

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-T

SECTOR DE NORMALIZACIÓN
DE LAS TELECOMUNICACIONES
DE LA UIT

K.67

(02/2006)

SERIE K: PROTECCIÓN CONTRA LAS
INTERFERENCIAS

Sobrecargas esperadas en las redes de telecomunicaciones y de señalización provocadas por las descargas de los rayos

Recomendación UIT-T K.67

Recomendación UIT-T K.67

Sobrecargas esperadas en las redes de telecomunicaciones y de señalización provocadas por las descargas de los rayos

Resumen

En esta Recomendación se presentan las características (formas de onda y valores de cresta) de las sobrecargas esperadas (sobretensiones y sobrecorrientes) provocadas por las descargas de rayos en las líneas de telecomunicaciones de la red de acceso y en las líneas de señalización de las instalaciones del cliente en las que se emplean conductores metálicos. Los valores correspondientes se presentan en función de un conjunto de valores de parámetros relativos a la corriente generada por la descarga del rayo que define a esta última como fuente de daños por cualquier tipo de acoplamiento electromagnético producido en las líneas de telecomunicaciones y de señalización.

Esta Recomendación permite evaluar la eficacia de las medidas de protección (por ejemplo, dispositivo de protección contra las crestas de tensión) que resisten la sobrecorriente esperada en el punto de instalación.

Orígenes

La Recomendación UIT-T K.67 fue aprobada el 13 de febrero de 2006 por la Comisión de Estudio 5 (2005-2008) del UIT-T por el procedimiento de la Recomendación UIT-T A.8.

Palabras clave

Descarga del rayo, punto de transición, sobrecarga, sobrecorriente, sobretensión.

PREFACIO

La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) es el organismo especializado de las Naciones Unidas en el campo de las telecomunicaciones. El UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT) es un órgano permanente de la UIT. Este órgano estudia los aspectos técnicos, de explotación y tarifarios y publica Recomendaciones sobre los mismos, con miras a la normalización de las telecomunicaciones en el plano mundial.

La Asamblea Mundial de Normalización de las Telecomunicaciones (AMNT), que se celebra cada cuatro años, establece los temas que han de estudiar las Comisiones de Estudio del UIT-T, que a su vez producen Recomendaciones sobre dichos temas.

La aprobación de Recomendaciones por los Miembros del UIT-T es el objeto del procedimiento establecido en la Resolución 1 de la AMNT.

En ciertos sectores de la tecnología de la información que corresponden a la esfera de competencia del UIT-T, se preparan las normas necesarias en colaboración con la ISO y la CEI.

NOTA

En esta Recomendación, la expresión "Administración" se utiliza para designar, en forma abreviada, tanto una administración de telecomunicaciones como una empresa de explotación reconocida de telecomunicaciones.

La observancia de esta Recomendación es voluntaria. Ahora bien, la Recomendación puede contener ciertas disposiciones obligatorias (para asegurar, por ejemplo, la aplicabilidad o la interoperabilidad), por lo que la observancia se consigue con el cumplimiento exacto y puntual de todas las disposiciones obligatorias. La obligatoriedad de un elemento preceptivo o requisito se expresa mediante las frases "tener que, haber de, hay que + infinitivo" o el verbo principal en tiempo futuro simple de mandato, en modo afirmativo o negativo. El hecho de que se utilice esta formulación no entraña que la observancia se imponga a ninguna de las partes.

PROPIEDAD INTELECTUAL

La UIT señala a la atención la posibilidad de que la utilización o aplicación de la presente Recomendación suponga el empleo de un derecho de propiedad intelectual reivindicado. La UIT no adopta ninguna posición en cuanto a la demostración, validez o aplicabilidad de los derechos de propiedad intelectual reivindicados, ya sea por los miembros de la UIT o por terceros ajenos al proceso de elaboración de Recomendaciones.

En la fecha de aprobación de la presente Recomendación, la UIT no ha recibido notificación de propiedad intelectual, protegida por patente, que puede ser necesaria para aplicar esta Recomendación. Sin embargo, debe señalarse a los usuarios que puede que esta información no se encuentre totalmente actualizada al respecto, por lo que se les insta encarecidamente a consultar la base de datos sobre patentes de la TSB en la dirección <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© UIT 2006

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

ÍNDICE

	Página
1 Alcance	1
2 Referencias	1
3 Definiciones.....	2
4 Abreviaturas, siglas o acrónimos	3
5 Configuración de referencia	3
6 Medidas de protección.....	4
6.1 Protección inherente	4
6.2 Protección primaria	5
6.3 Puesta a tierra equipotencial, puesta a tierra y apantallamiento	5
7 Sobrecargas esperadas debidas a las descargas de los rayos	6
7.1 Descarga directa de un rayo en una estructura (fuente de daño S1): la corriente provocada por la descarga del rayo fluye a través de las líneas de telecomunicaciones o de señalización que acceden a la estructura (edificio de la central o del cliente o emplazamiento distante)	6
7.2 Descarga del rayo cerca de la estructura o en la misma (fuente de daño S1 o S2): sobrecargas inducidas en las líneas de telecomunicaciones o de señalización dentro de la estructura (edificio de la central o del cliente o sitio distante)	7
7.3 Descarga directa del rayo en las líneas de telecomunicaciones o de señalización	9
7.4 Descargas de rayos cerca de las líneas de telecomunicaciones	10
Anexo A – Sobrecargas inducidas en la estructura debidas a la caída del rayo cerca de la estructura o en la misma	14
A.1 Condiciones generales	14
A.2 Descarga del rayo cerca de la estructura	14
A.3 Descarga del rayo en la estructura.....	19
Anexo B – Sobrecargas inducidas en la línea de telecomunicaciones debidas a la incidencia del rayo cerca de la línea: terreno perfectamente conductor	21
Apéndice I – Sobrecargas inducidas en la estructura debidas a la descarga de un rayo cerca de la estructura o en la propia estructura: configuración experimental y resultados	24
I.1 Introducción.....	24
I.2 Modelo teórico.....	24
I.3 Emplazamiento de prueba experimental y configuración de prueba.....	26
BIBLIOGRAFÍA	32

Introducción

El origen de las sobretensiones y sobrecorrientes peligrosas que se producen en las redes de telecomunicaciones y de señalización es el rayo (descargas de rayos directas e indirectas), la inducción provocada por las corrientes de fallo en las líneas de energía eléctrica incluyendo los sistemas de tracción eléctrica, el contacto con las líneas de energía eléctrica y la elevación del potencial de tierra.

Los métodos de protección denominados "medidas protectoras" son pertinentes para las "líneas" (por ejemplo, empleo de cable apantallado en lugar de cable no apantallado) o para las partes específicas del sistema. El último caso puede dividirse de manera general en tres clases:

- utilización de prácticas de instalación tales como puesta a tierra equipotencial, puesta a tierra y apantallamiento de las instalaciones y en las líneas externas a fin de reducir el acoplamiento entre la energía producida por la descarga del rayo y la línea;
- utilización de dispositivos de protección que impidan que llegue a las partes vulnerables un exceso de energía eléctrica, ya sea mediante su derivación (por ejemplo, empleando descargadores) o desconectando la línea (por ejemplo, a través de fusibles); estos dispositivos de protección se definen como "*protección primaria*";
- utilización de equipos con rigidez dieléctrica, capacidad de transporte de corriente e impedancia apropiadas de manera que puedan resistir las condiciones que se les aplique; esta característica se define como "*protección inherente*".

Los tipos de dispositivos de protección (protección primaria) se instalan contra las sobretensiones (dispositivos de protección contra las crestas de tensión (SPD, *surge protective device*) por ejemplo, protectores mediante descargadores de aire con electrodos de carbón o metálicos, tubos de descarga de gas (GDT, *gas discharge tubes*), dispositivos de protección semiconductores) y contra las sobrecorrientes (por ejemplo, fusibles, bobinas térmicas, protectores contra sobrecorriente autorregeneradores, fusibles).

Para la especificación de componentes y aparatos de protección es necesario determinar la amenaza debida a las sobrecargas en su punto de instalación particular. Dicha amenaza debe ser inferior al nivel de resistencia de los componentes y equipos de protección afectados. Este nivel se determina mediante pruebas apropiadas.

La presente Recomendación trata de las sobrecargas esperadas debidas a las descargas del rayo en diferentes puntos de instalación de estos componentes y equipos de protección en las redes de telecomunicaciones y de señalización.

Algunas fórmulas o hipótesis que se emplean para la evaluación de las sobrecargas esperadas son aproximaciones rigurosas, y un estudio ulterior podría mejorar dicha evaluación.

Recomendación UIT-T K.67

Sobrecargas esperadas en las redes de telecomunicaciones y de señalización provocadas por las descargas de los rayos

1 Alcance

Esta Recomendación define las sobrecargas esperadas (sobretensiones y sobrecorrientes) debidas a la descarga del rayo en diferentes puntos de transición de la red de acceso de telecomunicaciones y de las líneas de señalización, tanto en estructuras exteriores como interiores, es decir, en los edificios de la central y del cliente y en los emplazamientos distantes.

El objeto de la Recomendación es determinar las sobretensiones y las sobrecorrientes en las redes de telecomunicaciones y señalización que emplean conductores metálicos, debidas a la corriente generada por la descarga del rayo como fuente de daño, que dependen de la posición del punto de descarga con relación a la línea considerada (véase 3.6).

La sobrecargas esperadas se definen mediante sus valores de cresta y sus formas de onda en función del nivel de protección contra las crestas (SPL, véase 3.7) para cada tipo (S_1 , S_2 , S_3 y S_4) de fuente de daño (véase 3.6). Se supone que la forma de onda de las sobrecargas esperadas es una doble exponencial que se describe mediante su tiempo de subida, T_1 , y su tiempo de caída al valor mitad, T_2 .

Esta Recomendación permite evaluar la eficacia de las medidas de protección (por ejemplo, dispositivo de protección contra las crestas) que resisten la sobrecorriente esperada en el punto de instalación.

2 Referencias

Las siguientes Recomendaciones del UIT-T y otras referencias contienen disposiciones que, mediante su referencia en este texto, constituyen disposiciones de la presente Recomendación. Al efectuar esta publicación, estaban en vigor las ediciones indicadas. Todas las Recomendaciones y otras referencias son objeto de revisiones por lo que se preconiza que los usuarios de esta Recomendación investiguen la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las Recomendaciones y otras referencias citadas a continuación. Se publica periódicamente una lista de las Recomendaciones UIT-T actualmente vigentes. En esta Recomendación, la referencia a un documento, en tanto que autónomo, no le otorga el rango de una Recomendación.

- [1] Manual de protección contra el rayo de las líneas e instalaciones de telecomunicación, Capítulo 10 (1995), *Sobretensiones y sobrecorrientes medidas en líneas de abonado*.
- [2] Recomendación UIT-T K.46 (2003), *Protección de las líneas de telecomunicación que utilizan conductores simétricos metálicos contra las sobrecargas inducidas por el rayo*.
- [3] Recomendación UIT-T K.47 (2000), *Protección de las líneas de telecomunicación que utilizan conductores metálicos contra las descargas directas de rayos*.
- [4] Recomendación UIT-T K.56 (2003), *Protección de las estaciones de base radioelectricas contra el rayo*.
- [5] CEI 62305-1:2006, *Protection against lightning – Part 1: General principles*.
- [6] CEI 62305-2:2006, *Protection against lightning – Part 2: Risk management*.
- [7] CEI 62305-4:2006, *Protection against lightning – Part 4: Electric and electronic systems within structures*.

3 Definiciones

En esta Recomendación se definen los términos siguientes.

3.1 sobretensión peligrosa debida a la descarga del rayo: Sobretensión cuyo valor de cresta U_p es mayor o igual al nivel de resistencia de sobretensión del equipo o del aislamiento del conductor de la línea de telecomunicaciones.

3.2 tiempo de caída equivalente al valor mitad (T_2) [1]: El tiempo de caída al valor mitad (T_2) de una tensión o corriente de choque es igual al intervalo de tiempo entre el origen virtual y el instante en la cola en el cual la tensión o corriente ha disminuido al valor de semiamplitud. (El origen virtual de una tensión o corriente de choque es el instante anterior a aquel en el que la tensión o la corriente alcanza 30% ó 10% del valor de cresta por un tiempo $0,3$ ó $0,1 \cdot T_1$ respectivamente.)

3.3 duración del frente o tiempo de subida (T_1) [1]: La duración del frente o el tiempo de subida T_{1v} de una tensión de choque se define como 1,67 veces el intervalo de tiempo entre los instantes en que el impulso alcanza 30% y 90% del valor de cresta.

La duración del frente T_{1i} de una corriente de choque se define como 1,25 veces el intervalo entre los instantes en que el impulso alcanza 10% y 90% del valor de cresta.

