de información, de los equipos de cómputo y, en general, de los equipos eléctricos y electrónicos el diseño y la protección de estos contra los efectos dañinos de las descargas eléctricas atmosféricas es hoy una tarea de primera necesidad.

Por ello en lo que se refiere a parámetros de rayo, se trata de abordar el tema con un enfoque crítico para recomendar cuales son los parámetros de la descarga eléctrica atmosférica que deben utilizarse en los diseños de ingeniería de nuestro país, tomando como base una comparación entre estudios realizados recientemente en zonas tropicales (más cercanas a nuestra realidad) y otros llevados a cabo para ubicaciones geográficas diferentes a las de nuestro entorno.

1.4.1 FORMACIÓN DEL RAYO

Desde la primera percepción de que el rayo es una descarga eléctrica, los científicos han estudiado ampliamente las tormentas y los rayos. Aunque han transcurrido siglos de estudios y creado instrumentos sofisticados que han permitido un conocimiento mayor, hay mucho aún sobre este fenómeno que no es claramente entendido. Para comprender como funciona la protección contra el rayo y cual sistema es más apropiado para las diferentes aplicaciones, se necesita un repaso del fenómeno.

Las nubes de tormenta son cuerpos eléctricamente cargados suspendidos en una atmósfera que puede ser considerada en el mejor de los casos un mal conductor. Durante una tormenta, se produce una separación de cargas dentro de la nube. El potencial en la base de la nube alcanza generalmente los 100 MV y la elevación resultante del campo eléctrico sobre la tierra los 10 kV/m. Dicha separación de cargas usualmente deja la base de la nube con carga negativa, induciéndose una carga similar de polaridad contraria en la superficie de la tierra debajo de ésta de aproximadamente la misma forma y tamaño. Ver figura 1.9.

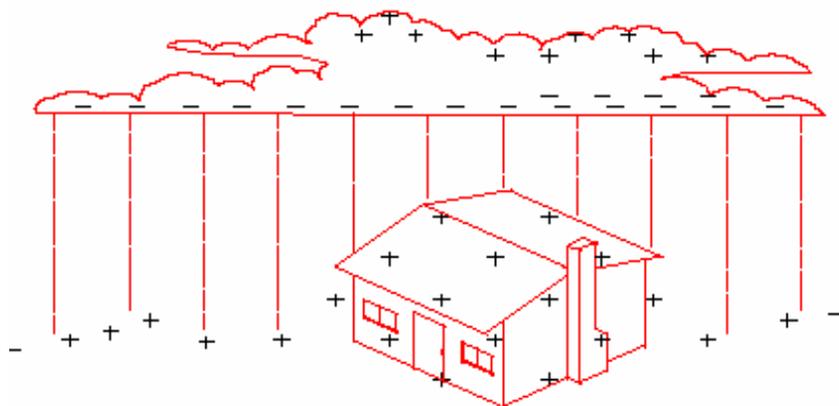


Figura 1.9 Separación de carga.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Mientras crece la intensidad de la tormenta, la separación de cargas continua hasta que el aire entre la nube y la tierra no puede actuar como aislador.

Se forman chispas de baja intensidad llamadas “líderes de paso”, que se mueven desde la base de la nube que con arranques y paradas sucesivas acercándose a tierra. Estos pasos son de igual longitud, y esa longitud está relacionada con la carga en la nube de tormenta así como la corriente pico del impacto. Suelen ramificarse mucho, pero la mayoría de ellas no llegan al suelo.

Cerca de la superficie terrestre se va generando, poco a poco y sobre ciertos puntos llamados de descarga, una acumulación de cargas positivas. Mientras los líderes se aproximan a la tierra el campo eléctrico entre líderes se incrementa con cada paso. Finalmente, a la distancia de un paso de la tierra se establece una “zona de impacto”. Una zona de impacto tiene forma semiesférica con un radio igual a una longitud de paso (ver figura 1.10). El campo eléctrico dentro de la zona de impacto es tan alto que crea trazadores ascendentes desde los objetos en tierra. El primer trazador que alcanza el líder de paso cierra el circuito nube-tierra y comienza el proceso de neutralización de cargas.

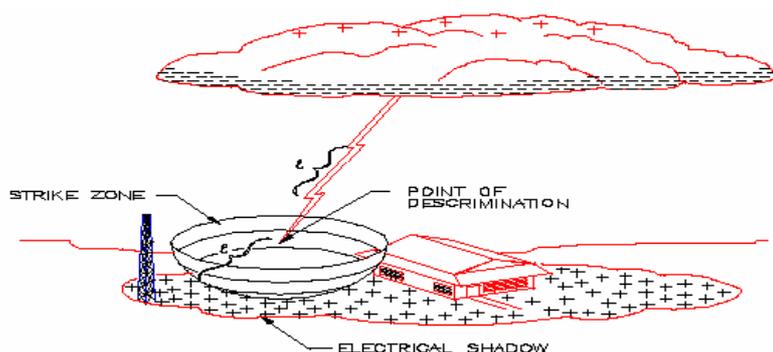


Figura 1. 10 Zona de impacto.

En la figura 1.11 se muestra como cuando se interponen estructuras entre la tierra y la nube de tormenta, éstas también se cargan. Ya que ellas acortan una parte del espacio de aire de separación, pueden ser impactadas por el rayo.

La neutralización de cargas (el rayo) es causado por el flujo de electrones de un cuerpo a otro, tal que no haya diferencia de potencial resultante entre los dos cuerpos. El proceso crea el mismo resultado que cortocircuitar los terminales de una batería. Se produce en este momento la primera descarga de retorno (Return Stroke) que se desplaza desde la tierra a la nube transportando gran cantidad de carga en el canal y en un tiempo muy pequeño.

Posteriormente aparece una segunda descarga de retorno (menos energética que la primera), es la llamada GUÍA RÁPIDA (Dart Leader) que baja de una sola vez de forma no pulsante y así sucesivamente hasta unas 5 como promedio. Para el ojo humano todo sucede tan rápido que lo que se observa es un solo destello.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

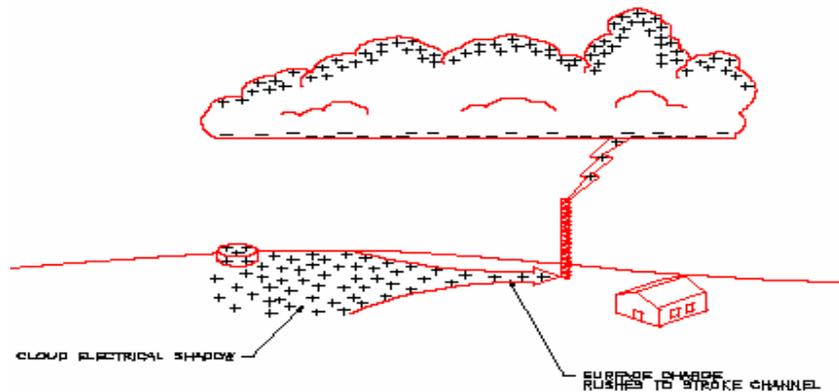


Figura 1.11 Neutralización de cargas.

Aunque las tormentas son altamente variables en su intensidad, dimensiones, composición y estructura eléctrica se pueden hacer algunas generalizaciones a cerca de ellas:

- La actividad eléctrica suele venir asociada con fuertes corrientes ascendentes y precipitación, por la que se asocian a nubosidad de tipo cumuliforme.
- Las observaciones disponibles revelan actividad eléctrica entre 60° N y 60° S, más frecuentemente en bajas latitudes y en tierra.
- La mayoría de los rayos se observan en nubes con contenido de gotas de agua y de hielo.

1.4.2 EFECTOS DEL RAYO

Típicamente más de 2000 tormentas están activas alrededor del globo terráqueo en un momento dado, produciendo aproximadamente 100 descargas por segundo, casi 30 millones de descargas en un año lo que lo convierte en el principal regulador del balance calorífico del planeta, además de ser un gran fijador del nitrógeno en el suelo, necesario para la vida vegetal y un recuperador del ozono en el aire.

La descarga eléctrica atmosférica es, sin embargo el principal generador de disturbios electromagnéticos, y tiene efectos muy negativos. Los principales son:

Térmicos

Relacionados con el desprendimiento de calor, la temperatura máxima puede alcanzar valores superiores a 30000°C. Se le asocian daños forestales, por fuego y de elementos eléctricos y electrónicos por sobrecalentamiento.

Electromagnéticos

Asociados a la alta frecuencia (espectro muy largo) del fenómeno que provoca radiaciones parásitas, inducción y acoplamiento de circuitos. Se le asocian daños debido a sobretensiones inducidas en circuitos eléctricos, electrónicos y de comunicaciones.

Electrodinámicos

Debidos a los esfuerzos entre conductores paralelos próximos con la circulación de la corriente del rayo. En un conductor la corriente ejerce una fuerza, la cual se obtiene directamente de la ley circuital de Amperes:

$$F = B \cdot l \cdot i = \frac{\mu_{o1}}{2\pi a} i^2 \quad (1.7)$$

Donde:

B: inducción magnética

i: intensidad de corriente

l: longitud del conductor

a: separación entre conductores

Se le asocian daños de roturas de conductores eléctricos y telefónicos.

Electroquímicos

En su trayectoria el rayo puede encontrar materiales metálicos en los que la reacción química que provoca es la corrosión; en especial en la zona de transición metal-tierra puede desgastar el metal o, si existe, la cubierta galvánica anticorrosiva (reacción galvánica). Se le asocian daños en los sistemas de puesta a tierra.

