

Calidad de la Energía Eléctrica

Manuel Pérez Donación

Universidad de Vigo



CAPÍTULO VI

Transitorios de tensión, sobretensiones temporales, rayos y puestas a tierra

7.1. Transitorios de tensión. Definición

Según la UNE-EN 50160 se define la sobretensión transitoria como una sobretensión oscilatoria o no oscilatoria de corta duración generalmente fuertemente amortiguada y que dura como máximo algunos milisegundos.

Se destaca el aspecto de variación brusca en la tensión, con valores que superan varias veces el valor máximo de la tensión nominal, y que pueden poner en peligro determinados elementos y aparatos eléctricos.

En función de su origen, se pueden distinguir dos tipos de transitorios:

- ✚ **Transitorios de origen atmosférico.** Externos al sistema eléctrico, cuya fuente principal son las descargas atmosféricas.
- ✚ **Transitorios debidos a maniobras.** Internos al sistema eléctrico, cuyas fuentes pueden englobarse bajo la denominación de maniobras.

Las sobretensiones transitorias, también denominadas corrientemente impulsos de tensión, pueden aparecer en las redes eléctricas de potencia como en las de control de forma esporádica y pueden repetirse varias veces a lo largo del tiempo y también de forma periódica.

Así pues los transitorios de tensión, son variaciones bruscas del valor instantáneo de la onda de tensión que pueden llegar a ser varias veces superiores al valor máximo de ésta, la duración está comprendida entre algunos microsegundos y muy pocos milisegundos (hasta medio ciclo de la tensión senoidal). Pueden ser positivos o negativos, siendo sus efectos equivalentes.

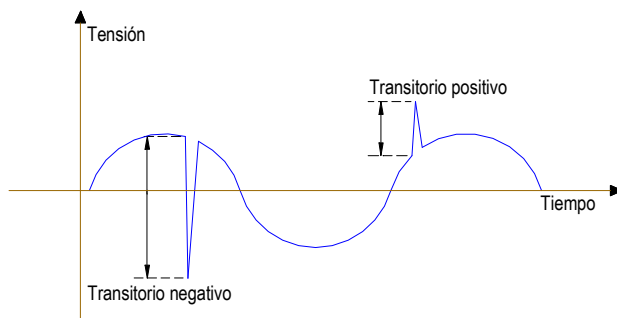


Figura 7.1. Transitorios de tensión positivo y negativo.

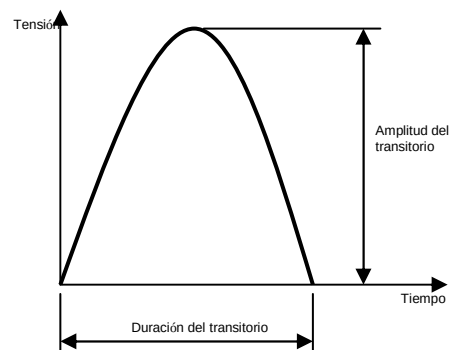


Figura 7.2. Transitorio de tensión simple

Por su amplitud y duración, los transitorios de tensión tienen que ser analizados a partir de valores instantáneos de la amplitud de la onda de tensión y no mediante valores promediados, que son los que habitualmente se utilizan para medir otro tipo de perturbaciones que afectan a la amplitud de la onda.

Los transitorios de tensión suelen aparecer de forma esporádica, pero es posible también que se repitan a lo largo del tiempo. Pueden manifestarse en cualquier punto de la red. A partir de éste, tienden a desplazarse a lo largo de la misma con la velocidad de propagación de una onda en un medio conductor. Por ello, suele considerarse que aparecen en todos los puntos de dicha red en el mismo instante en que son generados, aunque con parámetros diferentes, especialmente en lo que se refiere al valor de pico que disminuye cuanto más lejos se encuentre del punto de generación.

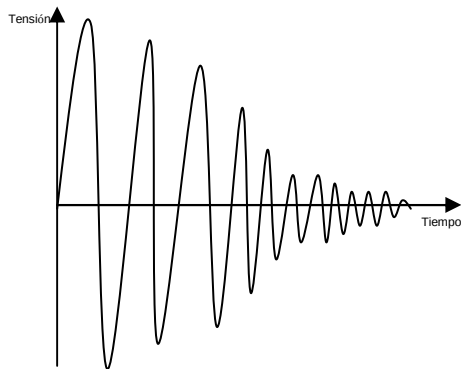


Figura 7.3. Transitorio complejo

Es posible que ciertos transitorios generados en líneas de alta tensión se propaguen por ellas, se transmitan a través del acoplamiento inductivo de los transformadores y aparezcan en las líneas de tensiones más bajas de una forma atenuada.

No todos los transitorios de tensión tienen la misma forma, lo cual indica que su naturaleza tiene orígenes diferentes. Pueden ser simples con solo una subida y bajada o complejos una subida y, a lo largo del tiempo, con una serie de oscilaciones amortiguadas. También pueden ser positivos y negativos independientemente del instante de polaridad de la onda.

7.2. Parámetros característicos

Los parámetros que caracterizan los transitorios de tensión son:

- **Frente de subida.**- Tiempo comprendido entre el 10% y el 90% de su amplitud máxima.
- **Frente de bajada.**- Intervalo de tiempo comprendido entre la amplitud máxima del impulso y el 50% de esta amplitud en la zona de decrecimiento (cola del transitorio).
- **Duración.**- Diferencia absoluta entre los instantes de inicio y final del transitorio. Como antes se ha señalado, oscila entre varios microsegundos y algunos milisegundos.
- **Valor de pico.**- Amplitud máxima del transitorio, siendo el orden de su magnitud de 1 a 5 veces el valor nominal de la tensión.
- **Energía.**- Capacidad de disipación de potencia del transitorio sobre una impedancia dada. Depende de la duración y del valor de pico.
- **Frecuencia de oscilación.**- Frecuencia asociada a la oscilación amortiguada de un transitorio de forma compleja. Se sitúa por encima de 1 kHz.

7.3. Valores de referencia

En la tabla 7.1, se recogen los transitorios de tensión más habituales en las redes de distribución de alta y baja tensión y los valores de referencia de sus parámetros principales medibles.

Tabla 7.1. Valores de referencia.

Nivel de tensión	Causa	Duración	Frecuencia de oscilación	Valor de pico
Alta (1 kV<V<36 kV)				
	Actuación elementos de corte	$t > 100 \mu\text{seg}$	$F < 10\text{kHz}$	(*)
	Transferidos de un nivel superior de tensión	$t > 100 \mu\text{seg}$	$F < 10\text{kHz}$	(*)
	Descarga atmosférica	$1\mu\text{seg} < t < 100\mu\text{seg}$	$10\text{kHz} < F < 1\text{MHz}$	(*)
	Reencendido	$1\mu\text{seg} < t < 100\mu\text{seg}$	$10\text{kHz} < F < 1\text{MHz}$	(*)
Baja (<1 kV)				
	Actuación de elementos de corte	$t > 100 \mu\text{seg}$	$F < 10\text{kHz}$	$V_p < 1 \text{ kV}$
	Transferidos de un nivel superior de tensión	$t > 100 \mu\text{seg}$	$F < 10\text{kHz}$	$V_p < 1 \text{ kV}$
	Descarga atmosférica	$1\mu\text{seg} < t < 100\mu\text{seg}$	$10\text{kHz} < F < 1\text{MHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$
	Reencendido	$1\mu\text{seg} < t < 100\mu\text{seg}$	$10\text{kHz} < F < 1\text{MHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$

(*) Limitado por el nivel de protección de la red.

7.3.1. Límites

Las sobretensiones transitorias, de acuerdo con la norma UNE-EN 50160, generalmente no sobrepasan los 6 kV de valor de cresta, pero a veces, pueden tomar valores más elevados. El tiempo de subida puede variar desde unos microsegundos a varios milisegundos.

7.4 Causas que originan los transitorios

En general, como se ha indicado, existen dos causas o fuentes generadoras de los transitorios de tensión respecto a su origen:

- Fuentes externas al sistema eléctrico.
- Fuentes internas al sistema eléctrico.

7.4.1. Fuentes externas al sistema eléctrico

La fuente externa más típica es la descarga atmosférica, es decir, el rayo. El transitorio de tensión producido por la caída de un rayo se puede presentar de dos formas bien distintas:

- Por el impacto directo sobre el sistema.
- Por la inducción producida por la descarga a tierra de un rayo en las proximidades del sistema, estas descargas pueden ser nube-tierra o entre nubes.

El rayo afecta directamente a las redes aéreas, existen numerosos estudios al respecto, no existe el mismo peligro en todas las regiones; se habla de su «nivel isocerámico». La probabilidad y la frecuencia de aparición de estos transitorios depende de las características geográficas de cada zona, definidas por los niveles isocerámicos, que determinan la frecuencia de las descargas atmosféricas.

En cuanto a las instalaciones, tampoco existe el mismo riesgo; el peligro mayor corresponde al caso de líneas aéreas de gran longitud en regiones con muchas tormentas.

Las normas de coordinación del aislamiento y la compatibilidad electromagnética (CEM) tienen muy presente este fenómeno natural que desarrolla una energía transitoria considerable, transmitida a la red BT por los transformadores MT/BT.

Los parámetros de los transitorios generados por fuentes externas, es decir, los transitorios de tipo rayo tienen magnitudes diferentes según sea la forma en la que hayan sido ocasionados. En general, son de mayor energía los originados por el impacto directo.

7.4.2. Fuentes internas al sistema eléctrico

Existen elementos en la red eléctrica y en los receptores conectados a ella que pueden generar transitorios de tensión. Las fuentes más habituales son:

- Actuación de un elemento de corte (operación de conexión ó desconexión). El transitorio de tensión se produce como consecuencia de un cambio brusco de la intensidad que circula por la red derivado de la conexión ó desconexión de cargas. En los casos de desconexión, se pueden generar transitorios de forma compleja cuando en el elemento de corte se producen "reigniciones" en la extinción del arco eléctrico.

Por ejemplo, se producen transitorios en la:

- *Conexión ("energización") y desconexión de líneas eléctricas mediante seccionadores ó interruptores.* El transitorio es atribuible a la existencia de las inductancias equivalentes de las líneas eléctricas.
- *Conexión y desconexión de transformadores.* El transitorio de tensión se produce como resultado de la existencia de un núcleo magnético.
- *Conexión de baterías de condensadores.* Se utilizan habitualmente para regular la tensión en las redes eléctricas, corregir el factor de potencia, etc. Su 'energización' ocasiona transitorios de tensión a consecuencia de las características transitorias de la carga de un condensador.
- *Conexión y desconexión de cargas.* Ciertos receptores, incluidos electrodomésticos, motores, lámparas de descarga, etc., pueden generar transitorios de tensión a causa de sus características técnicas.
- Fusión de fusibles. Los fusibles de limitación de corriente generan transitorios de tensión al actuar, debido a la inductancia equivalente de la red que protegen.

- Conmutaciones de convertidores electrónicos de potencia. Generan transitorios de tensión periódicos, al producirse cortocircuitos momentáneos en el proceso de conmutación, seguidos de un rápido cambio en la tensión.

Los parámetros de los transitorios de tensión generados por cada una de estas fuentes son característicos, de modo que es posible asociar la forma del transitorio a su fuente de origen.

En general, tienen una energía superior a los de tipo rayo, ya que, aunque su valor de tensión de pico es menor, su duración suele ser mayor.

7.5. Efectos que producen

Los transitorios de tensión pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico, tanto redes como receptores. Su consecuencia más directa es la aparición, en la mayoría de los casos, de una sobretensión cuyos efectos negativos dependerán de la magnitud de la misma.

7.5.1. Efectos sobre las redes eléctricas y equipos asociados

Los niveles de aislamiento dieléctrico que incorporan actualmente los diseños de las redes y equipos asociados permiten que estos soporten sin daño los transitorios de tensión previsible en función de su localización geográfica y de sus propias características técnicas. Así ocurre, entre otros, con los siguientes elementos:

- Cables.
- Aisladores en general.
- Condensadores
- Transformadores.
- Interruptores.

Estos y otros elementos de la red tienen asignado un límite máximo admisible de sobretensión transitoria, denominado habitualmente "tensión de choque", que se obtiene a partir de ensayos. El grado de cumplimiento de estos límites, mediante una adecuada coordinación de los niveles de aislamiento en los diferentes estados de la red, determinará que estos equipos sean más ó menos inmunes a los transitorios de tensión.

7.5.2. Efectos sobre los receptores

Los nuevos equipos que aparecen en el mercado incluyen dispositivos electrónicos, fabricados con elementos semiconductores, lo que hace que presenten un bajo nivel de inmunidad frente a los transitorios de tensión.

Los efectos de este tipo de perturbaciones sobre los receptores pueden ser clasificados en función del riesgo de que estos sufran averías ó anomalías de funcionamiento.

- Receptores con riesgo de avería. Básicamente, son los equipos que incorporan semiconductores de potencia, por ejemplo:

- Rectificadores con diodos.
- Reguladores de velocidad de motores mediante tiristores.
- Reguladores de velocidad mediante Triacs.
- Reguladores de velocidad mediante GTO's, (Tiristor con descebado controlado por la puerta ó rejilla).

Estos receptores pueden sufrir daños por transitorios de tensión del orden de nanosegundos. La probabilidad de que se produzcan averías depende de diversos factores, entre ellos:

- Amplitud del transitorio.
- Duración del transitorio.
- Polaridad.
- Características de la red a la que están conectados

- Receptores con riesgo de anomalías de funcionamiento. Son, fundamentalmente, receptores con circuitos electrónicos para señales de baja potencia.

En general, no están conectados directamente a la red de baja tensión, sino que se acoplan mediante una conversión corriente alterna/corriente continua. Esta puede llegar a transmitir los transitorios de tensión que llegan a través de la red y afectar a los circuitos electrónicos alterando su funcionamiento.

Algunos de los receptores más sensibles son los siguientes:

- *Sistemas digitales en general.* Estos receptores (ordenadores, sistemas controlados por microprocesadores, etc.) pueden sufrir alteraciones en los programas, almacenamiento incorrecto de datos en la memoria, etc.

- *Sistemas de control.* Cuando están contruidos con microprocesadores, se pueden producir rupturas en la función de control.
- *Instrumentación.* Es posible la generación de indicaciones incorrectas.
- *Alarmas y sistemas de disparo.* Pueden actuar de manera no deseada.
- *Equipos de control de velocidad de motores.* Cuando el control se realiza mediante semiconductores de potencia, la velocidad puede verse alterada de forma involuntaria.

7.5.3. Efectos en B.T. de las sobretensiones que aparecen en M.T.

Las sobretensiones que aparecen en las redes de media tensión (M.T.) de distribución aéreas debidas a la caída de un rayo, pueden transferirse a las redes de baja tensión (B.T.) provocando fallos en los equipos a ellas conectados.

Se clasifican los puntos de suministro según su nivel de exposición y su categoría. Respecto al primero, los puntos pueden estar sometidos a:

- Áreas de “baja exposición” (áreas con poca actividad cerámica con pocos transitorios de maniobra).
- Áreas de “media exposición” (alta actividad cerámica y abundantes transitorios de maniobra).
- Áreas de “alta exposición” (sistemas anormalmente críticos).

En cuanto a la localización, se establecen tres categorías:

- Categoría A (enchufes alejados de las tomas de tensión).
- Categoría B (enchufes cercanos a las tomas de tensión).
- Categoría C (tomas de tensión exteriores y terminales de transformadores).

La tabla 7.2 presenta los valores de sobretensión y sobreintensidad recomendados por IEEE con el fin de uniformizar los ensayos de los equipos.

Figura 7.2. Niveles de sobretensión y sobreintensidad máximos recomendados por IEEE.

Categoría	Grado de exposición	F-F, F-N, F-T		N-T	
		kV	kA	kV	kA
B	Bajo	2	1	2	1
B	Medio	3	2	4	2
B	Alto	6	3	6	3
C	Bajo	6	3	...	...
C	Medio	10	5	...	...
C	Alto	20	10	...	...

F: fase; N: neutro; T: tierra.

7.6. Métodos de prevención y corrección

Los métodos o medidas para asegurar la compatibilidad electromagnética (CEM) de los receptores frente a los transitorios de tensión, pueden seguir tres vías:

- Reducir la emisión de transitorios, en la fuente de perturbación. Esto resulta imposible en el caso de las fuentes externas e, incluso, muy difícil en el caso de las internas, en cualquier caso, no se pueden fijar niveles de CEM desde el punto de vista de la emisión.
- Atenuar su propagación.
- Aumentar la inmunidad de los receptores. Pueden fijarse niveles de CEM desde el punto de vista de la inmunidad (tensión de pico máxima, energía asociada a los transitorios, etc.)

Entre las acciones de prevención y corrección, cabe distinguir las que puede adoptar la empresa suministradora y las que pueden aplicar los consumidores.

7.6.1. Medidas que puede adoptar la empresa suministradora

En el diseño de las instalaciones del sistema eléctrico, las empresas suministradoras adoptan fundamentalmente dos tipos de medidas preventivas:

- Una adecuada coordinación de los niveles de aislamiento de los elementos que integran las redes.

- La instalación de dispositivos que extinguen los transitorios de tensión en puntos cercanos a las fuente de generación. Los más habituales son:
 - Pararrayos (autoválvulas).
 - Explosores.
 - Conductores de tierra equipotenciales sobre apoyos de circuitos aéreos de alta tensión.

Cabe advertir, no obstante, que estas medidas permiten atenuar la propagación de transitorios de tensión hacia las instalaciones de los clientes, pero no pueden garantizar su eliminación total, ni la inmunidad. Siempre existirá una posibilidad de penetración de los transitorios de tensión generados en puntos externos a la instalación del consumidor, en especial cómo consecuencia de inducciones provocadas por descargas atmosféricas.

7.6.2. Medidas que puede adoptar el cliente.

En primer lugar, hay que identificar los receptores que son sensibles a los transitorios de tensión. A continuación, es necesario anteponer, a sus circuitos de alimentación, dispositivos que absorban los transitorios de tensión y eviten su propagación.

Entre los más habituales cabe mencionar el supresor de transitorios de tensión. A la hora de elegir el supresor más adecuado para cada instalación, es preciso tener en cuenta una serie de parámetros característicos:

- Tensión nominal de funcionamiento
- Tiempo de respuesta. El orden se sitúa entre picosegundos y microsegundos
- Intensidad de pico del transitorio de corriente admisible
- Tensión en los extremos del supresor durante la disipación. Su orden de magnitud es muy inferior al nominal.

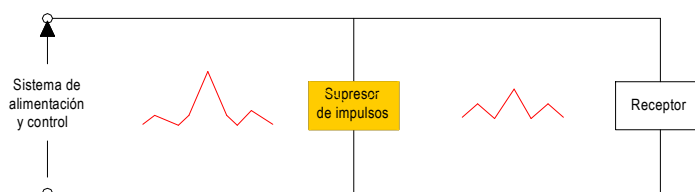


Figura 7.4. Esquema de funcionamiento de un supresor de transitorios

7.6.2.1. Supresor de transitorios

Se trata de un elemento colocado en paralelo con el receptor sensible en la entrada de alimentación o en la de señal de baja potencia, que posee una impedancia muy elevada para valores cercanos a la tensión nominal de dicho receptor y muy baja, respecto de la de éste, a partir de un valor determinado de tensión superior a la nominal. En esta última situación, el transitorio de tensión genera un transitorio de corriente que circula por el supresor, de forma que o bien la potencia asociada se disipa en forma de calor, o bien se deriva al circuito de tierra.

El ancho de banda correspondiente a este tipo de perturbación puede ser muy elevado; por lo que, es muy importante determinar la necesidad real que se precisa para tener un correcto funcionamiento.

Los supresores de transitorios más comunes son los siguientes:

a) - Varistores y diodos Zener.

Los varistores elementos semiconductores, (carbono de silicio, óxido de zinc, etc.), con una característica tensión/corriente no lineal. Sus parámetros presentan las características que se indican en la tabla 7.3.

Tabla 7.3. Parámetros característicos de los varistores

Tiempo de respuesta	nanosegundos
Tensiones nominales	disponibles en baja y media tensión
Picos de corriente admisibles	del orden de kA.

Los varistores con forma de disco, de la serie SIOV-S, pueden reaccionar contra tensiones excesivas en menos de 25 ns y aunque pueden trabajar con pulsos de corriente de hasta 10 kA, tan sólo lo pueden hacer durante muy pocos microsegundos, por lo que, no son capaces de manejar disipaciones de potencia durante un tiempo elevado en condiciones de sobretensión.

Los diodos Zener son elementos semiconductores rectificadores polarizados con tensión inversa, se utilizan únicamente en aplicaciones con alimentación en corriente continua. Sus parámetros presentan las características que se indican en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Parámetros característicos de los diodos Zener

Tiempo de respuesta	Picosegundos
Tensiones nominales	hasta 300V
Picos de corriente admisibles	hasta del orden de 50A.

Los diodos Zener de la serie BZT03 están diseñados especialmente para la supresión de transitorios y tienen un tiempo de reacción de unos 10 ms.

Sus restantes características son similares a las de los varistores SIOV-S, sus rangos de máxima corriente son menores, pero sus tiempos de funcionamiento con disipación de potencias, son significativamente más elevados.

Existe una componente vital en ambos circuitos: un fundido de acción rápida, que entra en funcionamiento de forma muy breve después de que el varistor, o el diodo zéner, hayan respondido a la excitación; como en un fusible, este componente se fundirá en algunos ms. si la corriente supera de forma peligrosa la corriente de protección.

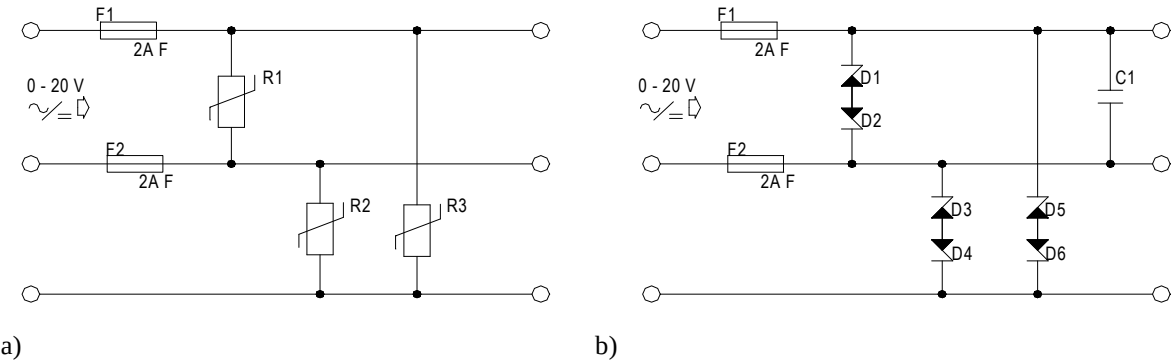


Figura 7.5. Esquemas de supresores de transitorios: a) con varistores , b) con diodos Zéner

Para evitar problemas de protección, los dispositivos no deben comenzar a conducir hasta alcanzar tensiones comprendidas entre los 270 y los 275 V, para los varistores R2 y R3 y los diodos Zéner D3 a D6, esto significa que la tensión de red, más su variación de tolerancia, están dentro del margen de funcionamiento de éstos.

En principio, este tipo de componentes pueden montarse directamente en las bases de conexión de la tensión de red, sin embargo, los estándares de seguridad para equipos (como BS y BDE) requieren que los terminales neutro y vivo estén aislados del terminal de protección de tierra por tensiones de hasta 2 kV; es decir, si se conecta cualquier componente entre el terminal neutro o vivo y el terminal de tierra, debe haber una tensión de ruptura de al menos 2 kV, no siendo posible estos valores de tensión incluso con varistores, ni tampoco con los diodos Zéner.

Esta restricción puede evitarse cambiando los componentes de seguridad al devanado secundario del transformador, donde las tensiones son bastantes más bajas: En este punto es posible implementar medidas efectivas contra tensiones excesivas sin violar ningún estándar de seguridad.

b) - **Descargadores de gas.**

Los descargadores de gas están constituidos por tubos de descarga gaseosa mediante gases inertes. Su aplicación es muy restringida: se utilizan, por ejemplo, para protección de equipos de alta frecuencia. Estos dispositivos actúan de forma diferente a los dispositivos semiconductores, derivan el transitorio a tierra, en lugar de disiparlo. Sus parámetros presentan los siguientes rasgos que se indican en la tabla 7.5.

Tabla 7.5. Parámetros característicos de los descargadores de gas

Tiempo de respuesta	microsegundos
Tensiones nominales	Superiores a 70V y hasta 70kV
Picos de corriente admisibles	hasta 60A.

c) - Equipos protectores de sobretensiones.

Son equipos conectados en serie en la entrada de la alimentación del receptor, bien en la de corriente alterna de baja tensión, bien en la de corriente continua, que lo desconectan de la misma con un determinado retraso entre 5 y 10 milisegundos cuando aparece en ella un transitorio de tensión, efectuando a continuación la reposición en un tiempo inferior a 30 segundos.

7.7. Sobretensiones temporales

7.7.1. Definiciones

Según la UNE-EN 50160 se define la sobretensión temporal como un aumento de la tensión de alimentación de duración relativamente larga.

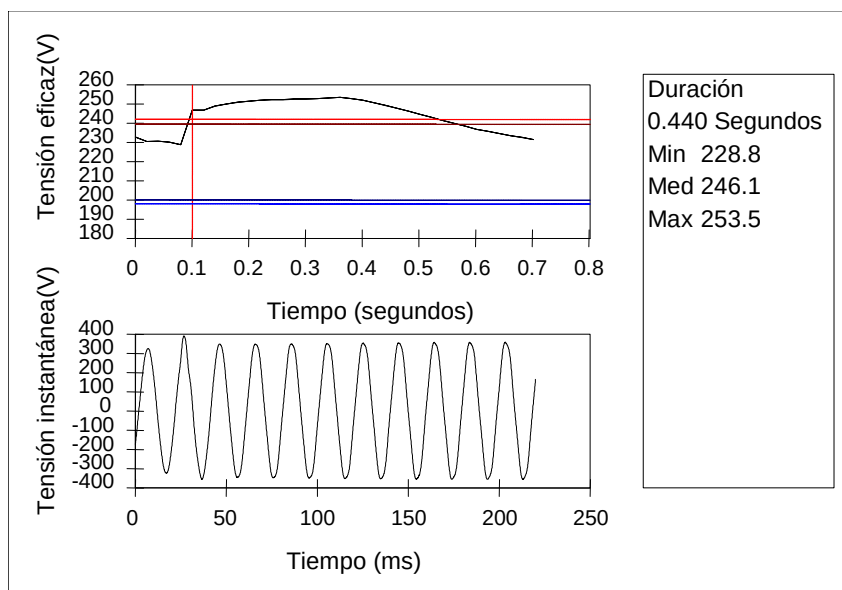


Figura 7.6. Representación gráfica de una sobretensión temporal.

La **duración** de una sobretensión temporal es el tiempo durante el cual la tensión es superior al límite de detección. Este límite es un porcentaje de la tensión de referencia.

En el caso de líneas trifásicas, una sobretensión temporal que sucede debido a una misma causa, comienza cuando la tensión en una de las fases aumenta hasta un valor superior al límite de detección y termina cuando la tensión en las tres fases es igual o inferior al límite de detección.

Las sobretensiones temporales se caracterizan por su duración y por la **tensión máxima alcanzada** durante el aumento de tensión, en valor porcentual sobre la tensión de referencia.