3.4 nivel de protección contra la descarga del rayo (LPL, *lightning protection level*): Conjunto de valores de parámetros de la corriente producida por la descarga del rayo que define a esta última como fuente de daño [4].

NOTA – El nivel de protección contra la descarga del rayo se utiliza para diseñar los componentes de protección contra la descarga del rayo (por ejemplo, sección transversal de los conductores, espesor de las capas metálicas, capacidad de corriente del SPD, distancia de separación contra chispas peligrosas) y para definir los parámetros de prueba que simulen los efectos de la descarga del rayo en dichos componentes, de conformidad con el conjunto pertinente de parámetros relativos a la corriente producida por la descarga del rayo. En las normas CEI 62305 se introducen cuatro niveles de protección contra la descarga del rayo (I a IV). Por cada LPL, se fija un conjunto de parámetros relativos a la corriente máxima producida por la descarga del rayo (cuadro 1).

3.5 valor de cresta (x_p) [1]: El valor de cresta (x_p) de una sobretensión/sobrecorriente se define como el valor máximo observado durante la sobrecarga.

3.6 fuente de daño: La fuente de daño depende de la posición del punto de descarga con relación a la línea considerada:

- Fuente de daño S_1 : rayos que inciden en la estructura (el edificio de la central o del cliente o un emplazamiento distante) donde accede la línea de telecomunicaciones o de señalización.
- Fuente de daño S_2 : rayos que inciden cerca de la estructura (el edificio de la central o del cliente o un emplazamiento distante) donde accede la línea de telecomunicaciones o de señalización.
- Fuente de daño S_3 : rayos que inciden en la línea de telecomunicaciones que accede a la estructura (el edificio de la central o del cliente o un emplazamiento distante).
- Fuente de daño S_4 : rayos que inciden cerca de la línea de telecomunicaciones que accede a la estructura (el edificio de la central o del cliente o un emplazamiento distante).

3.7 nivel de protección contra las crestas (SPL, *surge protection level*): Valores de cresta y forma de onda de las sobretensiones o sobrecorrientes peligrosas esperadas que pueden aparecer en distintos puntos de las redes de telecomunicaciones debido a la corriente producida por la descarga del rayo como fuente de daño.

NOTA – En la presente Recomendación se introducen tres niveles de protección contra crestas (I a III). Por cada SPL, se calculan los valores de cresta y la forma de onda de las sobretensiones y sobrecorrientes peligrosas esperadas.

3.8 pendiente del frente de impulso o de subida (S) [1]: La pendiente del frente o pendiente de subida (*S*) es la velocidad media de variación de la tensión o la corriente. Puede determinarse mediante la relación entre el valor de cresta x_p y la duración del frente T_1 :

$$S = \frac{x_p}{T_1} \quad (1)$$

3.9 sobrecarga: Tensión o corriente excesiva o temporal, o ambas, acopladas en una línea de telecomunicaciones procedentes de una fuente eléctrica externa.

NOTA 1 – Las fuentes eléctricas típicas son la descarga del rayo y los sistemas de alimentación de energía de c.a./c.c.

NOTA 2 – El acoplamiento de la fuente eléctrica puede producirse por: campo eléctrico (capacitivo), campo magnético (inductivo), conductividad (resistiva), campo electromagnético.

3.10 sobrecarga producida por la descarga del rayo: Sobrecarga provocada por la descarga de un rayo a través de cualquier tipo de acoplamiento electromagnético (conductor, inductor y capacitivo).

NOTA – La sobrecarga se caracteriza por los siguientes cinco parámetros: valor de cresta, duración del frente (T_1), tiempo de caída al valor mitad, T_2 (o parámetros de tiempo T_1/T_2), pendiente y energía específica.

3.11 dispositivo de protección contra las crestas (SPD, *surge protective device*): Dispositivo que restringe la tensión de un puerto o puertos designados, provocada por una sobrecarga, cuando ésta rebasa un nivel predeterminado.

NOTA 1 – Un SPD es una combinación de un circuito de protección y un soporte.

NOTA 2 – Se pueden incorporar funciones secundarias, tales como una limitación de corriente a fin de restringir una corriente terminal.

NOTA 3 – Por lo general, el circuito de protección dispone al menos de un componente de protección limitador de sobretensión y no lineal.

4 Abreviaturas, siglas o acrónimos

En esta Recomendación se utilizan las siguientes abreviaturas, siglas o acrónimos.

BN	Red de continuidad eléctrica (<i>bonding network</i>)
CBN	Red de continuidad eléctrica común (<i>common bonding network</i>)
E	Central (<i>exchange</i>)
LPL	Nivel de protección contra la descarga del rayo (<i>lightning protection level</i>)
MDF	Repartidor principal (<i>main distribution frame</i>)
MET	Terminal principal de puesta a tierra (<i>main earthing terminal</i>)
NT	Terminación de red (<i>network termination</i>)
S	Abonado (<i>subscriber</i>)
SPD	Dispositivo de protección contra las crestas (<i>surge protective device</i>)
SPL	Nivel de protección contra las crestas (<i>surge protection level</i>)

5 Configuración de referencia

En la figura 1 se muestran las configuraciones de referencia de las líneas de telecomunicaciones con conductores metálicos simétricos, y asimismo se ilustran los nodos de referencia y las secciones de cable entre ellos.

Los puntos de transición de la figura 1 tienen la siguiente descripción [2]:

- Punto de transición L: Transición entre la interfaz del equipo dentro del edificio de la central y el cableado externo.
- Punto de transición E: Entrada al edificio de la central, por ejemplo, repartidor principal (MDF).
- Punto de transición P: Transición entre cables enterrados con aislamiento de papel y con aislamiento de plástico.
- Punto de transición C: Transición entre cables enterrados y aéreos.
- Punto de transición D: Transición entre cables aéreos apantallados y no apantallados.
- Punto de transición S: Entrada al edificio del cliente.
- Punto de transición A: Transición entre la interfaz del equipo dentro del edificio del cliente y el cableado externo.
- Punto de transición M: Transición entre la interfaz del equipo dentro del edificio de la central y el cableado interno.
- Punto de transición I: Transición entre la interfaz del equipo dentro del edificio del cliente y el cableado interno.

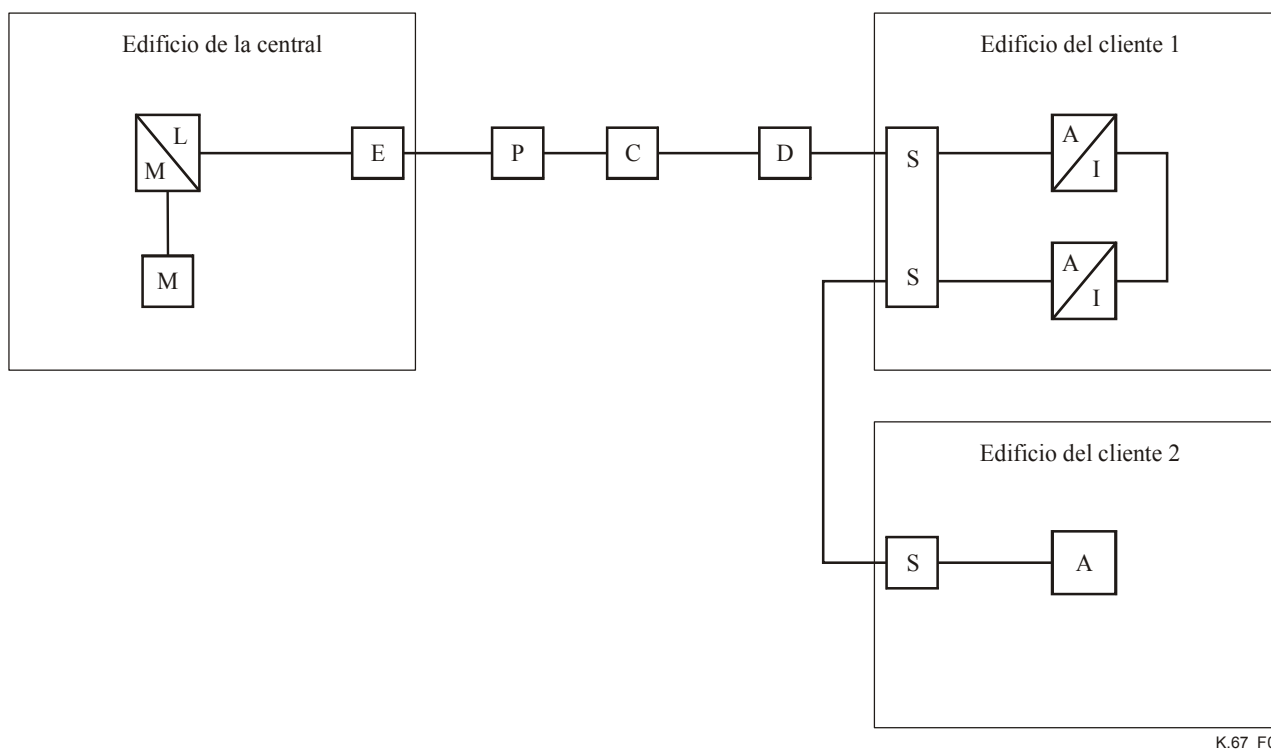


Figura 1/K.67 – Configuración de referencia

6 Medidas de protección

6.1 Protección inherente

Es necesario utilizar equipo con rigidez dieléctrica, capacidad de transporte de corriente e impedancia apropiadas de manera que pueda resistir las condiciones que se le han de aplicar, es decir, las características de resistibilidad inherente del equipo, a fin de lograr la protección del equipo y limitar el riesgo de daños.

Los requisitos de resistibilidad del equipo de telecomunicaciones que se emplea en diferentes puntos de las redes de telecomunicaciones se han definido en las Recs. UIT-T K.20, K.45 y K.21 para los equipos que se instalan en el edificio de la central, en la red de acceso y en el edificio del cliente respectivamente.

Desde la perspectiva de la protección contra la descarga del rayo, estos requisitos de resistibilidad permiten que el equipo resista la mayoría de las sobrecargas inducidas que son provocadas por la descarga del rayo cerca de la línea (véase 7.4). Como estas sobrecargas son las más frecuentes si se comparan con otras, la utilización de medidas de protección adicionales (protección primaria) se limita a las instalaciones "expuestas", determinadas durante la evaluación de riesgos [2, 3, 6].

6.2 Protección primaria

La utilización de protección primaria impide que llegue energía excesiva a las partes vulnerables de las instalaciones de telecomunicaciones y de señalización (por ejemplo, aislamiento de los equipos y de los conductores). Para este fin, se debe instalar adecuadamente protección primaria y sus características deben seleccionarse convenientemente.

La eficacia de la protección primaria depende de su capacidad de conducción de las sobrecorrientes (por ejemplo, dispositivos de limitación de tensión, como los GDT) o de su resistencia a las sobretensiones (por ejemplo, dispositivos de limitación de corriente, como los fusibles). Los parámetros relativos a la descarga del rayo que permiten determinar los valores máximos de las sobretensiones y sobrecorrientes se presentan en el cuadro 1, en función del nivel de protección contra la descarga del rayo (LPL, *lightning protection level*). Estos valores máximos de sobretensiones y sobrecorrientes están asociados con los siguientes niveles de protección contra las crestas (SPL, *surge protection level*): SPL I = 0,01, SPL II = 0,02 y SPL III = 0,05, que indican el valor de probabilidad de que la sobretensión o la sobrecorriente peligrosa sea mayor que o igual al valor de cresta asociado.

Cuadro 1/K.67 – Valores máximos de los parámetros relacionados con la descarga del rayo con arreglo a los LPL

Parámetros relativos a la corriente		Símbolo	Unidad	LPL			
				I (99%)	II (98%)	III (95%)	IV
Primera descarga corta	Corriente de cresta	I_p	kA	200	150	100	
	Descarga corta	Q_{corta}	C	100	75	50	
	Energía específica	W/R	kJ/Ω	10 000	5625	2500	
	Parámetros de tiempo	T_1/T_2	μs/μs	10/350			
Descarga corta subsiguiente	Corriente de cresta	I_p	kA	50	37,5	25	
	Pendiente promedio	di/dt	kA/μs	200	150	100	
	Parámetros de tiempo	T_1/T_2	μs/μs	0,25/100			
Descarga larga	Descarga larga	Q_{larga}	C	200	150	100	
	Parámetro de tiempo	T_{largo}	s	0,5			
Rayo	Descarga del rayo	Q_{rayo}	C	300	225	150	

6.3 Puesta a tierra equipotencial, puesta a tierra y apantallamiento

La utilización de técnicas de instalación que incluyen puesta a tierra equipotencial, puesta a tierra y apantallamiento permiten reducir el acoplamiento entre la descarga del rayo y la línea de comunicación. En el caso de descargas directas del rayo en la línea o cerca de ella, la red de continuidad eléctrica común de la estructura y las redes de continuidad eléctrica de los equipos

dispersan la corriente de la descarga del rayo proporcionando, por consiguiente, el apantallamiento de las líneas internas. Un apantallamiento o conducto totalmente circundante puede ser una medida eficaz para reducir la tensión y la corriente acopladas en los conductores de comunicaciones. El parámetro crítico para la eficacia del apantallamiento del cable es su impedancia de transferencia, que para los apantallamientos sólidos a las frecuencias de la descarga del rayo es aproximadamente igual a la resistencia del apantallamiento en corriente continua (c.c.).