Fisiológicos

Anualmente el rayo es el responsable de un porcentaje importante de pérdidas de vidas humanas. En los sistemas eléctricos es frecuente alcanzar potenciales de varios centenares de kV en tomas de tierra de los equipos de alta tensión afectados. La ley de variación, función de la distancia a la toma de tierra, es aproximadamente hiperbólica y provoca la aparición de potenciales y gradientes asociados con valores muy elevados, en las proximidades de las tomas de tierra, incluso a distancias de decenas de metros, que constituyen un peligro para la vida por los altos valores de las tensiones de paso y de contacto que pueden provocar una electrización causante de electrocución.

1.4.3 PARÁMETROS DEL RAYO IMPORTANTES PARA APLICACIONES EN INGENIERÍA.

La definición de los parámetros del rayo requiere de una exquisita exactitud, ya que para cualquier análisis de la protección de los sistemas eléctricos, instalaciones industriales y edificaciones contra las descargas de rayos es necesario el conocimiento de sus características en el espacio y en el tiempo.

Diversas investigaciones se han desarrollado, incluyendo registros y mediciones del rayo, para poder modelar su cuadro de desarrollo desde la formación de la nube de tormenta y el surgimiento del canal del líder, hasta su propagación e impacto en los objetos en tierra teniendo en cuenta las descargas múltiples y así caracterizar los parámetros del rayo para su aplicación en los diseños de ingeniería.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Sin embargo es necesario tener bien claro, que la mayoría de estas investigaciones han sido realizadas en zonas templadas o semitropicales y muy pocas en zonas tropicales (todas en este caso sin series de tiempo lo suficientemente válidas desde el punto de vista estadístico para validar los parámetros del rayo) y por tanto, que la información disponible en las normas internacionales no puede ser trasladado sin un estudio detallado de objetividad de su utilización.

Para el propósito de planeamiento del sistema, diseño y mantenimiento, los parámetros del rayo pueden dividirse en dos grupos fundamentales:

- Parámetros de incidencia, que incluyen:
 - Nivel ceráuneo, Td o NC.
 - Densidad de descargas a tierra Ng o DDT.
 - Polaridad del rayo.
 - Multiplicidad.
 - Duración de la descarga eléctrica atmosférica.
 - Duración del intervalo entre descargas individuales.
- Parámetro de amplitud de la corriente de retorno del rayo, CR.
- Parámetro de la forma de impulso de la corriente de rayo.

La comprensión y el conocimiento que debe ser esclarecido a todo el personal que se dedica al diseño de los sistemas de protección integral contra rayo en el sistema de baja tensión, instalaciones industriales y edificaciones es que las magnitudes anteriormente señaladas varían espacial y temporalmente.

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.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

En un mismo país, por ejemplo Cuba, los parámetros pueden variar de una región a otra, influenciados además de por la ubicación geográfica de cada región por los parámetros meteorológicos particulares de las microlocalizaciones y la orografía.

La perspectiva espacial significa que los parámetros del rayo varían global y localmente, influenciados por la delimitación de área y por las micro y las macro influencias como: los parámetros meteorológicos (temperatura, viento, presión atmosférica, etc.) y los parámetros geográficos (regiones montañosas, planas o costeras, etc.).

La perspectiva temporal significa que, los parámetros del rayo se caracterizan por variar en diversas escalas en el tiempo, las cuales son: diariamente (la información de tormenta es diferente dependiendo de la convección en la mañana o en la tarde), mensualmente (variación estacional) y cíclica (en base a años).

En lo adelante, se describen los parámetros del rayo de acuerdo a las investigaciones realizadas en diferentes países.

1.4.3.1 INTENSIDAD DE LAS DESCARGAS.

Los indicadores más utilizados para evaluar este parámetro, actualmente son: los días tormenta y la densidad de rayos a tierra (N_g o DDT).

DÍAS TORMENTA AL AÑO.

Los días tormentas, primer indicador establecido y ampliamente utilizado todavía, es un indicador indirecto que expresa la cantidad de días tormenta al año (T_d o N_c) de la región y acostumbra a darse para un país según el Mapa de Niveles Isoceráunicos (curvas de nivel de igual cantidad de días tormentas al año).

Para obtener el número de días tormentas al año se utilizan las observaciones que se realizan desde las estaciones meteorológicas donde se toma como día de tormenta, aquel en que el observador note aunque solo sea una llamarada de rayo o trueno. De esta manera no se discrimina entre los rayos nube a nube, entre nubes y los rayos nube a tierra.

Sus principales imprecisiones se deben a su forma de obtención y al necesario establecimiento de una relación empírica o analítica entre los días tormentas y el número total de rayos a tierra. Además deben tomarse las observaciones en el período más largo posible para en algún modo tener en cuenta las variaciones de tormenta a tormenta, de año a año y de región en región.

El mapa de Niveles Isoceráunicos de la República de Cuba y que constituye el único indicador de la intensidad de las tormentas con que cuenta el país, se muestra en la figura 1.12.

Como se conoce, para los propósitos de ingeniería, un diseñador de sistemas de protección contra rayos debe conocer, no la cantidad de días tormenta sino la densidad de rayos a tierra.

En este caso, como se plantea anteriormente se establece una relación entre T_d y N_g o N_c y DDT.

DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA.

La densidad de rayo a tierra (N_g o DDT) es un indicador directo, actualmente el más exacto para caracterizar la actividad de tormenta en una región. Expresa la cantidad de rayo en una superficie de tierra de un kilómetro cuadrado en el tiempo de un año. La información que se obtiene de la determinación de rayos a tierra en un periodo de tiempo lo suficientemente largo para una región permite definir las curvas de isodensidad de rayos a tierra.

Existen dos tecnologías para obtener la densidad de rayos a tierra: los contadores de rayo y los sistemas de detección y localización de rayos.

Desde la década del cincuenta del siglo pasado, se han utilizado los contadores electrónicos de rayos para realizar mediciones directas de la densidad de rayos a tierra en regiones limitadas en todo el mundo. Estos dispositivos son sensores del campo eléctrico de la descarga. De forma general, los contadores de rayo basan su funcionamiento en que el campo eléctrico de la descarga censado en la antena se introduce a un circuito contador, si este rebasa el umbral prefijado el contador se dispara e incrementa en uno su valor. Después de operar no son capaces de volver a hacerlo hasta un segundo posterior con lo que evitan registrar las descargas consecutivas.

Los contadores de rayos presentan un grupo de limitaciones en su aplicación. Ellos son sensores de rango corto, tienen un rango de eficiencia o radio de cubrimiento de 20 a 30 Km por lo que el cubrimiento de un área grande implica la utilización de muchos contadores. Esto encarece el proyecto a la vez que trae dificultades en la logística de la recuperación de la información por lo que en la actualidad se utilizan fundamentalmente en regiones no amplias. No discriminan la polaridad de la descarga ni los rayos ramificados.

Además, ellos deben ser colocados en áreas totalmente abiertas porque obstrucciones en su vecindad, por ejemplo, edificaciones altas, hace necesario aumentar la altura de la antena y por tanto el rango efectivo lo cual obliga a ajustes de sensibilidad que por lo regular conducen a estimaciones erróneas de la densidad de rayos a tierra. Especial cuidado debe tenerse en la posibilidad de obtenerse conteos deficientes en casos de proximidad de los contadores a torres de transmisión de onda corta, estaciones de servicio de automóviles o carreteras.

La medición de la densidad de rayos a tierra por medio de los Sistemas de Detección y Localización de Rayos constituye hasta hoy el medio más exacto para evaluar este indicador.

La aparición de los sistemas de localización de rayos (LLS's: siglas en inglés de Lightning Location System) brinda una poderosa herramienta para caracterizar los parámetros del rayo. Además de registrar los rayos nube a tierra nos brinda la información sobre el momento en que ocurre la descarga en tiempo real (espacio y tiempo), su valor pico, el número de descargas consecutivas, e incluso su polaridad.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