7.7.2. Límites

En la UNE-EN 50160 se indica que en ciertas condiciones, un defecto que se produce aguas arriba de un transformador puede temporalmente producir sobretensiones del lado de baja tensión mientras dure la corriente de falta. Tales sobretensiones no sobrepasan generalmente el valor eficaz de 1,5 kV.

7.7.2. Medida

La medida básica, según la IEC 61000-4-30 (Clase A), será el valor eficaz de la tensión actualizado cada medio ciclo $U_{rms}(1/2)$.

La exactitud en la medida de la tensión máxima alcanzada para equipos de clase A debe ser del $\pm 0,2\%$ de la tensión declarada de entrada.

La exactitud en la medida de la duración de la sobretensión temporal es igual a la exactitud en la medida del comienzo de la sobretensión (1/2 ciclo) más la exactitud en la medida de la finalización de la sobretensión (1/2 ciclo).

7.8. El efecto rayo

El rayo es un fenómeno perturbador importante en el funcionamiento de todas las instalaciones eléctricas, por varios motivos:

- Afecta a toda la gama de potencias y a todos los niveles de tensión: desde el transporte de energía a MAT hasta los circuitos integrados, pasando por las alimentaciones en baja tensión y las transmisiones de datos.
- Puede ser el origen de perturbaciones momentáneas en la continuidad del suministro, por la degradación de la calidad de las alimentaciones.
- Puede causar la destrucción de materiales y, como consecuencia, largas interrupciones del servicio de las instalaciones.
- Constituye un peligro para las personas (tensión de paso, elevación del potencial de las masas y del circuito de tierra).

El rayo es siempre una causa de perturbaciones en la utilización de la electricidad. Es el origen de algunas sobretensiones y transitorios. La caída de un rayo induce daños de considerable cuantía en la mayoría de regiones del mundo al sector de comunicaciones, de industria y comercio.

7.8.1. Formación del rayo

La tierra y la electrosfera, zona conductora de la atmósfera (con una altura del orden de 50 a 100 km), constituyen un condensador esférico natural que se carga por ionización, originando un campo eléctrico dirigido hacia el suelo, del orden de varios centenares de voltios/metro.

Como el aire es débilmente conductor, existe una corriente de conducción permanente asociada, del orden de 1.500 A para todo el globo terráqueo. El equilibrio eléctrico a esta corriente queda establecido con descargas por puntas, por las lluvias, y descargas de rayos.

La formación de las nubes, masas de agua en forma de vapor, se acompaña de fenómenos electrostáticos de separación de cargas: las partículas ligeras, cargadas positivamente, son arrastradas por las corrientes de aire ascendentes y las partículas pesadas, cargadas negativamente, caen por la acción de su propio peso. También se ha llegado a la conclusión de que en la base de las nubes se encuentran unos núcleos de cargas positivas concentrados en las zonas donde se producen lluvias intensas.

Así pues, generalmente las nubes están cargadas negativamente en su base y positivamente en su parte superior. Por inducción electrostática la tierra resultará positiva inmediatamente debajo de tal nube. Se establece así una diferencia de potencial enorme, produciéndose el rayo cuando se vence la rigidez dieléctrica del medio (aire o vapor de agua). Simultáneamente con el rayo se produce la luz (relámpago) y sonido (trueno).

Aproximadamente la mitad de los rayos constituyen descargas simples y la otra mitad corresponde a rayos compuestos por descargas múltiples de rápida sucesión. El rayo incidirá sobre el elemento que le signifique mayor conductividad y sea capaz de aportar más cargas al fenómeno. También pueden producirse descargas superficiales entre ellos al desaparecer la carga inductora como consecuencia de rayos de nube a nube.

Así como en la nube se forman centros de carga, algo similar ocurre en la tierra, pues hay suelos más conductores que otros, teniéndose en cuenta que las cargas en la tierra se mueven según la inducción que impone la nube. Dado que la nube puede cubrir grandes superficies terrestres, su influencia electrostática será importante. Puede haber de este modo muchos centros de carga.

El inicio de la descarga en una primera instancia es invisible, en la cual varios trazadores se acercan a tierra, a modo de ramificaciones. Cuando el camino trazado por los trazadores queda ionizado, se inicia la descarga de retorno principal, originando las descargas visibles. Globalmente, a escala macroscópica, se crea un dipolo. Cuando el gradiente límite de rigidez dieléctrica se supera, se produce una descarga en el seno de la nube, entre nubes o entre las nubes y el suelo.

Haré un inciso para establecer la clasificación de las nubes, indicando que el padre de las nomenclaturas de las nubes fue Luke Howard, nacido en Londres en 1772, el cual, que no era meteorólogo sino fabricante de productos químicos, presentó en 1802 un documento a la Sociedad Askesian titulado “*En la modificación de las nubes*”, en el cual proponía que se podían identificar varias categorías simples dentro de la complejidad de las formas de las nubes. Lo más importante, que trascendió las fronteras y los idiomas propios de los diferentes países, fue que Howard dio a sus categorías descriptivas nombres latinos, lo cual hizo que, a diferencia de Lamarck que les dio nombres en francés, fueran comprensibles por todas las culturas. Así Howard dividió las nubes en tres grupos:

Cúmulo, del latín *cumulus*, que significa “del montón”. Según el diccionario de la RAE, se definiría como un “conjunto de nubes propias del verano, que tiene apariencia de montañas nevadas con bordes brillantes”. **Estrato**, del latín *stratus*, que significa “capa” y que tiene por definición según la RAE: “Nube que se presenta en forma de faja en el horizonte. **Cirro**, del latín *cirrus*, o rizo de pelo; sería una forma de fibras paralelas, extensibles por el aumento de cualquiera o todas las direcciones. Para destacar que la formación de una nube se debe a la condensación, estableció una cuarta categoría: **Nimbo**, del latín *nimbus*, que según la RAE se define como una “nube grande, baja y grisácea, portadora de lluvia, nieve o granizo”

En los siguientes puntos se describe con más detenimiento la producción de un rayo:

1. La nube de tormenta denominada **cúmulo-nimbus** es la fuente de la producción de rayos. Este tipo de nube es la que puede llegar a generar chubascos de alta intensidad y de relativa poca duración.

Entre los trece tipos de nubes que distinguen básicamente los meteorólogos hay uno solo que se carga de electricidad. Es el cúmulo-nimbus que se genera a partir de grandes bancos de cúmulos por efectos de vientos verticales que los elevan a considerable altura (*hasta doce mil metros en climas templados y hasta dieciocho mil en tropicales*) en que, al perder la eficiencia del mecanismo generador del viento, se detienen.

2. Cuando la atmósfera presenta mucha turbulencia, se produce una separación de las cargas positivas (en la parte superior de las nubes) y negativas (en la parte inferior de las nubes). Cuando esta separación alcanza el límite disruptivo (de carga eléctrica), esta separación provoca descargas eléctricas, ya sea entre nubes conocidas como relámpagos o entre la nube y el suelo a los que llamamos rayos (figura 7.8. y 7.9.).

3. Evolución del rayo:

Las etapas para la evolución de un rayo se describen de la siguiente manera:

- a. Hay una descarga inicial (trazador) que se genera en la base de una nube (la base de la nube es la parte más cercana al suelo).
- b. Esta descarga inicial, mientras viaja hacia el suelo, se ramifica como las ramas de un árbol, cada una de las ramificaciones busca la trayectoria más fácil de acceso, señalada por la mejor conductividad a una velocidad promedio de 0,15 m/s.
- c. El rayo, al acercarse al suelo, genera un campo eléctrico significativo en el suelo en dirección vertical del trazador.
- d. Cuando se alcanza el umbral de ionización del aire (energía existente en un medio físico, causada por ondas electromagnéticas, mediante las cuales se propaga directamente sin desplazamiento de la materia), unas pequeñas ramas eléctricas se escapan del suelo, estructuras o árboles hacia arriba, y pueden convertirse en descargas eléctricas positivas.
- e. La ramificación ascendente más cercana y de mayor velocidad puede unirse al trazador, estableciéndose así un canal ionizado único, desapareciendo las ramificaciones y quedando un solo canal eléctrico.



Figura 7.7. Formación de un rayo

El campo eléctrico nube-suelo puede alcanzar -15 a -20 kV/metro sobre un suelo plano. Pero la presencia de obstáculos, deforma y aumenta localmente este campo con factores de 10 a 100 y hasta 1.000 según la configuración de las irregularidades (fenómeno denominado «efecto de punta»). El gradiente de ionización del aire atmosférico es entonces de alrededor de 30 kV/m y se producen descargas por efecto corona. Sobre objetos de grandes dimensiones (torres, chimeneas, columnas) pueden originarse descargas de rayo o producirse la aireación de los mismos.

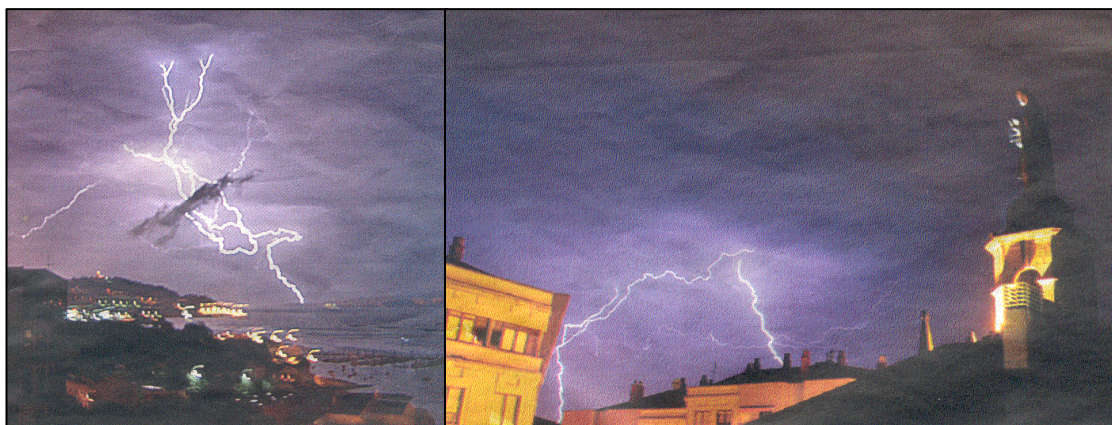


Figura 7.8. Vista real de rayos.

7.8.2. Clasificación de las descargas de rayo

Una descarga de rayo entre nubes y tierra, se descompone en dos fases: la primera fase es siempre la formación de una predescarga poco luminosa, “trazador o líder”, que progresa a través de aire neutro; y una segunda fase que es la del canal ionizado, que provoca la descarga del rayo propiamente dicho, descarga de arco visible de corriente intensa.

En el estudio y cálculo de sobretensiones, un rayo puede ser visto como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, lo que se conoce como onda bipolar. En general, se han identificado cuatro tipos de descargas rayo entre nube y tierra. Según el origen del trazador, se distinguen varios tipos atendiendo al desplazamiento:

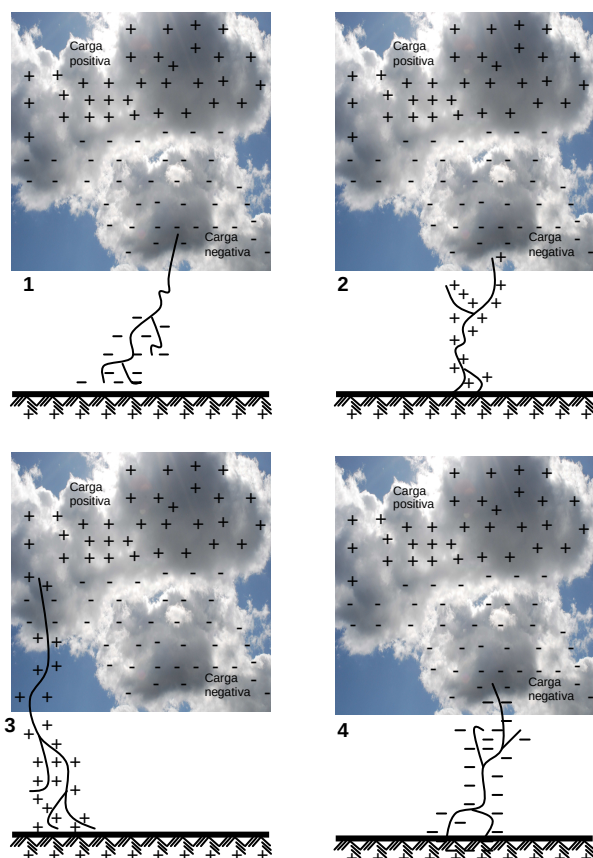


Figura 7.9. Tipos de rayos

- **Descargas descendentes.** El trazador (líder) parte de una nube y progresa por saltos sucesivos formando arborescencias abiertas hacia abajo. Este trazador se llama trazador por saltos. Los rayos descendentes son los más frecuentes en sitios llanos.

- **Descargas ascendentes.** El trazador parte del suelo, desde un objeto destacado como un pico puntiagudo y produce arborescencias abiertas hacia arriba. Es usual que se produzca en terrenos montañosos.

En segundo lugar, según su polaridad, se pueden clasificar en:

- **Descargas negativas.** Son las que descargan la parte negativa de la nube.

- **Descargas positivas.** Son las que descargan la parte positiva de la nube.

Las descargas negativas forman el 90 % de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta (categoría 1); menos del 10 % de las descargas son positivas (categoría 3). También existen descargas iniciadas desde tierra hasta la nube (categorías 2 y 4), sin embargo, estas descargas son relativamente raras y ocurren normalmente en zonas de gran altitud, desde los picos de las montañas o desde altas estructuras construidas por el hombre. En la figura 7.9., se pueden ver los distintos tipos de descargas rayo nube-tierra

En regiones templadas, como en España, el 90% de los rayos son negativos. La proporción de rayos positivos parece que es más elevada en el mar, según las observaciones más recientes.

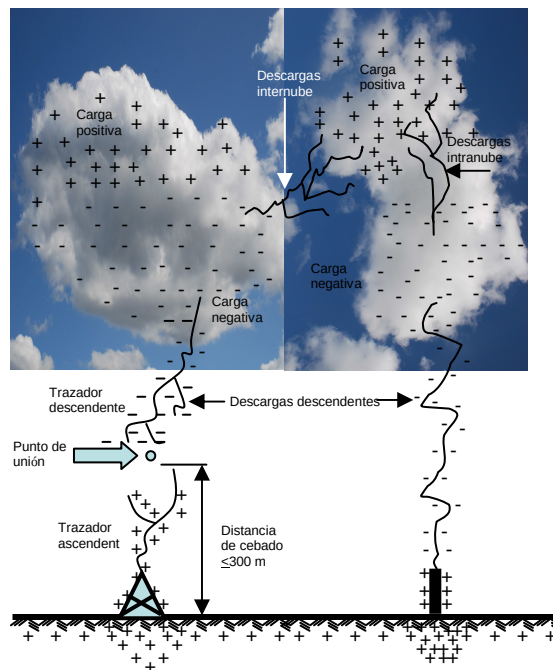


Figura 7.10. Otro tipo de descargas y unión del trazador ascendente con el trazador descendente

Otro tipo de descargas rayo, son las siguientes (figura 7.10):

- **Descargas internube:** desarrollo del trazador desde una nube a otra.
- **Descargas intranube:** desarrollo del trazador entre zonas de diferente carga dentro de la misma nube
- **Nube a cielo o "duendes",** que son descargas hacia la atmósfera, más arriba de las nubes.

Cada descarga tiene un proceso físico propio: cuando el trazador descendente cuya cabeza progresa por saltos se aproxima al suelo, salta otro trazador que sale de una prominencia en el suelo y va a su encuentro. Así se forma un canal ionizado continuo entre la nube y el suelo que va a permitir el paso de una corriente de gran intensidad llamada "descarga de retorno".

Este proceso de unión es esencial para poner en marcha sistemas de protección y se llama ligadura. La ligadura es el proceso principal del mecanismo de impacto que explica cómo se decide el punto exacto donde va a golpear el rayo. El trazador por saltos (escalones) que sale de la nube tormentosa es miope y progresa abriendo un camino en el aire de forma totalmente aleatoria en la mayor parte de su trayectoria. El trazador descendiendo unos 50 a 100 m en un microsegundo, detiene su marcha unos 50 microsegundos mientras se acumula la carga transferida desde la nube y se forma un nuevo camino ionizado que va a crear un nuevo avance del trazador. Estos avances y reposos de este primer flujo de carga, hacen que se le conozca como el "trazador o líder escalonado". En el último momento cuando faltan doscientos o trescientos metros para tierra se decide todo.

La distancia entre el punto de origen del trazador ascendente y el punto de unión se llama habitualmente "distancia de cebado" y no sobrepasa nunca los 300 metros (Figura 7.10.).

El papel de las descargas ascendentes es entonces esencial. En el caso más frecuente del rayo negativo, el trazador por saltos es un canal ionizado que lleva un excedente de cargas negativas con una fuerte concentración en su punta. Cuando este trazador se aproxima al suelo, genera debajo un campo eléctrico que alcanza valores del orden del centenar de kilovoltios por metro. En este momento, los trazadores ascendentes positivos se lanzan bruscamente hacia el trazador descendente hasta que entran en contacto estableciendo un nexo continuo entre el suelo y la nube y se puede formar el arco eléctrico. Al cerrarse eléctricamente el camino a tierra, la carga se desplaza a una velocidad vertiginosa, produciéndose la "descarga de retorno" de gran luminosidad, etapa del rayo considerada como la más energética de todas. Luego, con intervalos de 0.01 a 0.1 segundos se producen nuevos flujos de electrones hacia abajo, abriéndose paso por el camino ionizado que dejó el líder escalonado. Estos son los "trazadores o líderes rápidos" que al golpear tierra producen descargas de retorno menos energéticas que la primera. En un rayo es típico que existan tres o cuatro trazadores o líderes, pudiendo existir hasta 20 ó 30. El canal de la

descarga en cuyo interior existe un “hilo conductor de plasma”, puede llegar a temperaturas de 30.000 °C y la presión del aire subir hasta 100 atmósferas. El diámetro del canal es de unos 10 cm.

En general, el rayo completo dura entre 0,01 y 2 segundos e implica de 2 a 3 arcos de retorno. La intensidad oscila entre 3.000 y 200.000 amperios con un valor medio de 25.000 amperios. Recientemente se han observado algunos que han alcanzado los 500.000 amperios. Para que todos estos procesos se puedan realizar es necesario que la tensión entre la base de la nube y el suelo alcance un valor del orden de varios cientos de millones de voltios.

Cuando la descarga de retorno cesa, el proceso que envuelve al rayo, incluyendo varios procesos de descarga en el interior de la nube, podría finalizar. En este caso, este proceso es llamado rayo de impacto un único.

La descarga de una nube puede generar nuevas reparticiones de carga en la atmósfera, presentándose descargas horizontales entre varias nubes de tormenta. Es posible por lo tanto, que se desencadene otra descarga atmosférica de similar ubicación a la anterior, que utilice los mismos caminos ionizados que dejó la primera. Así pues, si la nube dispone todavía de carga adicional, otro canal continuo puede propagarse hacia abajo a lo largo del primer canal residual e iniciar otra descarga de retorno. Algunos de estos segundos canales actúan como los primeros porque no siguen el canal de retorno previo. Los segundos canales y las subsiguientes descargas de retorno normalmente no están ramificados.

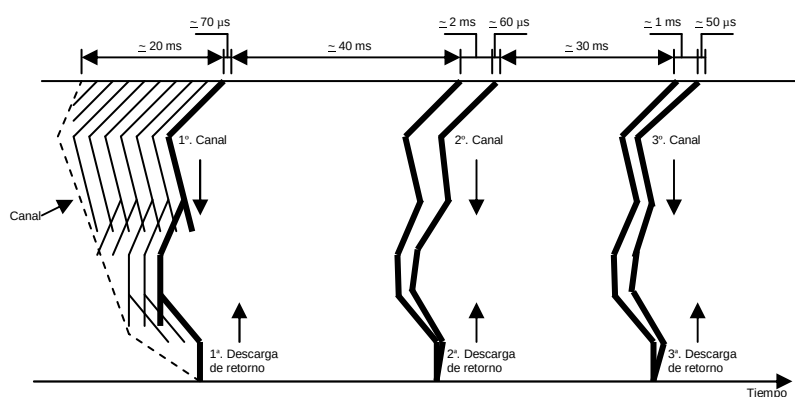


Figura 7.11. Sucesión de descargas de retorno.

Los rayos de polaridad positiva (categoría 3) tienen un considerable interés práctico porque tanto la corriente de pico como la carga total transferida pueden ser mucho más grandes que las de la mayoría de los rayos con polaridad negativa más comunes.

Los rayos positivos contienen normalmente una única descarga de retorno seguida de un periodo de corriente continua. La mayoría de rayos positivos a tierra ocurren durante las tormentas de invierno, aunque estas tormentas producen pocos rayos en general, y es relativamente raro que ocurran en tormentas de verano, no más de un 15 % de los rayos, aunque tormentas con carga predominantemente negativa acaban a menudo con descargas positivas. El porcentaje de descargas positivas en tormentas de verano aparentemente incrementa con un incremento de la latitud geográfica y con un incremento de la altura del terreno, es decir, cuanto más cerca está la carga de la nube de la tierra mayor probabilidad de que ocurran descargas positivas, aunque en la actualidad no se tiene suficientemente conocimiento sobre descargas positivas como para decir que esto es siempre una condición necesaria.

Los parámetros de un rayo que tienen mayor influencia en el valor de las sobretensiones, son:

- La forma de onda de la corriente de descarga
- El valor máximo (o de cresta) de la corriente para la primera descarga
- La polaridad de la descarga

Efecto punta

Puede ser estático en un punto, en movimiento en el mismo punto o viajar por el suelo y estructuras en función de la dirección y velocidad de la nube, el efecto del movimiento, causa una sensación de ver una corona o múltiples efectos puntas llamado entonces “efecto corona”, son diminutas chispas eléctricas que aparecen en la parte superior de los materiales, generalmente es de color verde-azul y con fuerte olor a ozono por ionización del aire, el efecto punta aparece siempre dentro de la sombra eléctrica.

7.8.3. Forma de onda y parámetros característicos

El fenómeno físico del rayo corresponde a una fuente de corriente de impulsos, que pueda generar una serie de descargas de una cantidad de electricidad determinada en un intervalo de tiempo corto.

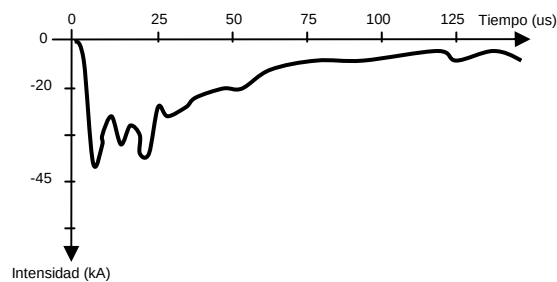
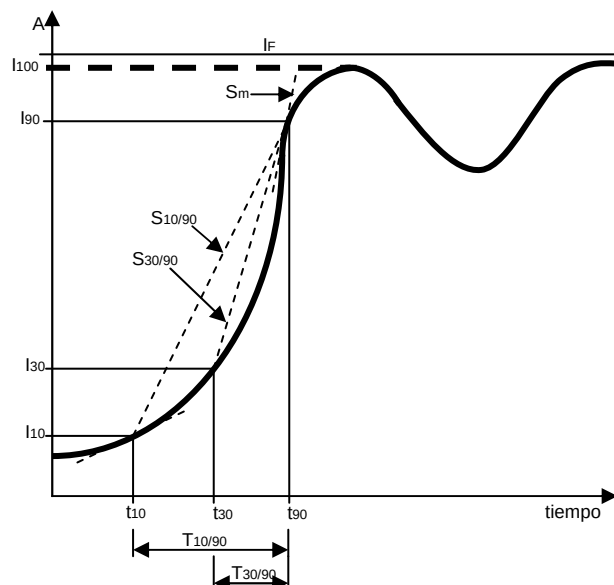


Figura 7.12. Oscilograma de una corriente de rayo.

La forma de onda real observada es muy variable: consiste en un frente de elevada pendiente hasta la amplitud máxima (de algunos microsegundos hasta unos 20 microsegundos) seguido de una cola de valores decrecientes con una duración de algunas decenas de microsegundos, como se puede observar en la figura 7.12.

La banda espectral asociada se extiende desde unos 10 kHz a varios MHz.



En el estudio y cálculo de sobretensiones, un rayo se puede considerar como una fuente de corriente que puede tener polaridad positiva, negativa o ambas en una misma descarga, es lo que se conoce como onda bipolar.

La Figura 7.13. muestra una onda de rayo normalizada según CIGRE Working Group 33. 01, en la que se presentan los parámetros más importantes. Donde: $T_{10/90}$ representa el intervalo de tiempo entre el 10% y el 90% de la corriente de pico de una descarga, y $T_{30/90}$ representa el intervalo de tiempo entre el 30% y el 90% de la corriente de pico.

En la Tabla 7.6, se indican de forma resumida los parámetros de la primera descarga de un rayo, según CIGRE Working Group 33. 01.

Figura 7.13. Forma de onda y parámetros de una descarga atmosférica

Tabla 7.6. Parámetros de la primera descarga con distribución log-normal

	M	σ
Frente, μs		
$t_{10/90} = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576
$t_{30/90} = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553
$t_m = I_F/S_m$	1.28	0.611
Pendiente, kA/ μs		
S_m , máxima	24.3	0.599
S_{10} , a 10%	2.6	0.921
$S_{10/90}$, 10-90%	5	0.645
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.662
Cresta, kA		
I_i , inicial	27.7	0.461
I_F , final	31.1	0.484
Inicial/Final	0.9	0.230
Cola, μs	77.5	0.577
Carga, Q_i , C	4.65	0.882
$\int I^2 dt$, $(kA)^2 s$	0.057	1.273

Donde: M es el valor medio y σ es la desviación estándar.

7.8.4. Predicción del rayo

Se pueden realizar estudios para la predicción del rayo. Así, por ejemplo, en Francia se ha implantado en 1.986 una red de localización de las descargas por tormentas y se ha creado una organización llamada

Météorage.

Météorage funciona con una red de estaciones de detección repartidas estratégicamente sobre el territorio nacional francés, unidas a los ordenadores de un centro operacional sito en París.

Estas estaciones, distantes de 200 a 300 km miden las ondas electromagnéticas creadas por las descargas de las tormentas a partir de las informaciones siguientes:

- Localización
- Temporización (fecha y fijación al milisegundo)
- Polaridad de la onda (> 0 , < 0)
- Amplitud de la onda (0 a varios centenares de kA)
- Número de arcos

Météorage ofrece diferentes servicios interesantes para diversas aplicaciones, en particular el transporte y la distribución de la energía eléctrica.

Ejemplos de prestaciones: alerta, señalización, observación, vigilancia, formación o acumulación de experiencia, calificación, consultas, interrogaciones, estadísticas.

En los estudios del «fenómeno rayo» se utilizan, sobre todo, las dos características de predicción siguientes:

7.8.4.1. Nivel cerámico Nk

Es el número de días al año que una tormenta ha afectado una zona definida. Se trata de una información aparentemente muy aproximada pero realmente útil.

En el resto del mundo, Nk puede ser mucho más elevado, por ejemplo, más de 180 en África tropical o Indonesia.