La protección primaria en combinación con las medidas de puesta a tierra equipotencial y puesta a tierra forman una barrera electromagnética de las instalaciones que reduce la penetración de las perturbaciones electromagnéticas desde el exterior.

7 Sobrecargas esperadas debidas a las descargas de los rayos

7.1 Descarga directa de un rayo en una estructura (fuente de daño S1): la corriente provocada por la descarga del rayo fluye a través de las líneas de telecomunicaciones o de señalización que acceden a la estructura (edificio de la central o del cliente o emplazamiento distante)

Cuando la corriente producida por la descarga del rayo incide directamente en una estructura, fluye al sistema de puesta a tierra de la estructura así como a los servicios que acceden a la estructura. Por consiguiente, una parte de dicha corriente penetra a la cubierta o a los conductores del cable de la línea de telecomunicaciones o de señalización ya sea directamente o a través de dispositivos de protección contra las crestas (SPD, *surge protective device*) conectados a las líneas, ya que el cable es uno de los servicios que acceden a la estructura.

Los parámetros relacionados con la corriente producida por la descarga del rayo son los que se muestran en el cuadro 1 para la primera descarga corta en función del LPL seleccionado. Por consiguiente, la corriente del rayo que accede a la línea de telecomunicaciones o de señalización se describe mediante una forma de onda de 10/350 μ s y un valor de cresta de I_f .

Puede suponerse, como primera aproximación, que la mitad de la corriente producida por el rayo, I , fluye al sistema de terminación de puesta a tierra y que el 50% restante se comparte entre los n servicios que acceden a la estructura.

Si la línea de telecomunicaciones o de señalización que accede a la estructura no está apantallada o dentro de un conducto metálico, cada uno de los m conductores de la línea transportará una parte igual de la cresta de la corriente del rayo, I_f , que puede evaluarse mediante:

$$I_f = \frac{0,5 \times I_p}{n \times m} \quad \text{para una línea no apantallada} \quad (2)$$

En el caso de las líneas apantalladas (o que están dentro de un conducto metálico) que se unen en la entrada de la estructura, los valores de cresta, I_f , de la corriente que entra en cada uno de los m conductores, está dada por:

$$I_f = \frac{0,5 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{para una línea apantallada} \quad (3)$$

donde:

R_s resistencia óhmica por unidad de longitud de la pantalla o del conducto metálico

R_c resistencia óhmica por unidad de longitud del conductor

La tensión en circuito abierto entre un conductor y el terminal principal de puesta a tierra (MET, *main earthing terminal*) es aproximadamente proporcional al producto entre la resistencia de puesta a tierra y la parte de la corriente producida por la descarga del rayo que fluye a la red de puesta a

tierra si el cable no está apantallado. Si el cable está apantallado, la tensión en circuito abierto entre el conductor y el MET que está unido a la pantalla del cable es aproximadamente proporcional al producto entre la resistencia de la pantalla y la porción de la corriente del rayo que fluye a través de la pantalla, limitada por la tensión de ruptura entre los conductores centrales y la pantalla (por ejemplo, 5 kV). Cuando la pantalla se pone a tierra periódicamente, la corriente en la pantalla se atenúa conforme se propaga alejándose del punto de descarga. La propagación de la descarga a lo largo del cable produce dispersión y el aumento del tiempo de caída.

Aun con la posibilidad de ionización de la tierra cerca de los electrodos, la magnitud de la tensión resultante puede ser lo suficientemente alta para activar la protección primaria o provocar la ruptura del aislamiento del conductor, si no existe protección. Por lo tanto, no se consideran los procedimientos detallados para el cálculo de la tensión de cresta. Esto se aplica a las líneas de telecomunicaciones apantalladas y no apantalladas.

7.2 Descarga del rayo cerca de la estructura o en la misma (fuente de daño S1 o S2): sobrecargas inducidas en las líneas de telecomunicaciones o de señalización dentro de la estructura (edificio de la central o del cliente o sitio distante)

La descarga del rayo cerca de una estructura o en la misma induce sobretensiones en modo común en la línea de telecomunicaciones o de señalización dentro de la estructura (edificio de la central o del cliente o sitio distante) debido a la derivada en el tiempo de la corriente producida por el rayo (di/dt). El valor de cresta V_{io} de la tensión inducida en circuito abierto se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_{io} = L_M \times \frac{di}{dt} = L_M \times \frac{I_p}{T_1} \quad (4)$$

donde:

L_M es la inductancia mutua entre el bucle inducido y la corriente producida por el rayo

I_p es el valor de cresta de la corriente del rayo

T_1 es la duración del frente de la corriente del rayo

El parámetro correspondiente a la corriente producida por el rayo es la pendiente media (di/dt), dada por la relación entre el valor de cresta, I_p , y el tiempo de subida, T_1 (véase 3.8), de las descargas subsiguientes (caso más desfavorable) que se presentan en el cuadro 1 en función del LPL seleccionado.

Se prevé que la forma de onda de las tensiones inducidas en circuito abierto tendrá una duración muy corta (del orden de algunos μs , por ejemplo, 2 μs a 10 μs) y una duración del frente similar a la de la descarga subsiguiente (es decir, 0,25 μs), como se demuestra mediante mediciones de las tensiones inducidas en un bucle que se realizan con la generación de rayos, como se informa en el apéndice I.

El valor de cresta de la corriente en cortocircuito (I_{sc}), si se desprecia la resistencia óhmica de los alambres del bucle (caso más desfavorable), se determina de la siguiente manera:

$$I_{sc} = \frac{V_{oi} \times T_1}{L_S} \quad (5)$$

o

$$I_{sc} = \frac{L_M}{L_S} \times I_p \quad (6)$$

donde:

L_S es la autoinductancia del bucle inducido

Para la corriente en cortocircuito (I_{sc}), el parámetro correspondiente a la corriente producida por el rayo es el valor de cresta (I_p), de la primera descarga (caso más desfavorable) que se presenta en el cuadro 1 en función del LPL seleccionado. Su forma de onda es la de la corriente del rayo (véase el apéndice I), por lo tanto en el caso más desfavorable se describe mediante la forma de onda de 10/350 μ s.

Los valores de cresta de la tensión en circuito abierto (V_{oi}), debidos a las descargas subsiguientes, y la corriente en cortocircuito (I_{si}), debida a la primera descarga, se indican en el cuadro 2 para distintos valores de SPL. Como se muestra en el anexo A (A.2 y A.3) estos valores se han calculado para un bucle no apantallado con un área de bucle de 50 m² (h = 5 m; e = 10 m) dentro de una estructura o edificio no apantallado.

Cuadro 2/K.67 – Tensiones en circuito abierto y corrientes en cortocircuito esperadas por conductor en diferentes nodos de la línea de telecomunicaciones o de señalización debidas a la descarga directa del rayo en la estructura (S_1), en la línea de telecomunicaciones (S_3) y cerca de la estructura (S_2)

	Descarga directa del rayo sobre la estructura Fuente de daño S_1			Descarga del rayo cerca de la estructura Fuente de daño S_2		Descarga directa del rayo sobre la línea de telecomunicaciones Fuente de daño S_3	
	Nodos E y S	Nodos L, A, M e I (nota 1) (1 conductor de bajada solamente) (véase el cuadro A.2)		Nodos L, A, M e I (nota 1) (véase el cuadro A.1)		Nodos L, E, P	Nodos C, D, S, A
SPL	(parte de la corriente producida por la descarga directa del rayo) forma de onda: 10/350 μ s [kA]	(tensión inducida por descargas subsiguientes) forma de onda: 0,25/2 μ s [kV]	(corriente inducida por la primera descarga) forma de onda: 10/350 μ s [kA]	(tensión inducida por descargas subsiguientes) forma de onda: 0,25/2 μ s [kV]	(corriente inducida por la primera descarga) forma de onda: 10/350 μ s [kA]	(parte de la corriente producida por la descarga directa del rayo) forma de onda: 10/350 μ s [kA]	(parte de la corriente producida por la descarga directa del rayo) forma de onda: 10/350 μ s [kA]
I	Ecuación (2) o (3)	250	6	5	0,1	0,50 (nota 2)	Ecuación (12) o (14)
II	Ecuación (2) o (3)	190	4,5	3,5	0,07	0,50 (nota 2)	Ecuación (12) o (14)
III	Ecuación (2) o (3)	125	3	2,2	0,05	0,50 (nota 2)	Ecuación (12) o (14)
NOTA 1 – Condiciones de cálculo: estructura no apantallada; línea inducida no apantallada; dimensiones del bucle: 50 m ² (h = 5 m; e = 10 m); radio del conductor del bucle: 0,5 mm NOTA 2 – En algunos casos particulares puede utilizarse la ecuación (12) o (14). La tensión de ruptura entre la línea y tierra se considera igual a 100 kV y se supone que la línea está cortocircuitada a tierra en el punto de interés.							

Para una línea inducida con un área de bucle diferente y la misma longitud de bucle (e), los valores de las tensiones de descarga del cuadro 2 deben multiplicarse por el siguiente factor (K_r):

$$K_r = A/50 \quad (A \text{ es el área del bucle en m}^2) \quad (7)$$

La ecuación (5) permite la evaluación de la corriente en cortocircuito (I_{sc}), calculando el valor de la autoinductancia (L_S) del nuevo bucle.

Para las líneas apantalladas los valores de las tensiones de descarga mostradas en el cuadro 2 pueden reducirse por un factor K_{s3} dado por la siguiente ecuación:

$$K_{s3} = K_r \times K_{ss} \quad (8)$$

donde:

$$K_{ss} = \frac{V_{cs}}{V_{io}} \quad (9)$$

V_{cs} es la tensión entre el conductor y la pantalla dada por la siguiente ecuación:

$$V_{cs} = R \times I_{sc} \quad (10)$$

Utilizando las ecuaciones (4) y (5) para V_{io} e I_{sc} respectivamente, la ecuación (8) se transforma en:

$$K_{ss} = \frac{R \times T_1}{L_S} \quad \text{válida para } (L_S/R) \gg T_1 \quad (11)$$

donde:

K_{ss} es el valor del factor de apantallamiento relacionado con la pantalla (R es la resistencia de la pantalla en Ω).

NOTA – La ecuación (10) es válida para cubiertas tubulares. En el caso de cubiertas trenzadas se trata de una aproximación.

Los valores de las corrientes de descarga para un área de bucle diferente pueden evaluarse considerando que tanto la sobretensión inducida como la inductancia del bucle tienen diferentes valores (véanse A.2 y A.3).

7.3 Descarga directa del rayo en las líneas de telecomunicaciones o de señalización

Existen dos situaciones posibles:

- a) el punto de descarga está lejos de la estructura;
- b) el punto de descarga está cerca de la estructura.

En ambas situaciones, la corriente producida por la descarga del rayo que accede a la línea de telecomunicaciones o de señalización se describe mediante una forma de onda de 10/350 μ s y un valor de cresta I_f . Si se desprecian los efectos de la propagación, se supone la misma forma de onda de 10/350 μ s para la corriente esperada en distintos sitios de la red (edificio de la central o del cliente o sitios distantes).

En la situación a), la corriente de cresta total en la línea estará dada, en el caso más desfavorable, por el doble de la tensión de ruptura entre la línea y tierra dividida por la impedancia de sobrecarga de la línea (por ejemplo, $2 \times 100 \text{ kV}/400 \Omega = 500 \text{ A}$); este caso más desfavorable es independiente de los LPL I a IV. No obstante, si la línea está apantallada y la pantalla se pone a tierra periódicamente, se aplica el análisis de la situación b).

En la situación b), se debe tener en cuenta la división de la corriente producida por el rayo en ambos sentidos de la red de telecomunicaciones y la ruptura del aislamiento a tierra. Como una primera aproximación, puede suponerse que la mitad de la corriente del rayo (I_p), fluye a tierra a través de la ruptura del aislamiento y que la mitad del 50% restante de la corriente se propaga en ambos sentidos, entre los n servicios que están próximos.

Si la línea de telecomunicaciones o de señalización no está apantallada o no se encamina a través de un conducto metálico, cada uno de los m conductores de la línea transportará una parte igual de la cresta (I_f), de la corriente del rayo que puede evaluarse mediante la fórmula:

$$I_f = \frac{0,25 \times I_p}{n \times m} \quad \text{para una línea no apantallada} \quad (12)$$

donde $n = 1$ ó 2 ; el último caso se aplica por ejemplo, cuando las líneas de telecomunicaciones y de energía eléctrica se encuentran muy próximas, como es el caso cuando comparten los mismos postes.