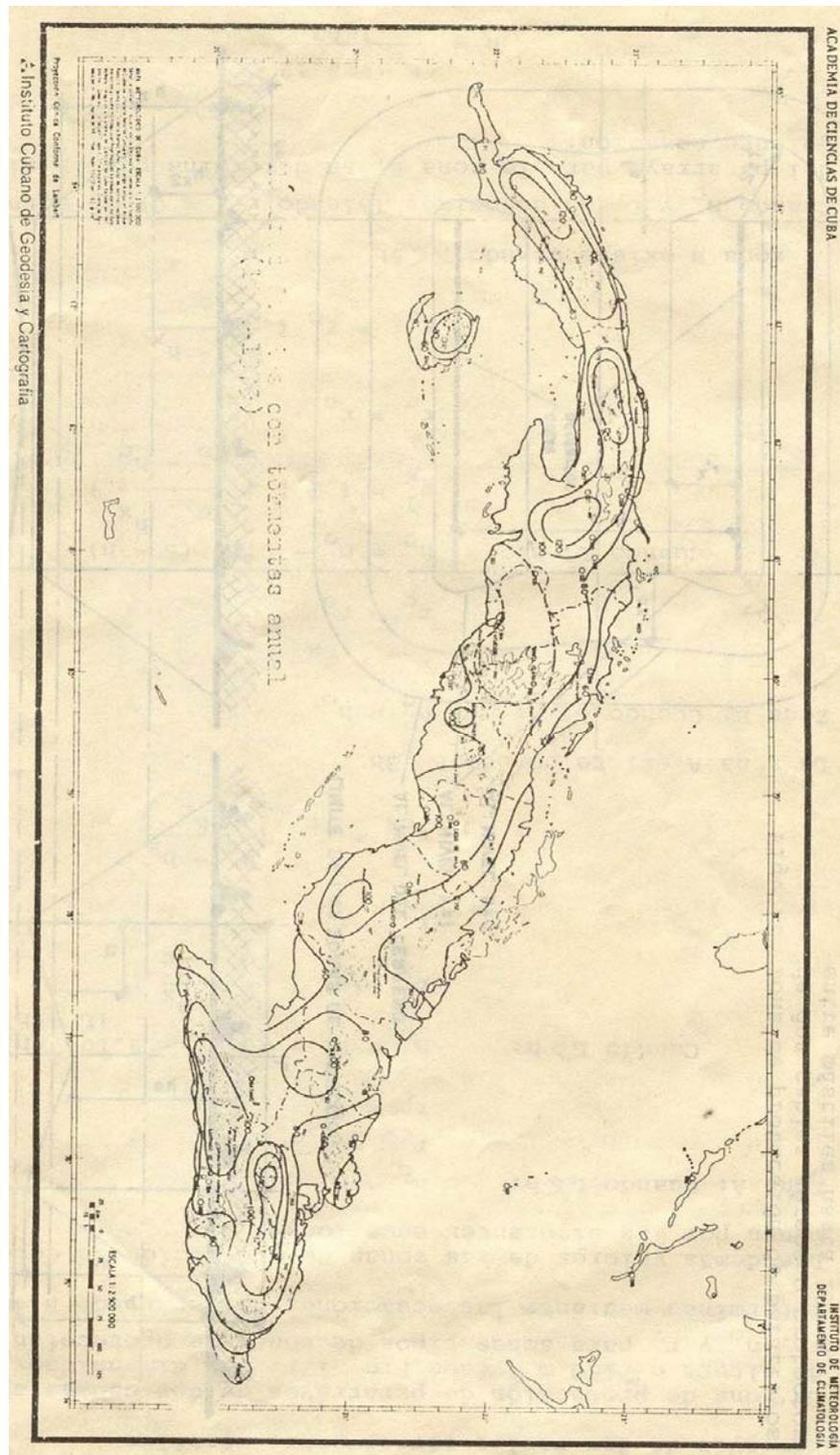


Figura 1.12 Mapa de Niveles Isoceráunicos de la República de Cuba.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobreteniones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Existen dos métodos para obtener la incidencia de rayos a tierra por medio de los Sistemas de Detección y Localización de rayos. Uno orientado a la exposición particular de una línea u otro elemento del sistema y otro a la obtención regional del parámetro. Como ellos dan una estimación de la latitud y longitud de cada impacto brindan la posibilidad de obtener N_g .

La incidencia de rayos cercana al objeto de análisis en cuestión es una representación del número de eventos que golpean sobre él o en su vecindad en un intervalo de tiempo dado. Esta forma de representación brinda la información más específica sobre la exposición a golpes del rayo de cualquier elemento que no es necesariamente igual en toda su longitud o extensión y permite, por tanto, el mejor diseño de protección y el aumento de la confiabilidad individual de las componentes del sistema eléctrico.

La información de latitud y longitud que brindan los Sistemas de Detección y Localización de rayos se utiliza frecuentemente para obtener la información de la densidad de rayos a tierra en una región, la cual se calcula por división de la región de interés en pequeños rectángulos y acumulación del número total de impacto de cada uno de ellos en un intervalo de tiempo predeterminado. El resultado final se expresa en un Mapa de Isodensidad de rayos a tierra de la región que además de los propósitos de protección de los sistemas eléctricos se utiliza en climatología, seguridad pública, entre otros.

Al igual que en el primer método, la eficiencia de la detección y la exactitud de la localización juegan un rol importante en la obtención de datos fidedignos.

El sistema de localización de rayo más recientemente fue desarrollado por el centro Marshall de la NASA basado en el principio de detección óptica. El detector óptico de transitorios es un equipo científico montado sobre la Estación Satelital Microlab-1, la cual fue lanzada a órbita en un cohete Pegasus, en abril de 1995. Su misión fundamental es mejorar la comprensión de la distribución de las tormentas, y su variación, mediante la detección y localización de la actividad eléctrica atmosférica sobre grandes áreas de la Tierra.

Utilizando la técnica de muestreo en su paso durante cinco años, por diferentes regiones, la NASA emitió con los resultados de esta investigación el Mapa de Distribución de la Actividad Eléctrica Atmosférica en el planeta que se muestra en la figura 1.13.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

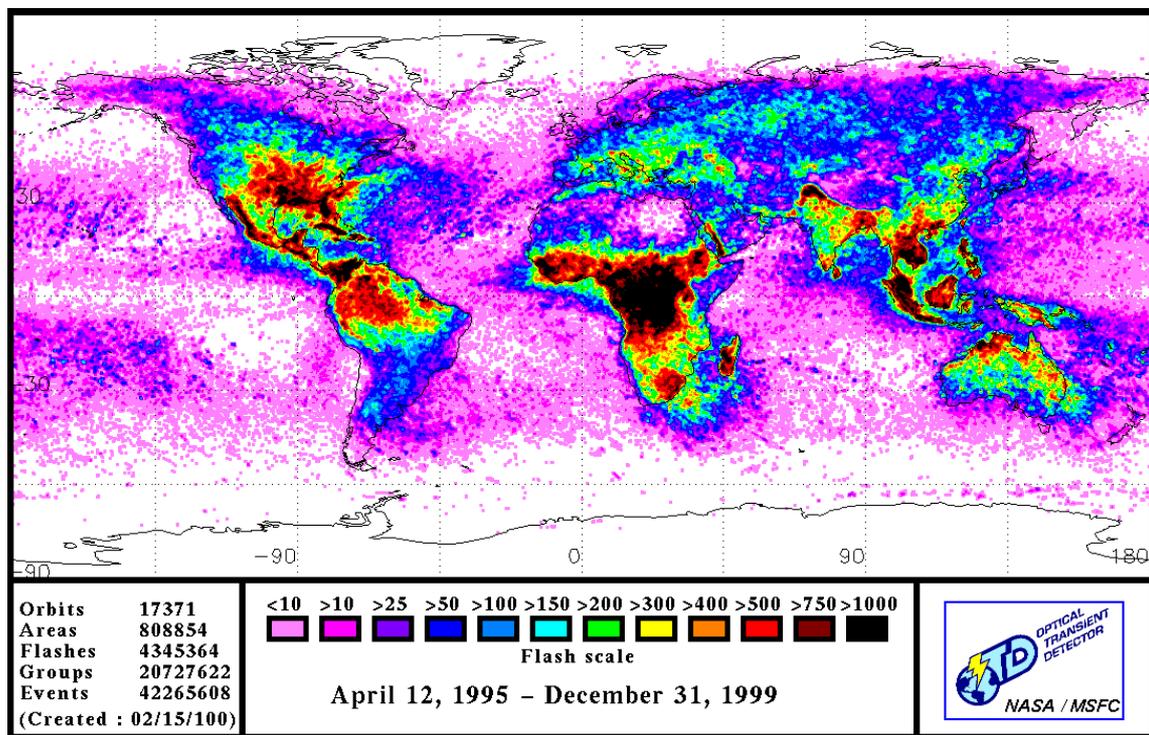


Figura 1.13 Mapa de Distribución de la Actividad Eléctrica Atmosférica en el planeta emitido por la NASA.

Como se observa, Cuba se encuentra en la zona de más alta actividad eléctrica atmosférica del planeta.

En la tabla 1.1 se muestran algunas de las ecuaciones que se utilizan para calcular N_g a partir de T_d y los resultados para la aplicación de un T_d igual a 100, valor más utilizado y aceptado actualmente por los diseñadores de sistemas de protección contra rayos en muchas regiones de nuestro país, aunque existen algunas regiones con valores mayores y menores que este.

Tabla 1.1 Relación empírica entre los días tormentas y el número total de rayos a tierra.

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

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto y tomando en consideración los estudios detallados realizados en Colombia acerca de los parámetros del rayo y que las condiciones climáticas de Cuba se asemejan más a las de países como México, Brasil y Colombia, se propone como ecuación para calcular la densidad de rayos a tierra en nuestro país la reportada por H. Torres, PAAS, Colombia.

$$Ng = 5.4 \cdot 10^{-7} \cdot LAT^{1.6} \cdot Td^{2.5} \quad (1.8)$$

Esto no debe llevar a un análisis equivocado en el sentido de la actividad eléctrica atmosférica, las formulas responden a un análisis global (en este caso país), los estudios de ingeniería deben ser referidos a estudios locales y esto debe ser tenido en cuenta.

1.4.3.2 POLARIDAD DE LA DESCARGA.

Berger (1978) propuso cuatro tipos de descarga eléctrica atmosférica en términos de la dirección del movimiento de carga entre nube y tierra (ascendente o descendente) y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga (positivo o negativo). Una representación esquemática se muestra en la figura 1.14.

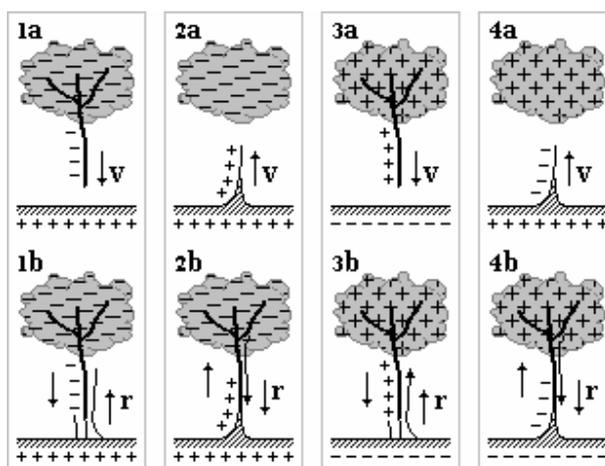


Figura 1.14 Polaridad de la descarga.