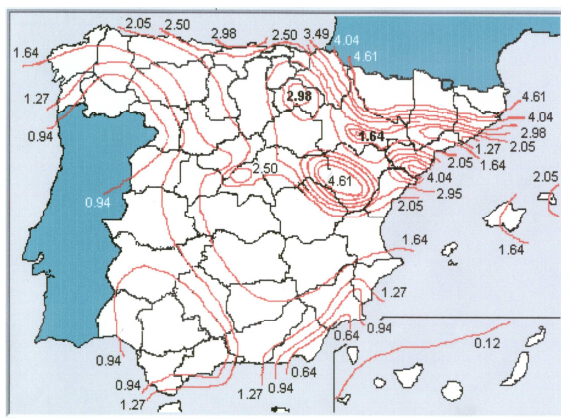


Figura 7.14. Mapa isocerámico de España

Una línea isocerámica es la que une puntos de la superficie terrestre con igual número de días en los que se pueden observar truenos (si sólo se ven relámpagos no se computan) en un intervalo de tiempo. Aunque estas líneas no dan indicación precisa de intensidad, duración, etc., de las tormentas eléctricas, se ha comprobado que constituyen una eficiente referencia sobre la probabilidad de caída de rayos. Las regiones tropicales son las que tienen más tormentas y muy intensas, ocurriendo lo contrario en las zonas de alta montaña, de intenso frío o marítimas.

En base a las líneas isocerámicas, se confecciona una carta cerámica, mapa en donde están representadas las mencionadas líneas.

7.8.4.2. Densidad de rayos N

Es la densidad anual de caídas de rayos (CdR) al suelo, expresada en $\text{CdR} / \text{km}^2 / \text{año}$. Este dato puede tener variaciones de cierta importancia de un año a otro para una misma región. Las estadísticas que mejor se suelen conocer se refieren al número de días de tormenta al año, Nk, conocido como nivel cerámico, o al número de horas de tormenta al año, T_h , que se registran en un punto determinado.

En Francia, la densidad N está comprendida, según las regiones, entre 2 y 6 $\text{CdR} / \text{km}^2 / \text{año}$.

Se puede establecer una relación entre los dos parámetros considerados: Nk y N, ecuación (7.1):

$$N = k \cdot N_k^a \quad (7.1)$$

Donde N_k es el nivel cerámico en número de días de tormenta por año, k y a son constantes para las que se han propuesto muchos valores.

La expresión aceptada por CIGRE e IEEE, es la (7.2).

$$N = 0.04 \cdot N_k^{1.25} \quad (7.2)$$

Con todo ello, esta aproximación no resulta lo suficientemente precisa, por ello lo más fiable es utilizar estadísticas y mediciones directas.

7.8.5. Cálculo de las sobretensiones atmosféricas

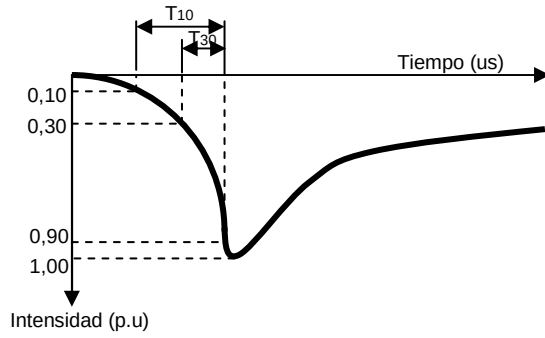


Figura 7.15 . Típica forma de la onda de corriente de retorno del rayo

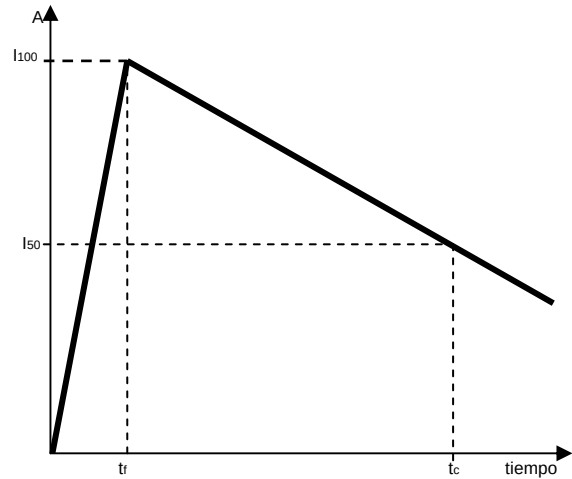


Figura 7.16. Forma de onda en doble rampa

Para el cálculo aproximado de las sobretensiones atmosféricas, se puede suponer como hipótesis de partida que la onda de corriente de una descarga atmosférica tiene la forma de doble rampa, como se indica en la Figura 7.16.

La expresión de la forma de onda en doble rampa, viene dada por la ecuación (7.3).

$$i(t) = \alpha_1 \cdot t \cdot u(t) - \alpha_2 \cdot (t - t_f) \cdot u(t - t_f) \quad (7.3)$$

$$\text{Donde: } \alpha_1 = \frac{I_{100}}{t_f}, \quad \alpha_2 = \left[\frac{2t_c - t_f}{2t_f(t_c - t_f)} \right] \cdot I_{100}$$

$u(t), u(t - t_f)$ Función de escalón unidad

I Intensidad de pico de la onda de corriente de una descarga, en A.
 t_f Tiempo del frente de la onda de corriente de una descarga, en s.
 t_c Tiempo al valor medio de la intensidad de pico, en s.

La distribución estadística de todos los parámetros del rayo, se puede aproximar por una distribución logarítmica normal, cuya función de probabilidad viene dada por la expresión (7.4).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{x}{M}\right)}{\sigma} \right]^2 \right\} \quad (7.4)$$

Siendo M y σ el valor medio y la desviación estándar, respectivamente.

Por otro lado, la función de distribución acumulada permite calcular la probabilidad de que la corriente de pico de una descarga sea igual o mayor que un valor de corriente I , y se puede aproximar mediante la expresión (7.5).

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31} \right)^{2.6}} \quad (7.5)$$

Para el cálculo aleatorio de las sobretensiones se pueden seguir diferentes métodos, entre ellos se pueden citar: método de Monte Carlo, método de Box-Muller, método Polar, método de la transformada inversa.

7.8.5.1. Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo, cuya invención se asigna a Stan Ulam y a John von Neumann, es un método no determinístico o estadístico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y

costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Montecarlo, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoraron enormemente con el desarrollo de la computadora.

Así pues, el método de Monte Carlo, es un procedimiento numérico iterativo que utiliza en cada nuevo cálculo un conjunto de valores distintos que se varían de acuerdo a la distribución de probabilidad asociada a cada una de las variables involucradas en el proceso. El método de Monte Carlo permite resolver una gran variedad de problemas, ya que es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico. El error absoluto obtenido decrece según $1/\sqrt{N}$, siendo N el número de iteraciones realizadas.

7.8.5.2. Método de Box-Muller

El método de Box-Muller (nombrado así por sus inventores George Edward Pelham Box y Mervin Edgar Müller 1958) es un método de generación de pares de números aleatorios independientes con distribución normal "estándar" (esperanza cero y varianza unitaria), a partir de una fuente de números aleatorios uniformemente distribuidos, y parte de la base de que cualquier computadora y lenguaje de programación tiene incorporado un sistema para generar números con distribución $N(0,1]$. La generación de dos variables aleatorias normalmente distribuidas e independientes (X,Y), con una media de valor cero y una desviación normal 1, se puede realizar según el algoritmo descrito por las ecuaciones (7.6), (7.7), (7.8) y (7.9).

$$1. \text{ Se genera: } U \approx N(0,1] \quad \theta \approx u(0,2\pi) = 2\pi \cdot N(0,1] \quad (7.6)$$

$$2. \text{ Se calcula: } R = f(U) = \sqrt{-2 \cdot \ln(1-U)} \quad (7.7)$$

$$3. \text{ Las variables aleatorias normalmente distribuidas e independientes, vienen dadas por la expresión (7.8).}$$

$$X = R \cdot \cos(\Theta) \quad (7.8)$$

$$Y = R \cdot \text{sen}(\Theta) \quad (7.9)$$

Si se supone que U_1 y U_2 son variables aleatoria independientes que están uniformemente distribuidas en el intervalo (0, 1]. Sea:

$$X = R \cdot \cos(\Theta) = \sqrt{-2 \ln U_1} \cos(2\pi U_2) \quad (7.10)$$

$$y \quad Y = R \cdot \text{sen}(\Theta) = \sqrt{-2 \ln U_1} \text{sen}(2\pi U_2) \quad (7.11)$$

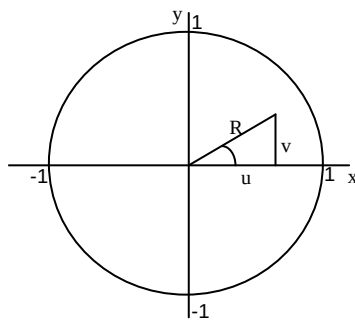
Entonces X e Y son variables aleatorias independientes con una distribución normal con desviación standard 1.

La demostración se basa en el hecho que, en un sistema cartesiano bi dimensional donde las coordenadas X e Y son dadas por dos variables aleatorias independientes y distribuidas normalmente, las variables aleatorias para R^2 y Θ , en las coordenadas polares correspondientes, también son independientes y poseen las expresiones:

$$R^2 = -2 \cdot \ln U_1 \quad (7.12)$$

$$y \quad \Theta = 2\pi U_2 \quad (7.13)$$

7.8.5.3. Método polar



$$R^2 = u^2 + v^2$$

$$\cos \theta = \frac{u}{R}$$

$$\sin \theta = \frac{v}{R}$$

El método polar toma dos muestras de un intervalo distinto, $[-1, +1]$, y las transforma a dos muestras normalmente distribuidas sin utilizar las funciones seno o coseno. Ver Figura 7.17.

Se utilizan dos valores uniformemente distribuidos, u y v , para producir el valor $s = R^2$, el cual también se encuentra distribuido en forma uniforme. Las definiciones del seno y del coseno se aplican luego sobre la forma básica de la transformada de Box-Müller con la finalidad de evitar el uso de funciones trigonométricas.

Figura 7.17. Esquema explicativo del método polar

Dados u y v , independientes y uniformemente distribuidos en un intervalo cerrado $[-1, +1]$, sea $s = R^2 = u^2 + v^2$. (Donde obviamente $R = \sqrt{s}$). Si $s = 0$ o $s > 1$, se eliminan u y v y se prueba con otro par (u, v) . Se continúa con el proceso hasta que se encuentra un par con s en el intervalo abierto $(0, 1)$. Dado que u y v están uniformemente distribuidos y como solo se admiten puntos contenidos en el círculo unitario, los valores de s también se encontraran uniformemente distribuidos en el intervalo abierto $(0, 1)$. Esto último se puede verificar si se calcula la función de densidad de probabilidad para s en el intervalo $(0, 1)$. Lo que no es otra cosa que el área del círculo de radio $\sqrt{s}$ dividido por π . A partir de esto se puede encontrar la función de densidad de probabilidad que tenga un valor constante de 1 en el intervalo $(0, 1)$. En forma similar, el ángulo θ dividido por 2π está distribuido uniformemente en el intervalo abierto $(0, 1)$ e independiente de s .

7.8.5.4. Método de la transformada inversa

También es posible utilizar el método de la transformada inversa para generar números aleatorios distribuidos normalmente; el método de la transformada (o transformación) inversa, también conocido como método de la inversa de la transformada, es un método para la generación de números aleatorios de cualquier distribución de probabilidad continua cuando se conoce la inversa de su función de distribución (cdf). Este método es en general aplicable, pero puede resultar muy complicado obtener una expresión analítica de la inversa para algunas distribuciones de probabilidad.

7.8.6. Efectos del rayo

Los efectos más importantes del rayo, son los siguientes:

- *Efectos visuales*: El relámpago
- *Efectos acústicos*: el aire en el canal de la descarga se calienta y se expande en forma de una onda de choque. Posteriormente, esta onda se vuelve energía acústica produciéndose el trueno. La percepción de este efecto es posible hasta una decena de kilómetros. Cada componente del rayo: el líder escalonado, los líderes rápidos, las descargas de retorno, contribuyen al trueno. Los componentes más energéticos producen las frecuencias más bajas del sonido. Estas frecuencias bajas se atenúan menos que las altas, ya que la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia. El estudio del trueno ha perfeccionado los conocimientos que ya se tenían sobre el rayo y constituye un elemento fundamental para el estudio de las descargas entre las nubes y del canal de la descarga en el interior de una nube donde los medios visuales no pueden suministrar información. Adicionalmente, nos aporta criterios para la interpretación de los datos de nivel isoceràunico.
- *Efectos térmicos*: liberaciones de calor por el efecto Joule en el canal ionizado.
- *Efectos electrodinámicos*: corresponden a las fuerzas mecánicas de las que son objeto los conductores colocados en el campo electromagnético creado por esta circulación de corriente intensa. Pudiendo dar como resultado deformaciones en los materiales que se hallan a su paso;
- *Efectos electroquímicos*: relativamente menores, estos efectos se traducen por una descomposición electrolítica por aplicación de la ley de Faraday.

- *Efectos de inducción:* en un campo electromagnético variable, cualquier conductor es proclive a corrientes inducidas;
- *Efectos sobre un ser vivo (humano o animal):* el paso de una corriente de una cierta intensidad, durante una corta duración es suficiente para provocar riesgos de electrocución por, ataque cardíaco o respiratorio a lo que hay que añadir los riesgos de quemaduras.
-

Existen dos grandes tipos de accidentes causados por el rayo:

- *Aquellos causados por un golpe directo:* cuando el rayo impacta un edificio o una zona determinada. El rayo puede entonces provocar numerosos daños, entre los cuales el incendio es el más frecuente. Contra este peligro, los medios de protección son los sistemas de pararrayos.
- *Aquellos causados indirectamente:* por ejemplo cuando el rayo golpea o induce sobretensiones en los cables de energía o las conexiones de transmisión. Se deben proteger los aparatos con riesgo de ser alcanzados contra las sobretensiones y las corrientes indirectas así creadas.

Cargas electrostáticas durante la formación del líder. En el momento de la presencia de la sombra eléctrica en tierra, el campo eléctrico presente es de alta tensión y genera el efecto punta en la parte más alta de la instalación. Este efecto se transforma visualmente en chispas que salen de los materiales expuestos a la sombra eléctrica. En el caso de la punta de un pararrayos, las cargas electrostáticas generan interferencias y ruidos que se pueden acoplar en las líneas de datos o señales de TV y radio. Durante la aparición de este fenómeno, por el cable de tierra del pararrayos circularán corrientes superiores a los 150 A.

Pulsos electrostáticos. Se trata de transitorios atmosféricos que aparecen en los equipos por la variación brusca del campo electrostático presente en la zona durante la tormenta, la causa que provoca este fenómeno es la diferencia de potencial entre la nube y tierra. Sus efectos son los pulsos eléctricos que aparecen debido al impacto cercano de rayos. Cualquier elemento que se encuentre suspendido en el aire con relación a tierra dentro de la sombra eléctrica, se cargará con una tensión proporcional a la altura y al campo electrostático presente, como si se tratase de un condensador.

Pulsos electromagnéticos. En el instante mismo del impacto del rayo en un pararrayos o en un elemento cualquiera, el contacto físico de la energía del rayo en el punto de contacto, genera una chispa que se transforma en un pulso electromagnético que viaja por el aire, en el mismo instante el flujo de la corriente que circula por los conductores eléctricos de tierra a la toma de tierra, genera un campo magnético proporcional a la intensidad de corriente de descarga del rayo.

La intensidad del pulso electromagnético es variable en función de la intensidad de descarga del rayo y del punto de contacto físico con el elemento impactado. El tiempo de transferencia de la corriente a tierra y el nivel de absorción de la tierra física, determinan los valores eléctricos de acoplamiento en los equipos cercanos.

La energía radiada por el pulso electromagnético en el aire, viaja a la velocidad de la luz induciendo por acoplamiento todo aquello que se encuentre a su paso como elemento flotante o referente a tierra, destruyendo componentes electrónicos en un radio de unos 1.500 metros y llegando la señal radiada a más de 300 km de distancia.

7.8.7. Protección contra el rayo

Los efectos de un rayo pueden ser causados por un impacto directo o por causas indirectas. Estas consecuencias pueden ser catastróficas para estructuras, personas y animales o, en el mejor de los casos, tener únicamente consecuencias económicas.

Un sistema de protección contra el rayo (SPR) ayudará a minimizar los daños causados por el rayo, derivándolo de forma controlada a tierra.

7.8.7.1. Protección contra el rayo en edificios.

Existe un buen número de normativas que obligan a estudiar y calcular, en función del riesgo isocerámico, superficie de captura del edificio, materiales de construcción, usos del edificio, etc, si es necesario instalar un sistema de protección contra el rayo.

En España, la entrada en vigor del nuevo Código Técnico de Edificación, que en su apartado de seguridad de utilización nº. 8: “Seguridad frente al riesgo causado por la acción del rayo”, indica la obligatoriedad de instalar dispositivos para la protección externa e interna contra el rayo, en función del cálculo del índice de riesgo de la instalación a proteger, la cual es de aplicación en:

- Obras de edificación de nueva construcción.
- Obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación.
- Cambio de actividad o uso del edificio existente.

Por otro lado, en España las normas UNE 21186 y NF C 17-102, indican las medidas a adoptar para diseñar, con los conocimientos y la tecnología actual, un sistema de protección contra el rayo efectivo en estructuras (edificaciones o zonas cubiertas como zonas de almacenamiento, áreas de ocio, deportivas, etc), mediante pararrayos con dispositivo de cebado y marca las directrices para la realización del sistema de protección.

Un sistema de protección contra el rayo, está compuesto por:

- Sistema de protección externa (pararrayos).
- Sistema de protección interna.
- Red de tierras.

7.8.7.1. Pararrayos

El objetivo de la gran mayoría de los pararrayos es atraer los rayos y proteger a las instalaciones del impacto directo de los mismos, excitando su carga y capturando su impacto para conducir su potencia a la toma de tierra eléctrica. Para proteger una estructura contra los rayos directos, conviene privilegiar un punto de impacto posible con el fin de salvaguardar el resto de la estructura y facilitar el flujo de la corriente eléctrica hacia el suelo, minimizando la impedancia del recorrido utilizado por el rayo.

Un pararrayos consta, básicamente de los siguientes elementos:

- Cabezal captador. Tiene la función de asegurar la formación del trazador ascendente.
- Mástil. Elemento extensible que permite dar la altura necesaria al cabezal captador para cubrir el radio de acción de la zona a proteger.
- Anclaje. Elemento que permite la sujeción del mástil.
- Conductor bajante. Elemento conductor cuya función es conducir la corriente del rayo desde el cabezal captador a la toma de tierra.

Es obligatorio instalar pararrayos en los siguientes casos:

- En edificios en que se manipulen sustancias tóxicas, radioactivas, altamente inflamables o explosivas.
- En edificios cuya altura es superior a 43 m.
- Siempre que la frecuencia esperada de impactos (N_e) sea mayor que el riesgo admisible (N_a). Los valores de N_e y N_a se pueden determinar a partir de la página SU27 del documento básico SU8 del CTE.

Para el cálculo de la frecuencia esperada de impactos, N_e , se ha tener en cuenta:

- Ubicación geográfica. Mediante un mapa geográfico de densidad de impactos, se ha de poder determinar el valor de N_g , que corresponde el número de impactos sobre el terreno por km^2 y año.
- Superficie equivalente de captura, A_e (m^2), de la estructura a proteger.
- Situación del edificio en relación a su entorno. En función de si el edificio se encuentra aislado, próximo a otros edificios o árboles de la misma altura o incluso más altos, rodeado de edificios más bajos o aislado sobre una colina o promontorio, se determinará el coeficiente C_1 .

Para el cálculo del riesgo admisible, N_a , se ha de tener en cuenta:

- Tipo de construcción. Conocer si la estructura y cubierta del edificio, son metálicas, de hormigón o de madera.
- Contenido del edificio. Conocer si el contenido es inflamable o no. En caso de que sea inflamable, la instalación del pararrayos es obligatoria.
- Uso del edificio. Conocer si son edificios de concurrencia, de uso sanitario, comercial o docente, en cuyo caso la instalación del pararrayos es obligatoria.
- Necesidad de funcionamiento continuo. Conocer si el deterioro puede interrumpir un servicio imprescindible (hospitales, bomberos, policía, etc.), o puede ocasionar un impacto ambiental grave. En caso afirmativo la instalación del pararrayos es obligatoria.

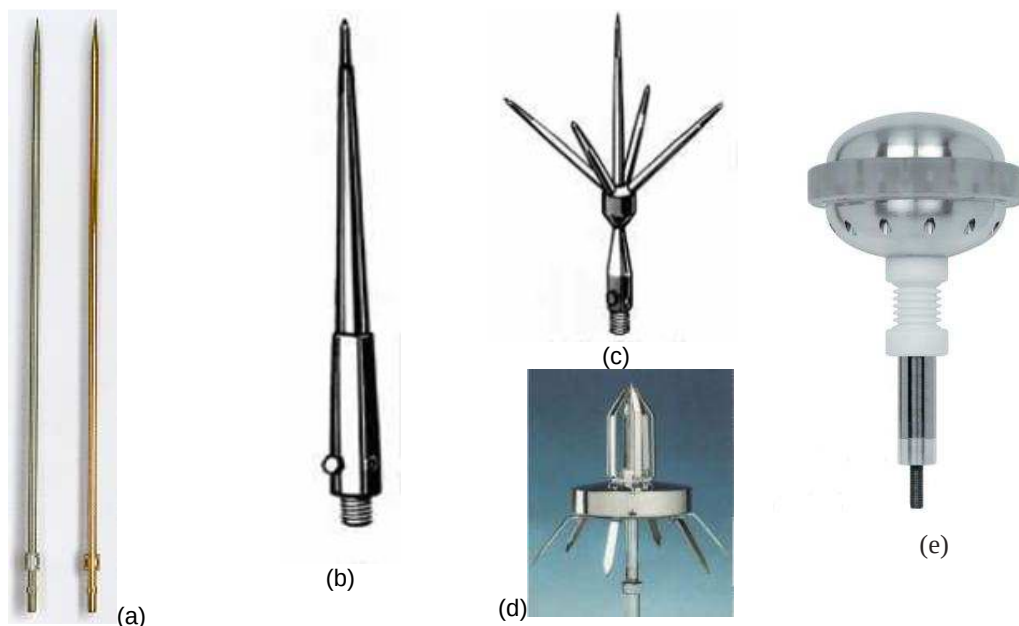


Figura 7.18. Tipos de cabezales captadores.

- (a) captor de varilla simple
- (b) captor de punta única
- (c) captor de cinco puntas
- (d) Captor tipo EMS (Early Streamer Emitter)
- (e) Captor PDCE (pararrayos desionizador de cargas electrostáticas)

Pararrayos de puntas simples Franklin (PSF)

Se trata de electrodos de acero o de materiales similares acabados en una o varias puntas que no disponen de ningún dispositivo electrónico ni fuente radioactiva. Su medida varía dependiendo de los modelos y de los fabricantes, algunos de los cuales colocan un sistema metálico cerca de la punta para generar un efecto de condensador.

Por su geometría dominante, favorecen el disparo de los cebados ascendentes y se imponen así como el punto de impacto preferencial de los rayos generados en un entorno próximo. Este tipo de protección está especialmente aconsejado para las estaciones de radioenlaces y los mástiles de antena cuando el volumen a proteger es reducido.

Una instalación de pararrayos de puntas simples o varilla simple incluye:

- Pararrayos de puntas o varilla y su mástil de extensión,
- uno o dos conductores de bajada,
- una barra o placa colectora que es el punto de intersección entre el conductor de bajada y su vinculación con el sistema de puesta a tierra, lo que permite la verificación de la resistencia de la toma de tierra del pararrayos,
- un revestimiento que protege los dos últimos metros de cada bajada,
- una conexión equipotencial desconectable entre cada toma de tierra y el circuito de tierra general de la estructura.

El pararrayos debe generalmente superar como mínimo en 2 metros los puntos altos del o de los edificios a proteger. Por consiguiente, se deberá determinar su colocación en función de las estructuras de los edificios: chimeneas, locales técnicos, mástiles portabanderas, postes o antenas. Se elegirán preferentemente estos puntos vulnerables como puntos de implantación. Se puede eventualmente elevar el pararrayos mediante un mástil de extensión.

Todos los pararrayos generan, en mayor o menor medida, efectos secundarios de contaminación electrostática y electromagnética, ambos son efectos realmente producidos por el rayo, que afectan y pueden llegar a destruir instalaciones eléctricas y equipos, por este motivo se recomiendan protecciones suplementarias en las instalaciones internas para minimizar los efectos, de sobretensión producida, en los equipos eléctricos, de telecomunicaciones, audiovisuales y cualquier otro que contenga electrónica sensible.

Pararrayos con dispositivo de cebado (PDC)

Están formados por electrodos de acero o de materiales similares acabados en una punta y que incorporan un sistema electrónico que genera un avance teórico del trazador, otros incorporan un sistema piezoeléctrico que genera un efecto similar. Estos sistemas se caracterizan por anticiparse en el tiempo en la captura del rayo, una vez que se produce la carga del dispositivo electrónico de excitación (cebador). Indicar que este tipo de pararrayos no incorporan ninguna fuente radioactiva.

El dispositivo electrónico aprovecha la influencia eléctrica del aumento de potencial entre la nube y la tierra para autoalimentar el cebador. Normalmente los componentes electrónicos se encuentran alojados en el interior de un envase metálico colocado lo más cerca posible de la punta del pararrayos y su finalidad es excitar la avalancha de electrones (ionización). La excitación del rayo se efectúa ionizando el aire por impulsos repetitivos. Al ir aumentando gradualmente la diferencia de potencial entre el pararrayos y la nube, aparece la ionización natural o efecto corona. Se trata de pequeñas descargas que salen de la punta con más intensidad para ionizar el aire más lejos. Este efecto es el principio de excitación para trazar un camino conductor intermitente que facilitará la descarga del fenómeno rayo.

Pararrayos desionizadores de cargas electrostáticas (PDCE)

Los Pararrayos Desionizadores de Carga Electroestática (PDCE), incorporan un sistema de transferencia de carga (CTS) y no incorporan ninguna fuente radioactiva. Se caracteriza por facilitar la transferencia de carga electrostática entre nube y tierra antes del segundo proceso de la formación del rayo, anulando el fenómeno de ionización o efecto corona en la tierra.

Así pues, su finalidad es parar el proceso de formación del rayo, eliminando el proceso de ionización. El objetivo es evitar la saturación de carga electrostática entre la instalación de tierra y la atmósfera que nos rodea, trabajando a partir de la influencia del campo eléctrico natural durante la tormenta, eliminando el efecto de las distribuciones de cargas y transformándolas en una pequeña corriente de fuga a tierra. Se trata de evitar la formación y descarga del rayo en la zona de protección.

El cabezal del pararrayos está formado por dos electrodos de aluminio separados por un aislante dieléctrico. Su forma es esférica y el sistema está conectado en serie entre la toma de tierra y la atmósfera que lo rodea. Se instalan en lo más alto de las estructuras a proteger, sobresaliendo 2 metros por encima de cualquier elemento constructivo o decorativo por medio de un mástil y se utiliza como medio colectivo de protección del rayo en todo tipo de estructuras en tierra y mar.

Durante el proceso de la tormenta se genera un campo de alta tensión en tierra que es proporcional a la carga de la nube y su distancia de separación del suelo. A partir de un valor del campo eléctrico natural en tierra, la instalación equipotencial de tierras del pararrayos facilita la transferencia de las cargas a través del cable eléctrico. Estas cargas se concentran en el electrodo inferior del pararrayos que se encuentra conectado a la toma de tierra.