El valor obtenido de la ecuación (12) será igual o menor que el siguiente valor:

$$I_f \leq 8 \times A \quad [\text{kA}] \quad (13)$$

donde A representa la sección del conductor de telecomunicaciones o de señalización [mm²].

En el caso de líneas entrantes apantalladas (o introducidas en un conducto metálico) que se unen en la entrada de la estructura, los valores de cresta (I_f), de la corriente que llega a cada uno de los m conductores, están dados por:

$$I_f = \frac{0,25 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{para una línea apantallada} \quad (14)$$

donde:

R_s la resistencia óhmica por unidad de longitud de la pantalla o del conducto metálico

R_c la resistencia óhmica por unidad de longitud del conductor

La tensión en circuito abierto entre el conductor y la pantalla es aproximadamente proporcional al producto entre la resistencia de la pantalla y la parte de la corriente producida por el rayo que fluye a través de la pantalla, limitada por la tensión de ruptura entre los conductores centrales y la pantalla (por ejemplo, 5 kV). Cuando la pantalla se pone a tierra periódicamente, la corriente en la pantalla se atenúa conforme se propaga alejándose del punto de descarga. La propagación de la descarga a lo largo del cable produce dispersión y el aumento del tiempo de caída.

En el caso del edificio de la central, por lo general, el rayo incide sobre la línea aérea (pocos pares) bastante lejos de la estructura. Por esta causa, pueden utilizarse los valores del cuadro 2. Para situaciones particulares, podrán aplicarse las ecuaciones (12), (13) y (14) anteriores.

Para el edificio del cliente, el caso más desfavorable se presenta, por lo general, cuando el punto de descarga está cerca de la estructura. Por este motivo, pueden utilizarse los valores calculados mediante las ecuaciones (12), (13) y (14) anteriores.

NOTA – Se dispone de poca información con relación a las sobrecorrientes debidas a la descarga directa del rayo en las líneas de telecomunicaciones. En el capítulo 10 del Manual sobre protección contra el rayo de las líneas e instalaciones de telecomunicación [1], el estudio de Canadá indica que "*el evento de 300 A, 300 μ s fue resultado de la descarga directa de un rayo sobre un poste que distaba unos 200 m de un lugar de observación provisto de descargador de carbón. También se disponía allí de contador de nivel y monitor de onda digital. El cable y el poste sufrieron graves deterioros*". No se dispone de información sobre el valor de cresta de la descarga de corriente del rayo en la línea. Si se supone que la sobrecorriente de 300 A ha sido provocada por una corriente del rayo de aproximadamente 30 kA, que corresponde a un 50% de probabilidad, en ese caso, es posible calcular los valores de 2 ó 1 kA asociados con LPL I o III respectivamente. Se pueden obtener resultados similares aplicando la ecuación (6) con $n=1$ y $m=20$ cuando la corriente producida por la descarga del rayo es de 200 kA (LPL I) o 100 kA (LPL III).

7.4 Descargas de rayos cerca de las líneas de telecomunicaciones

7.4.1 Generalidades

Estudios realizados en diferentes países han permitido investigar los valores de cresta de las sobretensiones y sobrecorrientes producidas por el rayo esperados en algunos puntos de transición de la red de telecomunicaciones. Los resultados correspondientes figuran en el capítulo 10 del Manual sobre protección contra el rayo de las líneas e instalaciones de telecomunicación [1].

Los requisitos de resistibilidad inherentes del equipo de telecomunicaciones, que se definen en las Recs. UIT-T K.20, K.21 y K.45, se fundamentan en los resultados de estos estudios como se muestra en el citado Manual [1].

La aplicación de medidas de protección adicionales (protección primaria) se limita a las instalaciones "expuestas" y se calcula mediante la evaluación del riesgo [2, 3, 6].

El caso de inducción más desfavorable, supuesto en esta Recomendación, se ilustra en la figura 2 donde la ubicación de la descarga del rayo es equidistante a la terminación de la línea y a una distancia "x" de la línea de telecomunicaciones, que se trata de una línea aérea a una altura de 6 m ($h = 6$).

Las sobretensiones y sobrecorrientes peligrosas esperadas se evalúan en el punto medio y en las terminaciones de la línea.

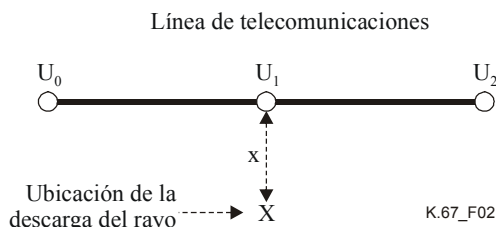


Figura 2/K.67 – Configuración de referencia para la evaluación de una descarga inducida por un rayo que incide cerca de la línea (caso más desfavorable)

Por la definición de SPL:

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)} \quad (15)$$

donde:

U_{SPL} es la tensión correspondiente al SPL seleccionado

U_R es una tensión de referencia (inferior a U_{SPL}) que define el nivel de tensión de resistibilidad mínimo del equipo conectado a la línea o del aislamiento del conductor de la línea

$N_T(U)$ es el número total de descargas que inducirán una tensión igual o mayor que U

El cálculo de N_T y U_{SPL} se presenta en el anexo B para una línea aérea, tanto apantallada como no apantallada, por encima de un terreno perfectamente conductor.

Asimismo, en el anexo B se sugiere cómo evaluar las corrientes en cortocircuito asociadas con las sobretensiones peligrosas.

7.4.2 Valores calculados (terreno perfectamente conductor)

Los valores de cresta de las sobretensiones en circuito abierto y las sobrecorrientes en cortocircuitos peligrosos esperados en los puntos de transición P, C y D (cerca del punto medio) de la línea aérea no apantallada se presentan en el cuadro 5, para los diferentes SPL. La forma de onda de la sobretensión y la sobrecorriente varía ampliamente con las características de la corriente producida por el rayo (forma de onda, valor de cresta y velocidad), con la distancia entre el lugar de descarga del rayo y la línea, y con las características de la línea (conexiones de puesta a tierra, apantallamiento, etc.). Si se considera una corriente del rayo fija y una línea no apantallada, el aumento de la distancia entre el lugar de la descarga del rayo y la línea produce una tensión y una corriente inducidas menores y formas de onda más largas. Además, el apantallamiento de una línea también permite disminuir la tensión y la corriente inducidas y formas de onda más largas.

Para las corrientes de descarga del rayo del cuadro 1, la velocidad de la descarga de retorno del rayo es igual a 130 m/ μ s y las tensiones inducidas correspondientes a la gama seleccionada de SPL (es decir, 0,01 a 0,05), la forma de onda de las tensiones y las corrientes inducidas en una línea no apantallada pueden representarse mediante una onda exponencial doble de 8/20 μ s. Para una línea apantallada, el valor de cresta es inferior y la forma de onda es más larga, de manera que una onda exponencial doble de 10/700 μ s es más representativa.

NOTA – La forma de onda de 8/20 μ s de una línea aérea no apantallada se calculó utilizando la referencia [5], y suponiendo una velocidad de descarga de retorno de 130 m/ μ s. Para la línea apantallada, se supuso la forma de onda en armonía con las mediciones.

7.4.3 Valores medidos (terreno no perfectamente conductor)

En varios países se han medido las sobretensiones y sobrecorrientes que pueden aparecer en la red de acceso y los datos correspondientes están incluidos en el Capítulo 10 del Manual sobre protección contra el rayo de las líneas e instalaciones de telecomunicación [1]. Los datos más recientes se resumen en el cuadro 3.

Estos datos fueron recopilados en el campo utilizando líneas compuestas por una combinación de secciones enterradas y aéreas apantalladas y a menudo una sección no apantallada de corta longitud cerca de las instalaciones del cliente (el *hilo de acometida*). La mayoría de los datos se midieron en los extremos de la central y del abonado. En el cuadro 3, la tensión U_e corresponde a la tensión entre el par y la pantalla medida en el extremo de la central e i_{sce} representa la corriente en cortocircuito asociada, mientras que U_s es la tensión en circuito abierto entre el par (o un conductor del par) y tierra en el extremo del cliente e i_{scs} es la corriente en cortocircuito asociada.

Cuadro 3/K.67 – Sobretensiones en circuito abierto y sobrecorrientes en cortocircuito medidas en los extremos de la central y del cliente

Probabilidad	Extremo de la central		Extremo del cliente	
	U_e [V]	i_{sce} [A]	U_s [V]	i_{scs} [A]
0,01	860	17	2300	23
0,02	680	13	1640	16
0,05	480	8	1020	10

Suponiendo que la resistencia de la pantalla $R_s = 5 \Omega$, la resistencia a tierra de la conexión de la pantalla a tierra cerca del cliente $R_t = 40 \Omega$ y la impedancia de sobrecarga $Z = 100 \Omega$ para la sección enterrada y $Z = 400 \Omega$ para la sección aérea, pueden calcularse unos valores de $\eta_{ss} = 0,05$ y $\eta_{se} = 0,1$.

Si se consideran estos valores de factor de apantallamiento, a partir de los datos de las mediciones se puede calcular la distribución truncada ($U_R = 50$ V) en el extremo de la central y ($U_R = 150$ V) en el extremo del cliente. Los valores de cresta peligrosos de las sobretensiones y sobrecorrientes se presentan en el cuadro 4 en función del SPL.

Cuadro 4/K.67 – Sobretensiones en circuito abierto y sobrecorrientes en cortocircuito peligrosas medidas en los extremos de la central y del cliente

SPL	Extremo de la central		Extremo del cliente	
	U_e [V]	i_{sce} [A]	U_s [V]	I_{scs} [A]
I	1000	20	3500	35
II	750	15	2500	25
III	500	10	1500	15

Estos valores se indican también en el cuadro 5.

Cuadro 5/K.67 – Tensiones en circuito abierto y corrientes en cortocircuito esperadas por conductor en distintos nodos de la línea de telecomunicaciones o de señalización debidas a la descarga del rayo cerca de la línea de telecomunicaciones (S_4)

Descarga del rayo cerca de la línea de telecomunicaciones o de señalización (caso más desfavorable) Fuente de daño S ₄										
SPL	Nodos L, E, P, C		Nodos D, S, A		Nodos L, E, P, C (calculados η _s = 0,05)	Nodos L, E, P, C (medidos)		Nodos D, S, A (calculados η _e = 0,1)	Nodos D, S, A (medidos)	
	Línea no apantallada (nota)				Línea compuesta por: secciones enterradas apantalladas (nodos E-C), secciones aéreas apantalladas (nodos C-D) y secciones aéreas no apantalladas aéreas (nodos C-S)					
	tensión inducida: 8/20 μs [kV]	corriente inducida: 8/20 μs [A]	tensión inducida: 8/20 μs [kV]	corriente inducida: 8/20μs [A]	tensión inducida: 10/700 μs [kV]	tensión inducida: 10/700 μs [kV]	corriente inducida: 10/350 μs [A]	tensión inducida: 10/700 μs [kV]	tensión inducida: 10/700 μs [kV]	corriente inducida: 10/350 μs [A]
I	44	110	64	160	1	1	20	6,4	3,5	35
II	23	60	34	85	0,75	0,8	15	3,4	2,5	25
III	10	25	14	35	0,5	0,6	10	1,4	1,5	15
NOTA – Condiciones de cálculo: línea aérea y terreno perfectamente conductor.										

Anexo A

Sobrecargas inducidas en la estructura debidas a la caída del rayo cerca de la estructura o en la misma

A.1 Condiciones generales

Las sobrecargas inducidas, provocadas por la caída del rayo, en los bucles formados por el cableado de una instalación es un problema importante que se trata en muchas Recomendaciones UIT-T de la serie K. Las sobrecargas provocadas por la caída del rayo se caracterizan por su forma de onda y su valor de cresta.

En el apéndice I se muestran las formas de onda de las sobretensiones inducidas basándose en los resultados de las mediciones realizadas en una instalación experimental.

El valor de cresta de la tensión en circuito abierto (V_{io}) y la corriente en cortocircuito (I_{io}) inducidas en el bucle se calculan en A.2 y A.3 para los casos cuando las descargas de los rayos inciden cerca de la estructura o en la misma respectivamente.