En la figura, las descargas ubicadas en los grupos 1 y 3 se les denominan rayos lineales con líderes descendentes con polaridades negativa y positiva, respectivamente. Los representados en los grupos 2 y 4 se les conocen como rayos lineales con líderes ascendentes con polaridades positiva y negativa, respectivamente.

Según las estadísticas disponibles a escala mundial se plantea que entre el 90 % y 95 % de las descargas de rayos de nube a tierra son de polaridad negativa y entre el 5 % y 10 % de polaridad positiva. De acuerdo con esto, se plantean las siguientes consideraciones:

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1. Un análisis global de incidencia de rayos positivos indica que ésta puede variar en diferentes regiones del mundo, ese rango de variación es generalmente menor al 10 %.
2. En los casos en que la incidencia de rayos positivos exceda el 10 %, estos deben ser tomados en consideración porque su proporción puede variar los límites superior e inferior de la distribución de amplitudes de corriente.
3. La incidencia de rayos positivos puede incrementarse con la altitud de la región y/o con el aumento de la altura de la estructura.
4. Las investigaciones demuestran que las descargas positivas están relacionadas principalmente a rayos lineales con líderes ascendentes y que estos ocurren principalmente para estructuras muy altas o estructuras ubicadas en regiones muy altas.
5. Se ha encontrado que los rayos de polaridad positiva dependen no solamente de condiciones espaciales, como elevación, clima y latitud, sino de condiciones temporales como hora diaria de presentación de la tormenta y periodo del año.

Como la polaridad del rayo puede también afectar la estrategia de una óptima protección contra rayos, se hace importante destacar que lo antes mencionado, no lo es todo sobre este parámetro de incidencia.

Resultados de mediciones en diferentes redes de localización de rayos, como por ejemplo la LDN (Lighting Detection Network) de los Estados Unidos, muestran que una considerable proporción de descargas en época de invierno son de polaridad positiva. De los análisis de resultados con antenas de detección de rayos, tipo DF, en la costa este de los Estados Unidos, Orville (1987) reportó un cambio de polaridad en descargas, como función de la temporada, con dominio de la polaridad positiva en la temporada de invierno. Orville también reportó un incremento de la mediana de la corriente pico de retorno del rayo para esta temporada.

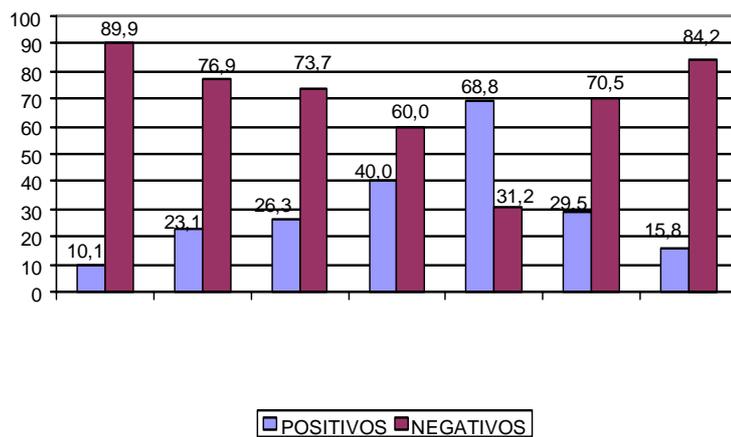
En 1994, Sugimoto *et al*, presentan mediciones de corriente de retorno del rayo durante el invierno en Japón, siendo éste el período cuando la actividad de rayos es más severa, encontrando una relación cercana de uno a uno entre las descargas negativas y las positivas, pero ninguna diferencia estadística notable en las magnitudes de corriente.

Estudios realizados en Colombia desde el punto de vista de un análisis espacial, muestran como la relación entre el porcentaje de descargas negativas y positivas varía, obteniéndose valores de un 89.9 % y un 10.1 % (Bogotá), de un 60 % y un 40 % (El Bagre) de descargas de polaridad negativa y positiva respectivamente y casos como el de la localidad Nechi donde se recoge un 31.2 % de descargas negativas y un 68.8 % de descargas positivas.

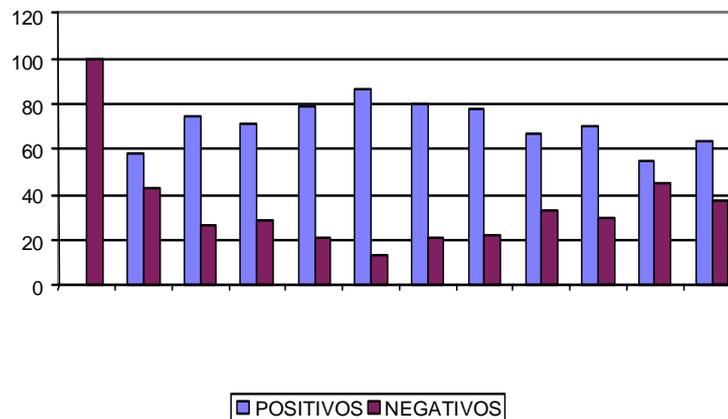
SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

En un análisis mes a mes (análisis temporal) realizado en la localidad Nechi, Colombia, en el periodo de 1997 al 2001, se recogen valores como el del mes de enero el cual permaneció invariable durante todo el periodo de análisis con un 100 % de descargas de polaridad negativa, y valores para los restantes once meses donde se mantuvo el porcentaje de descargas positivas por encima de un 10 % con respecto a las descargas negativas. Esto no es más que una prueba de la marcada significación de las variaciones temporales en los parámetros del rayo. Los gráficos 1.1 y 1.2 recogen estos datos.



Gráficos 1.1 Polaridad promedio en diferentes ciudades (análisis espacial).



Gráficos 1.2 Polaridad mes a mes promedio en Nechi (1997-2001), análisis temporal.

Como se puede observar los resultados obtenidos en países templados no se pueden generalizar para todo el mundo. Los resultados en países tropicales son bien diferentes y Cuba situada debajo del trópico de Cáncer puede tener por tanto una composición de las polaridades de sus rayos bien diferente de las que se encuentran hoy tipificadas en el mundo y se utilizan en los análisis.

1.4.3.3 MULTIPLICIDAD DE LA DESCARGA.

Un rayo a tierra (tanto de líder ascendente como de líder descendente) frecuentemente incluye un proceso de descargas múltiples. Estas pueden desarrollarse de dos formas:

- Después de la descarga de retorno (descarga principal), por el camino aún ionizado se suceden desde otras regiones cargadas de la misma nube, una o más descargas a tierra que en cualquier caso (líder inicial ascendente o descendente) se desarrollan con líder ininterrumpido de la nube a la tierra para golpear el mismo punto en que incide la descarga principal.
- Aquellas que tienen diferentes puntos de terminación en la tierra. Estas pueden ser originadas por ramificaciones al final del camino ionizado que conducen a que la descarga principal ocurra en varios puntos (rayos de raíces ramificadas) o pueden involucrar una sucesión de descargas espacialmente separadas (“rayos complejos”) que aunque ocurren a intervalos comparables a los de las descargas descritas en el punto anterior, tienen aparentemente, líderes guías independientes y pueden terminar a varios kilómetros del punto de incidencia de la descarga principal.

Observaciones recientes, realizadas en la Florida reportan un 50 % de rayos con descargas espacialmente separadas con distancias al canal principal desde 0.3 Km hasta 7.3 km, con una media geométrica de 1.7. Similares valores se reportan también en Nuevo México.

El conocimiento de las características de las descargas sucesivas es importante para el diseño de los sistemas de protección contra rayos porque los objetos en tierra pueden someterse a un grupo de descargas dentro de un intervalo muy corto y por tanto sus dispositivos de protección deben estar diseñados para estas contingencias.

Por ejemplo, los pararrayos deben ser capaces de operar sucesivamente de forma exitosa con intervalos de tiempo muy cortos.

El conocimiento científico sobre las descargas que suceden la descarga principal del rayo ha aumentado con la tecnología desarrollada para llevar a cabo el lanzamiento de cohetes especiales que inician el rayo a partir de una nube de tormenta.

Sus principales características importantes para ingeniería son:

- Magnitud de la corriente.
- Probabilidad de ocurrencia.
- Tiempo de su duración.
- Intervalo entre ellas.

Para cualquier tipo de rayo las descargas sucesivas involucran con una alta probabilidad, ocurrencias de magnitudes de corriente y de su frente, menores que las de la descarga de retorno. Esto no se refuta con las investigaciones realizadas en países tropicales hasta el momento, sin embargo la magnitud de esos valores si necesitan un análisis.

1.4.3.4 AMPLITUD MÁXIMA DE LA CORRIENTE DEL RAYO.

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 $\sigma_{\text{Log } I_r} = 0.32$.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

La ecuación práctica que representa la distribución es la siguiente:

$$P(I_r) = \frac{1.0}{1.0 + \left(\frac{I_r}{I_m}\right)^{bc}} \quad (1.9)$$

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 puede conducir a serios errores en los diseños de protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

En la figura 1.15 se muestra una comparación de la distribución anterior con distribuciones de probabilidad acumulativas obtenidas con mediciones directas en torres en regiones tropicales, Malasia, Rhodesia (ahora Zimbabwe), Brasil y Colombia.