La baja resistencia del electrodo inferior del pararrayos, facilita la captación de cargas opuestas en el electrodo superior. Durante este proceso de transferencia de energía se produce internamente en el pararrayos un pequeño flujo de corriente entre lo que sería el ánodo y el cátodo. El efecto sería la generación de una corriente de fuga, proporcional a la carga de la nube y que puede llegar a los 300 mA, que se deriva a la puesta a tierra de la instalación.

La carga electrostática de la instalación, se compensa progresivamente a tierra según aumenta la diferencia de potencial entre nube y tierra, neutralizando el efecto punta en tierra (líder) en un 100% de los casos.

El efecto de disipar constantemente el campo eléctrico de alta tensión en la zona de protección, garantiza que el aire del entorno no supere la tensión de ruptura evitando posibles chispas, ruido audible, radiofrecuencia, vibraciones del conductor y caídas de rayos.

Las instalaciones de pararrayos con tecnología CTS cubren unas necesidades más exigentes de protección, donde los sistemas convencionales de captación del rayo acabados en punta no son suficientes.

Pararrayos compensador del efecto corona (PCEC)

Se basan en la distribución equipotencial de la ionización del aire. Su objetivo es evitar el efecto punta en la atmósfera que lo rodea. Se trata, en definitiva, de distribuir radialmente la transferencia de carga de la zona durante el primer proceso de la formación del rayo.

Con este principio físico, se anula la concentración del campo eléctrico de alta tensión en las puntas más salientes de la instalación a proteger, evitando la aparición del trazador (líder) y, por lo tanto, todo el proceso restante de excitación y descarga del rayo. Con este sistema se consigue una zona eléctricamente compensada fuera de influencia de rayos directos.

El captador está constituido por un electrodo semiesférico de aluminio soportado por un mástil de acero inoxidable y no incorpora ninguna fuente radioactiva. Con el fin de transferir la carga electrostática a tierra, se conecta con la toma de tierra, evitando la excitación e impacto directo del rayo en

aproximadamente un 95% de los casos. Se trata, en definitiva, de canalizar por la toma de tierra la diferencia de potencial entre la nube y el captador del pararrayos. La instalación conduce primero hacia arriba, a través del cable desnudo de tierra, la tensión eléctrica generada por la tormenta eléctrica hasta el punto más alto de la instalación y durante el proceso de formación de la tormenta, se genera un transporte de cargas que se concentran en la parte inferior del electrodo del pararrayos.

Pararrayos radioactivos

Los inventores de estos tipos de pararrayos, entre ellos el físico Szillard (1914), supusieron que la ionización originada por fuentes radiactivas colocadas cerca de las puntas de los pararrayos tipo Franklin facilitarían las descargas de las nubes y con ello evitar la caída del rayo, esta hipótesis de partida, no tienen una validez total, ya que en los cálculos desarrollados a estos efectos, se obtienen valores muy pequeños de ionización.

Están constituidos por una varilla metálica acabada en punta donde en las proximidades de esta punta se ha colocado una fuente radiactiva (usualmente una o varias superficies de 4 a 10 cm cuadrados de Américo) con el objetivo de mejorar su capacidad de captar rayos al ionizar el medio cercano a la fuente radiactiva. Generalmente, lleva un arco o carcasa cónica que rodea su punta. Sin embargo, hay otros tipos de pararrayos con apariencia similar. Para descartar que se trate de un pararrayos radiactivo se requiere hacer medidas con detectores especiales para la radiactividad que emiten.

En los últimos años y en diferentes países europeos, entre ellos España, ha sido prohibida la instalación de estos pararrayos radiactivos como consecuencia del posible riesgo que tienen para las personas la utilización de fuentes radiactivas próximas a los lugares de trabajo o descanso, pues en mil años el material radiactivo aún estará emitiendo la quinta parte de la radiación actual, lo cual constituye un riesgo potencial. Aunque normalmente están instalados lejos de los lugares de permanencia de las personas, el material radiactivo es poco y el alcance de la radiación emitida es corta, a lo sumo algunos metros, los riesgos están cifrados en la pérdida de hermeticidad de la cápsula que contiene el material radiactivo, en la instalación y almacenamiento masivo y descontrolado, en su almacenamiento al descartarlo y en la aparición de situaciones de accidente.

Pararrayos tipo jaula de Faraday o reticular

Se basa en el fenómeno descubierto por el físico inglés Michael Faraday (1791-1867). Si rodeamos un ambiente con una lámina conductora, el campo eléctrico externo redistribuye los electrones libres en el conductor, dejando una carga positiva neta sobre la superficie externa en algunas regiones y una carga negativa neta en otras. Esta distribución de carga ocasiona un campo eléctrico adicional tal que el campo total en todo punto interior es cero, tal como lo predice la ley de Gauss (por este principio se sabe que estar dentro de un automóvil durante una tormenta es más seguro ya que si se produce una descarga en él, la carga tiende a permanecer sobre la carrocería metálica y dentro de él no se genera campo eléctrico). El dispositivo consiste en un retículo o malla tendida a lo largo de los aleros del tejado o terraza de grandes edificios y conectada eléctricamente a tierra. Se emplean en aquellos edificios donde predomina la superficie frente a la altura.

El receptor está constituido por una red conductora en forma de malla de forma que ningún punto de la cubierta quede a más de 9 m de un cable conductor. El tendido de la malla se realizará por las partes más elevadas de la cubierta, de modo que transcurra por los caballetes y limatesas evitando las limahoyas y, para evitar la corrosión, problema frecuente en esta solución, los receptores instalados con este objeto deberán ser del mismo material que los receptores propios de la construcción conectándose entre ellos por uniones duraderas que excluyan la corrosión: soldados, atornillados o remachados. Los materiales a utilizar son el cobre, el acero galvanizado o acero tratado contra la corrosión con 50 mm² de sección mínima, e incluso el aluminio aunque debido a su exclusivo uso para esta instalación suele plantar problemas en sus enlaces con los electrodos, conexiones equipotenciales, etc., particularmente en su contacto con el cobre.

Al igual que en el sistema de puntas es muy adecuado conectar estos elementos receptores en cubierta con, al menos, dos líneas principales de tierra que a su vez terminarán en el electrodo de puesta a tierra del edificio para de este modo reducir la intensidad que circulará por cada una de ellas en el momento de la descarga. Se deben colocar, como mínimo, 2 bajadas independientes por los primeros 100 m² de planta cubierta por la red de captadores y una más por cada 300 m² o fracción que exceda de aquella y que en edificios con redes a diferentes niveles se conectarán los inferiores a las redes superiores.

En todo caso la longitud del conductor entre dos bajadas no excederá de 30 m, medidos por el perímetro de la malla, y cada 20 m de altura se unirán las bajadas entre ellas mediante un anillo y en base inferior de la red conductora en su unión con el suelo se dispondrá siempre un tubo de protección de acero galvanizado de 44 mm de diámetro nominal de paso.

El sistema reticular presenta la posibilidad de mejorar la protección de la estructura instalando terminales en su parte alta y conectándolos a la misma, la cual se conecta a tierra en su parte inferior. Como se supone que las estructuras metálicas son eléctricamente continuas, aunque de no ser así pueden establecerse interconexiones, es suficiente conectar a tierra aproximadamente uno de cada dos pilares del perímetro de forma que los puntos a tierra no estén distanciados entre sí más de 18 m. Los edificios de hormigón armado que tengan los redondeos de la estructura conectados eléctricamente de una manera conveniente mediante anillos y estén a su vez puestos a tierra mediante su conexión con el electrodo enterrado, presentan las mismas condiciones anteriores para evitar la posibilidad de cualquier chispazo, así como formación de arcos debido a la diferencia de tensión con los elementos metálicos próximos.

Hilos tendidos.

El sistema de hilos tendidos, hilos de guardia, se compone de uno o varios hilos conductores tendidos por encima de las instalaciones a proteger. La zona de protección se determina por aplicación del modelo electrogeométrico. Los conductores deben ser conectados a tierra en cada uno de sus extremos.

La instalación de hilos tendidos necesita un estudio especial que tenga en cuenta en particular la resistencia mecánica, la naturaleza de la instalación, las distancias de aislamiento.

Esta tecnología es muy utilizada para proteger los depósitos de munición y de forma general cuando no es posible utilizar la estructura del edificio como soporte de los conductores que evacúan las corrientes del rayo a tierra.

Conclusiones en el uso de pararrayos.

Las nuevas tecnologías de protección del rayo se convierten en una necesidad evidente para la protección de las personas, animales e instalaciones: comunicación, audiovisual, maquinaria etc.

Los sectores más afectados por el fenómeno rayo, tienen a su alcance soluciones apropiadas. Las nuevas tecnologías para el diseño de sistemas de protección más eficaz del rayo, cumplen con el objetivo para los que han sido diseñadas: proteger del impacto del rayo evitando su caída en la zona de protección.

De lo analizado hasta ahora podemos concluir que:

1. Se prevé que el cambio climático genere temporadas de tormentas cada vez más largas con grandes potenciales energéticos que repercuten en una tendencia hacia una mayor actividad eléctrico-atmosférica, en general, y de rayos, en particular.
2. Los impactos de rayos son aleatorios y su trayectoria es caótica con un potencial de descarga muy destructivo.
3. Las nuevas tecnologías electrónicas de comunicaciones, simplifican la gestión o información para el usuario pero aumentan la necesidad propia de una protección más eficaz.
4. Evitar la caída del rayo es una necesidad evidente. Cada vez hay una mayor cantidad de actividades humanas donde el impacto o presencia de rayos es notoria y sensible. Los pararrayos tipo Franklin excitan y atraen las descargas de rayos (Atrae-rayos), generando fenómenos de repercusión eléctrica, a veces, peligrosos para los componentes electrónicos sensibles.
5. Los pararrayos PDC excitan y atraen las descargas (Atrae-rayos), se caracterizan primordialmente por su sistema electrónico de cebado incorporado en el cabezal del pararrayos, este sistema consigue en un laboratorio de alta tensión adelantarse a la captación de la descarga en un tiempo más corto (microsegundos), referente a la descarga de un pararrayos en punta tipo Franklin, pero en el campo de aplicación tienen un retraso de microsegundos para efectuar el trabajo de carga del dispositivo electrónico.
6. Algunos fabricantes de pararrayos PDC, aconsejan la revisión del cabezal cada vez que un rayo impacta en ellos, para verificar la eficacia de su sistema electrónico de cebado que lleva incorporado y cambiarlo si fuera necesario. El motivo es la posible destrucción del sistema electrónico de cebado producido por los efectos: térmicos, electrodinámicos y electromagnéticos del rayo durante el impacto.
7. Los certificados de laboratorios de alta tensión que avalan la eficacia del sistema PDC tendrían que ser solo utilizados como documentos de referencia técnica del fabricante y no como aplicación en las instalaciones, ya que la norma no garantiza una protección absoluta con estos sistemas de pararrayos y los ensayos no contemplan toda la instalación de protección.

8. Todos los sistemas de protección acabados en una o varias puntas que tienen como principio excitar y atraer el rayo, sean pasivos o activos, ionizan el aire generando chispas peligrosas y descargas de alta tensión, las instalaciones de protección externa del rayo están reguladas por normativas de baja tensión; Estos sistemas tendrían que ser utilizados fuera de las zonas de riesgo de explosiones, zonas urbanas o industriales. Su campo de aplicación sería ideal para garantizar zonas de captación de rayos, como por ejemplo los bosques, así se evitarían un gran número de incendios.

9. Las zonas urbanas e industriales tienen que ser protegidas con sistemas de pararrayos desionizadores de carga electrostática (para-rayos), donde la transferencia de carga electrostática será compensada pacíficamente en el tiempo real y no se representará la descarga visual del rayo ni sus fenómenos repercutidos de acoplamientos o inducciones.

Zona de protección

De forma resumida, se puede indicar lo siguiente:

- Las descargas atmosféricas “no pueden evitarse”.
- Ningún sistema de protección puede garantizar en forma absoluta vidas, bienes ni estructuras.
- Todos los sistemas de protección tratan de controlar la descarga buscando que se produzca sobre puntos definidos y garantizar su rápida disipación a tierra.
- Área protegida es el volumen que encierra a todos los elementos que gracias a la instalación de un “captor” tienen una baja posibilidad de recibir una descarga.

Tabla 7.7. Ángulo de protección para diferentes niveles de protección

Nivel de protección	h=20 m	h=30 m	h=45 m	h=60 m
I	25°			
II	35°	25°		
III	45°	35°	25°	
IV	55°	45°	35°	25°



Figura 7.19. Cono de protección de un pararrayos instalado en una torre

Si varios pararrayos de puntas están unidos a distancias inferiores a 20 metros, el cable de unión actúa también como pararrayos continuo, y el volumen protegido pasa a ser prismático.

7.9. Puestas a tierra

Los problemas relacionados con la seguridad están presentes en todo tipo de instalaciones eléctricas, entre las que se incluyen, como no podía ser de otra manera, las instalaciones de aerogeneradores. Las medidas de seguridad no se extienden únicamente a la protección de personas que se encuentren cerca de las instalaciones, sino también a las propias instalaciones y a su funcionamiento cuando se produce una situación de fallo.

Un sistema de puesta a tierra está formado por los diferentes equipos que se establecen en las instalaciones para limitar la tensión a la que éstas pueden estar sometidas en una situación de fallo, para asegurar el correcto funcionamiento de equipos de protección en estas situaciones y para intentar reducir las averías que puedan producirse en caso de una corriente transitoria peligrosa.

Las puestas a tierra actúan como elementos derivadores de la corriente eléctrica producida durante un fallo para su disipación en el terreno. En general están formadas por una malla de electrodos enterrada en el mismo a una profundidad que depende de las características de la instalación y del terreno. Dado que su objetivo es la disipación de corriente en el terreno, un buen sistema de puesta a tierra será aquel que ofrezca una baja resistencia al paso de la corriente. Se intentará, por tanto, que la resistencia equivalente del sistema sea la mínima posible.

A partir de los resultados de algunos de los estudios científicos realizados durante los años treinta y cuarenta, se elaboró en 1954 por el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) un primer documento denominado: “*Guía de aplicaciones en métodos de conexiones a tierra para subestaciones*” [1], que contenía una serie de normas, especificaciones y recomendaciones a la hora de diseñar sistemas de puestas a tierra. Estas recomendaciones determinaban la resistencia de los electrodos que constituyen la toma de tierra en sí, o calculaban los gradientes de potencial originados en la superficie del terreno por la derivación al mismo de una corriente eléctrica. Este primer trabajo fue ampliado a partir de 1956 y publicado como una guía de referencia por el mismo instituto en 1961 [2]. Esta guía fue ampliándose hasta la edición de 1986 [3,4] que constituye en cierto modo la base de muchas otras normativas nacionales entre ellas la española. Esta edición de 1986 sigue revisándose periódicamente siendo la revisión del año 2000 [5] la segunda mayor revisión de la guía editada en 1961.

La normativa básica en España sobre estas instalaciones está compuesta por dos documentos, la *Instrucción Técnica Complementaria número 18* del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión aprobado en el Real Decreto 842/2002 de 2 de agosto y en la *Instrucción Técnica Complementaria número 13* del Real Decreto 3275/1982, de 12 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación.

Dado que el terreno constituye una parte importante en el funcionamiento de los sistemas de puestas a tierra, sus propiedades eléctricas, en particular su resistividad, y sus propiedades mecánicas, condicionarán el diseño de las tomas de tierra de las instalaciones eléctricas. Serán diferentes, por tanto, las tomas de tierra diseñadas para una instalación en un terreno arcilloso o en un terreno estratificado por ejemplo. El caso de estos últimos es objeto de estudio concreto en este trabajo.

Los estudios de terrenos para este fin no se desarrollaron hasta los años treinta, donde se empezaron a publicar artículos científicos sobre la derivación de corriente eléctrica a través de instalaciones de tomas de tierra y sobre el comportamiento de estos sistemas de seguridad.

La presencia de una toma de tierra generará en el terreno una determinada distribución de potenciales eléctricos debido a la derivación de corriente al mismo. La distribución de potenciales tiene que ser estudiada con detalle ya que la presencia de altos gradientes de potencial puede afectar a la seguridad de las personas que se encuentren en la zona de la toma de tierra. Este problema se reduce en grandes rasgos al análisis del paso de corriente eléctrica a través del circuito de la toma de tierra. Para este análisis es preciso conocer la resistividad eléctrica del terreno. La resistividad eléctrica se define como la resistencia al paso de la corriente eléctrica que presenta una muestra de terreno por unidad de longitud y de sección.

De forma rigurosa la resistividad es un tensor que ha de incorporar la variación de dicha magnitud para cada dirección en función de la dirección de la corriente eléctrica. Muchas veces, debido a la poca información sobre las propiedades del terreno, este tensor se suele reducir a una mera magnitud escalar. El terreno puede ser modelado de varias maneras entre las que podemos destacar el del modelo homogéneo e isotrópico y los modelos de dos o múltiples capas.

La resistividad del terreno es una magnitud básica en el cálculo de las puestas a tierra debido a que su valor entra directamente en el cálculo de la resistencia equivalente de la toma a tierra y de los gradientes de potencial generados en el terreno por la derivación de una corriente eléctrica. En los diseños

preliminares se suelen tomar para la resistividad eléctrica valores medios tabulados [6-9]. Las normativas básicas de varios países entre ellos España recogen valores orientativos de la resistividad de diversos terrenos.

De cualquier modo, si se fueran necesarios cálculos más precisos para la correcta estimación de la resistencia equivalente del sistema de puesta a tierra se pueden realizar mediciones experimentales sobre el terreno tomando muestras en distintos puntos y distintas profundidades. Esta medición puede ser muy relevante en suelos formados por múltiples estratos obteniéndose un perfil de resistividades en función de la profundidad.

Además de los valores de la resistividad para el cálculo de la resistencia equivalente del sistema de puesta a tierra habrá que tener en cuenta su dependencia con otras magnitudes como la humedad del terreno, la temperatura o la composición química del suelo. No hay que olvidar que la resistividad y sus dependencias, además de afectar a la resistencia del sistema, afectan a los valores de los gradientes de potencial generados sobre el terreno por una derivación de corriente y a la propia magnitud de la corriente derivada.

Existen varios métodos propuestos en la bibliografía para la realización de esta medición experimental de la resistividad del terreno. Los perfiles de resistividades del terreno están ampliamente documentados en la bibliografía disponible.

El cálculo y diseño de sistemas de protección, dentro de los cuales se incluyen las instalaciones de puesta a tierra en la planificación y construcción de las propias instalaciones. Es importante en centros y subestaciones transformadoras, ya que las intensidades de las corrientes de falta o de defecto (corriente que circula debido a un defecto de aislamiento) que pueden circular por la instalación son muy elevadas.

7.9.1. Sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen los equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa, o también que por falta de aislamiento en uno de los conductores y al quedar en contacto con las placas de los contactos y ser tocados por alguna persona pudiera ocasionarle lesiones o incluso la muerte.

El objetivo de un sistema de puesta a tierra es:

- Proporcionar seguridad a las personas
- Proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección.
- Establecer la permanencia, de un potencial de referencia, al estabilizar la tensión eléctrica a tierra, bajo condiciones normales de operación.
- Mejorar calidad del servicio
- Disipar la corriente asociada a descargas atmosféricas y limitar las sobre tensiones generadas.
- Dispersar las cargas estáticas a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra se definen en la instrucción complementaria número 18 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) como *“una unión eléctrica directa, sin fusibles ni protección alguna, de una parte del circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo mediante una toma de tierra con un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo”*. Es decir que son toda ligazón metálica directa sin fusible ni protección alguna, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo, o varios, enterrado en el suelo, con objeto de conseguir que en el conjunto de instalaciones, edificios y superficies próximas del terreno no existan diferencias de potencial peligrosas, y que al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falta o las corrientes procedentes de cortocircuitos y de descargas de origen atmosférico .

A efectos de seguridad de los aparatos receptores, estos se clasifican en: receptores para alumbrado, aparatos de caldeo, receptores a motor, transformadores, autotransformadores y varios, especificándose la obligatoriedad de cumplir determinadas condiciones, entre ellas la puesta a tierra, contenidas en las instrucciones complementarias.

Esta clasificación remite a un número muy grande de instrucciones, las más importantes son:

- MIE BT 023 (Instalaciones interiores o receptoras: protecciones contra sobreintensidades y sobretensiones).
- MIE BT 024 (Instalaciones interiores o receptoras: protección contra contactos directos e indirectos).
- MIE BT 026 (Instalaciones interiores de viviendas: prescripciones generales).

- MIE BT 026 (Instalaciones interiores o viviendas: ejecución de las instalaciones).
- MIE BT 028 (Instalaciones en locales de pública concurrencia: prescripciones particulares).
- MIE BT 019 (Puestas a tierra).

Además existen referencias aisladas sobre aparatos de caldeo, potencias de arranque de motores; así como comentarios puntuales aunque ocasionalmente importantes en diversas hojas de interpretación.

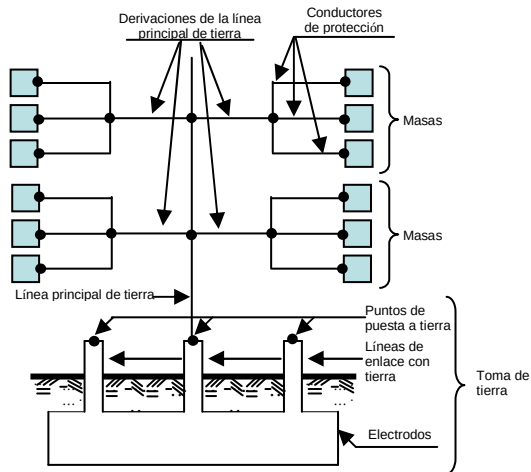


Figura 7.20. Esquema de un sistema de puesta a tierra

Se recomienda que se realicen las instalaciones de puesta a tierra teniendo en cuenta que la corriente siempre busca el camino mas fácil por donde poder pasar, y al llegar a tierra se disipa por esta, por ello es conveniente tener una resistividad muy baja en el terreno donde se realiza la instalación.

Los sistemas de puesta a tierra, representados esquemáticamente en la figura 7.20., están formados principalmente por tres componentes:

- la toma de tierra
- las líneas principales de tierra
- las derivaciones de las líneas de tierra y los conductores de protección

7.9.2. La toma de tierra

La parte más importante de un sistema de puesta a tierra es la toma de tierra, y concretamente el conjunto de electrodos que constituyen la unión eléctrica con el terreno. Se denomina toma de tierra a la instalación que tiene como fin establecer la unión eléctrica de una parte del circuito o una parte conductora no perteneciente al mismo con el terreno. Los dos objetivos del diseño e instalación de una toma de tierra son:

- el transporte y la disipación por el subsuelo de las corrientes eléctricas producidas, tanto en condiciones de funcionamiento normales como en condiciones de fallo de modo que se garantice la integridad de los equipos.
- la protección de las personas que trabajan o caminan por los alrededores de una instalación eléctrica, evitando que queden expuestas a sufrir descargas de importancia.

En un caso general una toma de tierra está formada por los siguientes elementos:

- **Electrodos:** hace referencia al conductor o malla de conductores que se encuentra permanentemente en buen contacto eléctrico con el terreno y que sirve para facilitar el paso a éste de las corrientes de falta que se puedan originar.
- **Líneas de enlace:** son el conjunto de conductores que unen los electrodos enterrados con los puntos de puesta a tierra. Estos conductores pueden encontrarse fuera del terreno o en el seno del mismo pero, en todo caso, convenientemente aislados.
- **Puntos de puesta a tierra:** son puntos equipados con dispositivos de conexión de conductores situados fuera del terreno que sirven de unión entre la línea de enlace y la línea principal de tierra de la instalación eléctrica.
- **Líneas principales de tierra:** son las líneas que unen a través de derivaciones y de conductores de protección, los puntos de puesta a tierra con las masas que se desea proteger.

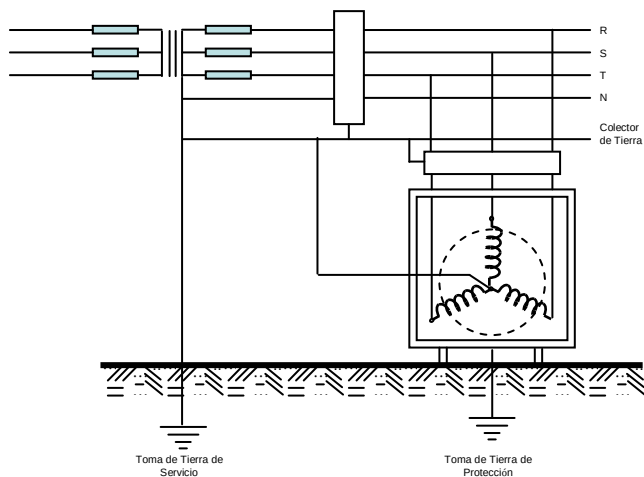


Figura 7.21. Representación esquemática de los dos tipos de tomas de tierra

Según la instrucción técnica complementaria número 18 del REBT que, como ya se dijo anteriormente, regula los sistemas de puesta a tierra, estipula en su apartado 3.1 las características de las tomas a tierra. Entre otras características, los electrodos que han de ser de cobre según la clase 2 de la norma UNE 21.022. Además, la profundidad de la misma no será nunca inferior a 50 cm y nunca se utilizarán canalizaciones metálicas de agua o gas como circuitos derivadotes por motivos de seguridad.

Las tomas de tierra de una instalación eléctrica pueden clasificarse de acuerdo con su funcionalidad en dos tipos: de **protección** y de **servicio**. Un esquema de ambas se presenta en la figura 7.21.

7.9.3. Toma de tierra de protección

Es la conexión directa de partes conductoras de una instalación, accesibles al contacto de personas, no sometidas a tensión eléctrica pero que lo pudieran estar debido a una avería, un contacto accidental, una descarga atmosférica o una sobretensión. Proporcionan un medio para disipar corrientes eléctricas en el terreno (debidas a descargas atmosféricas, sobretensiones de maniobra, corrientes homopolares) sin sobrepasar los límites impuestos por los equipos. Así pues, estas tomas de tierra tienen dos funciones básicas:

- establecer un circuito de retorno a tierra entre la parte conductora del equipo afectado y la entrada de la alimentación.
- aproximar el potencial de la parte conductora al de la superficie del terreno cercano a la misma, de forma que se proteja a las personas contra diferencias de tensión peligrosas.

Se conectarán a las tierras de protección, entre otros, los siguientes elementos:

- Los chasis y bastidores de aparatos de maniobra.
- Los envoltentes de los conjuntos de armarios metálicos.
- Las puertas metálicas de los locales.
- Las vallas y cercas metálicas.
- Las columnas, soportes, pórticos, etc.
- Las estructuras y armaduras metálicas de los edificios que contengan instalaciones de alta tensión.
- Los blindajes metálicos de los cables.
- Las tuberías y conductos metálicos.
- Las carcasas de transformadores, generadores, motores y otras máquinas.
- Hilos de guarda o cables de tierra de las líneas aéreas.

7.9.4. Toma de tierra de servicio

Se utiliza para la derivación de corrientes elevadas al terreno, uniendo a tierra de forma temporal parte de las instalaciones que están normalmente bajo tensión, o de forma permanente ciertos puntos de los circuitos eléctricos de servicio.

Cuando una toma de tierra sea necesaria a la vez por motivos de protección y por motivos de servicio, prevalecerán siempre las prescripciones dadas por las medidas de protección tal y como en España recoge el punto sexto de la instrucción técnica complementaria número 18 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) que regula las puestas a tierra.