A.2 Descarga del rayo cerca de la estructura

El valor de cresta de la tensión en circuito abierto (V_{io}) inducida en el bucle dentro de la estructura y causada por la caída de un rayo cerca de esta última puede calcularse mediante la ecuación (4) cuando la inductancia mutua L_M está dada por la siguiente ecuación aproximada (suponiendo el campo magnético incidente como una onda plana) [3, 6]:

$$L_M = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times \ln \left(\frac{f + d + e}{f + d} \right) \quad [\mu H] \quad (A.1)$$

donde (véase la figura A.1):

h anchura o altura del bucle [m]

e longitud del bucle [m]

f distancia del canal del rayo al muro de la estructura [m]

d distancia del bucle al muro de la estructura

$\eta = 0,12 \times w$ factor de apantallamiento del blindaje de la estructura (blindaje de LPZ 1), siendo $w \leq 5$ m el ancho de la malla de la pantalla espacial tipo rejilla [5, 6]

K_s factor de apantallamiento teniendo en cuenta el efecto de apantallamiento de la pantalla del cable

e:

I_{ps} valor de cresta de la descarga de rayos subsiguientes (cuadro 1) [kA]

$T_1 = 0,25$ duración del frente de las descargas subsiguientes (cuadro 1) [μs]

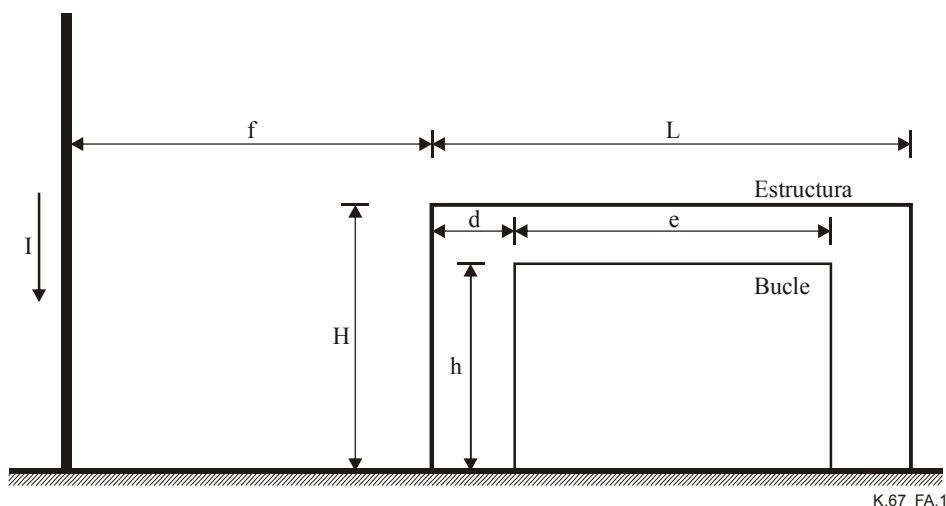


Figura A.1/K.67 – Descargas del rayo cerca de la estructura

Si la resistencia óhmica de los hilos se desprecia (caso más desfavorable), la corriente en corto circuito (I_{sc}) se calcula mediante la ecuación (5) o (6), donde la autoinductancia L_S , en μH , del bucle se determina a través de la siguiente ecuación:

$$L_S = 0,8 \times \sqrt{e^2 + h^2} - 0,8 \times (e + h) + 0,4 \times e \times \ln \left[\frac{\frac{2 \times h}{r}}{e + \sqrt{e^2 + \left(\frac{h}{e}\right)^2}} \right] + 0,4 \times h \times \ln \left[\frac{\frac{2 \times e}{r}}{e + \sqrt{e^2 + \left(\frac{e}{h}\right)^2}} \right] \quad (A.2)$$

donde:

r el radio del hilo del bucle [m]

Las sobretensiones peligrosas esperadas que se inducen en el bucle interno se evalúan con la ecuación (4).

Por la definición del SPL:

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)} \quad (A.3)$$

donde:

U_{SPL} es la tensión correspondiente al SPL seleccionado

U_R es una tensión de referencia (inferior a U_{SPL}) que define el nivel de tensión de resistibilidad mínima del equipo conectado a la línea o del aislamiento del conductor de la línea

$N_T(U)$ es el número total de descargas que inducirán una tensión igual o mayor que U

El número total de descargas $N_T(U)$ está dado por (véase la figura A.2):

$$N_T = 4 \cdot N_g \int_{R \text{ o } I}^{\infty} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\infty} \int_{\infty}^{\infty} p(i) \cdot di \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot x \cdot dx \quad (A.4)$$

donde:

N_g es la densidad de descargas de rayos en el terreno (descargas/ km² · año)

R es la distancia mínima desde el bucle gracias a la cual el rayo no incidirá directamente en la estructura ($R \cong 3H + L/2$) (véase la figura A.1)

$p(i)$ es la función de probabilidad de la corriente producida por la descarga del rayo

NOTA 1 – Como se muestra en la Rec. K.47, $p(i) = 10^{-2} e^{(a-bi)}$ para $i \geq 0$, donde "i" representa la corriente de cresta producida por el rayo [kA], $a = 4,605$ y $b = 0,0117$ para $i \leq 20$ kA y $a = 5,063$ y $b = 0,0346$ para $i > 20$ kA.

θ es el ángulo entre el bucle y una línea recta que une el lugar de la descarga y el bucle

x es la distancia entre el lugar de la descarga y el centro del bucle

I_p es la corriente de cresta producida por la descarga del rayo que inducirá la tensión U en el bucle dada por la ecuación (4)

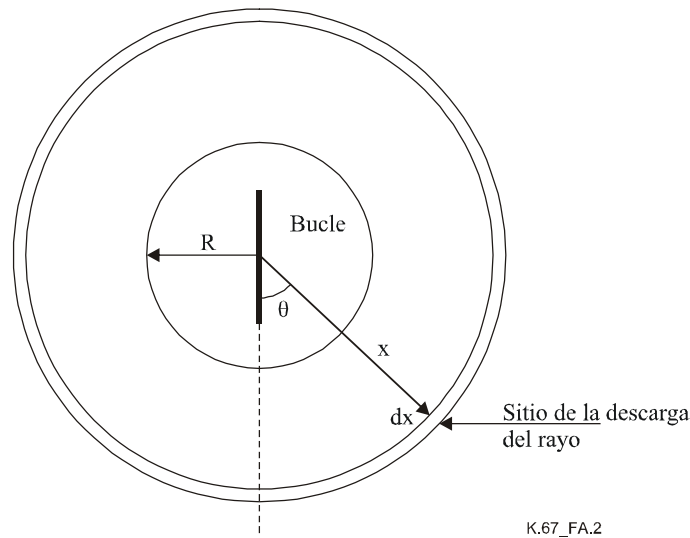


Figura A.2/K.67 – Configuración de referencia para la evaluación de la sobrecarga inducida en un bucle por la incidencia de un rayo cerca de una estructura

Habida cuenta de que la mayoría de las descargas de los rayos tendrán lugar a cierta distancia de la estructura de manera que $f+d \gg e$ y, por lo tanto, $\ln [(f+d+e)/(f+d)] \cong e/(f+d)$, la ecuación (A.1) puede plantearse como:

$$L_M = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times \frac{e}{(f+d)} \cong \frac{W}{x} \quad (\text{A.5})$$

donde $x \cong f + d$ y W es una constante dada por:

$$W = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times e \quad (\text{A.6})$$

Al resolver las integrales de la ecuación (A.4), insertar los resultados en la ecuación (A.3) y tras algunos cálculos algebraicos se llega a las siguientes ecuaciones:

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_1 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_{SPL}) - D]}{[(C_1 \cdot U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_R) - D]} \quad \text{para } U_R \text{ y } U_{SPL} \leq U_{LIM} \quad (\text{A.7})$$

$$SPL = \left(\frac{b_1 \cdot U_R}{b_2 \cdot U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_{SPL})]}{[(C_1 \cdot U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_R) - D]} \quad \text{para } U_R \leq U_{LIM} \text{ y } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.8)$$

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_{SPL})]}{[(C_2 \cdot U_R + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_R)]} \quad \text{para } U_R \text{ y } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.9)$$

NOTA 2 – Las tres ecuaciones anteriores, (A.7), (A.8) y (A.9), en lugar de una sola, se deben a la interrupción de la función p(i) en i = 20 kA (véase la nota 1);

donde:

$$U_{LIM} = \frac{20 \cdot W}{R \cdot T_1} \quad (A.10)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \cdot R \cdot T_1}{W} \quad (A.11)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \cdot R \cdot T_1}{W} \quad (A.12)$$

$$D = \left(1 + 20b_1 - 20 \frac{b_1^2}{b_2} - \frac{b_1^2}{b_2^2} \right) \exp(a_1 - 20b_1) = 82,33 \quad (A.13)$$

$a_1 = 4,605$; $b_1 = 0,0117$; $a_2 = 5,063$; y $b_2 = 0,0346$ son los parámetros de p(i).

En las ecuaciones de (A.7) a (A.9), U_{SPL} y U_R están dadas en kV.

Cuando $R \rightarrow 0$ se alcanza una condición límite para el SPL. En este caso, las ecuaciones (A.7) a (A.9) se reducen a la forma simple mostrada en la ecuación (A.14), donde U_{SPL} es independiente de las dimensiones del bucle y de los parámetros p(i).

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \quad (A.14)$$

En los cuadros A.1 y A.2 se muestran los valores de U_{SPL} para distintos valores de SPL, U_R y las dimensiones de la estructura y el bucle, basándose en las ecuaciones (A.7) a (A.9).

Para poder obtener las corrientes en cortocircuito inducidas en el bucle puede aplicarse la misma lógica. Las ecuaciones resultantes son similares a las ecuaciones (A.7) a (A.9) donde las tensiones U_R , U_{SPL} y U_{LIM} se sustituyen por las corrientes I_R , I_{SPL} e I_{LIM} . Las ecuaciones (A.10) a (A.12) se modificarán de la siguiente manera:

$$I_{LIM} = \frac{20 \times W}{R \times L_S} \quad (A.15)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \times R \times L_S}{W} \quad (A.16)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \times R \times L_S}{W} \quad (A.17)$$

Para el cálculo de los valores de los cuadros A.1 y A.2 se decidió que debería aplicarse la función p(i) a la primera descarga del rayo. Como se establece en cuadro 1, las descargas subsiguientes tienen la misma distribución que la primera, pero las corrientes se dividen por un factor 4 (es decir, 200 kA de la primera descarga corresponden a 50 kA de la descarga subsiguiente y así sucesivamente). Por lo tanto, como para el cálculo de las ecuaciones (A.7) a (A.9) se ha utilizado la

función $p(i)$, la duración del frente de la descarga subsiguiente utilizada en el cálculo de U_{SPL} se ha multiplicado por un factor 4, es decir, $T_1 = 1 \mu s$, a fin de compensar la diferencia en la magnitud de las corrientes. Los valores de U_{SPL} e I_{SPL} se calcularon para la primera descarga y las subsiguientes, respectivamente.

Cuadro A.1/K.67 – Valores de cresta de sobretensiones y sobrecorrientes inducidas en un bucle de 25 m² dentro de una estructura debidas a la descarga de un rayo cerca de la estructura

SPL	Dimensiones de la Estructura (m)					
	L = 25 – H = 50 (edificio grande)		L = 15 – H = 5 (edificio pequeño)		L = 0 – H = 0 (sin edificio)	
	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)
I	2520	61	4630	112	5000	121
II	2100	51	3390	82	3540	86
III/IV	1610	39	2200	53	2240	54
NOTA – Condiciones de cálculo: $h = 2,5$ m; $e = 10$ m; $r = 0,5$ mm ($L_s = 41,2 \mu H$); $\eta = 1$; $K_s = 1$.						

Cuadro A.2/K.67 – Valores de cresta de sobretensiones y sobrecorrientes inducidas en un bucle de 50 m² dentro de una estructura debidas a la descarga de un rayo cerca de la estructura

SPL	Dimensiones de la Estructura (m)					
	L = 25 – H = 50 (edificio grande)		L = 15 – H = 5 (edificio pequeño)		L = 0 – H = 0 (sin edificio)	
	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)	U_{SPL} (V)	I_{SPL} (A)
I	3370	64	4890	93	5000	95
II	2690	51	3500	67	3540	68
III/IV	1920	37	2230	43	2240	43
NOTA – Condiciones de cálculo: $h = 5$ m; $e = 10$ m; $r = 0,5$ mm ($L_s = 52,4 \mu H$); $\eta = 1$; $K_s = 1$.						

Los valores de la inductancia L_s de diferentes dimensiones de bucle pueden evaluarse mediante la ecuación (A.2). En el cuadro A.3 se muestran algunos resultados de la ecuación (A.2) para distintas dimensiones de bucle.

Cuadro A.3/K.67 – Valores de inductancia (L_s) en μH para distintas dimensiones de bucle

h (m)	e = 20 m		e = 10 m	
	r = 0,5 mm	r = 5 mm	r = 0,5 mm	r = 5 mm
2,5	75,3	54,6	41,2	29,7
0,5	56,4	37,5	28,7	19,1
0,05	36,9	18,4	18,5	9,2
0,025	31,3	12,9	15,7	6,4

A.3 Descarga del rayo en la estructura

En el caso de que la descarga del rayo incida en la estructura, se podrán tener en cuenta los tres casos siguientes:

- 1) estructura protegida mediante un sistema de protección contra el rayo (LPS, *lighting protection system*) construido con una varilla independiente (por ejemplo, una torre de antenas que protege la estación de base radioeléctrica (RBS, *radio base station*) cercana);
- 2) estructura protegida mediante un LPS en malla con conductores de bajada espaciados en todo el perímetro;
- 3) estructura protegida mediante una pantalla espacial de tipo rejilla (LPS) con una anchura de malla $w \leq 5$ m.