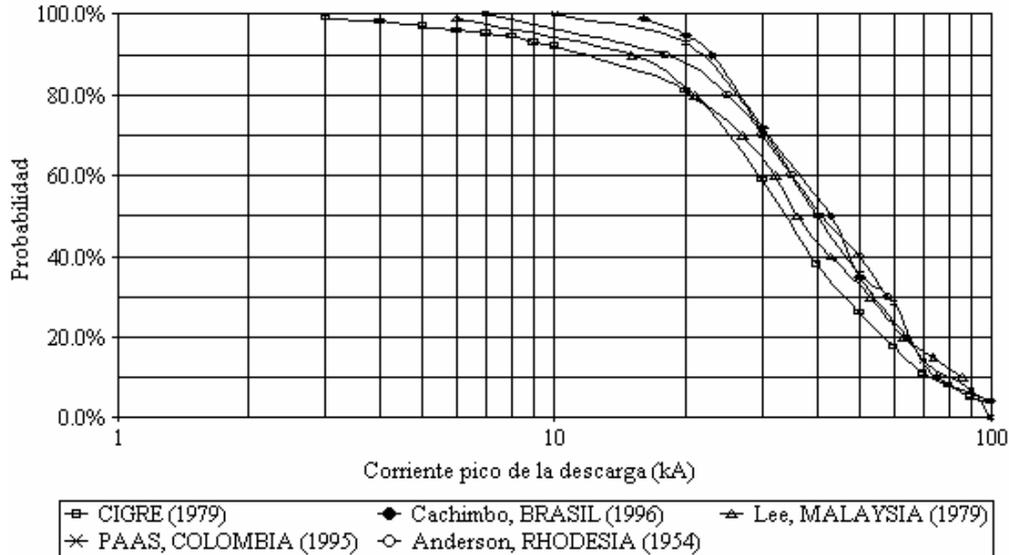


Figura 1.15 Comparación entre funciones de distribución de corriente.

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 1.15 se dan en la tabla 1.2.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Tabla 1.2 *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.

Aunque no se tiene la certeza, hasta que se realice el correspondiente estudio en nuestro país y se alarguen las series de tiempo (por lo menos quince años) de los estudios realizados recientemente en países tropicales, los resultados mostrados llevan a pensar que las magnitudes probables de la corriente de retorno del rayo en zonas tropicales como Cuba pueden ser mayores que las reportadas en latitudes norte.

Es importante destacar que esta condición se ha tenido en cuenta para la actualización de los parámetros del rayo en el Comité CIGRE y para aplicaciones en el diseño de protección contra rayos de equipos eléctricos y electrónicos en zonas tropicales.

1.4.3.5 FORMA DE ONDA Y TIEMPO DERIVATIVO DE LA CORRIENTE DEL RAYO.

El tiempo de elevación al pico de la onda de la descarga es importante en las sobretensiones que se generan producto del rayo. La impedancia efectiva del sistema es relativamente alta en los primeros instantes del impacto y decrece después gradualmente debido a la distribución de corrientes en la red. De acuerdo con esto altas sobretensiones ocurren para corrientes de frente muy rápido.

El tiempo de cola juega también un papel predominante porque define la cantidad de energía asociada a la onda de sobretensión. La mayoría de los dispositivos actuales utilizados en la protección contra rayos pueden eliminar el transitorio relacionado con una alta corriente y no con una alta energía.

Según la polaridad de la descarga nube a tierra sus ondas representativas se muestran en la figura 1.16.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

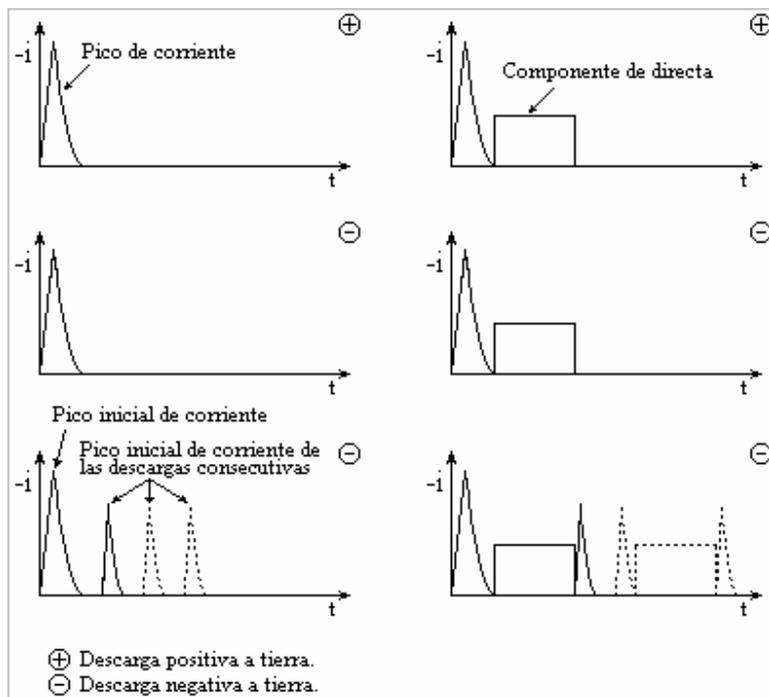


Figura 1.16 Posibles formas de onda de impacto de rayo en objetos en tierra.

Como se observa en la figura las componentes son:

- Para descargas de polaridad positiva:
 - impulso positivo de corriente y, posiblemente,
 - componente de directa positiva.
- Para descargas de polaridad negativa:
 - impulso negativo de corriente de la descarga principal y, posiblemente,
 - impulsos negativos de corriente de las descargas consecutivas y, posiblemente,
 - componente de directa negativa.

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.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

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 μs no simula los efectos de corriente continua asociados al evento del rayo. A diferencia de la forma de onda 8/20 μs , la forma de onda 10/350 μs 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 μs alcanza el 90 % de su valor pico en 10 μs y cae a la mitad de su valor en 350 μs , ver figura 1.17b.

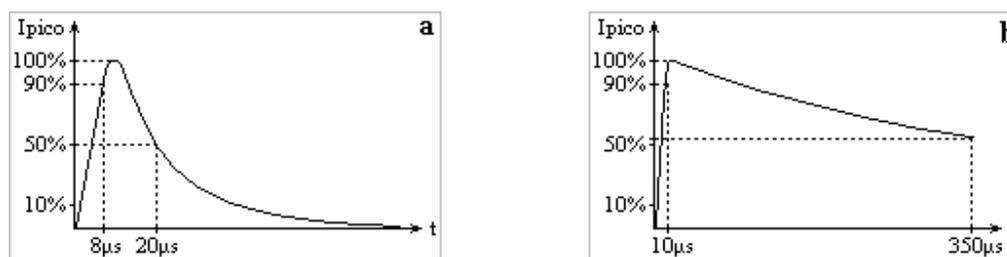


Figura 1.17 Formas de onda de corriente de impulso más utilizadas.

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 μs y la forma de onda 8/20 μs 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.

1.5 GESTIÓN DE RIESGO

1.5.1 TÉRMINOS UTILIZADOS

FUENTES DE LOS DAÑOS

La corriente del rayo es la principal fuente de daños. Las fuentes de daños se clasifican, según la posición del punto impactado por la descarga, en:

- S1: Descargas en una edificación.
- S2: Descargas cerca de una edificación.
- S3: Descargas en un servicio.
- S4: Descargas cerca de un servicio.

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).

Edificaciones:

$$R1 = R_A + R_B + R_C^{(1)} + R_M^{(1)} + R_U + R_V + R_W^{(1)} + R_Z^{(1)}$$

$$R2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z$$

$$R3 = R_B + R_V$$

$$R4 = R_A^{(2)} + R_B + R_C + R_M + R_U^{(2)} + R_V + R_W + R_Z$$

1) Sólo para edificaciones con riesgo de explosión y para hospitales u otras edificaciones donde los fallos de los sistemas internos ponen en peligro inmediatamente la vida de las personas.

2) Sólo para propiedades donde se pueden perder animales.

Servicios:

$$R'2 = R'_V + R'_W + R'_Z + R'_B + R'_C$$

$$R'4 = R'_V + R'_W + R'_Z + R'_B + R'_C$$

1.5.2 RIESGOS PARCIALES QUE DEPENDEN DE LA FUENTE Y DEL TIPO DE DAÑO

EDIFICACIÓN

Componentes de riesgo para una edificación ocasionados por descargas en la misma:

R_A: Componente relacionado con las lesiones a los seres vivos, causadas por las tensiones de contacto y de paso en las zonas de hasta 3 m fuera de la edificación. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L1 y, en el caso de las propiedades agrícolas, también pérdidas de tipo L4 con posible pérdida de animales.

R_B: Componente relacionado con el daño físico, causado por la ocurrencia de chispas peligrosas en la edificación que puedan desencadenar un incendio o una explosión, y que también puede poner en peligro al medio ambiente. Pueden ocurrir todos los tipos de pérdidas (L1, L2, L3, L4).

R_C: Componente relacionado con el fallo de los sistemas internos, causado por el LEMP. En todos los casos podrían ocurrir pérdidas de tipo L2 y L4, así como de tipo L1 en el caso de edificaciones con riesgo de explosión y en hospitales u otras edificaciones donde el fallo de los sistemas internos pone inmediatamente en peligro la vida de las personas.

Componente de riesgo para una edificación ocasionado por descargas cerca de la misma:

R_M: Componente relacionado con el fallo de los sistemas internos, causado por el LEMP. En todos los casos pueden ocurrir pérdidas de tipo L2 y L4, así como de tipo L1 en el caso de edificaciones con riesgo de explosión y en hospitales u otras edificaciones donde el fallo de los sistemas internos pone en peligro inmediatamente la vida de las personas.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Componentes de riesgo para una edificación ocasionados por descargas en un servicio conectado a la misma:

- R_U:** Componente relacionado con las lesiones a los seres vivos, causadas por la tensión de contacto dentro de la edificación debido a la corriente del rayo inyectada en una línea que penetra en dicha edificación. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L1 y, en el caso de las propiedades agrícolas, también pérdidas L4 con posible pérdida de animales.
- R_V:** Componente relacionado con el daño físico (incendio o explosión desencadenados por la presencia de chispas peligrosas entre la instalación externa y las partes metálicas, por lo general en el punto de entrada de la línea en la edificación) causado por la corriente del rayo que se transmite a través de los servicios que se encuentran activos. Pueden ocurrir todos los tipos de pérdidas (L1, L2, L3, L4).
- R_W:** Componente relacionado con el fallo de los sistemas internos, causado por sobretensiones inducidas en las líneas de entrada y transmitidas a la edificación. En todos los casos pueden ocurrir pérdidas de tipo L2 y L4, así como de tipo L1 en el caso de edificaciones con riesgo de explosión y de hospitales u otras edificaciones donde el fallo de los sistemas internos pone en peligro inmediatamente la vida de las personas.