Así pues, se deberán conectar a tierra los siguientes elementos:

- Los neutros de los transformadores, que lo precisan en instalaciones o redes con neutro a tierra de forma directa o a través de resistencia o bobinas.
- El neutro de los alternadores y otros aparatos o equipos que lo precisen.
- Los circuitos de baja tensión de los transformadores de medida.

- Los limitadores, descargadores, autoválvulas, pararrayos para la eliminación de sobretensiones o descargas atmosféricas.
- Los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

7.9.5. Factores de riesgo que influyen en una instalación de toma de tierra

La corriente eléctrica que fluye al terreno cuando se produce una situación de fallo origina una distribución de potenciales eléctricos en la superficie del terreno en el que está enterrada la toma de tierra pudiéndose crear regiones con gradientes de potencial importantes que pueden afectar a la seguridad de las personas.

Para la evaluación de la seguridad en una instalación de puesta a tierra hay que tener en consideración diversos condicionantes entre los que cabe destacar:

- el tamaño de la instalación de toma de tierra.
- el estado de conservación en que se encuentra.
- el valor de la resistividad del terreno (resistencia por metro lineal que ofrece el terreno a la conducción de la corriente eléctrica).
- la ausencia de resistencias que limiten la intensidad de la corriente de fallo si se produce el contacto de una persona con la instalación eléctrica.

7.9.6. Parámetros característicos de una toma de tierra

Las tomas de tierra, vienen caracterizadas por siete parámetros que habrá que definir a la hora de proyectar una instalación desde el punto de vista de la seguridad:

- *Sobretensión de tierra.* En circunstancias de fallo, se denomina sobretensión de tierra a la diferencia de potencial entre la toma de tierra y el potencial de referencia.
- *Tensión de paso.* Es la diferencia de potencial entre dos puntos del terreno separados 1 m.
- *Tensión de contacto.* Es la diferencia entre la sobretensión de tierra en un punto de la instalación y el potencial en el mismo punto en la superficie del terreno.
- *Tensión de malla.* Es la mayor tensión de contacto que puede encontrarse en la instalación de la toma de tierra.
- *Tensión transferida.* Es la tensión de contacto en el caso de que una persona toque una instalación eléctrica. Se corresponde con la máxima tensión de contacto.
- *Intensidad total del sistema.* Es la intensidad total que circula por la toma de tierra cuando existe una derivación al terreno a través de la misma.
- *Resistencia equivalente del sistema.* Es la resistencia que ofrece la toma de tierra al paso de la corriente eléctrica. Se puede calcular directamente como el cociente entre la sobretensión de tierra y la intensidad total que circula por el sistema.

7.9.7. Los electrodos de la toma de tierra.

Para realizar un sistema de puesta a tierra se necesitan electrodos de tierra, los cuales existen de muchos tipos. La elección de uno u otro tipo dependerá de la instalación a proteger, las corrientes de fallo que se produzcan, las tensiones, el tipo de terreno y el coste económico.

Cuando se instala un electrodo de tierra, es común tener un registro, con el objetivo de poder localizarlo con facilidad y para que después de un cierto tiempo se pueda realizar el mantenimiento del mismo. El uso de un registro es opcional.

Los electrodos de tierra se pueden encontrar en diferentes tamaños, formas, y con diferentes características. A continuación se describen los tipos de electrodos más comunes:

a) Varilla Copperweld.

Esta varilla es una de las más usadas, dado el bajo coste de material. Este tipo de electrodo esta hecho de acero y recubierto de una capa de cobre, su longitud es de 3,05 m y un diámetro de 16 mm. Esta varilla se debe enterrar en forma vertical y a una profundidad de por lo menos 2,5 m. Se acepta que la varilla vaya enterrada en forma horizontal, siempre y cuando se realice a un mínimo 80 cm de profundidad, aunque esta actuación no es muy recomendable.

La varilla Copperweld no tiene mucha área de contacto, pero sí una longitud considerable, con la cual es posible un contacto con capas de tierra húmedas, con lo cual se obtiene un valor de resistencia bajo que es lo deseado para facilitar la disipación de corriente en el terreno.

b) Varilla.

Este tipo de electrodo de tierra tiene un área de contacto más grande que la varilla Copperweld, por lo que no necesita mucha longitud. Este electrodo se forma por un perfil de acero galvanizado, y puede ser en forma de cruz, de ángulo recto o en te.

c) Rehilete.

Este electrodo se forma con dos placas de cobre cruzadas, las cuales van soldadas. Este tipo de electrodo es bueno para terrenos donde es difícil excavar, ya que tiene mucha área de contacto.

d) Placa.

Debido a que este electrodo tiene una gran área de contacto es recomendado en terrenos que tengan alta resistividad. Debe tener un área de por lo menos 2000 cm² y un espesor mínimo de 6,5 mm en materiales ferrosos y de 1,5 mm en materiales no ferrosos.

e) Electrodo en estrella.

Este tipo de electrodo se puede hacer con cable de cobre desnudo con ramificaciones a ángulos de 60°. Estos electrodos se utilizan en el campo, ya que por la longitud del cable se obtiene un valor de resistencia menor.

f) Electrodo de anillos.

Este electrodo consiste en una espira de cable de cobre desnudo, con un diámetro mínimo de 34 mm² y una longitud mínima de 6 m en contacto con la tierra. Debe situarse a una profundidad de por lo menos 80 cm.

g) Malla.

La malla se hace armando una red de conductores de cobre desnudos, esta malla se puede mejorar con algún otro tipo de electrodos. Esta malla es muy utilizada en las subestaciones eléctricas, ya que reduce el riesgo de descargas.

h) Placa estrellada.

Este tipo de electrodo es una placa que tiene varias puntas en su contorno, esta se conecta a la línea de tierra por medio de una barra atornillable. Su principal ventaja es que ayuda a que se disipe la energía a través de sus puntas.

i) Electrodo de varillas de hierro o acero.

Prácticamente este electrodo son las varillas que se aprovechan en la construcción de algún edificio. Las varillas deben tener por lo menos 16 mm de diámetro.

j) Electrodo de tubo metálico.

Este tipo de electrodo puede ser la tubería metálica del agua. El diámetro debe ser de mínimo 19 mm, si el tubo es de acero o hierro tiene que tener una cubierta de otro metal para que lo proteja de la corrosión, la tubería debe estar enterrada por lo menos 3 m. Como ya se ha mencionado, por seguridad no se recomienda el uso de conducciones de agua o de gas como electrodos de la toma de tierra.

k) Electrodo empotrado en cemento.

Este tipo de electrodo se debe encontrar en una cimentación que este enterrada y tenga una longitud de por lo menos 6 m, con varillas desnudas con 13 mm de diámetro mínimo. El electrodo debe estar incrustado en cemento un mínimo de 5 cm.

l) Electrodo horizontal o contra-antena.

El electrodo horizontal es un conductor de cobre desnudo enterrado de forma horizontal en una zanja de 50 cm mínimo de profundidad, se pueden hacer varias configuraciones, pero la más utilizada es la línea recta. Su principal inconveniente es que la excavación es muy costosa.

m) Electrodo profundo.

Este tipo de electrodo no es más que una varilla Copperweld unida a un conductor de cobre desnudo de gran longitud. Este electrodo es utilizado en terrenos donde hay mucha roca, se hace una perforación vertical profunda hasta encontrar las capas húmedas de la tierra, ya que la humedad aumenta la conductividad, colocando la varilla conductora en contacto con estas capas húmedas.

n) Electrodo en espiral.

El electrodo en espiral es un cable de cobre denudo en espiral de diferentes diámetros y enterrados a diferentes profundidades para hacer contacto con las diferentes capas de la tierra.

ñ) Electroodos químicos.

Los electrodos químicos son aquellos electrodos a los que se les adiciona algún compuesto químico para aumentar la conductividad y de esta forma disminuir el valor de resistencia.

De acuerdo a pruebas que se han realizado a los electrodos mencionados anteriormente se puede decir que el más utilizado es la varilla Copperweld, gracias a su gran eficiencia y bajo costo de material e instalación.

Los electrodos pueden ser artificiales o naturales. Se entiende por electrodos artificiales los establecidos con el exclusivo objeto de obtener la puesta a tierra, y por electrodos naturales las masas metálicas que puedan existir enterradas.

Para las puestas a tierra se emplearan principalmente electrodos artificiales. No obstante los electrodos naturales que existirán en la zona de una instalación y que presenten y aseguren un buen contacto permanente con el terreno, pueden utilizarse bien solos o conjuntamente con otros electrodos artificiales.

En general, se puede prescindir de éstos cuando su instalación presente serias dificultades y cuando los electrodos naturales cumplan los requisitos anteriormente señalados con sección suficiente y la resistencia de tierra, que se obtenga con los mismos, presente un valor adecuado.

Los electrodos artificiales podrán estar constituidos por:

- Electrodos simples constituidos por barras, tubos, placas, cables, pletinas u otros perfiles.
- Anillos o mallas metálicas constituidos por elementos indicados anteriormente o por combinaciones de ellos.

Los electrodos serán de metales inalterables a la humedad y a la acción química del terreno, tal como el cobre, el hierro galvanizado, hierro sin galvanizar con protección catódica o fundición de hierro. Para este último tipo de electrodos, las secciones mínimas serán el doble de las secciones mínimas que se indican para los electrodos de hierro galvanizados.

Sólo se admite los metales ligeros, cuando sus resistencias a la corrosión sean netamente superiores a la que presentan, en el terreno que se considere, el cobre o el hierro galvanizado. La sección de un electrodo no será nunca inferior a la sección del conductor que constituye la línea principal de tierra.

Los electrodos naturales puedan estar constituidos por:

- Una red extensa de conducciones metálicas enterradas, siempre que la continuidad de estas conducciones quede perfectamente asegurada, y en el caso de que las conducciones pertenezcan a una distribución pública o privada, haya acuerdo con los distribuidores correspondientes. Se prohíbe utilizar como electrodos las canalizaciones de gas, de calefacción central y las conducciones de desagüe, humos o basuras.
- La cubierta de plomo de los cables de una red eléctrica de baja tensión enterrada, con la condición de que la continuidad de la cubierta de plomo esté perfectamente asegurada y, en el caso de que la red pertenezca a una distribución pública, haya acuerdo con el distribuidor.
- Los pilares metálicos de los edificios, si están interconectados, mediante una estructura metálica, y enterrados a cierta profundidad. El revestimiento eventual de hormigón no se opone a la utilización de los pilares metálicos como tomas de tierra y no modifica sensiblemente el valor de su resistencia de tierra.

Como ya se menciono, la varilla copperweld es el electrodo mas utilizado debido a sus características, también ya mencionadas. El objetivo de este electrodo es estar en contacto con las capas húmedas de la tierra. Para lograrlo se recomienda instalarla en forma vertical, enterrada por lo menos 2,5m con esto se debe obtener un valor de resistencia bajo. Si no se logra con una varilla se pueden colocar mas varillas conectadas por medio de conductor de cobre desnudo en diferentes configuraciones y un espaciado de por lo menos la longitud del electrodo.

7.9.8. Terrenos

7.9.8.1. Clasificación de los suelos

Tras el estudio y análisis de las tomas a tierra, este tercer apartado tiene por objeto definir la tipología de terrenos así como una de sus propiedades: la resistividad eléctrica que es la más importante en el estudio y diseño de los sistemas de puestas a tierra. Podemos describir los tipos de suelo según diversas

clasificaciones, entre ellas podemos señalar:

- Estructura horizontal.
- Estructura molecular.
- Proceso de formación.
- Horizontes y tipos de suelo según el horizonte.

7.9.8.2. Estructura del suelo

La estructura del suelo es el estado del mismo. La evolución natural del suelo produce una estructura vertical “*estratificada*” a la que se conoce como **perfil**. Las capas que se observan se llaman **horizontes** y su diferenciación se debe a:

- la dinámica interna.
- el transporte vertical.

Así mismo, se llama roca madre a la roca que proporciona su matriz mineral al suelo. En virtud del tipo de roca sobre la que se asienta el suelo cabe distinguir dos tipos de suelos.

- **suelos autóctonos**, que se asientan sobre su roca madre y representan la situación más común.
- **suelos alóctonos**, formados con una matriz mineral aportada desde otro lugar por los procesos geológicos de transporte.

La estructura del suelo afecta a un numeroso grupo de características físicas del mismo, de entre las cuales cabe destacar la relevancia de la **porosidad** del mismo, la cual permite la circulación del agua, la renovación del aire y la penetración de las raíces.

La descomposición de la roca madre puede hacerse por **disgregación**, o por **factores físicos y mecánicos**, o por **alteración** o por **descomposición química**. En este proceso se forman unos elementos muy pequeños que conforman el suelo, los coloides y los iones. Dependiendo del porcentaje de coloides e iones, y de su origen, el suelo tendrá unas determinadas características.

En cuanto al mecanismo de formación del suelo, se debe tener en cuenta los **coloides**, dentro de los coloides del suelo se pueden distinguir dos grandes grupos según su carga.

- En primer lugar están los coloides electropositivos o **basoides** que están representados por los óxidos de hierro y aluminio, más o menos hidratados, que se comportan como bases débiles y se encuentran dispersos en medio ácido y coagulados en medio alcalino.
- En segundo lugar están los coloides electronegativos o **acidoides**, cargados negativamente y que son los más abundantes en el suelo. Están representados por los minerales arcillosos, los complejos ferro-silícicos y las sustancias húmicas. Se comportan como ácidos débiles y se encuentran dispersos en medio alcalino y floculan en medio ácido. Dentro de estos últimos las arcillas se comportan como hidrófobas y se hallan rodeadas de una delgada capa de agua, mientras que las sustancias húmicas son hidrófilas y presentan una gruesa capa de agua.
- Existen también una serie de coloides que son **anfóteros** y cambian de signo según que el pH esté por encima o por debajo de su punto isoeléctrico. La caolinita que sería un coloide electronegativo, se hace electropositivo cuando el pH está por debajo de cuatro aproximadamente.

El modo en el cual se disponen las partículas terrosas, estando en contacto entre ellas, determina la estructura del suelo. La estructura del suelo es una propiedad que está mudando continuamente, en función de un complejo de factores físicos, químicos y biológicos.

Se considera el suelo como un sistema multifase formado por:

- **fase sólida**, que constituyen el esqueleto de la estructura del suelo.
- **fase líquida** (generalmente agua).
- **fase gaseosa** (generalmente aire) que ocupan los intersticios entre los sólidos.

Pueden distinguirse tres grupos de parámetros que permiten definir el comportamiento del suelo ante una acción que en él incide:

- **parámetros de identificación**: granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua).
- **parámetros de estado**: humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes.
- **parámetros estrictamente geomecánicos**: en función de la variación de los parámetros de identificación y de los parámetros de estado varía el comportamiento geomecánico del suelo, definiéndose un segundo orden de parámetros tales como la resistencia al esfuerzo.

cortante, la deformabilidad o la permeabilidad.

De manera genérica, es usual hablar de movimiento de suelos incluyendo en el concepto el trabajo con materiales, como rocas y otros, que sobrepasan la definición formal.

7.9.8.3. Proceso de formación

Según el proceso de formación, el suelo puede ser:

- **Sedimentario.** En este tipo de suelo, las partículas se formaron en un lugar diferente, y fueron transportadas y se depositaron en otro emplazamiento.
- **Residual.** Este suelo se ha formado por la meteorización de las rocas en el mismo local donde ahora se encuentra, con escaso o nulo desplazamiento de las partículas
- **Relleno artificial.** Estos son construidos por el hombre para los más diversos fines.

a) Suelos sedimentarios

El principal modo de formación de los sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas de la superficie terrestre. En general las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización física de la roca, mientras que las partículas arcillosas son formadas por procesos de alteración química de las mismas. La formación de partículas arcillosas a partir de las rocas puede producirse, por combinación de elementos en disolución o por la descomposición química de otros minerales.

Los sedimentos pueden ser transportados por uno de los cinco agentes siguientes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos. La forma de transporte afecta los sedimentos principalmente de dos formas: a) modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución; b) produce una clasificación o graduación de las partículas.

b) Suelos residuales

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan en el sitio en que se van formando. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de la descomposición se produce una acumulación de suelo residual. Entre los factores que influyen en la velocidad de alteración de la naturaleza de los productos de la meteorización están el clima (Temperatura y lluvia), la naturaleza de la roca original, el drenaje y la actividad bacteriana. El perfil de un suelo residual puede dividirse en tres zonas:

- a) la zona superior, en la que existe un elevado grado de meteorización, pero también cierto arrastre de materiales;
- b) la zona intermedia en cuya parte superior existe una cierta meteorización, pero también cierto grado de deposición hacia la parte inferior de la misma; y,
- c) la zona parcialmente meteorizada que sirve de transición del suelo residual a la roca original inalterada.

La temperatura y otros factores han favorecido el desarrollo de espesores importantes de suelos residuales en muchas partes del mundo.

7.9.8.4. Horizontes del suelo

Se llama horizonte, a un nivel en el perfil edáfico, más o menos paralelo a la superficie, con unas características edáficas (*propiedades físicas, químicas y composición*), que le hacen diferente a los niveles adyacentes. En general la diferenciación de horizontes se hace más patente a medida que se progresa en la evolución del suelo. Los horizontes se clasifican según sus propiedades cualitativas y cuantitativas. Cuando se consideran las propiedades cualitativas, se habla de horizontes genéticos.

- **Horizonte H**, está formado por acumulación "in situ" de material orgánico depositado en la superficie, que está saturado de agua durante periodos prolongados y que contiene 30% o más, de materia orgánica.
- **Horizonte O**, está formado por acumulaciones de material orgánico depositados sobre la superficie, que sólo está saturado de agua unos pocos días al año y que contiene 35%, o más de materia orgánica. La materia orgánica se encuentra poco o nada transformada, siendo claramente visible la organización biológica de los restos. Es un horizonte típico de los suelos de bosque.
- **Horizonte A**, es un horizonte de mineral oscurecido, formado por la incorporación de materia orgánica bien descompuesta y distribuida como partículas finas, constituyendo lo que se llama humus. Su contenido en materia orgánica es menor que el que se encuentra en los dos horizontes anteriores. Se halla en la parte superior del suelo o por debajo del horizonte O.

- **Horizonte E**, son horizontes eluviales que, generalmente están debajo de un horizonte A, del que normalmente se diferencian por un contenido más bajo en materia orgánica y un color más claro. Son horizontes minerales empobrecidos por estar sometidos a la eluviación máxima, están enriquecidos relativamente en limos y en arenas y son pobres en materia orgánica, hierro, aluminio o arcillas.
- **Horizonte B**, horizonte *iluvial* o de acumulación, es un horizonte mineral en el cuál la estructura de la roca está destruida o sólo queda débilmente manifiesta. Está formado por el aporte de materiales desde los horizontes A o C, o alteración del material "in situ". Puede incluir costras minerales calcáreas, férricas o de otra composición. Es el que presenta características más diversas.
- **Horizonte C**, es un horizonte mineral de roca no consolidada, poco afectada por los cambios edafogénicos, excepto por la meteorización y el hidromorfismo y que comparte alguna de sus propiedades con las de horizontes superiores. El horizonte C también es llamado material parental y se extiende en profundidad hasta la roca consolidada, la cual es denominada horizonte R.
- **Horizonte R** esta compuesto por la roca madre, es lo suficientemente coherente para no poder romperse con la mano y no se deshace con el agua.

En base al horizonte, al desarrollo del perfil, la naturaleza de la evolución y el tipo de humus, existen básicamente tres tipos de suelos:

- **No evolucionados**; estos son suelos brutos muy próximos a la roca madre. Apenas tienen aporte de materia orgánica y carecen de horizonte B
- **Poco evolucionados**; los suelos poco evolucionados dependen en gran medida de la naturaleza de la roca madre.
- **Evolucionados**; estos son los suelos que tienen perfectamente formados los tres horizontes. se encuentra en ellos todo tipo de humus, y tienen cierta independencia de la roca madre.

7.9.8.5. Factores que influyen en la resistividad del terreno

Si bien los componentes más importantes del terreno son, en estado seco, aislantes (sílice, óxido de aluminio, etc.), su resistividad disminuye drásticamente en presencia de sales solubles y humedad.

Por otro lado, la composición de la tierra, incluso en un lugar determinado, es muy heterogénea, presentándose capas, bolsas, depósitos, etc. Tanto horizontal como verticalmente. Las zonas superficiales en que se instalan las tomas de tierra tampoco son uniformes y, además, están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del terreno:

- La composición.
- Las sales solubles y su concentración.
- El estado higrométrico.
- La temperatura.
- La granulometría
- La compacidad.
- La estratigrafía

Composición del terreno

La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Sucede, incluso, que para una misma clase de terreno, situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente.

Los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de $\Omega \cdot m$, para terrenos orgánicos y húmedos a una decena de miles de $\Omega \cdot m$ para granitos secos.

Sales solubles y su concentración

Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductividad del suelo es, esencialmente de naturaleza electrolítica, esto es, la conducción de corriente tiene lugar, principalmente, a través del electrolito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno. Naturalmente, diferentes sales dan diferentes resistividades en la misma concentración.

Estado higrométrico del terreno

El contenido de agua o grado de humedad del terreno influye, de forma apreciable sobre su resistividad. Su valor no es constante, ya que varía con el clima, época del año, naturaleza del subsuelo, la profundidad considerada y la situación del nivel freático pero rara vez es nulo, incluso al referirse a zonas desérticas.

A medida que el grado de humedad aumenta (cuyo principal efecto es disolver las sales solubles), la resistividad disminuye con rapidez, pero a partir de cifras del orden de 15% en peso, esta disminución es mucho menos acusada, a causa de la práctica saturación del terreno.

Temperatura

La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se acusa mucho al alcanzarse los 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos, elevándose ostensiblemente la misma.

Granulometría

Es un factor importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de ésta supere al de la arcilla.

Los suelos de grano grueso se prestan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede paliar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.

Compacidad

La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste. Por tanto convendrá colocar los electrodos en las zonas más compactas. Una mayor compactación disminuye la distancia entre partículas y se logra una mejor conducción a través del líquido contenido. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor acercamiento entre éstas no influye en la conducción. Esta está determinada esencialmente por las características del material y agua contenida.

Estratigrafía

La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o el nivel freático.

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo o de la humedad. Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

Será, por tanto, prudente tener en cuenta esas variaciones de resistividad en el establecimiento de una red de tierras enterrada en una profundidad del orden de 1m.

Puede concluirse en que claramente se ve que la resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.

7.9.8.6. La resistividad eléctrica del suelo

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad s como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la resistencia eléctrica viene dada por la expresión (7.14).

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (7.14)$$

A partir de la ecuación (7.14), se puede despejar la resistividad (ecuación 7.15).

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (7.15)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio por metro ($\Omega \cdot m$). La conductividad se define como el inverso de la resistividad (7.16).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (7.16)$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S). La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad o presión.

Estrictamente hablando todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los cuerpos con conductividad iónica se conocen como electrolitos si no presentan forma gaseosa.

El mecanismo de la conductividad de los metales puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que éstos forman, sin vinculación a ninguno determinado. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número redundan en una conductividad muy elevada. Su resistencia aumenta con la temperatura y con el contenido de impurezas. La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre 10^{-8} y $10^{-7} \Omega m$.

Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que posean conductividad metálica. Entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño) y quizá algún mineral poco abundante como la ullmanita (NiSbS).

Los minerales semiconductores son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo. Además su conductividad aumenta con la temperatura. Por ello, no cabe esperar que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda representarse por un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios. En general los telururos y los arseniuros son conductores muy buenos. Los sulfuros suelen entrar también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio. Los óxidos, y los compuestos de antimonio suelen ser malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no suelen aparecer en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones, y junto con un material aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo que la resistividad conjunta del terreno puede variar mucho de unos casos a otros.

En los cuerpos dieléctricos o aislantes, los electrones están fuertemente ligados a los átomos. Esto puede deberse a que existan enlaces covalentes o iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrolito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas. Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo, las micas y el petróleo entre otros. Entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aislantes si no fuera por la presencia de electrolitos.

El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos $10^5 \Omega \cdot m$ por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl. Así las aguas de lagos y arroyos de alta montaña varían entre $10^3 \Omega \cdot m$ y $3 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$ y las aguas marinas tienen una resistividad de unos $0,2 \Omega \cdot m$.

Tabla 7.8. Resistividades típicas del agua

Tipo de agua	Resistividad [$\Omega \cdot m$]
Agua de origen meteórico	30 -1000
Agua superficial – rocas ígneas	30 - 500
Agua superficial – rocas metamórficas	10 -100
Agua subterránea – rocas ígneas	30 – 150
Agua subterránea – rocas sedimentarias	> 1
Agua de mar	> 0,2
Agua potable	> 1,8
Agua de irrigación	> 0,7

Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas.

Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. La resistividad de las rocas puede variar en margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros.

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen altos valores de resistividad. La resistividad de estas rocas depende mucho del grado de fracturación que posee, y el porcentaje de agua que rellena las fracturas del terreno.

Las rocas sedimentarias comúnmente son más porosas y tienen un alto contenido de agua, lo que normalmente hace disminuir los valores de resistividad.

Los suelos mojados y el agua fresca del terreno tienen aun más bajos valores de resistividad. Los suelos arcillosos normalmente tienen valores de resistividad más bajos que el suelo arenoso. Sin embargo, se destaca que existe una superposición en los valores de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos. Esto es debido a que la resistividad de un muestreo particular del suelo o roca depende de un número de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

Los metales, tal como hierro, tienen valores de resistividad sumamente bajos. Los químicos, tal como sodio y cloruro de potasio, pueden reducir mucho el valor de resistividad del agua del terreno a menos de $1 \Omega \cdot m$ con moderadas concentraciones. El efecto de electrolitos, tal como el ácido acético, es comparativamente menor. Los compuestos de hidrocarburos sin degradar típicamente tienen valores muy altos de resistividad, entre 100 a 10000 $\Omega \cdot m$, o como el xileno con un valor superior a los 100.000 $\Omega \cdot m$, generando anomalías notables en el medio receptor.

La resistividad de las rocas también depende de la temperatura a la que se encuentre ya que la temperatura influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros. En concreto, un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico mal conductor.

Por último, cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que estos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan **anisotropía**. La formación de estratos puede producir anisotropía. Tal es el caso de las rocas sedimentarias. En general este efecto será débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en la roca.

El suelo es una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos. Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo.

De entre todos los factores, la humedad es el más importante. Además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo.

Una limitación del método resistivo es su alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la conductividad cerca de la superficie, debido por ejemplo al contenido de humedad. Hablando en términos electrónicos, el nivel de ruido es alto. Una topografía accidentada puede tener un efecto similar, ya que el flujo de corriente se concentra en los valles y se dispersa en las colinas. Como resultado se distorsionan las superficies equipotenciales produciendo falsas anomalías debido solo a la topografía.

Las prospecciones geoelectricas se dividen normalmente en dos tipos: SEV y CE. El SEV tiene como objetivo determinar la variación de la resistividad con la profundidad, lo que es adecuado, por ejemplo, en la determinación de las diferentes capas o estratos de un suelo. La CE trata de determinar la variación de la resistividad a una profundidad determinada y se utiliza por ejemplo en prospecciones arqueológicas.

La resistividad de los suelos tiene un margen de variación muy amplio. Incluso un mismo suelo puede presentar diferentes resistividades con el tiempo dependiendo de factores como la temperatura o la humedad, siendo éste el más determinante. Por lo tanto es difícil estimar la composición del subsuelo solamente a partir de la medida de resistividad.