En los dos primeros casos la tensión en circuito abierto (V_{io}) inducida en el bucle dentro de la estructura puede evaluarse con la ecuación (4), donde la inductancia mutua L_M está dada por la siguiente ecuación [4, 6]:

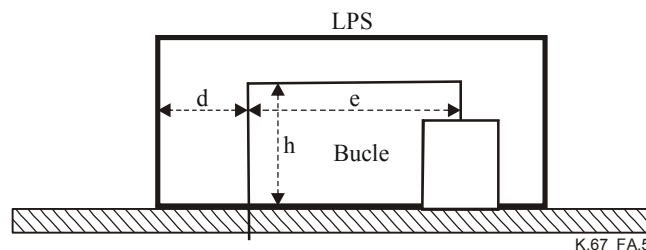
$$L_M = 0,2 \times K_c \times K_s \times h \times \ln\left(\frac{d+e}{d}\right) \quad [\mu H] \quad (A.18)$$

donde (véase la figura A.3):

- h altura del bucle [m]
- e longitud del bucle [m]
- d distancia entre los conductores de bajada y el bucle del circuito [m]
- K_c factor que tiene en cuenta la distribución de corriente entre los conductores de bajada
- K_s factor de apantallamiento que tiene en cuenta el efecto de apantallamiento de la pantalla del cable

e:

- I_{ps} valor de cresta de las descargas subsiguientes (cuadro 1) [kA]
- $T_1 = 0,25$ duración del frente de las descargas subsiguientes (cuadro 1) [μs]



**Figura A.3/K.67 – Descargas del rayo en la estructura:
LPS con uno o varios conductores de bajada**

En el caso de un LPS con un conductor de bajada, se supone que $K_c = 1$; en el caso de un LPS con múltiples conductores de bajada [6]:

$$K_c = \frac{1}{2 \times n} + 0,3 \quad (A.19)$$

donde:

- n representa el número de conductores de bajada igualmente espaciados en todo el perímetro.

En el tercer caso de una estructura protegida mediante un LPS con pantalla espacial tipo rejilla, el valor de cresta de la tensión inducida en circuito abierto en el bucle puede calcularse con la ecuación (4) donde la inductancia mutua L_M está dada mediante la siguiente ecuación [6]:

$$L_M = 0,4 \times \pi \times K_s \times h \times \ln \left(\frac{d_w + e}{d_w} \right) \times K_h \times \frac{w}{\sqrt{d_r}} \quad [\mu H] \quad (A.20)$$

donde (véase la figura A.4):

d_w distancia entre el bucle y el muro [m]

d_r distancia entre el bucle y el techo [m]

K_h factor de configuración igual a $0,01[1/m^{0,5}]$

K_s factor de apantallamiento que tiene en cuenta el efecto de apantallamiento de la pantalla del cable

e:

I_{ps} valor de cresta de las descargas subsiguientes (cuadro 1) [kA]

$T_1 = 0,25$ duración del frente de las descargas subsiguientes (cuadro 1) [μs]

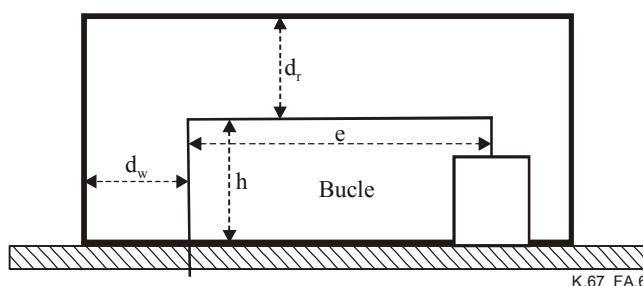


Figura A.4/K.67 – Descargas del rayo en la estructura: sistema de protección contra el rayo con pantalla espacial tipo rejilla

Si se desprecia la resistencia óhmica de los hilos (caso más desfavorable), la corriente en cortocircuito (I_{sc}) se calcula con la ecuación (5) o (6), donde la autoinductancia (L_S), en henrios, del bucle se calcula con la ecuación (A.2).

Los valores de V_{oi} e I_{sc} , debidos a la primera descarga y las subsiguientes, se muestran en el cuadro A.4 en función del LPL, suponiendo que la estructura está protegida por un LPS integrado por una varilla independiente ($K_c = 1$, caso más desfavorable), que el cableado interno no está apantallado y que la dimensión del bucle inducido es de $50 m^2$ ($h = 5 m$; $e = 10 m$).

Cuadro A.4/K.67 – Valores de cresta de las sobrecargas inducidas en un bucle de $50 m^2$ dentro de una estructura debidas a la descarga directa del rayo en la estructura

LPL	Primera descarga		Descargas subsiguientes	
	V_{oi} [kV]	I_{sc} [kA]	V_{oi} [kV]	I_{sc} [kA]
I	25	6	250	1,5
II	19	4,5	190	1,2
III/IV	12,5	3	125	0,8
Condiciones de cálculo: $L_S = 42 \mu H$; $L_M = 0,792 \mu H$; dimensiones del bucle de $50 m^2$ ($h = 5 m$; $e = 10 m$); $K_c = 1$; $K_s = 1$; $d = 4 m$; $r = 0,5 m$.				

Anexo B

Sobrecargas inducidas en la línea de telecomunicaciones debidas a la incidencia del rayo cerca de la línea: terreno perfectamente conductor

El número de descargas de rayos en la sección elemental " $L_r \times dx$ ", que inducen en la línea de telecomunicaciones una tensión igual o superior a U , está dado por:

$$N = 2 \times L_r \times N_g \times dx \int_I^{\infty} p(i) \times di \quad (B.1)$$

donde N_g es la densidad de descargas de rayos en el terreno, L_r es la longitud de la línea, $p(i)$ es la función de probabilidad de la corriente producida por la descarga del rayo (conforme a las Recs. UIT-T K.25, K.47 y CEI 61663-1) e I es la corriente de descarga de cresta que inducirá la tensión U en un punto determinado de la línea.

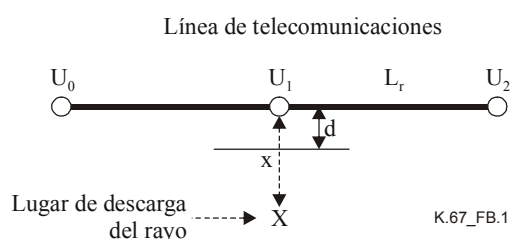


Figura B.1/K.67 – Configuración de referencia para la evaluación de la sobrecarga inducida por la caída de un rayo cerca de la línea

El número total de descargas que inducirán una tensión igual o superior a U está dado por:

$$N_T = 2 \times L_r \times N_g \int_d^{\infty} \int_I^{\infty} p(i) \cdot di \cdot dx \quad (B.2)$$

donde d es la distancia mínima desde la línea que impedirá una descarga directa sobre ella. Se supone la relación aproximada $d = 3 h$ (figura B.1).

El valor de cresta de la tensión U_1 , en el punto medio de la línea y U_0 o U_2 , en las terminaciones de la línea, pueden calcularse mediante las siguientes ecuaciones si se supone un terreno perfectamente conductor:

$$U_1 = \frac{30 \times I_p \times h}{d} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \right) \quad (B.3)$$

$$U_0 = U_2 = \frac{30 \times I_p \times h}{d} \quad (B.4)$$

donde:

- I_p es el valor de cresta (en kA) de la corriente producida por la descarga del rayo
- v es la relación entre la velocidad de la descarga de retorno (se supone $v = 1,3 \times 10^8$ m/s) y la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s):

$$v = 0,43 \quad y \quad \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}} \right) = 1,3$$

Si se incluye I_p de la ecuación (B.4) en la ecuación (B.2), se resuelven las integrales, se introducen los resultados en la ecuación (15) y se realizan algunos cálculos algebraicos, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_1 - A_1 U_0) - B]}{U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]} \quad \text{para } U_R \text{ y } U_0 \leq U_{LIM} \quad (B.5)$$

$$SPL = \frac{b_1 U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{b_2 U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]} \quad \text{para } U_0 > U_{LIM} \text{ y } U_R \leq U_{LIM} \quad (B.6)$$

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{U_{SPL} [\exp(a_2 - A_2 U_R)]} \quad \text{para } U_0 > U_{LIM} \text{ y } U_R > U_{LIM} \quad (B.7)$$

NOTA 1 – Estas tres ecuaciones, (B.5), (B.6) y (B.7), en lugar de una sola, se deben a la interrupción de la función $p(i)$ en $i = 20$ kA.

donde:

η representa el factor de apantallamiento de la línea ($\eta = 1$ cuando la línea no está apantallada)

$$U_{LIM} = 600 \, h \, \eta / d \quad (B.8)$$

$$A_1 = \frac{b_1}{10\eta} = \frac{0,00117}{\eta} \quad (B.9)$$

$$A_2 = \frac{b_2}{10\eta} = \frac{0,00346}{\eta} \quad (B.10)$$

$$B = \left(1 - \frac{b_1}{b_2} \right) \exp(a_1 - 20b_1) = 52,37 \quad (B.11)$$

$a_1 = 4,605$; $b_1 = 0,0117$; $a_2 = 5,063$; y $b_2 = 0,0346$ son los parámetros de $p(i)$.

En las ecuaciones (B.5) a (B.7), U_{SPL} y U_R están dadas en kV.

Cuando $d \rightarrow 0$ se logra una condición límite para el SPL. En este caso, las ecuaciones (B.5) a (B.7) se reducen a la forma simple que se muestra en la ecuación (B.12), donde U_{SPL} es independiente de las características de la línea y de los parámetros $p(i)$.

$$SPL = \left(\frac{U_R}{U_{SPL}} \right) \quad (B.12)$$

En el cuadro B.1 se muestran los valores de U_{SPL} para diferentes valores de SPL y U_R basándose en la ecuación (B.5) para una línea aérea no apantallada ($\eta = 1$).

Cuadro B.1/K.67 – Valores en circuito abierto de la sobretensión peligrosa (U_{SPL}) en los extremos de una línea aérea no apantallada en función del SPL para diferentes valores de la tensión de referencia U_R .

U_R (kV)	Sobretensión peligrosa, U_{SPL} [kV]		
	SPL		
	0,01	0,02	0,05
1,5	111	64	28
1,0	81	44	19
0,75	64	34	14
0,5	44	23	10
0,25	23	12	5

En el cuadro B.1, el doble del valor de la tensión referenciada ($2 \times U_R$) es el límite inferior de las tensiones "peligrosas" en circuito abierto, a fin de tener en cuenta la reflexión en la terminación de la línea. Por ejemplo, si se considera que $U_R = 0,75$ kV y $SPL = 0,01$, significa que el 1% de las tensiones en circuito abierto inducidas por encima de 1,5 kV serán iguales o mayores que 64 kV.

El valor de cresta de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) se calcula de la siguiente manera:

$$I_{sc} = \frac{U_{SPL}}{Z} \quad (B.13)$$

donde:

$Z = 400 \, \Omega$ representa la impedancia de sobrecarga de la línea aérea

Para una línea aérea apantallada, los valores de U_{SPL} pueden calcularse con el mismo procedimiento antes mencionado cuando se ha evaluado el valor del factor de apantallamiento relacionado con el blindaje y se ha utilizado en las ecuaciones (B.9) y (B.10). No obstante, la U_{SPL} resultante tendrá una probabilidad de ocurrencia absoluta (número de descargas por año) mucho menor que la U_{SPL} correspondiente a la línea no apantallada. Por lo tanto, es más representativo multiplicar la U_{SPL} de la línea no apantallada por el factor de apantallamiento a fin de obtener la U_{SPL} de la línea apantallada.

NOTA 2 – Si se considera SPL II, por ejemplo, significa que entre todas las tensiones por encima de 0,75 kV observadas en una línea no apantallada durante un determinado periodo de tiempo, el 2% son iguales o mayores que 34 kV y este porcentaje del 2% corresponde a N_T sobrecargas. Por consiguiente, para una línea apantallada ($\eta_e = 0,1$) y el mismo SPL II, en el mismo periodo de tiempo, N_T sobrecargas serán iguales o mayores que 3,4 kV. Sin embargo, cabe notar que entre todas las tensiones por encima de 0,75 kV observadas en esta línea apantallada durante este periodo de tiempo, más del 2% son iguales o mayores que 3,4 kV.