Componente de riesgo para una edificación debido a descargas cerca de un servicio conectado a la edificación:

- R_Z:** Componente relacionado con el fallo de los sistemas internos, causado por sobretensiones inducidas en las líneas de entrada y transmitidas a la edificación. En todos los casos pueden ocurrir pérdidas de tipo L2 y L4, así como de tipo L1 en el caso de edificaciones con riesgo de explosión y de hospitales u otras edificaciones donde el fallo de los sistemas internos pone en peligro inmediatamente la vida de las personas.

SERVICIO

Componentes de riesgo para un servicio debido a descargas en el servicio:

- R'_V:** Componente relacionado con el daño físico, causado por los efectos mecánicos y térmicos de la corriente del rayo. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L'2 y L'4.
- R'_W:** Componente relacionado con el fallo de los equipos conectados, causado por sobretensiones debidas al acoplamiento resistivo. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L'2 y L'4.

Componente de riesgo para un servicio debido a descargas cerca del servicio:

- R'_Z:** Componente relacionado con el fallo de las líneas y los equipos conectados, causado por sobretensiones inducidas en las líneas. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L'2 y L'4.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Componentes de riesgo para un servicio debido a descargas en la edificación a la cual está conectado el servicio:

R_B: Componente relacionado con el daño físico, causado por los efectos mecánicos y térmicos de la corriente del rayo que pasa por la línea. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L'2 y L'4.

R_C: Componente relacionado con el fallo de los equipos conectados, causado por sobretensiones debidas al acoplamiento resistivo. Pueden ocurrir pérdidas de tipo L'2 y L'4.

1.5.3 COMPONENTES DE RIESGO QUE SE TENDRÁN EN CUENTA PARA CADA TIPO DE PÉRDIDA EN UNA EDIFICACIÓN

		Fuente de daño							
		S1 Descarga en una edificación			S2 Descarga cerca de una edificación	S3 Descarga en una línea conectada a la edificación			S4 Descarga cerca de una línea conectada a la edificación
Componente de riesgo		R _A	R _B	R _C	R _M	R _U	R _V	R _W	R _Z
Riego para cada tipo de pérdidas	R ₁	*	*	*1)	*1)	*	*	*1)	*1)
	R ₂		*	*	*		*	*	*
	R ₃		*				*		
	R ₄	*2)	*	*	*	*2)	*	*	*
1) Sólo para edificaciones con riesgo de explosión y para hospitales u otras edificaciones donde los fallos de los sistemas internos ponen en peligro inmediatamente la vida de las personas. 2) Sólo para propiedades donde se pueden perder animales.									

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.4 COMPONENTES DE RIESGO QUE SE TENDRÁN EN CUENTA PARA CADA TIPO DE PÉRDIDA EN UN SERVICIO

		Fuente de daño				
		S3 Descarga que hace impacto en el servicio		S4 Descarga que hace impacto cerca del servicio	S1 Descarga que hace impacto en la edificación	
Componente de riesgo		R' _U	R' _W	R' _Z	R' _B	R' _C
Riego para cada tipo de pérdidas	R' ₂	*	*	*	*	*
	R' ₄	*	*	*	*	*

1.5.5 COMPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DE RIESGO CON RESPECTO A LA FUENTE DE DAÑO

Edificaciones:

$$R = R_D + R_I$$

$$R_D = R_A + R_B + R_C$$

$$R_I = R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z$$

Servicios:

$$R' = R'_D + R'_I$$

$$R'_D = R'_V + R'_W$$

$$R'_I = R'_B + R'_C + R'_Z$$

Donde:

R_D: Es el riesgo debido a las descargas que hacen impacto en la edificación (fuente S1).

R_I: Es el riesgo debido a las descargas que no hacen impacto en la edificación pero influyen en ella (fuentes: S2, S3 y S4).

R'_D: Es el riesgo debido a descargas que hacen impacto en el servicio (fuente S3).

R'_I: Es el riesgo debido a descargas que influyen en el servicio sin hacer impacto sobre el mismo (fuentes S1 y S4).

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.6 COMPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DE RIESGO CON RESPECTO AL TIPO DE DAÑO

Edificaciones:

$$R = R_S + R_F + R_O$$

$$R_S = R_A + R_U$$

$$R_F = R_B + R_V$$

$$R_O = R_M + R_C + R_W + R_Z$$

Servicios:

$$R' = R'_F + R'_O$$

$$R'_F = R'_V + R'_B$$

$$R'_O = R'_W + R'_Z + R'_C$$

Donde:

R_S : Es el riesgo debido a las lesiones de los seres vivos (D1).

R_F : Es el riesgo debido al daño físico (D2).

R_O : Es el riesgo debido al fallo de los sistemas internos (D3).

R'_F : Es el riesgo de daño físico (D2).

R'_O : Es el riesgo de fallo de los sistemas eléctricos y electrónicos (D3).

1.5.7 RIESGO EN UNA EDIFICACIÓN Y EN UN SERVICIO PARA CADA TIPO DE DAÑO Y DE PÉRDIDA

		Daño		
		D1 Lesiones a los seres vivos	D2 Daño físico	D3 Fallo de los sistemas eléctricos o electrónicos
Pérdidas	L₁ (Pérdida de vidas humanas)	R_S	R_F	$R_O^{1)}$
	L₂ (Pérdida del servicio para el público)	-	R_F, R'_F	R_O, R'_O
	L₃ (Pérdida del patrimonio cultural)	-	R_F	-
	L₄ (Pérdida del valor económico)	$R_S^{2)}$	R_F, R'_F	R_O, R'_O
<p>1) Sólo para edificaciones con riesgo de explosión y para hospitales u otras edificaciones donde los fallos de los sistemas internos ponen en peligro inmediatamente la vida de las personas.</p> <p>2) Sólo para propiedades donde se pueden perder animales.</p>				

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.8 EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DE RIESGO

Cada componente de riesgo $R_A, R_B, R_C, R_M, R_U, R_V, R_W$ y R_Z para el caso de las edificaciones y R'_V, R'_W, R'_Z, R'_B y R'_C para el caso de los servicios, se puede expresar según la correspondiente ecuación general:

$$R_X = N_X \cdot P_X \cdot L_X \text{ (edificación)} \quad R'_X = N_X \cdot P'_X \cdot L'_X \text{ (servicio)}$$

Donde:

N_X : es el número anual de eventos peligrosos (vea Anexo A).

P_X, P'_X : es la probabilidad de daño (vea Anexo B, vea Anexo D).

L_X, L'_X : es la pérdida resultante (vea Anexo C, vea Anexo E).

Nota 1: El número N_X de eventos peligrosos depende de la densidad de la descarga en tierra del rayo (N_g) y de las características físicas del objeto que se va a proteger, sus alrededores y el suelo.

Nota 2: La probabilidad de daño P_X depende de las características del objeto que se va a proteger y de las medidas de protección aplicadas.

Nota 3: La pérdida resultante L_X depende del uso asignado al objeto, la presencia de personas, el tipo de servicio que se ofrece al público, el valor de los bienes afectados por el daño y las medidas destinadas a limitar la cantidad de las pérdidas.

1.5.9 COMPONENTES DE RIESGO EN UNA EDIFICACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE DAÑOS CAUSADOS POR DIFERENTES FUENTES

	FUENTE DE DAÑO	S1 Descarga en una edificación	S2 Descarga cerca de una edificación	S3 Descarga en una línea conectada a la edificación	S4 Descarga cerca de una línea conectada a la edificación	Riesgo resultante según la fuente de daño
	DAÑO					
D1	Lesiones a los seres vivos	$R_A = N_D \cdot P_A \cdot T_a \cdot L_f$		$R_U = (N_L + N_{Da}) \cdot P_U \cdot T_U \cdot L_U$		$R_S = R_A + R_U$
D2	Daño físico	$R_B = N_D \cdot P_B \cdot r_p \cdot h_z \cdot T_f \cdot L_f$		$R_V = (N_L + N_{Da}) \cdot P_V \cdot r_p \cdot h_z \cdot T_f \cdot L_f$		$R_F = R_B + R_V$
D3	Fallo de los sistemas eléctricos o electrónicos	$R_C = N_D \cdot P_C \cdot L_O$	$R_M = N_M \cdot P_M \cdot L_O$	$R_W = (N_L + N_{Da}) \cdot P_W \cdot L_O$	$R_Z = (N_I + N_L) \cdot P_Z \cdot L_O$	$R_O = R_C + R_M + R_W + R_Z$
	Riesgo resultante según la fuente de daño	$R_D = R_A + R_B + R_C$		$R_I = R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z$		

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.10 PARÁMETROS PERTINENTES A LA EVALUACIÓN DE COMPONENTES DE RIESGO PARA LAS EDIFICACIONES