La medida de la resistividad aparente se realiza normalmente mediante cuatro electrodos, dos para inyectar la corriente y otros dos para medir la diferencia de potencial. Los dispositivos lineales más utilizados son: Wenner, Schlumberger, doble dipolo, polo-dipolo y polo-polo.

En las siguientes tablas (7.9, 7.10 y 7.11) se pueden ver las distintas resistividades según:

- Los distintos tipos de terreno:

Tabla 7.9. Resistividad media del suelo en función del tipo de terreno

Tipo de terreno	Resistividad media [$\Omega \cdot m$]
Suelo orgánico mojado	10
Suelo mojado	100
Suelo seco	1000
Suelo rocoso	10000

- La naturaleza de los suelos:

Tabla 7.10. Resistividad del terreno en función de su naturaleza

Naturaleza del terreno	Resistividad media [$\Omega \cdot m$]
Terrenos cultivables y fértiles	50
Terraplenes compactos y húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles	500
Suelos pedregosos desnudos, arena seca permeable	3000
Suelos rocosos fraccionados	6000
Suelos rocosos fraccionados	14000
Terrenos pantanosos	1 – 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000
Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1.500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2.000 a 3.000
Balasto o grava	3.000 a 5.000

- Los materiales de los que se componen los suelos:

Tabla 7.11. Resistividad del terreno en función del material de composición

Materiales	Resistividad media [$\Omega \cdot m$]
Sal gema	10^{13}
Cuarzo	10^9
Arenisca, guijarros de río, piedra triturada	10^7
Granitos compactos	$10^6 - 10^7$
Rocas compactas, cemento ordinario, esquistos	10^6
Carbón	$10^5 - 10^6$
Rocas madres, basaltos, diabases, cascajos y granitos antiguos (secos)	10^4
Guijarros de río y cascajo piedra triturada húmedos	5×10^3
Terrenos rocosos, calizas (jurásico) secos	3×10^3

Granitos antiguos (húmedos)	$1,5 \text{ a } 2 \times 10^3$
Yeso seco	10^3
Arena fina y guijarros (secos)	10^3
Grava y arena gruesa (seca)	$10^2 - 10^3$
Arena arcillosa, grava y arena gruesa húmeda	5×10^2
Suelos calcáreos y rocas aluvionarias	$3 \text{ a } 4 \times 10^2$
Tierra arenosa con humedad	2×10^2
Barro arenoso	$1,5 \times 10^2$
Margas turbas, humus muy secos	10^2
Margas y humus secos	50
Arcillas (secas)	30
Margas, arcillas y humus húmedos	10
Arcilla ferrosas, piritosas	10
Esquistos gráficas (húmedos y secos)	Menos de 5
Agua de mar	1
Soluciones salinas	0,1 - 0,001
Minerales conductores	0,01
Grafitos	0,0001

7.9.8.7 Medida de la resistividad eléctrica del suelo

Como se indicó anteriormente, la propiedad del suelo más influyente tanto en las tomas a tierra como en las prospecciones geofísicas, será la resistividad eléctrica del terreno. Su medición tiene como finalidad detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo.

El método más extendido consiste en la inyección de corriente continua, o de baja frecuencia, en el terreno mediante un par de electrodos y medir la tensión que aparece entre dos sondas de potencial colocadas en el interior de la zona de inyección de la corriente. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada.

Para estudiar los fenómenos electromagnéticos en el subsuelo, ocasionados por la derivación de corrientes eléctricas a través del sistema de puesta a tierra, es necesario determinar los parámetros electromagnéticos del terreno. Obtener estos valores no es una tarea fácil, debido a que los parámetros que rigen el comportamiento electromagnético del subsuelo dependen de variables ya comentadas tales como la temperatura, la humedad, la composición química, el grado de impurezas, etc. Además, el terreno muy pocas veces es uniforme y, en general, se presenta en estratos compuestos por diferentes materiales con características propias y diferentes.

La resistividad del terreno puede variar para terrenos comunes en cuatro órdenes de magnitud, desde aproximadamente $1 \Omega \cdot m$ a más de $10.000 \Omega \cdot m$. La gran variabilidad de la resistividad del subsuelo hace necesario la medición de este parámetro directamente en el terreno. A partir de las medidas se pueden construir modelos en capas que son utilizados por los geólogos para determinar la estructura y los minerales que contiene el terreno. Estas técnicas permiten obtener modelos del subsuelo que puede utilizarse posteriormente para el diseño y evaluación de redes de puesta a tierra o retornos conductivos para los sistemas en corriente alterna.

Es importante para la precisión de la medida que las dimensiones físicas de los electrodos utilizados en la determinación de la resistividad sean pequeñas comparadas con las distancias de separación entre ellos. La distancia de separación entre los electrodos depende de la amplitud de la zona en la cual se desea medir la resistividad. Si el subsuelo es uniforme, la resistividad medida es independiente de la separación de los electrodos utilizada en el ensayo. Sin embargo, en condiciones reales, a medida que aumenta la separación entre los electrodos las características del terreno varían y es habitual que la resistividad sea dependiente de la separación de los electrodos. Mediante las técnicas utilizadas en la estimación se puede obtener una estimación paramétrica de las resistividades de todas las capas del modelo del terreno y de sus respectivos espesores.

Para la determinación de la resistividad del terreno, existen varios métodos, de los cuales los más conocidos son el método de Wenner y el método del sistema simétrico, los cuales se describen a continuación.

Método de Wenner

Es el método más difundido para medir la resistividad del subsuelo es el de Wenner, conocido también como el método de los cuatro electrodos, el cual fue desarrollado por Frank Wenner del U.S. Bureau Of Standards en 1915, (F. Wenner, "A Method of Measuring Earth Resistivity"; Bull, National Bureau of

Standards, Bull 12(4) 258, pp 478-496, 1915/16). En la aplicación práctica de este método, los electrodos de inyección de corriente y de medición de potencial se colocan alineados y equidistantes, siempre en el interior se colocan los electrodos de potencial, P_1 y P_2 , separados una distancia a , y en el exterior se colocan los de inyección de corriente, C_1 y C_2 , separados una distancia $3a$ entre ellos como se muestra en la figura (7.22). Todos los electrodos se colocan a la misma profundidad, b , la cual no debe exceder un décimo de la distancia a .

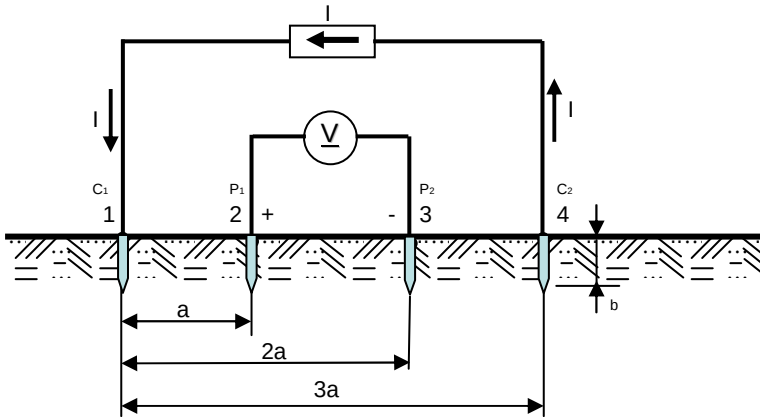


Figura 7.22a. Método de Wenner para la determinación de la resistividad del terreno



Figura 7.22b. Telurómetro para medir la resistencia de puesta a tierra y la resistividad por el método de Wenner

El método consiste en inyectar una corriente conocida a través de los electrodos de ensayo C_1 y C_2 y medir la diferencia de potencial, V_{23} , entre los electrodos P_1 y P_2 . La resistividad del terreno viene dada entonces por la expresión (7.17a), si se considera el valor de la tensión V_{23} y de la corriente inyectada I , o bien por la expresión (7.17b), si se utiliza directamente la lectura del telurómetro.

$$\rho = 2\pi a \frac{V_{23}}{I} \quad (7.17a)$$

Donde:

ρ = Resistividad promedio a la profundidad b en Ohmios-metro

a = Distancia entre los electrodos en metros

V_{23} = Diferencia de potencial entre los electrodos P_1 y P_2 (puntos 2 y 3) en voltios

I = Intensidad de la corriente que se inyecta en amperios

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{(a^2 + 4b^2)^{0,5}} - \frac{2a}{(4a^2 + 4b^2)^{0,5}}} \quad (7.17b)$$

Donde:

ρ = Resistividad promedio a la profundidad b en Ohmios-metro

a = Distancia entre los electrodos en metros

b = Profundidad de enterrado de los electrodos en metros

R = Lectura del telurómetro en Ohmios

Como los resultados de la medida se pueden ver afectados por posibles materiales metálicos enterrados, es conveniente realizar el experimento varias veces cambiando el eje de los electrodos 90° y la profundidad y distancia entre los mismos, con el objetivo de obtener un valor de resistividad lo más aproximado posible al valor real y con ello optimizar el diseño de la puesta a tierra.

Cuando se aplica el método de Wenner para el cálculo de la resistividad de un terreno no uniforme, los valores de resistividad obtenidos se denominan resistividades aparentes. La resistividad aparente del subsuelo permite identificar el número de capas, el espesor de cada capa y sus resistividades respectivas.

Método del Sistema Simétrico

Es una variante del método de Wenner que se utiliza cuando los electrodos de prueba no pueden introducirse a intervalos regulares. Para aplicar este método se utilizan dos electrodos de corriente y dos de potencial que se conectan al equipo de medición.

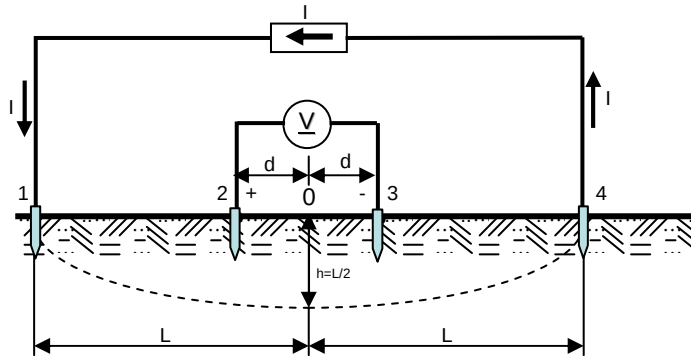


Figura 7.23. Método del sistema simétrico para la determinación de la resistividad del terreno.

Los cuatro electrodos de prueba se colocan simétricos con respecto a un punto O que se sitúa en el centro de la medición. El valor de la resistividad será la del estrato de terreno que está debajo del punto O. La relación entre la distancia de los electrodos de corriente y la profundidad o estrato de terreno a la cual se está midiendo la resistividad aparente, viene dada por la expresión (7.18)

$$h = \frac{L}{2} \quad (7.18)$$

De forma similar a lo que se puede hacer en el método de Wenner, se irán separando los electrodos de corriente, y por lo tanto aumentando la distancia L y así se conocerá el valor de la resistividad a una profundidad h mayor.

El valor de la resistividad aparente se obtiene por medio de la ecuación (7.19).

$$\rho_a = \frac{\pi(L^2 - d^2)}{2d^2} R \quad (7.19)$$

Donde L y d son las distancias que vienen reflejadas en la figura 7.23., expresadas en metros y R es la lectura del telurómetro en Ohmios.

Existen varios métodos para realizar la medición de la resistencia de tierra. De forma práctica, se puede utilizar para la medida el telurómetro y el medidor de resistencias de bucle.

Los **telurómetros**, son equipos portátiles que miden la resistencia de puesta a tierra y la resistividad por el método de Wenner.

- El instrumento puede medir resistencia y resistividad con 2, 3 ó 4 electrodos.
- El equipo se puede alimentar con pilas estándar tipo C o con baterías.
- Las medidas pueden simplificarse usando pinzas de corriente.

Método Voltio Amperimétrico utilizando el clásico medidor de tierra, o telurómetro, se clavan dos picas auxiliares en el terreno en línea recta a una distancia comprendida entre 5 y diez metros.

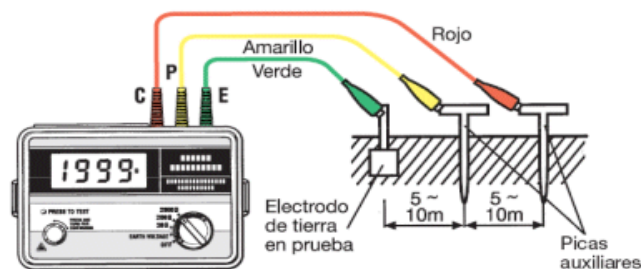


Figura 7.24. Sistema de medida voltio amperimétrico

Método Resistencia del Bucle de Fallo (Medidor de Bucle). La UNE 29460-6 describe un método seguro y fácil para comprobar la resistencia de tierra cuando, en un sistema TT, la ubicación de la instalación (p.ej. en ciudades) no permite clavar las picas auxiliares. Este método consiste en medir la resistencia del bucle de fallo con un medidor de Bucle que, en sistemas TT, permite en la práctica proporcionar el valor de la resistencia de tierra.

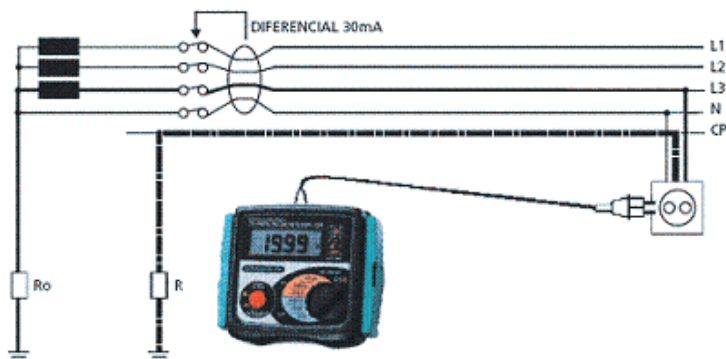


Figura 7.25. Sistema de medida de bucle de fallo

7.9.8.8. Resistividad aparente de terrenos estratificados

Uno de los usos más importantes de las medidas de resistividad en suelos bi-estratificados, es que mediante ellas se pueden determinar la profundidad de la superficie de la primera capa, su densidad real, y su factor de reflexión, así como también características de la capa siguiente, de esta forma es posible modelar los suelos de acuerdo a sus características eléctricas. Como resultado, se ha prestado una atención considerable a la interpretación de lo que es conocido como las curvas de profundidad. Si es usada la configuración de Wenner, cuatro electrodos igualmente espaciados, y mediante estas se realizan diferentes medidas variando la separación de los electrodos, es posible graficar las resistividades resultantes vs la separación de los electrodos, teniendo como consecuencia una curva de profundidad.

Desde la primera aparición de la inspección de la resistividad la interpretación de tales curvas ha sido una cuestión de gran preocupación y controversia para algunos investigadores, lo que hace este estudio un problema de gran envergadura.

Los métodos de interpretación que han sido desarrollados pueden ser aproximadamente divididos en dos grupos. El primero de estos es netamente empírico y basado en la experiencia. El segundo consiste en un cierto número de métodos que son basados en las teorías y cálculos de varios autores.

Método Empírico

Debido a que el estudio de los suelos puede resultar bastante complejo, representando una meta de gran envergadura para los profesionales del campo, muchos expertos prefieren basarse en la experiencia; por tanto han desarrollado técnicas no muy precisas, con la salvedad de que en muchos casos sobredimensionan los sistemas de puesta a tierra y por ende llegan a resultados favorables, que se ven contrarrestados por la inversión económica que se debe realizar. La experiencia de campo tiene muchos métodos, que se basan en las medidas de resistividad del terreno donde se va a ubicar el sistema. El primero de los métodos a mencionar consiste en tomar las medidas de campo del terreno en estudio, y llevarlas a una grafica, la cual se denomina curva de resistividad aparente o curva de profundidad. Dado a que el método de medida de resistividad comúnmente usado es el método de Wenner, es preciso representar gráficamente las medidas de las resistividades obtenidas en función de la separación de los electrodos. Ver figura 7.26.

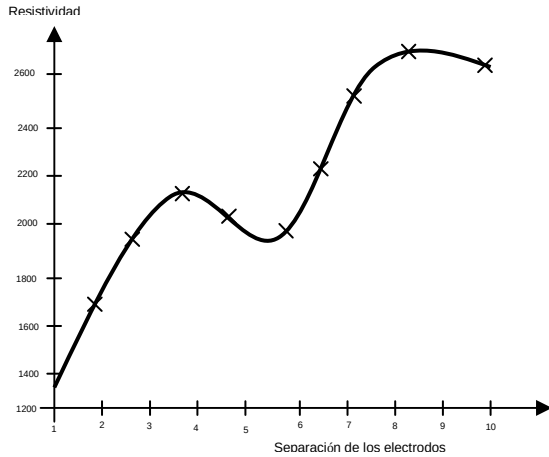


Figura 7.26. Curva de Resistividad Aparente

El método que mayormente se usa en la práctica, es el de realizar un promedio de las medidas tomadas en el terreno, y asumir que el suelo es homogéneo, aunque los resultados generalmente sean favorables, no conllevan a la mejor solución económica ya que cuando se aplica este método, el diseñador se ve obligado a sobredimensionar el sistema de manera tal de que se cumpla con los objetivos propuestos. Cuando los estudios del suelo, arrojan valores altamente críticos, es decir valores de resistividad mayores a 3000 Ω -m la práctica conlleva a introducir barras a libre albedrío hasta que se tenga una resistencia de puesta a tierra favorable para el cliente.

Métodos Directos basados en teorías y cálculos

Son más confiables con respecto a los métodos anteriormente presentados. La mayor dificultad que presentan es que la teoría supone condiciones ideales, tales como, suelos con capas isotrópicas uniformes con interfaces paralelas a la superficie. Sin embargo tales condiciones ideal no suelen encontrarse en la práctica y ello puede provocar que aparezcan algunos errores e inconsistencias, no obstante es posible obtener resultados útiles para las diferentes aplicaciones.

La función de resistividad aparente para un terreno bi-estratificado, en función de las resistividades de las dos capas del subsuelo ρ_1 y ρ_2 , la profundidad de la primera capa h y la separación a de los electrodos en las medidas de Wenner. Esta función viene dada por la expresión (7.20).

$$\rho_a(\rho_1, \rho_2, h, a) = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (7.20)$$

donde k es el coeficiente de reflexión entre los medios que se define de acuerdo con la expresión (7.21).

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (7.21)$$

Para determinar la resistividad aparente en un terreno con varios estratos horizontales, se plantea la solución general del problema en cada una de las capas con diferente resistividad. Se establecen dos condiciones de contorno por cada superficie de separación entre capas, una para el potencial y otra para la densidad de corriente normal a la superficie.

Así, para un terreno de p estratos se tienen $2p$ condiciones de contorno. Si se considera el aire como un medio más, existen $p+1$ zonas para el cálculo de potenciales y un número igual de soluciones generales, cada una con dos funciones indeterminadas que es necesario calcular. En definitiva se tienen $2(p+1)$ funciones indeterminadas, $2p$ ecuaciones de contorno y dos condiciones para garantizar que el potencial en el infinito es nulo.

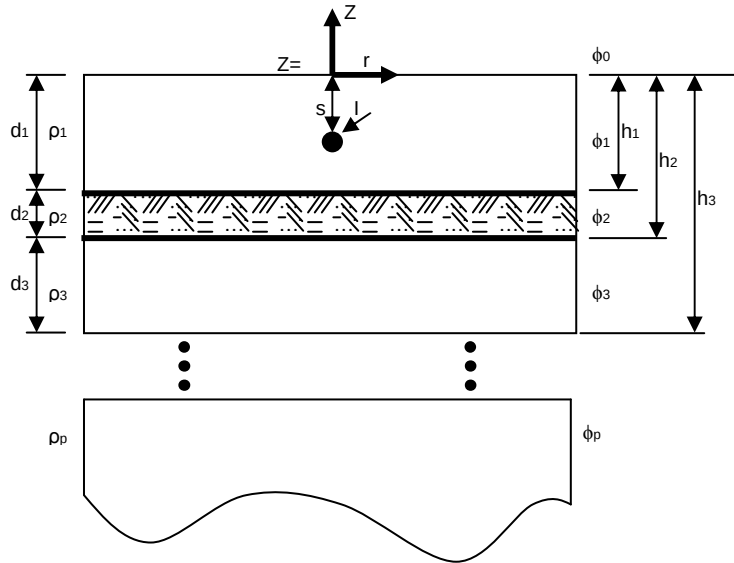


Figura 7.27. Modelo multiestratificado para el terreno.

Las soluciones generales para los potenciales, son (ecuaciones 7.22 y 7.23):

$$\Phi(z, r) = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \int_0^\infty \left(e^{-m|z+s|} + f_1(m)e^{-mz} + g_1(m)e^{mz} \right) J_0(mr) dm; 0 < z < -h_1 \quad (7.22)$$

$$\Phi_k(z, r) = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \int_0^\infty \left(f_k(m)e^{-mz} + g_k(m)e^{mz} \right) J_0(mr) dm; -h_{k-1} < z < -h_k; k \neq 1 \quad (7.23)$$

Donde las funciones $J_0(mr)$ son las funciones especiales de Bessel de orden 0.

La ecuación 7.22 se aplica para el cálculo del potencial en el primer estrato y la ecuación 7.23 se aplica para el cálculo del potencial en los demás k-1 estratos.

Las funciones $f_i(m)$ y $g_i(m)$ se pueden calcular aplicando las condiciones de contorno necesarias que han de igualar los potenciales calculados para un índice k y para un índice k+1, de entre los p estratos considerados, sobre la frontera que separa los dos estratos. Estas condiciones de contorno están expresadas en la ecuación (7.24).

$$\Phi_k(-h_k, r) = \Phi_{k+1}(-h_k, r); \forall k = 0, 1, 2, \dots, p-1 \quad (7.24)$$

La resolución de los sistemas de ecuaciones necesarios para la evaluación de la resistividad aparente del terreno ha de hacerse por métodos de integración numérica ya que no existen soluciones analíticas conocidas. Existen varios programas de cálculo numérico que permiten la evaluación de la resistividad aparente de terrenos multiestratificados.

La resistividad aparente del un terreno multiestratificado se puede calcular de una manera aproximada usando el método de Wenner para la medición de la resistividad como (ecuación 7.25):

$$\rho_a = \rho_1 \left[1 + 4a \int_0^{m_{\max}} \frac{P_{12}(m)}{P_{22}(m) - P_{12}(m)} (J_0(ma) - J_0(2ma)) dm \right] \quad (7.25)$$

Las funciones P_{12} y P_{22} se obtienen de la segunda columna de la matriz definida en la ecuación (7.26) que es resultante de un producto de matrices obtenidas de aplicar las condiciones de contorno señaladas al sistema de ecuaciones (7.22) y (7.23).

$$P = \prod_{k=1}^{p-1} \frac{1}{1 + k_k} \begin{pmatrix} 1 & k_k e^{-2mh_k} \\ k_k e^{-2mh_k} & 1 \end{pmatrix} \quad (7.26)$$

7.9.9. Resistencia de Puesta a Tierra de una Malla

Para el cálculo de la resistencia de la malla a tierra existen diversos métodos que, dependiendo de ciertas condiciones, pueden dar de una manera aproximada un valor cercano al real de la malla de tierra.

Un método simple empleado por Laurent y Nieman, el cual es recomendado por el estándar 80 de la IEEE, utiliza para este cálculo una modificación de la ecuación del electrodo en forma de plato circular, sumándole un segundo término, quedando la expresión de la resistencia de la malla de la siguiente manera (ecuación 7.27):

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (7.27)$$

Donde:

R = Resistencia de la malla, en Ω .

ρ = Resistividad promedio del suelo, en Ω -m.

L = Longitud total del conductor enterrado, en m.

r = Radio de un círculo con igual área que es ocupada por la instalación de puesta a tierra

El segundo término de la expresión indica que la resistencia de una malla es mayor que la de un plato sólido, y que esta diferencia decrece cuando la longitud del conductor aumenta.

Sin embargo, la resistencia de la malla de tierra determinada mediante la expresión (7.27) es una aproximación bastante general puesto que no toma en cuenta factores como por ejemplo la longitud efectiva del conductor de la malla de tierra que esta en existencia actualmente, por tanto para la determinación de la resistencia de la malla de tierra de una subestación cuando no se conoce de la existencia de electrodos o varillas de tierra y para mallas enterradas a una profundidad de entre 0,25 y 2,5 m; es necesario que se tome en cuenta un factor por la profundidad de enterramiento de la malla lo cual influirá directamente en su resistencia de tierra, la utilización de este factor y de otros parámetros que influyen directamente sobre la resistencia de la malla lleva a la utilización de la aproximación de Sverak's para la determinación de la resistencia de la malla de tierra de una subestación (recomendada por la IEEE) y la ecuación a utilizar es entonces la (7.28).

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (7.28)$$

Donde:

R_G = Resistencia de la malla de tierra del área de la S/E, en Ω .

ρ = Resistencia aparente del terreno de la subestación, en Ω .m.

L = Longitud efectiva del conductor de la malla de la subestación (medido directamente en el plano de la malla de tierra existente actualmente que se desea medir, en m.).

A = Área cubierta por la malla de tierra que se desea medir, en m².

h = Profundidad de la malla de tierra, en m.

Otro método para determinar y evaluar el estado de una malla de tierra, cuando se conoce la presencia de electrodos o varillas de tierra es empleando el método de Schwarz, que se basa en la expresión (7.29).

$$R = \frac{R_{11} \cdot R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}} \quad (7.29)$$

Donde:

R = Resistencia de la malla de tierra.

R_{11} = Resistencia de los conductores de la malla de tierra.

R_{22} = Resistencia de todas las barras enterradas.

R_{12} = Resistencia mutua entre el grupo de electrodos y los conductores de la malla.

Cada uno de los parámetros involucrados en la expresión (7.29), se calculan de la siguiente manera (Expresiones 7.30, 7.31 y 7.32):

$$R_{11} = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(2 \frac{L_c}{\sqrt{d \cdot h}} \right) + \left(K_1 \frac{L_c}{\sqrt{A}} \right) - (K_2) \right] \quad (7.30)$$

$$R_{22} = \frac{\rho}{2\pi \cdot n_b \cdot L_b} \left[\ln \left(8 \frac{L_b}{d_b} \right) - 1 + \left(\frac{2K_1 \cdot L_b}{\sqrt{A}} \right) (\sqrt{n_b} - 1)^2 \right] \quad (7.31)$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi \cdot L_c} \left[\ln \left(2 \frac{L_c}{d} \right) + \left(K_1 \frac{L_c}{\sqrt{A}} \right) - (K_2) + 1 \right] \quad (7.32)$$

Donde:

L_b = Longitud de las barras

L_c = Longitud de los conductores de la malla.

d = Diámetro de los conductores.

d_b = Diámetro de las barras.

h = Profundidad de la malla

n_b = Número de barras.

A = Área cubierta por la malla.

K_1 y K_2 = Son constantes que dependen de la relación largo y ancho de la malla, de la profundidad h , y en general puede asumirse que sus valores son aproximadamente $K_1 = 1.4$ y $K_2 = 5.6$.

7.9.9.1. Calculo para la Sección del Conductor de la Malla de Tierra

Los conductores de la malla de tierra deben diseñarse de manera que:

- Resistan la fusión y el deterioro de las juntas eléctricas bajo las más adversas combinaciones de magnitud y duración de las corrientes de falla.
- Sean mecánicamente resistentes, especialmente en aquellos sitios expuestos a grandes esfuerzos físicos.
- Tengan suficiente conductividad, de manera que no contribuyan substancialmente a diferencias locales de potenciales peligrosos.