Los valores resultantes, considerando un factor de apantallamiento, están incluidos en el cuadro 5, en particular, el factor de apantallamiento relacionado con el blindaje ($\eta_s = 0,05$) para los nodos L, E, P y C y el factor de apantallamiento relacionado con la tierra ($\eta_e = 0,1$) para los nodos D, S e I.

NOTA 3 – El factor de apantallamiento relacionado con el blindaje o pantalla se evaluó suponiendo la resistencia de la pantalla (R_s) igual a $5 \, \Omega$, por consiguiente, $\eta_s = R_s/Z = 5/100 = 0,05$. El factor de apantallamiento con respecto a tierra se evaluó suponiendo la resistencia a tierra de la pantalla R_e igual a aproximadamente $40 \, \Omega$, por consiguiente, $\eta_e = (R_s + R_e)/(Z + R_e) = 45/440 = 0,1$.

En el cuadro B.2 se presentan los valores de U_{SPL} para diferentes valores de SPL y U_R de una línea aérea apantallada ($\eta = 0,1$) y la lógica que se describió anteriormente.

Cuadro B.2/K.67 – Valores en circuito abierto de la sobretensión peligrosa (U_{SPL}) en los extremos de una línea aérea apantallada en función del SPL para diferentes valores de la tensión de referencia U_R

U_R (kV)	Sobretensión peligrosa, U_{SPL} [kV]		
	SPL		
	0,01	0,02	0,05
1,5	11	6,4	2,8
1,0	8,1	4,4	1,9
0,75	6,4	3,4	1,4
0,5	4,4	2,3	1,0
0,25	2,3	1,2	0,5

El valor de cresta de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) puede calcularse mediante la ecuación (B.13), donde Z es igual a 50Ω ó 100Ω es la impedancia de sobrecarga del circuito conductor-pantalla o del circuito conductor-tierra, respectivamente, ambos valores obtenidos empíricamente a partir de mediciones.

Apéndice I

Sobrecargas inducidas en la estructura debidas a la descarga de un rayo cerca de la estructura o en la propia estructura: configuración experimental y resultados

I.1 Introducción

La finalidad de este apéndice es soportar la hipótesis de que la forma de onda de la tensión inducida por la descarga del rayo en un bucle abierto tiene un tiempo de subida y una duración muy cortos y que la forma de onda de una corriente inducida por la descarga del rayo en un bucle cerrado es idéntica a la de la propia corriente provocada por la descarga del rayo. Esto se demuestra gracias a los datos experimentales a partir de un emplazamiento de prueba y generación de descargas de rayos en Cachoeira Paulista – Brasil.

I.2 Modelo teórico

Se consideran las siguientes hipótesis.

- El bucle se encuentra relativamente cercano al canal del rayo, de modo que la corriente puede considerarse uniforme en todo el canal del rayo (con esta hipótesis se ignoran los efectos de propagación de la corriente producida por el rayo en el canal del rayo).
- La tierra se considera como un conductor perfecto por lo que puede aplicarse la teoría de imágenes al canal del rayo por debajo de la superficie terrestre.
- No se tiene en cuenta el efecto de los conductores metálicos (por ejemplo, las líneas de energía eléctrica) que pueden transportar parte de la corriente producida por la descarga del rayo. Esto significa que puede considerarse una distribución de corriente simétrica sobre la superficie terrestre, lo que permite utilizar la teoría de imágenes.
- Se supone que el bucle tiene baja resistencia en comparación con su reactancia inductiva a las frecuencias asociadas con las corrientes producidas por la descarga del rayo (esto se aplica en la mayoría de los casos prácticos).
- No se tiene en cuenta ningún efecto de la pantalla alrededor del bucle.

- No se tiene en cuenta ninguna inclinación del canal del rayo a partir del eje vertical.
- El bucle y el canal del rayo se encuentran en el mismo plano (ésta es una hipótesis conservadora para la magnitud de la corriente, pero no afecta a la forma de onda).

Por lo tanto, la corriente del rayo inducida (I_a) fluye uniformemente a lo largo de una línea recta vertical (véase la figura I.1). El campo magnético inducido (B) producido por esta corriente es:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_a}{2 \times \pi \times x} \quad (\text{I.1})$$

donde:

x es la distancia desde el círculo del rayo

El flujo magnético que se induce en el bucle se determina fácilmente integrando el campo magnético a través del bucle.

$$\phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0}{2 \times \pi} \int_f^{f+e} \frac{dx}{x} \quad (\text{I.2})$$

lo cual da por resultado:

$$\phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (\text{I.3})$$

La tensión de excitación inducida (V) en el bucle está dada por la derivada con respecto al tiempo del flujo magnético:

$$V = \frac{\left(\frac{dI_a}{dt}\right) \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (\text{I.4})$$

La ecuación (I.4) puede escribirse de la siguiente manera:

$$V = L_M \times \left(\frac{dI_a}{dt}\right) \quad (\text{I.5})$$

donde:

L_M representa la inductancia mutua entre el canal del rayo y el bucle, es decir:

$$L_M = \frac{h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} = 0,2 \times h \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right) \text{ en } \mu\text{H} \quad (\text{I.6})$$

La corriente inducida I_{bucle} está dada por:

$$I_{\text{bucle}} = \left(\frac{1}{L_S}\right) \int V dt = \left(\frac{L_M}{L_S}\right) \times I_a \quad (\text{I.7})$$

donde:

L_S es la autoinductancia del bucle

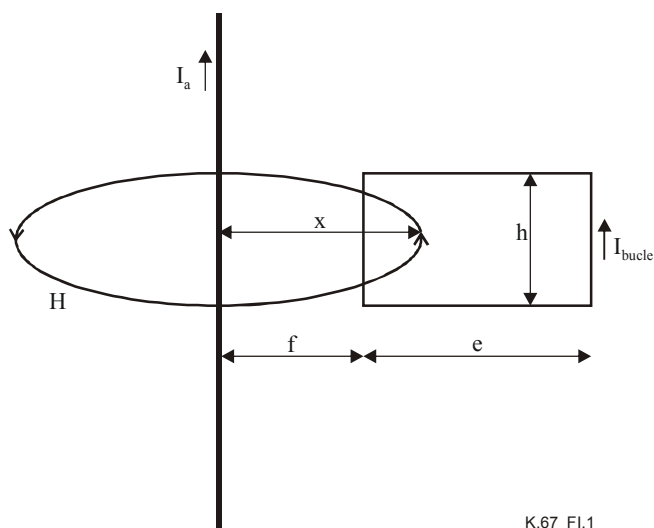


Figura I.1/K.67 – Inducción en un bucle

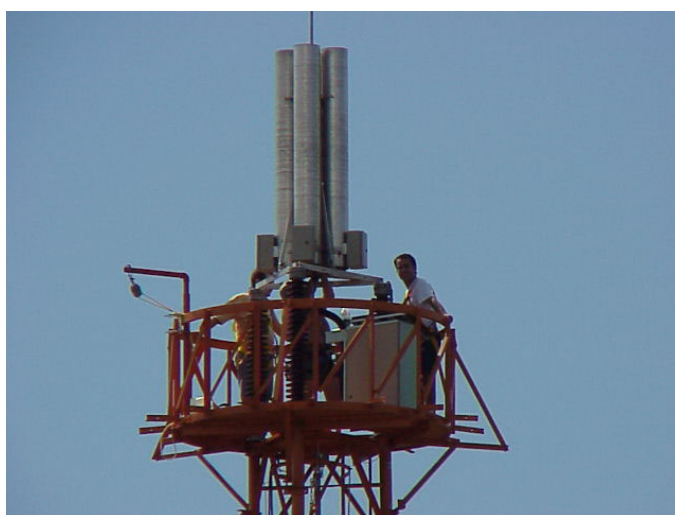
I.3 Emplazamiento de prueba experimental y configuración de prueba

I.3.1 Emplazamiento de prueba experimental

La estación de base radioeléctrica (RBS) del emplazamiento de prueba se muestra en la figura I.2a. En la parte superior de la torre se encuentra una plataforma superior con cohetes utilizados para generar descargas de rayos. En la figura I.2b se muestra una vista de cerca de la parte superior de la torre. La plataforma está soportada por aisladores y conectada a la estructura por un solo conductor que pasa a través de un monitor de corriente de Pearson (tipo 1330) y alimenta a un osciloscopio dentro de la caja metálica cercana. El osciloscopio se controla a distancia mediante una interfaz RS232 a través de fibra óptica. Esto proporciona una medición directa de la corriente producida por la descarga del rayo.



a) RBS del emplazamiento de prueba



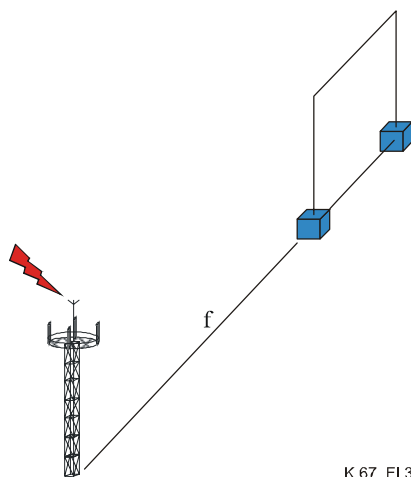
b) parte superior de la torre

Figura I.2/K.67 – Estación de base radioeléctrica del emplazamiento de prueba

I.3.2 Preparación de la prueba de tensión inducida en un bucle abierto

En la figura I.3, se ilustra la configuración experimental, donde se genera y registra la descarga del rayo en la parte superior de una torre de telecomunicaciones y la tensión inducida se mide en un bucle ubicado a una distancia f de la torre. Los datos de la configuración son:

- Dimensiones del bucle: $e = 1,5$ m y $h = 2,0$ m (área del bucle = 3 m²).
- Distancia entre el bucle y el lugar de la descarga del rayo, $f = 100$ m.

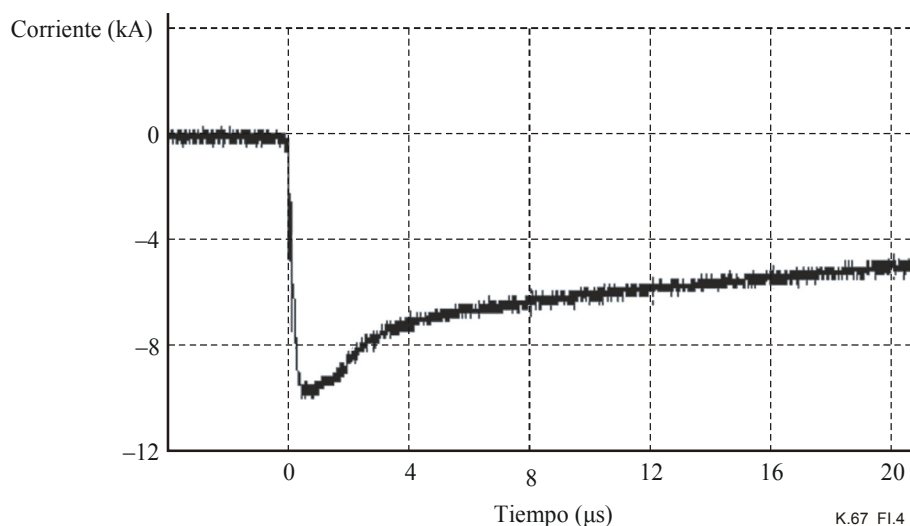


K.67_FI.3

Figura I.3/K.67 – Configuración de prueba de la tensión inducida en un bucle abierto

En la figura I.4 se muestra la corriente del rayo medida, y sus parámetros principales se resumen a continuación:

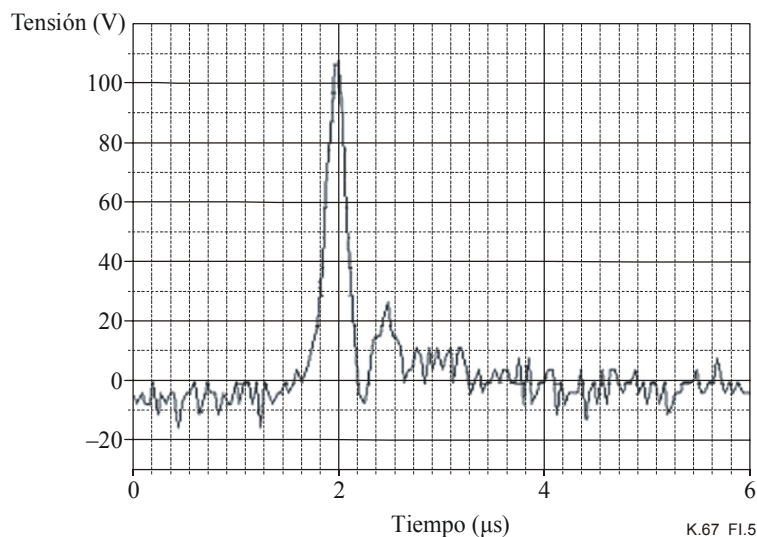
- corriente: duración del frente (T) = $0,375$ ms;
- valor de cresta (I_s) = $9,8$ kA.