Símbolo	Denominación	Valor, según la norma
<i>Número anual promedio de eventos peligrosos debido a las descargas</i>		
N_D	en la edificación	Apartado A.2
N_M	cerca de la edificación	Apartado A.3
N_L	en una línea que entra a la edificación	Apartado A.4
N_I	cerca de una línea que entra a la edificación	Apartado A.4
N_{Da}	en la edificación en un extremo "a" de la línea	Apartado A.2
<i>Probabilidad de que una descarga en la edificación cause</i>		
P_A	lesiones a los seres vivos	Apartado B.1
P_B	daño físico	Apartado B.2
P_C	fallos de los sistemas internos	Apartado B.3
<i>Probabilidad de que una descarga cerca de la edificación cause</i>		
P_M	fallos de los sistemas internos	Apartado B.4
<i>Probabilidad de que una descarga en una línea cause</i>		
P_U	lesiones a los seres vivos	Apartado B.5
P_V	daño físico	Apartado B.6
P_W	fallos de los sistemas internos	Apartado B.7
<i>Probabilidad de que una descarga cerca de una línea cause</i>		
P_Z	fallos de los sistemas internos	Apartado B.8
<i>Pérdidas debido a</i>		
$L_A = L_U = r_a \cdot L_t$	lesiones a los seres vivos	Apartado C.2
$L_B = L_V = r_p \cdot r_f \cdot h_z \cdot$	daño físico	Apartado C.2, C.3, C.4, C.5
L_f		
$L_C = L_M = L_W = L_Z =$	fallos de los sistemas internos	Apartado C.2, C.4, C.5
L_O		

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.11 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS COMPONENTES DE RIESGO DE UNA EDIFICACIÓN

Características de la edificación y de los sistemas internos. Medidas de protección	Componente de riesgo							
	R _A	R _B	R _C	R _M	R _U	R _V	R _W	R _Z
Área de captación	*	*	*	*	*	*	*	*
Resistividad superficial del suelo	*							
Resistividad del piso					*			
Restricciones físicas, aislamiento, advertencia, equipotencialización del suelo	*							
LPS	*1)	*	*2)	*2)	*3)	*3)		
Protección coordinada con SPD			*	*			*	*
Apantallamiento espacial			*	*				
Apantallamiento de las líneas externas					*	*	*	*
Apantallamiento de las líneas internas			*	*				
Precauciones del recorrido			*	*				
Red de conexiones			*					
Precauciones contra incendios		*				*		
Sensibilidad al fuego		*				*		
Peligro especial		*				*		
Tensión soportada al impulso			*	*	*	*	*	*

1.5.12 COMPONENTES DE RIESGO EN UN SERVICIO PARA DIFERENTES TIPOS DE DAÑOS CAUSADOS POR DIFERENTES FUENTES

	FUENTE DE DAÑO	S3 Descarga en una edificación	S4 Descarga cerca de una edificación	S1 Descarga en una línea conectada a la edificación	Riesgo resultante según la fuente de daño
DAÑO					
D2 Daño físico		$R'_V = N_L \cdot P'_V \cdot L'_V$		$R'_B = N_D \cdot P'_B \cdot L'_B$	$R'_F = R'_V + R'_B$
D3 Fallo de los sistemas eléctricos o electrónicos		$R'_W = N_L \cdot P'_W \cdot L'_W$	$R'_Z = (N_I - N_L) \cdot P'_Z \cdot L'_Z$	$R'_C = N_D \cdot P'_C \cdot L'_C$	$R'_O = R'_Z + R'_W + R'_C$
Riesgo resultante según la fuente de daño		$R'_D = R'_V + R'_W$	$R'_I = R'_Z + R'_B + R'_C$		

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.13 PARÁMETROS PERTINENTES A LA EVALUACIÓN DE COMPONENTES DE RIESGO PARA LOS SERVICIOS

Símbolo	Denominación	Valor, según la norma
<i>Número anual promedio de descargas</i>		
N_n	en la edificación conectada al servicio	Apartado A.2
N_L	en el servicio	Apartado A.4
N_I	cerca del servicio	Apartado A.5
<i>Probabilidad de que una descarga en la edificación adyacente cause</i>		
P'_B	daño físico	Apartado D.11
P'_C	fallos de los equipos conectados	Apartado D.11
<i>Probabilidad de que una descarga en el servicio cause</i>		
P'_V	daño físico	Apartado D.12
P'_W	fallos de los equipos conectados	Apartado D.12
<i>Probabilidad de que una descarga cerca del servicio cause</i>		
P'_Z	fallos de los equipos conectados	Apartado D.13
<i>Pérdidas debido a</i>		
$L'_B = L'_V = r'_f$	daño físico	Tabla E.1, ecuación E.2
$L_C = L_W = L_Z = L_O$	fallos de los equipos conectados	Tabla E.1, ecuación E.3

1.5.14 FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS COMPONENTES DE RIESGO EN UN SERVICIO

Características de la edificación y de los sistemas internos. Medidas de protección	Componente de riesgo				
	R_V	R_W	R_Z	R_B	R_C
Área de captación	*	*	*	*	*
Pantalla del cable	*	*	*	*	*
Cable de protección contra rayos	*	*	*	*	*
Conducto de cable de protección contra rayos	*	*	*	*	*
Conductores de pantalla adicionales	*	*	*	*	*
Tensión soportada al impulso	*	*	*	*	*
SPD	*	*	*	*	*

1.5.15 PROCEDIMIENTO BÁSICO DE GESTIÓN DE RIESGO

Para la decisión de proteger una edificación o un servicio contra el efecto de los rayos, así como la selección de las medidas de protección se aplicará el siguiente procedimiento:

- Identificación del objeto que se va a proteger y sus características.
- Identificación de todos los tipos de pérdidas en el objeto y el riesgo correspondiente R (R1 a R4).
- Evaluación del riesgo R para cada tipo de pérdida (R1 a R4).
- Evaluación de la necesidad de protección mediante la comparación entre el riesgo R1, R2 y R3 para una edificación (R'2 para un servicio) y el riesgo tolerable RT.
- Evaluación de la eficiencia de la protección desde el punto de vista del costo mediante la comparación entre los costos de pérdida total con y sin medidas de protección. En este caso, se deberán evaluar los componentes de riesgo R4 para una edificación (R'4 para un servicio) con el fin de evaluar dichos costos (vea el Anexo G).

Cuando se trate de edificación se tendrá en cuenta:

- La edificación en sí.
- Las instalaciones en la edificación.
- El contenido de la edificación.
- Las personas que se encuentran en la edificación o en zonas hasta 3 m de distancia en el exterior de la edificación.
- El medio ambiente afectado por un daño a la edificación.

Nota 1: La protección no incluye los servicios conectados en el exterior de la edificación.

Nota 2: La edificación que se tendrá en cuenta se puede subdividir en varias zonas (vea el Apartado 6).

Cuando se trate de servicio se tendrán en cuenta que el servicio es la conexión física entre:

- El edificio de conmutación de telecomunicaciones y el edificio del usuario o dos edificios de conmutación de telecomunicaciones o dos edificios del usuario, en el caso de las líneas de telecomunicación (telecommunication lines, TLC).
- Entre el edificio de conmutación de telecomunicaciones o el edificio del usuario y un nodo de distribución, o entre dos nodos de distribución en el caso de las TLC.
- Entre la subestación de alta tensión (AT) y el edificio del usuario, en el caso de las líneas electroenergéticas.
- Entre la estación principal de distribución y el edificio del usuario, en el caso de las tuberías.

El servicio que se tendrá en cuenta comprende los equipos de línea y los equipos de conexión de salida de la línea, tales como:

- Multiplexor, amplificador de potencia, unidades de redes ópticas, contadores, equipos de conexión de salida de la línea, etc.
- Interruptores automáticos, sistemas de sobrecorriente, contadores, etc.
- Sistemas de control, sistemas de seguridad, contadores, etc.

SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

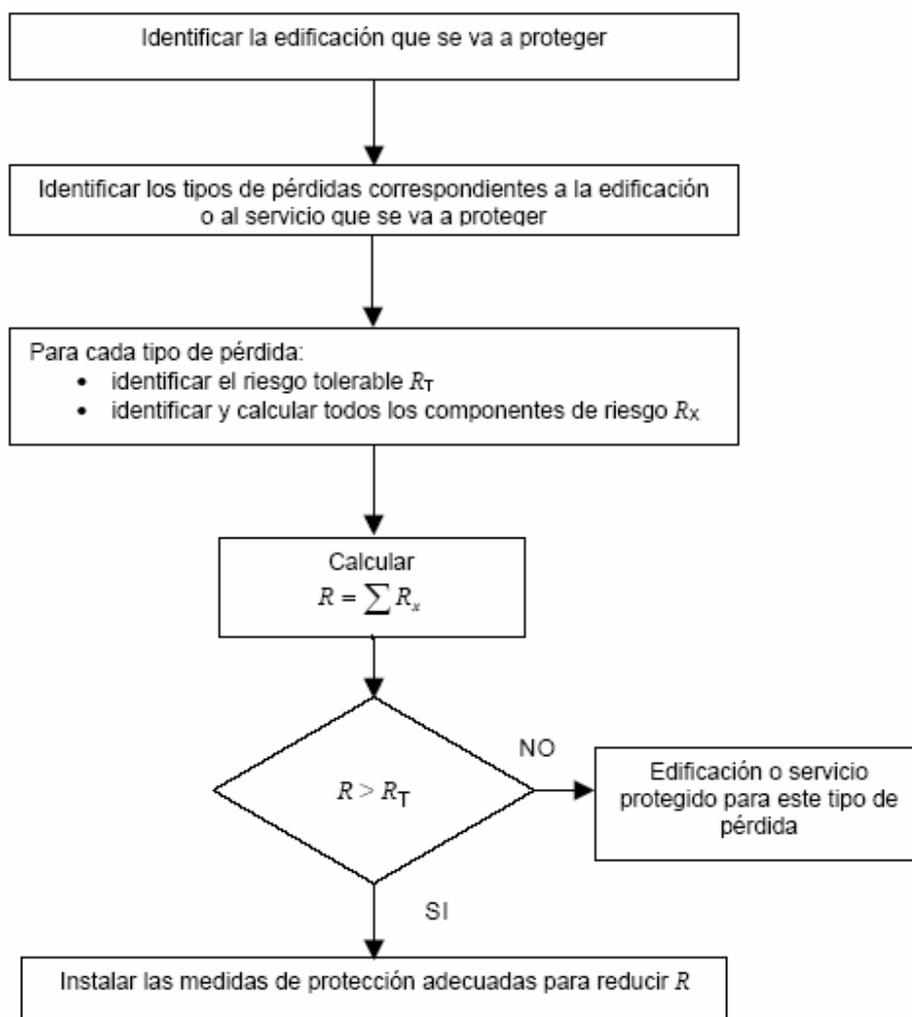
TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

Nota 1: La protección no incluye los equipos del usuario ni ninguna otra edificación conectada a los extremos del servicio.