El conductor de cobre adecuado para la malla de tierra, se puede obtener a partir de la expresión (7.33) desarrollada por Onderdonk y recomendada por la IEEE en su publicación Std. 80 de 1986:

$$A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{33S} \right) \log_{10} \left(1 + \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} \right)}} \quad (7.33)$$

Donde:

A = Sección del conductor.

I = Corriente RMS de cortocircuito (A).

S = Tiempo en segundos, durante el cual la corriente I es aplicada. Es el mismo tiempo de despeje de la falta.

T_a = Temperatura ambiente en grados centígrados (usualmente se usa 40°C).

T_m = Temperatura máxima permisible, en grados centígrados (usualmente se usa 450°C para uniones de fusión y 250°C para uniones apernadas)

En donde:

$$S = T_{or} + T_{oi} \quad (7.34)$$

Donde:

T_{or} = Tiempo de operación del relé de tierra (s).

T_{oi} = Tiempo de operación del interruptor (s).

Generalmente, a nivel práctico la resistencia mecánica fija una sección mínima.

7.9.10. Instalaciones de puesta a tierra. Cálculos

La puesta a tierra es la unión eléctrica directa, sin fusibles ni protección alguna, de una parte del circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo mediante una toma de tierra con un electrodo o con un grupo de electrodos enterrados en el suelo.

Mediante la instalación de la puesta a tierra se deberá conseguir que en el conjunto de instalaciones y la superficie próxima del terreno no aparezcan diferencias de potencial peligrosas y que, al mismo tiempo, se permita el paso a tierra de las corrientes de defecto o las de descarga de tipo atmosférico.

Para realizar una instalación de puesta a tierra hay que tener en cuenta una serie de prescripciones de seguridad que están relacionadas con las máximas tensiones y corrientes a las que puede estar sometido el cuerpo humano con relativa seguridad.

Las manifestaciones fisiológicas y fisiopatológicas debidas al paso de la corriente a través del cuerpo humano han despertado gran interés desde que se comenzó a usar la electricidad y han sido objeto de estudios muy detallados como consecuencia de los accidentes que, desde entonces, han sufrido multitud de personas con resultados muy diversos.

Los efectos que la corriente eléctrica puede tener al atravesar el cuerpo humano dependen de la duración de su paso, la magnitud de la corriente y su frecuencia, callosidad, sexo, estado de la epidermis, peso, altura, estado del punto de contacto a tierra, etc. Se han llevado a cabo un buen número de experimentos para establecer estos efectos y sus umbrales existiendo numerosa bibliografía al respecto. Los efectos van desde un simple cosquilleo, sin otras consecuencias, hasta la muerte del accidentado por parálisis respiratoria o paro cardíaco por fibrilación ventricular.

Se puede decir que los seres humanos somos muy vulnerables al paso de corrientes de 50 ó 60 Hz llegando a ser mortal una corriente de tan sólo 0,1 A. Una corriente continua de una intensidad hasta cinco veces mayor puede ser soportada sin efectos muy peligrosos. Las corrientes soportadas pueden ser incluso mayores a frecuencias de entre 3000 y 10000 Hz.

Los efectos debidos a la magnitud de la intensidad de corriente que atraviesa el cuerpo humano enumerados por orden creciente de las corrientes que los generan son simple percepción, contracciones musculares, pérdida de consciencia, fibrilación ventricular, bloqueo respiratorio y quemaduras.

Se suele situar el umbral de la percepción en una corriente de un 1mA. Corrientes de hasta los 6mA no suprimen el control muscular permitiendo a una persona soltar el conductor. La fibrilación ventricular es producida por corrientes a partir de unos 60 mA. Corrientes de esta magnitud pueden llegar a parar el corazón o a impedir la respiración. Siempre y cuando las corrientes de choque puedan mantenerse por debajo de estos niveles gracias a un sistema de puesta a tierra, los daños severos podrán ser evitados.

Los efectos del paso de corrientes eléctricas de entre 50 y 60 Hz por el cuerpo humano se recogen en la tabla 7.12. y su variación con el tiempo de paso de la corriente están recogidos en la figura 7.32.

Tabla 7.12. Efectos del paso de corrientes de entre 50 y 60 Hz por el cuerpo humano para diferentes intensidades de corriente

Intensidad de corriente [A]	Efecto fisiológico
$I < 0,0001$	Umbral de percepción de la corriente en las manos.
$0,0001 < I < 0,01$	Se percibe el paso de la corriente sin afección a la coordinación muscular.
$0,01 < I < 0,025$	Intensidad de corriente molesta siendo difícil la sujeción del objeto.
$0,025 < I < 0,06$	Intensidad peligrosa produciéndose espasmos musculares y dificultad respiratoria.
$0,06 < I < 0,1$	Intensidad muy peligrosa con fibrilación ventricular, parada cardíaca y fallo respiratorio.

7.9.11. Corrientes máximas aplicables al cuerpo humano

Entre los factores que intervienen en el accidente eléctrico, se pueden citar:

- Valor de la intensidad de la corriente eléctrica
- Valor de la tensión

- Tiempo de paso de la corriente eléctrica
- Valor de la resistencia óhmica que presenta el organismo
- La trayectoria que siga la corriente por el organismo
- Naturaleza de la corriente
- Valor de la frecuencia en el caso de c.a.
- Capacidad de reacción del organismo

De estos factores se destaca el valor de la intensidad de la corriente eléctrica.

En general se puede decir que cuando una corriente eléctrica se deriva por el cuerpo humano, la intensidad de esta corriente viene dada por la Ley de Ohm:

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_t}{\bar{Z}_t + \bar{Z}_r} \quad (7.35)$$

Donde:

U_t = tensión de contacto

Z_t = impedancia total del cuerpo humano

Z_r = impedancia de retorno (circulo exterior al cuerpo).

Impedancia del cuerpo humano

Para una tensión fija con el que el accidentado ha entrado en contacto, el peligro a que se encuentra sometido dependerá esencialmente de la intensidad y duración del paso de la corriente. De acuerdo con la expresión (7.35), la intensidad de la corriente que recorrerá su cuerpo dependerá de la impedancia. Ahora bien, la impedancia que ofrece el cuerpo humano al paso de la corriente no es un valor constante pues varía con la tensión y el tiempo de contacto.

Impedancia interna del cuerpo humano (Z_i): Impedancia entre dos electrodos en contacto con dos partes del cuerpo humano, después de suprimir la piel bajo los electrodos.

Impedancia de la piel (Z_p): Impedancia entre un electrodo sobre la piel y los tejidos conductores subyacentes.

Impedancia total del cuerpo humano (Z_t): Suma vectorial de la impedancia interna y de las impedancias de la piel.

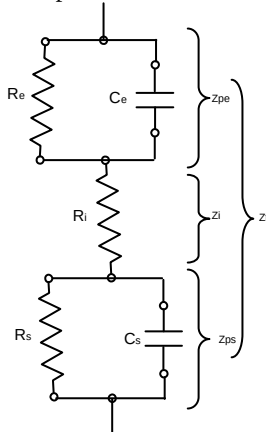


Figura 7.28. Impedancia del cuerpo humano.

$$Z_t = R_i + \frac{R_e}{1 + j\omega C_e R_e} + \frac{R_s}{1 + j\omega C_s R_s} \quad (7.36)$$

Donde: $R_e = R_{ce} + R_{pe}$ y $R_s = R_{cs} + R_{ps}$

R_{ce} = resistencia de contacto de la piel a la entrada de la corriente en el cuerpo.

R_{pe} = resistencia de la piel a la entrada de la corriente en el cuerpo.

R_e = resistencia a la entrada de la corriente.

C_e = capacidad a la entrada de la corriente en el cuerpo humano

R_i = resistencia interna de los tejidos.

R_{ps} = resistencia de la piel a la salida de la corriente del cuerpo.

R_{cs} = resistencia de contacto de salida.

R_s = resistencia a la salida de la corriente.

C_s = capacidad a la salida de la corriente del cuerpo humano.

R_t = resistencia total del cuerpo humano

C_t = capacidad total del cuerpo humano

Resistencia inicial del cuerpo humano (R_i): Resistencia que limita el valor de cresta de la corriente en el momento en que se aplica la tensión de contacto.

Además, las diferentes partes del organismo (piel, sangre, músculos, otros tejidos, huesos y articulaciones) presentan una cierta impedancia compuesta de elementos resistivos y capacitivos. Por tanto, la impedancia depende del trayecto de la corriente, de la tensión de contacto, de la duración del paso de la corriente, de la frecuencia, del estado de humedad de la piel, de la superficie del contacto, de la presión ejercida y de la temperatura. Ahora bien, mientras que la impedancia de la piel (Z_p) puede considerarse como conjunto de resistencias y capacidades, cuyo valor decrece rápidamente cuando la

corriente aumenta, la impedancia interna (Z_i) es principalmente resistiva. El valor de esta última depende, sobre todo, del trayecto de la corriente y, en menor grado, de la superficie de contacto.

Consecuentemente, la impedancia total del cuerpo humano tiene una componente resistiva y una componente capacitiva.

Para tensiones de contacto de hasta 50V, la impedancia total (Z_t) depende fundamentalmente de la impedancia de la piel que, debido a sus importantes variaciones entre distintas personas, también presenta grandes diferencias. Para tensiones de contacto más elevadas, la impedancia total depende cada vez menos de la impedancia de la piel y su valor se aproxima, después de la perforación de la piel, a de la impedancia interna (Z_i).

Los valores de la impedancia total del cuerpo humano indicados en la tabla 7.13, tomados de la norma UNE 20-572-1, valen para las personas en un trayecto mano a mano o mano a pie, con superficies de contacto importantes (100 cm^2) de piel seca.

Tabla 7.13. Valores de la impedancia total del cuerpo humano.

Tensión de contacto (V)	Valores de impedancia total (Z_t), en Ω , del cuerpo humano que cumplen como mínimo el % de la población		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1001	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
Valor límite	650	750	850

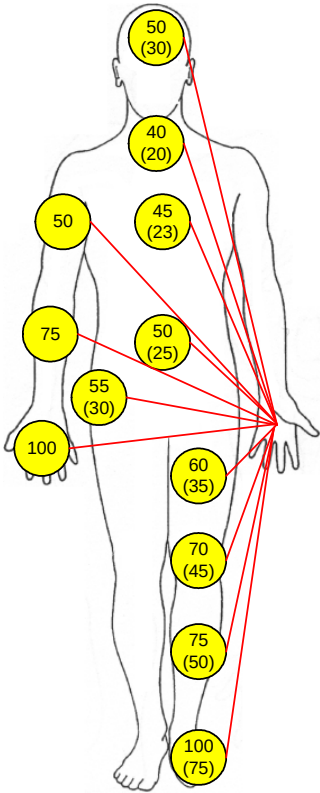


Figura 7.29. Impedancia interna del cuerpo humano (Z_i) en función del trayecto de la corriente (Norma UNE 20-572-92/1).

En la figura 7.29., las cifras indican el porcentaje de la impedancia del cuerpo humano para el trayecto correspondiente con relación a la del trayecto mano a mano.

Las cifras sin paréntesis corresponden al trayecto de una mano a la parte considerada del cuerpo. Las cifras entre paréntesis corresponden al trayecto entre las dos manos y la parte correspondiente del cuerpo.

Notas:

La impedancia entre una mano y los dos pies es igual al 75% y la impedancia entre las dos manos y los dos pies es igual al 50% de la impedancia entre las dos manos.

En primera aproximación, estos valores son igualmente válidos para la impedancia total del cuerpo humano. Para tensiones de contacto de hasta 50V, los valores medidos con superficies de contacto mojadas con agua normal son alrededor de un 25% inferiores y con soluciones conductoras pueden disminuir hasta un 50% respecto a los valores para condiciones de piel seca.

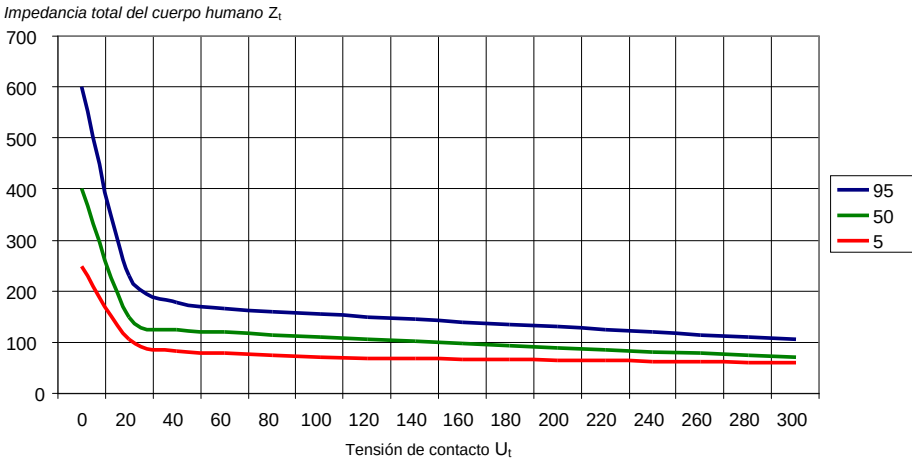


Figura 7.30. Valores estadísticos de la impedancia total del cuerpo humano válidos para seres vivos, un trayecto de la corriente mano a mano o mano a pie y tensiones de contacto de hasta 3.000 V

Tabla 7.14. Impedancia del cuerpo humano (Z_t) en función de la humedad de la piel (en Ω).

Tensión de contacto (en V)	Estado de humedad de la piel			
	Piel Seca BB1	Piel Húmeda BB2	Piel Mojada BB3	Piel Inmersa BB4
25	5000	2500	1000	500
50	4000	2000	875	440
250	150	1000	650	325
Límite	1000	1000	650	325

Se observa que, prácticamente, se alcanzan los valores límite a una tensión tan usual como la de 250 V.

Para trayectos distintos al mano-mano o mano-pie, los valores de las impedancias medidos son notablemente inferiores, por lo que tomarán en consideración los factores de corrección que se mencionan en la norma UNE 20-572-92.

Por tanto, las impedancias indicadas anteriormente, correspondientes a un trayecto, mano-mano, deberán multiplicarse por los coeficientes que se indican para trayectos de mano a: cabeza (50%), cuello (40%), tórax (45%), abdomen (50%), cadera (55%), brazo (60%), antebrazo (75%), muslo (60%), rodilla (70%) y pierna (75%). Naturalmente, si el recorrido va simultáneamente desde las dos manos a los puntos citados la impedancia será la mitad de las indicadas anteriormente.

Variación de la resistencia del cuerpo humano con la humedad

Diversos estudios experimentales demuestran que la impedancia interna del cuerpo humano es, básicamente, resistiva pura. Se ha comprobado que para corriente alterna cuya frecuencia sea superior a 10kHz, no provoca más efectos que el de calentar los tejidos por donde pasó la corriente.

En lo que a baja tensión se refiere, se puede considerar el comportamiento de los dipolos del cuerpo humano aproximadamente lineal. El valor de la resistencia en cada uno de ellos depende de diversas circunstancias. Quizá la circunstancia más importante es el estado de humedad de la piel. Cuando mayor es la humedad de la piel más disminuye la resistencia (R_{pe} y R_{ps}) de manera importante: la resistencia del cuerpo humano, que suele estar comprendida entre 5.000 en seco y 1.000 ohmios cuando se encuentra totalmente sumergido en un baño o en la ducha, por ejemplo.

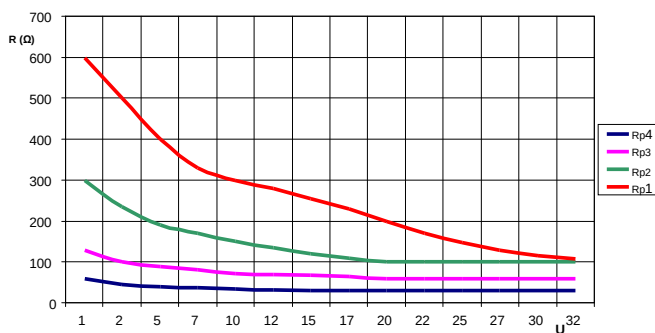


Figura 7.31. Variación de la resistencia del cuerpo humano en función de la tensión

Rp1 = piel seca

Rp2 = piel húmeda (sudor o atmósfera impregnada)

Rp3 = piel mojada (tras lavarse las manos antes de secarse)

Rp4 = piel sumergida en agua

En el gráfico de la figura 7.31, se muestra la variación de la resistencia del cuerpo humano para distintos valores de la tensión y para cuatro estados de la piel.

Como se puede ver, la disminución del factor R_{pi} , es brutal, aumentando cuantiosamente la posibilidad de accidentes sobre todo cuando el contacto es del tipo “mano-mano”, muy frecuente por otra parte.

Respecto al factor R_i , esta resistencia interna es muy variable según los órganos afectados: el corazón tiene un valor aproximado de 100 ohmios, mientras que el valor de la grasa oscila entre los 5.000 y 15.000 ohmios. En general se considera que una resistencia interna total de 1.000 ohmios se corresponde sensiblemente con la realidad de un cuerpo humano de constitución física media.

La resistencia de contacto (R_{ce} y R_{cs}) indica la posibilidad de una resistencia suplementaria debida, por ejemplo, al contacto con el suelo, pero su valor es muy reducido, en algunas decenas de ohmios, en el caso de un suelo muy conductor, por lo cual es una medida adecuada el no considerarlo en la práctica frente al valor R_i .

Aunque el valor de la tensión ciertamente interviene, es realmente la intensidad de la corriente, que nace de la diferencia de potencial entre los dos puntos en contacto, la magnitud resultante más peligrosa para medir los efectos de la electricidad, pues nos muestra con un solo valor múltiples factores, entre ellos la serie de circunstancias accidentales que alteran grandemente la resistencia de las personas (denominador de la expresión anterior).

La magnitud y la duración de una corriente de entre 50 y 60 Hertzios deben ser inferiores a los límites para producir una fibrilación ventricular. La relación que existe entre la intensidad de corriente y la duración de la misma viene dada por la ecuación (7.37).

$$I_B = \sqrt{\frac{S_B}{t_s}} \quad (7.37)$$

En esta expresión S_B representa una constante empírica relativa al choque eléctrico que puede soportar un porcentaje de una cierta población. Un valor genérico para esta constante es de 0,0135 que viene dada por la corriente que es capaz de soportar el 99,5 % de la población con un peso superior a los 50 Kg. Con este parámetro, serán admisibles corrientes de hasta 116 mA con una duración de hasta 1 segundo o de hasta 367 mA durante 0,1 s.

Umbral de percepción

El establecer los límites a partir de los cuales la corriente eléctrica resulta peligrosa, presenta serias dificultades. Puede dar idea de ello las dispersiones que aparecen en la determinación del umbral de sensibilidad sobre el paso de la corriente eléctrica, definido como el valor de la intensidad mínima que percibe una persona al hacer circular la corriente de mano a mano. Mientras que algunas personas detectan la corriente con intensidad de 0,5 mA, otros no empiezan a percibir su paso hasta que ésta no alcanza valores cercanos a los 2 mA.

En cuanto a las corrientes tolerables por el ser humano, se han llevado a cabo múltiples estudios y un buen número de referencias bibliográficas, están disponibles sobre las corrientes tolerables por el ser humano sin llegar a la fibrilación ventricular encontrándose todos ellos en el entorno de los 100 mA. Hay que tener en cuenta que se pueden tolerar intensidades mayores de muy corta duración usando dispositivos rápidos de protección.

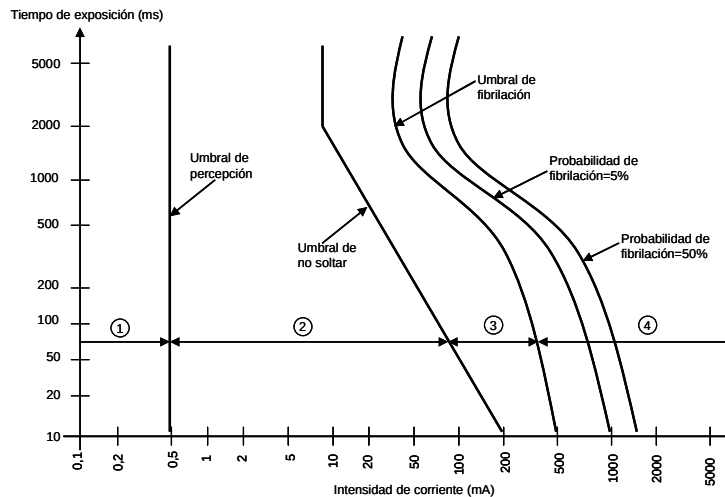


Figura 7.32. Efectos del paso de una corriente eléctrica de frecuencia entre 50 y 60 Hz por el cuerpo humano en función de la duración de su paso.

Umbral de no soltar

El fenómeno de no soltar tiene lugar por la excitación de nervios y músculos flexores bajo la acción de la corriente eléctrica, de forma que al quedar contraídos, inhabilitan a la persona a dejar el conductor, toda vez que los extensores son menos potentes que los flexores.

Muerte aparente

Cuando el nivel de intensidad se eleva por encima del umbral de no soltar, se afectan importantes funciones fisiológicas, como la respiración y la circulación. Para una intensidad de 20 a 30 mA, la contracción muscular puede alcanzar los músculos respiratorios (intercostales, pectorales y diafragma), originando una parada circulatoria (central o periférica), que ocasiona una asfixia con cianosis, lo cual suele llevar a un estado de muerte aparente y a una parada circulatoria y si no se desconecta rápidamente de la corriente y se le aplica asistencia respiratoria surgirá la parada cardíaca.

Umbral de fibrilación ventricular

La fibrilación ventricular está caracterizada por una contracción anárquica y asincrónica de cada una de las fibras del miocardio, lo que lleva inmediatamente a una parada circulatoria y a una anoxia que alcanza primero el cerebro y después al propio corazón. El umbral de fibrilación ventricular depende del peso corporal, valor de resistencia del organismo en cuestión, tiempo de exposición, trayectoria, frecuencia y amplitud de la corriente y se sitúa entre los 70 y 100 mA. Si se trata de corriente continua el umbral es más elevado.

Frecuencia

Los efectos del choque eléctrico varían con la frecuencia, comprobándose que a frecuencias muy elevadas se necesitan mayores intensidades para producir los mismos efectos.

Si se define como umbral de percepción al valor mínimo de la corriente eléctrica que una persona percibe con la mano, pues el valor de percepción varía con el punto de contacto (la lengua, la oreja, etc.), este valor también varía con la frecuencia:

Tabla 7.15. Frecuencia de la corriente sobre el cuerpo humano.

Frecuencia	Umbral de percepción	Límite de control muscular
0 Hz (cc)	2 mA	75 mA
50 Hz	0.5 mA	15 mA
10 kHz	5 mA	75 mA

La razón de que a frecuencias elevadas se necesiten mayores intensidades para producir los mismos efectos se debe a que en este caso empieza a tener importancia el efecto pelicular, no produciéndose en el organismo más efecto que el calentamiento de los tejidos por efecto Joule.

Esta propiedad se aprovecha en aplicaciones terapéuticas tales como la diatermia o en los bisturís eléctricos. De utilizar frecuencia industrial, sus efectos serán mortales.

Tiempo de contacto

Los efectos fisiológicos o fisopatológicos producidos por un contacto eléctrico dependen también de la duración de dicho contacto. En general, la mayor duración de éste agrava sus consecuencias o, inversamente, una determinada tensión o intensidad de contacto es menos peligrosa si ésta es de muy corta duración.

Por lo tanto, es conveniente definir aquellas tensiones de seguridad convencional como las máximas tensiones a que puede verse sometida una persona, durante un tiempo determinado, sin que sea peligroso eléctricamente para el hombre.

La norma francesa NF-C 15-100 recoge estos valores en relación con el tiempo de duración del contacto (Vc-Tc).

Tabla 7.16. Tensiones convencionales de seguridad (en V).

Tensión de contacto prevista (V)						Tiempo máximo de actuación de las protecciones (s)
BB1 y BB2		BB3		BB4		
c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	
<50	<100	<24	<50	<12	<25	infinito
50	100	24	50	12	25	5
75	130	40	70	21	35	1
90	150	50	83	27	45	0.5
110	170	65	10	37	57	0.2
150	200	96	128	55	73	0.1
220	250	145	165	82	93	0.05
280	310	195	215	110	122	0.03
350	370	250	260	135	140	0.02
500	500	370	370	210	210	0.01

Relación de intensidad de contacto-tiempo de contacto (Ic-Tc).

7.9.12. Tensiones máximas aplicables al cuerpo humano

Toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada en forma tal que, en cualquier punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, éstas queden sometidas como máximo a las tensiones de paso y contacto (durante cualquier defecto en la instalación eléctrica o en la red unida a ella) que resulten de la aplicación de las formulas que se recogen en la normativa correspondiente.

Tensión de paso

La tensión de paso, es la diferencia de potencial experimentada por una persona en contacto con el suelo con sus pies distanciados un metro y sin contacto con ningún otro conductor. Según la Estándar 81 de IEEE, “la Tensión de Paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo”.

Si se consideran, como aproximación, únicamente valores resistivos, R_i entre pierna y pierna = R_H y $R_e=R_s=R_S$, ver figura 7.33., se puede poner:

$$I = \frac{V_{pa}}{R_H} = \frac{V_p}{R_S + R_H + R_S} \quad (7.38)$$

$$V_p = V_{pa} \frac{R_H + 2R_S}{R_H} = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right) \quad (7.39)$$

En el caso de la tensión de paso, puede suceder que la resistividad superficial sea diferente en cada pie.

Esto es habitual en el acceso a un centro de transformación (CT) cuando un pie está en el pavimento del umbral y el otro en el terreno sin edificar. En este caso, la fórmula de la tensión de paso es:

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{3\rho_s + 3\rho'_s}{1000} \right) \quad (7.40)$$

En la que ρ_s y ρ'_s son las resistividades superficiales del terreno sobre el que se apoya cada pie. Para el pavimento de cemento, hormigón o similar puede tomarse una resistividad $\rho_s = 3,000 \Omega \cdot m$. A esta tensión se la denomina “tensión de paso de acceso”.

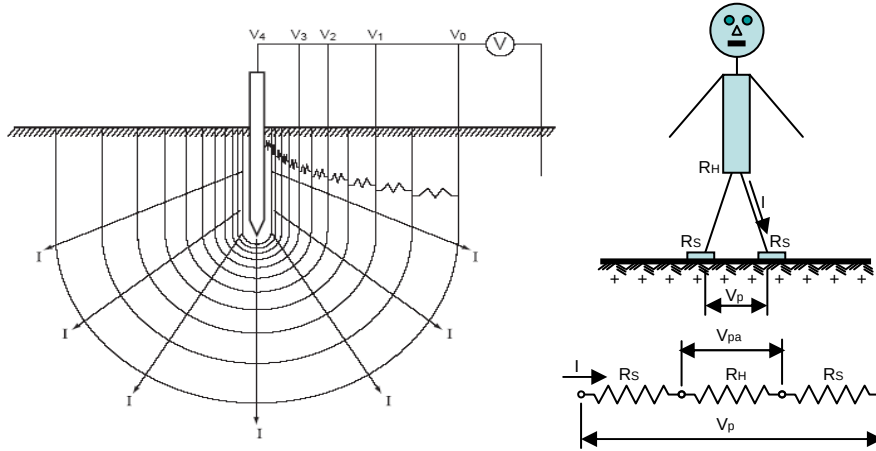


Figura 7.33. Tensión de paso.