K.67_FI.4

Figura I.4/K.67 – Activación de la corriente producida por la descarga del rayo

La medición de la tensión inducida en el bucle se muestra en la figura I.5, donde puede observarse que el tiempo de subida de la tensión en circuito abierto inducida es similar a la de la corriente inducida (es decir $0,35$ μs) y que su forma de onda es de corta duración, del orden de algunos μs.



(La escala de tiempo no es la misma que la de la figura I.4.)

Figura I.5/K.67 – Medición de la tensión inducida en un bucle

Si se incluyen los valores numéricos en la ecuación (I.4) y se tiene en cuenta la forma de onda trapezoidal de la corriente, se obtiene una onda rectangular con una duración de $0,375 \mu\text{s}$ y una cresta de 157 V . Este valor se comparará con el de la figura I.5, donde puede observarse que es un poco más grande que el valor medido (110 V).

Puede aplicarse un método más elaborado basándose en los trabajos de Rusck [I.1]. Este modelo incluye la propagación de la corriente en todo el canal del rayo. Si se tienen en cuenta las ecuaciones de Rusck para el campo magnético inducido (B) a cierta distancia del lugar de la descarga del rayo y se calculan sus derivadas con respecto al tiempo, se obtiene:

$$\frac{dB}{dt} = 0 \quad \text{para } t \leq r_0/v_0 \quad (\text{I.8})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t \right\} \quad \text{para } r_0/v_0 \leq t \leq r_0/v_0 + T \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t - \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \left[\left(\frac{v_0(t-T)}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} (t-T) \right\} \quad (\text{I.10})$$

para $t \geq r_0/v_0 + T$

En las ecuaciones (I.9) y (I.10), v_0 representa la velocidad de la luz en el espacio libre ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) y v la velocidad de propagación de la corriente producida por la descarga del rayo, que se supone igual a $1,3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Si se incluyen los valores numéricos en esas ecuaciones se obtiene la forma de onda mostrada en la figura I.6. Esta forma de onda tiene una cresta de 112 V y coincide perfectamente con la tensión medida.

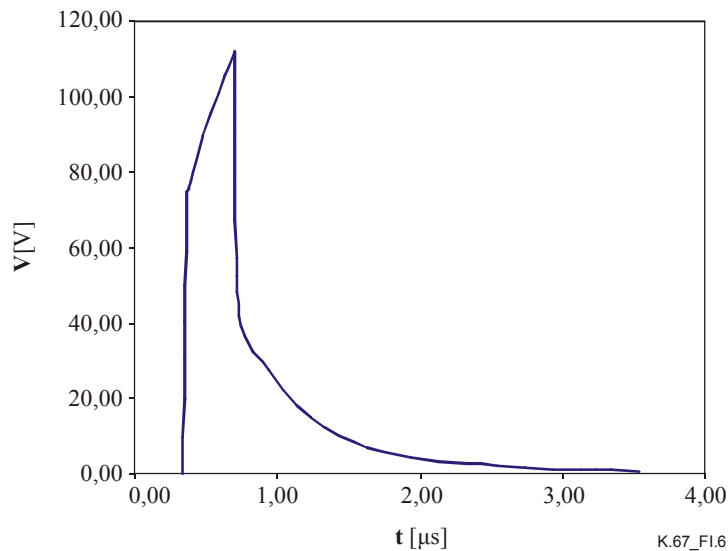
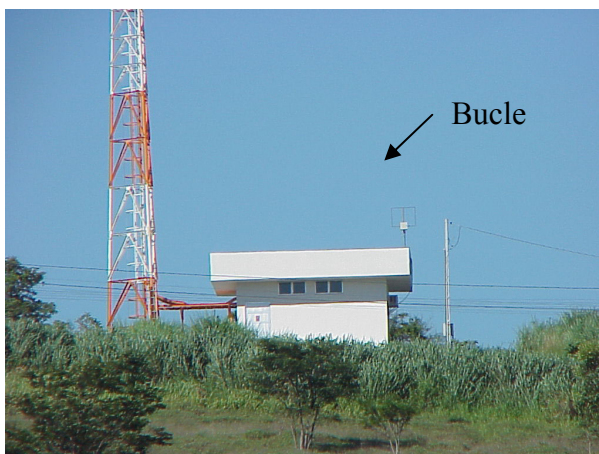


Figura I.6/K.67 – Onda de tensión calculada mediante el modelo de Rusck

De las ecuaciones (I.9) y (I.10) puede deducirse que, para bucles relativamente cercanos al punto de descarga del rayo ($f < T v_0$), el valor de cresta de la tensión inducida puede aproximarse razonablemente al considerar la corriente producida por el rayo uniforme en todo el canal, de acuerdo con la ecuación (I.4). No obstante, conforme el bucle se aleja del punto de descarga, la tensión inducida será progresivamente menor que el valor calculado mediante la ecuación (I.4), debido a que la velocidad de propagación de la corriente se vuelve un parámetro importante. En este caso, deben utilizarse las ecuaciones (I.8) a (I.10).

I.3.3 Configuración de prueba de la corriente inducida en un bucle cerrado

En la figura I.7a se muestra una vista cercana de la RBS, donde puede observarse un bucle en la parte superior del edificio. El bucle está constituido por un tubo de cobre cortocircuitado y su corriente se mide mediante un monitor de corriente de Pearson (tipo 110) que alimente un osciloscopio situado dentro del edificio de la RBS. En la figura I.7b se muestra la caída de un rayo en la parte superior de la torre, vista desde el refugio de control.



a) Edificio de la RBS con bucle



b) Caída de un rayo

Figura I.7/K.67 – Configuración de prueba de la corriente inducida en bucle cerrado

Las ondas, registradas simultáneamente en la parte superior de la torre (figura I.8) y en el bucle (figura I.9), se describen mediante el valor de cresta, el tiempo al valor mitad (T_h) y el tiempo de subida (T_f) que se define como $1,25 (T_{90\%} - T_{10\%})$.

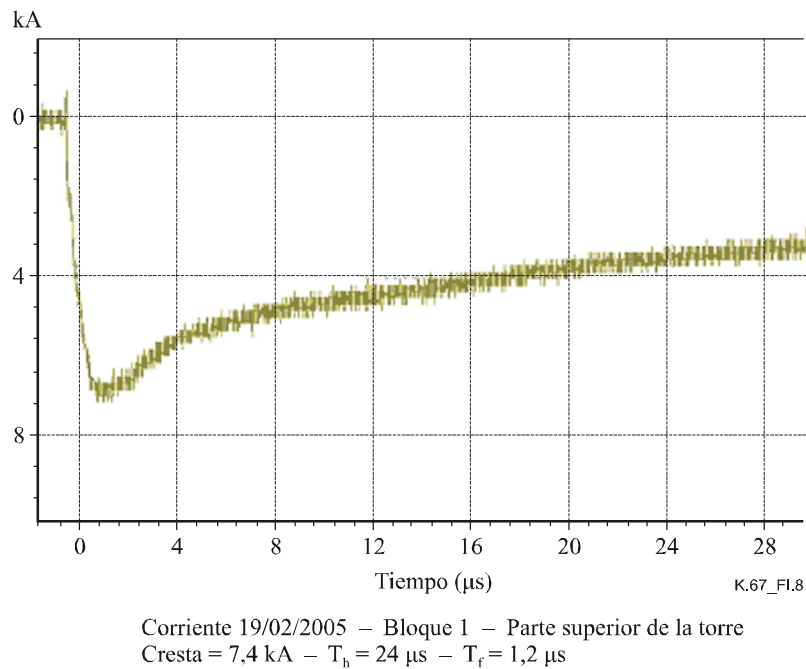


Figura I.8/K.67 – Corriente producida por la descarga del rayo

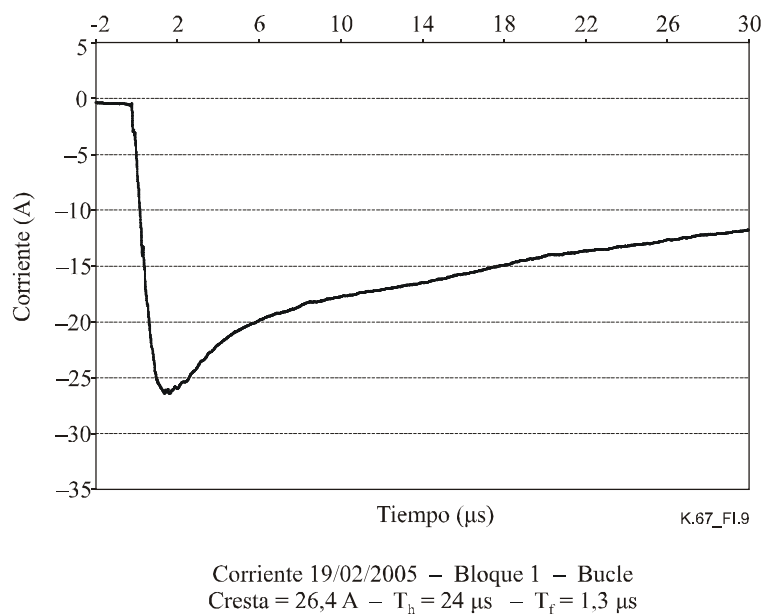


Figura I.9/K.67 – Corriente inducida en el bucle cerrado

La comparación entre las ondas registradas en la parte superior de la torre y en el bucle muestra una muy buena concordancia en cuanto a la forma de onda.

Los datos del emplazamiento de prueba son:

- Distancia entre el eje de la torre y el bucle: $f = 10,7$ m.
- Altura del bucle: $h = 0,80$ m.
- Anchura del bucle: $e = 1,00$ m.
- Radio del conductor del bucle $= 0,0075$ m.

La inductancia mutua entre la torre y el bucle viene dada por la ecuación (I.6) como:

$$L_M = 0,0143 \mu H$$

La autoinductancia del bucle viene dada por la ecuación (A.2) como:

$$L_S = 2,89 \mu H$$

La corriente de bucle esperada, dada por la ecuación (I.7), para una corriente producida por el rayo $I_a = 7,04$ kA es:

$$I_{bucle} = 34,8 \text{ A}$$

La medición de la corriente de bucle (26.4 A) es algo menor (24%) que el valor esperado ya que las condiciones reales del emplazamiento de prueba no satisfacen completamente las hipótesis teóricas enumeradas en I.2. Entre dichas hipótesis, la que más contribuye a esta diferencia es la presencia de la línea de energía eléctrica que conduce una parte de la corriente producida por el rayo en el sentido que se aleja de la estación y que no se acopla con el bucle. Para poder duplicar la medición de la corriente producida por la descarga del rayo, se han compensado estos factores en la ganancia del sistema comunicada a los programas informáticos de medición.

En conclusión, como se demuestra experimentalmente, la forma de onda de la corriente inducida provocada por la descarga del rayo en un bucle cerrado es idéntica a la forma de onda de la propia corriente del rayo y la relación entre sus valores de cresta pueden evaluarse mediante la relación entre la inductancia mutua y la autoinductancia, conforme a la ecuación (I.7).

BIBLIOGRAFÍA

- [I.1] RUSCK (S.): Transactions of the Royal Institute of Technology, No. 120, *Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks*, Estocolmo, 1958.

SERIES DE RECOMENDACIONES DEL UIT-T

Serie A	Organización del trabajo del UIT-T
Serie D	Principios generales de tarificación
Serie E	Explotación general de la red, servicio telefónico, explotación del servicio y factores humanos
Serie F	Servicios de telecomunicación no telefónicos
Serie G	Sistemas y medios de transmisión, sistemas y redes digitales
Serie H	Sistemas audiovisuales y multimedios
Serie I	Red digital de servicios integrados
Serie J	Redes de cable y transmisión de programas radiofónicos y televisivos, y de otras señales multimedios
Serie K	Protección contra las interferencias
Serie L	Construcción, instalación y protección de los cables y otros elementos de planta exterior
Serie M	Gestión de las telecomunicaciones, incluida la RGT y el mantenimiento de redes
Serie N	Mantenimiento: circuitos internacionales para transmisiones radiofónicas y de televisión
Serie O	Especificaciones de los aparatos de medida
Serie P	Calidad de transmisión telefónica, instalaciones telefónicas y redes locales
Serie Q	Conmutación y señalización
Serie R	Transmisión telegráfica
Serie S	Equipos terminales para servicios de telegrafía
Serie T	Terminales para servicios de telemática
Serie U	Conmutación telegráfica
Serie V	Comunicación de datos por la red telefónica
Serie X	Redes de datos, comunicaciones de sistemas abiertos y seguridad
Serie Y	Infraestructura mundial de la información, aspectos del protocolo Internet y Redes de la próxima generación
Serie Z	Lenguajes y aspectos generales de soporte lógico para sistemas de telecomunicación