1.5.16 VALORES TÍPICOS DE RIESGO TOLERABLE R_T

Riesgo tolerable	R_T
Perdidas de vidas humanas	10^{-5}
Pérdida del servicio para el público	10^{-3}
Pérdida del patrimonio cultural	10^{-3}

1.5.17 PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA NECESIDAD DE PROTECCIÓN



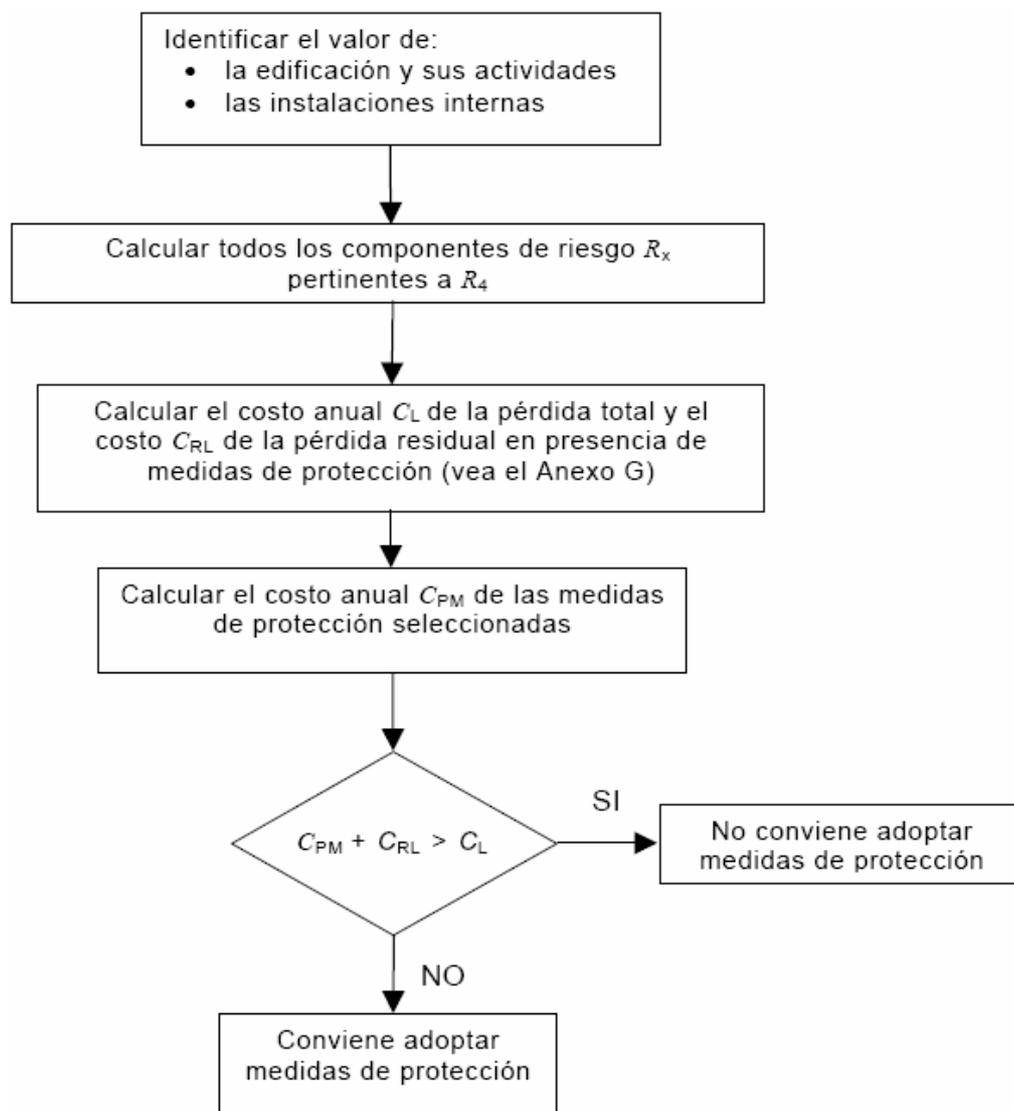
SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.18 PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE LAS MEDIDAS DE PROTECCIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL COSTO

Además de la necesidad de protección contra rayos para una edificación o para un servicio puede ser útil determinar los beneficios económicos que implica instalar medidas de protección para reducir la pérdida económica L_4 .

La evaluación de los componentes de riesgo R_4 para una edificación (R'_4 para un servicio) le permite al usuario evaluar el costo de la pérdida económica con y sin las medidas de protección adoptadas (vea el Anexo G).

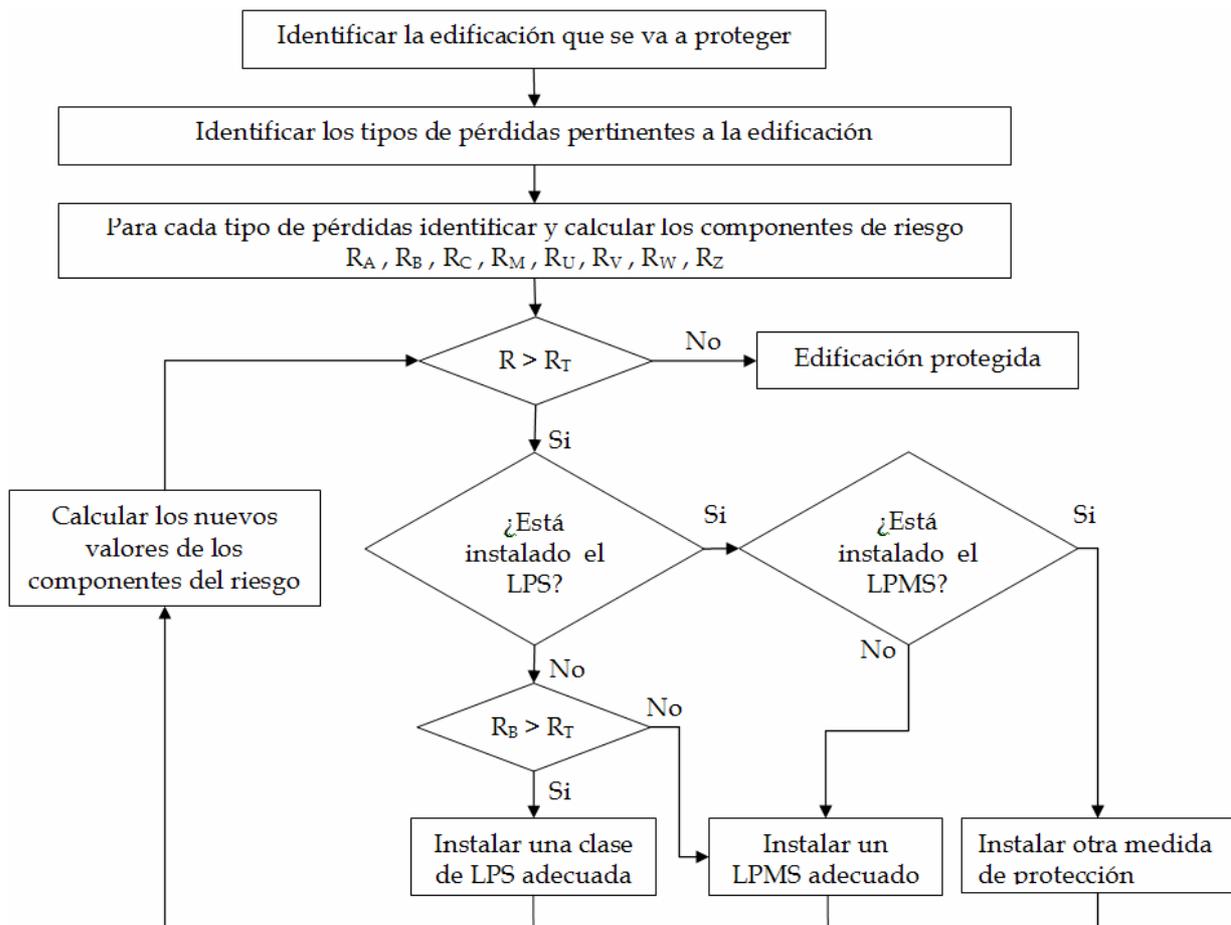


SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.19 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN EN LAS EDIFICACIONES

Para cada tipo de pérdida existe una serie de medidas de protección que, individualmente o en combinación, cumplen la condición $R \leq R_T$. En cualquier caso el instalador o planificador debe identificar los componentes de riesgo más críticos y reducirlos, teniendo en cuenta también los aspectos económicos.



SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

TEMA 1. Sobretensiones. El fenómeno del rayo y sus riesgos.

1.5.20 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE MEDIDAS DE PROTECCIÓN EN LOS SERVICIOS