Tensión de contacto

De acuerdo con la definición de la Standar IEEE 81: “La tensión de contacto es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia horizontal máxima que pueda alcanzar, o sea, aproximadamente, 1 metro”.

$$I = \frac{V_{ca}}{R_H} = \frac{V_C}{R_H + \frac{R_S}{2}} \quad (7.41)$$

$$V_c = V_{ca} \frac{R_H + \frac{R_S}{2}}{R_H} = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1.5 \rho_s}{1000} \right) \quad (7.42)$$

Siendo ρ_s la resistividad superficial del terreno expresada en $\Omega \cdot m$; y V_p y V_c en voltios (V).

Ambos responden a un planteamiento simplificado del circuito, al despreciar la resistencia de la piel y del calzado, y tomando la resistencia del cuerpo humano de 1.000 ohmios.

Cada pie humano se ha asimilado a un electrodo en forma de placa metálica de 200 cm^2 que ejerce sobre el terreno una fuerza mínima de 250N, lo que representa una resistencia de contacto con el suelo evaluada en $3\rho_s$, o sea $R_s = 3\rho_s$ (R_s en Ω).

Las tensiones V_{ca} y V_{pa} , son la parte de V_c y V_p que resultan aplicadas al cuerpo humano y que no deben sobrepasar los valores máximos antes indicados.

La tensión de contacto también definida con anterioridad es la diferencia de potencial entre la máxima tensión a la que puede estar sometida la toma de tierra y la tensión del terreno en un punto en el que una persona está a la vez en contacto con el terreno y con la instalación.

La tensión máxima de paso en voltios, que se puede aceptar se determina en función del tiempo de duración del defecto, según la expresión (7.43).

$$V_p = (1000 + 6C_s \rho_s) \sqrt{\frac{S_B}{t_s}} \quad (7.43)$$

La tensión máxima de contacto también en voltios se puede calcular según la expresión (7.43).

$$V_c = (1000 + 1.5C_s \rho_s) \sqrt{\frac{S_B}{t_s}} \quad (7.44)$$

En las expresiones (7.43) y (7.44) C_s es un factor de corrección para tener en cuenta la resistividad de los pies y que se puede calcular mediante la expresión (7.45), ρ_s es la resistividad del terreno en $\Omega \cdot m$, S_B

es el parámetro ya definido para el cálculo de la máxima intensidad y t_s es el tiempo de duración de la falta en segundos.

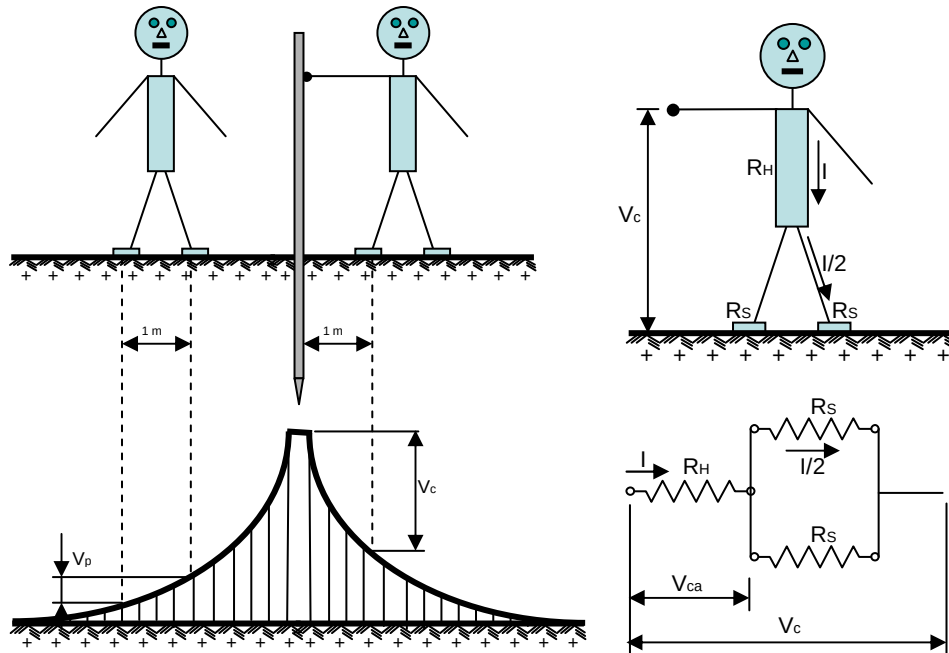


Figura 7.34. Tensión de contacto.

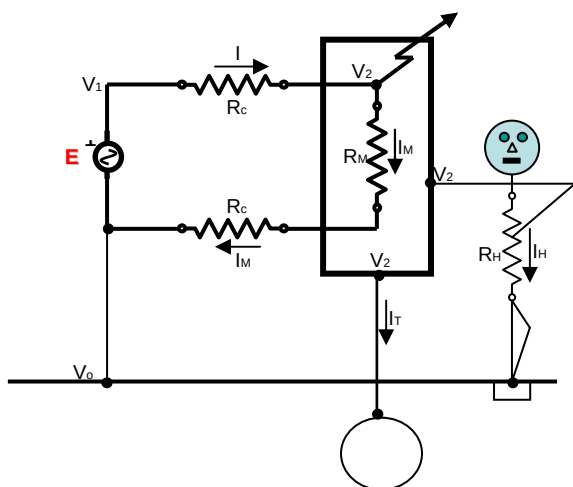
$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \quad (7.45)$$

Donde: h_s es la anchura del material de la superficie en contacto con el terreno en metros, ρ_s su resistividad y ρ la resistividad del terreno.

Para tiempos comprendidos entre 2 y 5 segundos la tensión de contacto aplicada no puede sobrepasar los 4 V, para tiempos superiores a 5 segundos la tensión de contacto aplicada no puede ser superior a 50 V. Salvo casos excepcionales justificados no se considerarán tiempos inferiores a 0,1 segundos. En caso de instalaciones con reenganche automático rápido (inferior a 0,5 segundos) el tiempo es la suma de los tiempos parciales de mantenimiento de la corriente de defecto.

A partir de las expresiones anteriores (7.43) y (7.44), se pueden determinar las máximas tensiones de paso y contacto admisibles en una instalación, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito.

7.9.13. Funcionamiento de una toma de tierra



En los siguientes apartados se explicará el funcionamiento de una malla de electrodos de tierra tomando como ejemplo el circuito accidental de contacto "mano-pie". En el siguiente esquema se muestra el circuito eléctrico que se origina cuando una persona toca parte de una instalación que se encuentra sometida a tensión debida a un cortocircuito.

Según se puede ver en la figura 7.33., el sistema representado tiene dos tomas de tierra:

- la propia del conjunto de la instalación eléctrica.
- los pies de la persona.

Figura 7.35. Esquema del circuito eléctrico cuando se produce por el contacto accidental de una persona con una parte de la instalación puesta bajo tensión.

Las magnitudes que se indican en la figura 7.35., son:

- V_0 : Potencial de referencia (considerado nulo) en un punto alejado de la instalación.
- V_1 : Potencial generado por el elemento electromotor E .
- V_2 : Potencial en la entrada del equipo, en la carcasa cuando se produce un cortocircuito y en la toma de tierra.
- V_3 : Potencial en el punto de la superficie del terreno en el que se encuentra la persona.
- I : Intensidad de corriente debida a la diferencia de potencial del elemento electromotor y a la resistencia eléctrica del conjunto del circuito.
- I_M : Intensidad de corriente que circula por el motor.
- I_s : Intensidad que fluye a la toma de tierra.
- I_H : Intensidad que circula por la persona.
- R_C : Resistencia eléctrica del cable.
- R_M : Resistencia eléctrica del motor.
- R_H : Resistencia eléctrica de la persona.

7.9.14. Circuito eléctrico exterior

El circuito eléctrico exterior tiene lugar a través de los cables, del motor (u otro dispositivo) y de la persona, y se puede explicar matemáticamente a través de las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad:

$$I = I_M + I_T + I_H \quad (7.46)$$

Ley de Ohm:

$$E = V_1 - V_0 \quad (7.47)$$

$$IR_C = V_1 - V_2 \quad (7.48)$$

$$I_M (R_M + R_C) = V_2 - V_0 \quad (7.49)$$

$$I_H R_H = V_2 - V_3 \quad (7.50)$$

Las incógnitas de todo este sistema de ecuaciones serían V_1 , V_2 , V_3 , I_M , I_T y I_H mientras que se conocen el potencial de referencia ($V_0 = 0$), la fuerza electromotriz E y las resistencias R_C , R_M y R_H .

7.9.15. Circuito eléctrico subterráneo

La circulación de corriente que tiene lugar en el terreno se muestra en el esquema correspondiente a la figura 7.36.

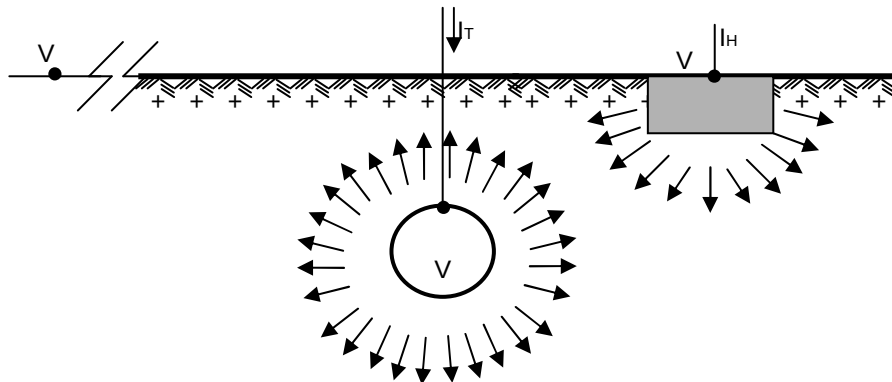


Figura 7.36. Esquema de un circuito subterráneo

Al tratarse el terreno de un medio continuo, se puede modelizar matemáticamente bajo las hipótesis de terreno isótropo, homogéneo y de superficie horizontal. Se obtendría así el potencial V (que verifica la ecuación de Laplace) en cualquier punto del terreno una vez conocidos los valores del potencial en la superficie de la toma de tierra y se cumple la hipótesis de que el potencial de referencia V_0 en un punto suficientemente alejado sea cero.

Este circuito subterráneo se puede resolver mediante una superposición de estados elementales, que consiste en la sustitución del estado final, que está representado en el esquema anterior y del cual no se conocen los valores de V_2 , V_3 , I_T e I_H , por la combinación lineal de dos estados elementales, de modo que sea posible obtener una relación entre las variables.

El estado elemental A, se muestra en el siguiente esquema. En él se fijan los siguientes valores del potencial:

- en los puntos de la toma de tierra de la instalación eléctrica: $V = 1$
- en la unión a tierra que se produce en los pies de la persona: $V = 0$

Las magnitudes i_{T1} e i_{H1} son las intensidades de corriente por unidad de tensión que fluyen de las dos tomas de tierra, la de la instalación y la del individuo, en este estado elemental A.

El estado elemental B se muestra en el siguiente esquema. Está caracterizado por los siguientes valores del potencial:

- en la toma de tierra de la instalación: $V = 0$
- en la conexión a tierra que tiene lugar a través de los pies de la persona: $V = 1$

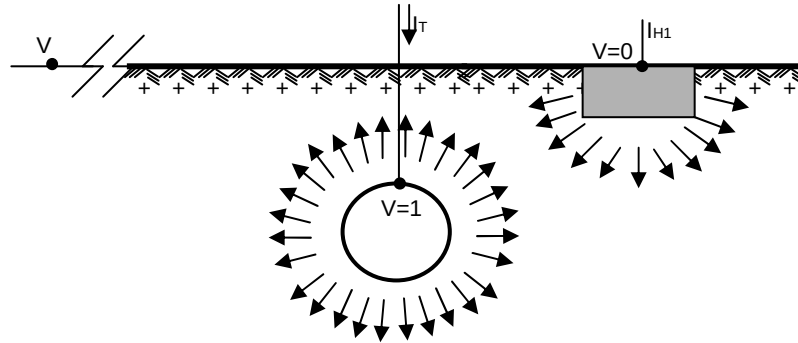


Figura 7.37. Esquema del estado elemental A en que puede descomponerse el circuito subterráneo.

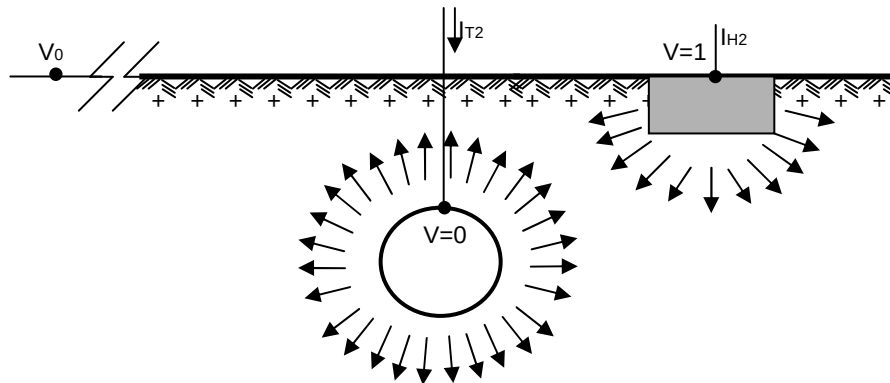


Figura 7.38. Esquema de estado fundamental B en el que se descompone el circuito subterráneo.

Las magnitudes i_{T2} e i_{H2} indican las intensidades de corriente por unidad de tensión que fluyen por las dos tomas de tierra, la de la instalación y la de la persona, en el estado elemental B.

El estado final, que se representa en el esquema del circuito subterráneo, es la combinación lineal de los dos elementales: el estado A ponderado por el valor del potencial V_2 más el estado B ponderado por el valor del potencial V_3 . Teniendo en cuenta que las intensidades de corriente de este estado final son I_S (a través de la toma de tierra de la instalación) e I_H (a través de los pies de la persona), se verifican las siguientes relaciones:

$$I_T = i_{T1}V_2 + i_{T2}V_3 \quad (7.51)$$

$$I_H = i_{H1}V_2 + i_{H2}V_3 \quad (7.52)$$

Usando ahora el teorema de reciprocidad de Maxwell podemos escribir también la siguiente igualdad entre las intensidades a través de la toma de tierra y de la persona:

$$i_{T2} = i_{H1} \quad (7.53)$$

En el esquema de la figura 7.39., está representado el circuito eléctrico equivalente al circuito subterráneo para una toma de tierra.

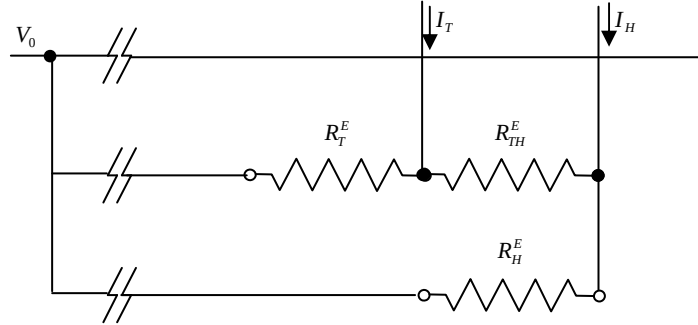


Figura 7.39. Circuito eléctrico equivalente al circuito subterráneo

Las nuevas magnitudes que se han introducido son:

- R_T^E : Resistencia al paso de la corriente de la toma de tierra de la instalación eléctrica.
- R_H^E : Resistencia eléctrica que ofrece la unión a tierra a través de los pies de la persona.
- R_{TH}^E : Resistencia a la circulación de corriente existente entre las dos tomas de tierra: la instalación y el individuo.

Resolviendo el circuito eléctrico de la figura 7.39., se obtiene las relaciones (7.54) y (7.55).

$$I_T = \left(\frac{1}{R_T^E} + \frac{1}{R_{TH}^E} \right) V_2 + \left(\frac{-1}{R_{TH}^E} \right) V_3 \quad (7.54)$$

$$I_H = \left(\frac{1}{R_{TH}^E} \right) V_2 + \left(\frac{1}{R_T^E} + \frac{1}{R_{TH}^E} \right) V_3 \quad (7.55)$$

La relación existente entre las resistencias del circuito equivalente y las intensidades por unidad de tensión de los estados elementales viene dada por:

$$R_T^E = \frac{1}{i_{T1} + i_{H1}} \quad (7.56)$$

$$R_H^E = \frac{1}{i_{T2} + i_{H2}} \quad (7.57)$$

$$R_{TH}^E = \frac{-1}{i_{H1}} \quad (7.58)$$

De las expresiones (7.56), (7.57) y (7.58), se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- i_{T1} e i_{H1} son las intensidades de corriente por unidad de tensión que emanan de la toma de tierra de la instalación eléctrica y de la unión a tierra de la persona en el estado elemental A caracterizado por imponer potencial 1 en la instalación y 0 en los pies del individuo como ya se ha indicado anteriormente. Habitualmente, la toma de tierra presenta una extensa superficie de contacto con el terreno para la disipación de corriente, por lo que la intensidad que emana de ella, i_{T1} , será relativamente importante. La intensidad de corriente i_{H1} que fluye por la unión a

tierra de la persona, debida a la circulación de cargas provocada por la intensidad i_{T1} , va a ser muy pequeña en relación con ésta, dado que la unión a tierra de la persona tiene una superficie total casi despreciable en comparación con la toma de tierra de la instalación.

- i_{T2} e i_{H2} son las intensidades de corriente por unidad de tensión que emanan de la toma de tierra de la instalación y de la unión a tierra de la persona en el estado elemental B, caracterizado por imponer potencial 0 en la instalación eléctrica y 1 en los pies del individuo. Dado que la superficie de la unión a tierra de la persona es muy pequeña, formada solamente por sus pies, la intensidad de corriente que circula i_{H2} también es pequeña, en comparación con la intensidad que emana de la instalación el estado elemental 1, i_{T1} . La intensidad i_{T2} que fluye por la toma de tierra de la instalación debido a la circulación de cargas provocada por i_{H2} va a ser también muy reducida, en relación con las anteriores.

En consecuencia la resistencia mutua, R_{TH}^E , entre las dos tomas de tierra (la instalación y la persona) será muy elevada, la resistencia equivalente de la unión a tierra de la persona, R_H^E , también será elevada ya que los dos sumandos del cociente de la relación empleada para el calculo de R_H^E serán pequeños. Por otra parte, debido a que la intensidad que emana de la toma de tierra de la instalación i_{T1} es importante, su resistencia equivalente, R_T^E , será muy pequeña comparada con las otras dos del circuito equivalente.

Las ecuaciones (7.46) a (7.52) constituyen el sistema del modelo de circuito accidental que tiene lugar cuando una persona toca una instalación eléctrica durante un cortocircuito. La resolución de estas siete ecuaciones, correspondientes a la unión del circuito eléctrico exterior con el circuito subterráneo, proporcionará los valores de las incógnitas V_1 , V_2 , V_3 , I , I_M , I_T e I_H .

7.9.16. Toma de tierra en condiciones de fallo

Para evaluar el efecto de la existencia de una toma de tierra en una instalación eléctrica cuando tiene lugar un cortocircuito, se definen los siguientes parámetros:

- R_C : resistencia eléctrica del cable.
- R_M : resistencia eléctrica de la carga.
- R_H : resistencia eléctrica de la persona.
- R_{EH} , R_{ETH} y R_{ET} : resistencias equivalentes.

A partir de estas resistencias se pueden definir los siguientes parámetros adimensionales como relaciones entre todas ellas.

$$\alpha = \frac{R_M}{R_C} \quad (7.59)$$

$$\beta = \frac{R_H^E}{R_C} \quad (7.60)$$

$$\tau = \frac{R_{TH}^E}{R_C} \quad (7.61)$$

$$\delta = \frac{R_H}{R_C} \quad (7.62)$$

$$\theta = \frac{R_T^E}{R_C} \quad (7.63)$$

El parámetro θ definido en la ecuación (7.63), es una medida de la resistencia equivalente de una toma de tierra referida a la resistencia de los conductores.

$$d_2 = \frac{\alpha+2}{\alpha+1} + \frac{1}{\theta} + \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{\frac{1}{\beta}}{\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\tau}} \right) \quad (7.64)$$

$$d_3 = \frac{1}{\beta} + \left(\frac{\alpha+2}{\alpha+1} + \frac{1}{\theta} \right) \left(1 + \frac{\frac{1}{\beta}}{\frac{1}{\delta} + \frac{1}{\tau}} \right) \quad (7.65)$$

El primer análisis a realizar es el estudio de la fracción de intensidad que circula por la persona (I_H) sobre la intensidad total (I), en función de los distintos valores de la resistencia equivalente de la toma de tierra R_T^E . Teniendo en cuenta las ecuaciones (7.64) y (7.65), esta relación se expresa como

$$\frac{I_H}{I} = \frac{1}{\delta} \left(\frac{1 - \frac{d_2}{d_3}}{d_2 - 1} \right) \quad (7.66)$$

En lo que respecta a la instalación de toma de tierra, la intensidad de corriente circula por la misma (I_T) durante una derivación de corriente se puede expresar en términos de los mismos parámetros, de la siguiente forma:

$$\frac{I_T}{I} = \frac{\frac{1}{\theta} + \frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{d_2}{d_3} \right)}{d_2 - 1} \quad (7.67)$$

Las dos preguntas a responder sobre la derivación de corriente por una toma de tierra, son las siguientes:

- ¿Una toma de tierra deriva más corriente al terreno cuanto menor sea su resistencia equivalente circulando entonces por el individuo que ha establecido el contacto accidental menos intensidad de corriente?
- ¿Qué fracción de intensidad circula por la persona si existe toma de tierra respecto de la intensidad que circula si no existe esta instalación?

Estas dos preguntas se contestan mediante la relación (7.68).

$$\frac{I_H(cont)}{I_H(sin)} = \frac{\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3}}{\frac{\frac{\alpha+2}{\alpha+1} + \frac{1+\delta/\beta}{\beta}}{\frac{1}{\beta} + \frac{(\alpha+2)(1+\delta/\beta)}{\alpha+1}}} \quad (7.68)$$

Los sistemas de puesta a tierra son sistemas pasivos en el sentido de que no evitan que se produzcan los cortocircuitos sino que actúan de elementos derivadores al terreno de las corrientes de fallo que se puedan producir. Pero una toma de tierra tiene un papel esencial combinado con otros elementos de la instalación eléctrica que sí son activos ya que, si bien no evitan el cortocircuito, al menos cortan el suministro de corriente en el sistema.

La relación entre la intensidad que circula por la carga cuando tiene lugar una derivación de corriente a la toma de tierra de la instalación, y la intensidad que circula por el equipo en condiciones normales se puede expresar, en términos de los parámetros definidos al comienzo de este apartado, mediante la siguiente relación:

$$\frac{I_M(fallo)}{I_M(normal)} = \frac{\alpha+2}{(\alpha+1)d_2} \quad (7.69)$$

Una variación brusca en el valor de la intensidad que circula por el equipo cuando se produce la derivación de corriente, se puede analizar también en la relación existente entre la intensidad que circula por el circuito (I) en condiciones de fallo y la que circula en condiciones normales. Esta relación, expresada según los parámetros definidos al comienzo de este apartado, es la siguiente:

$$\frac{I(fallo)}{I(normal)} = (\alpha + 2) \left(1 - \frac{1}{d_2} \right) \quad (7.70)$$

Otro aspecto a considerar, son los aumentos significativos de la intensidad de corriente eléctrica que circula cuando se produce un incremento en el consumo de potencia en una instalación, estos se detectan mediante elementos activos, que son sensibles al aumento de temperatura producido por la circulación de mayor intensidad de corriente.

Dado que en condición de fallo se produce un notable incremento de la intensidad que circula por la instalación que es tanto mayor cuanto más baja es la resistencia equivalente de la toma de tierra, podría parecer que la mera existencia de estos elementos y de una toma de tierra de resistencia equivalente suficientemente baja, garantiza automáticamente la desconexión de la instalación si se produce una derivación a tierra. No obstante, debido precisamente a que la variable de medida de estos elementos activos es la temperatura, el tiempo que transcurriría antes de cortar el suministro eléctrico en el sistema sería demasiado largo. Entretanto, por la instalación -y eventualmente por una persona que esté en contacto accidentalmente con ella en ese instante circularía una elevada intensidad de corriente.

Por ello se colocan en el circuito eléctrico interruptores "diferenciales" que tienen una gran sensibilidad para la detección de pequeñas variaciones en la intensidad de corriente e interrumpen rápidamente el suministro eléctrico.

El principio básico del funcionamiento de estos equipos es el siguiente: en condiciones normales, las intensidades que circulan por los conductores (de "ida" I y de "retorno" IM) son iguales y por tanto, la corriente neta, (I - IM) es nula; sin embargo, cuando se produce una derivación de corriente al terreno (bien por la toma de tierra, o directamente a través de un ser humano), la intensidad de corriente neta ya no es nula, sino que es igual a la que se deriva al terreno. Los "diferenciales" miden esta variación de la intensidad, disparando un interruptor que corta el suministro de corriente cuando la diferencia de intensidades supera un determinado valor límite.

En definitiva, cuanto más pequeña sea la resistencia equivalente, mayor será la variación de la corriente neta; por lo tanto el error relativo en la medida del detector diferencial instalado será menor y en consecuencia, actuará de un modo más eficaz.

Un sistema de puesta a tierra convencional, será tanto más eficaz desde el punto de vista de la seguridad humana y de la integridad de los equipos cuanto menor sea la resistencia que ofrezca el sistema de tierras al paso de la corriente eléctrica como ya hemos comentado con anterioridad.

Por otra parte, para garantizar la seguridad de las personas es esencial que las diferencias de potencial existentes entre la instalación eléctrica y los puntos de la superficie del terreno cercanos a ésta se encuentren por debajo de un determinado umbral ("tensión de contacto"), así como que las diferencias de potencial entre puntos de la superficie del terreno próximos (separados entre sí un metro) sean inferiores a un determinado valor límite ("tensión de paso" máxima admisible).

7.9.17. Diseño de instalaciones de puesta a tierra

A efectos de cálculos de proyecto se podrán emplear, para la estimación de las tensiones de paso y contacto que puede soportar el cuerpo humano las expresiones (7.42) y (7.43), indicadas anteriormente.

Ambas expresiones responden a un planteamiento simplificado del circuito despreciando la resistencia de la piel y del calzado. Se han determinado suponiendo que la resistencia del cuerpo humano es de 1000 Ω y asimilando cada pie a un electrodo en forma de placa de 200 cm cuadrados de superficie ejerciendo sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N, lo que representa una determinada resistencia de contacto con el suelo.

Si se prevén contactos del cuerpo humano con partes metálicas no activas que puedan ponerse a distinto potencial, se aplicara la formula (7.44) de la tensión de contacto haciendo Cs = 0.

Durante el proyecto de la instalación de la toma de tierra, se debe comprobar mediante el empleo de un procedimiento de cálculo preestablecido, que los valores de las tensiones de paso, Vp, y de contacto, Vc, que se calcule para la instalación proyectada en función de la geometría de la misma, de la corriente de puesta a tierra que considere y de la resistividad correspondiente al terreno, no superen en las condiciones más desfavorables a las calculadas por las formulas (7.43) y (7.44) en ninguna zona del terreno afectada por la instalación de tierra.

7.9.17.1. Procedimiento

Teniendo en cuenta las tensiones aplicadas máximas al proyectar una instalación de tierras se seguirá este procedimiento:

1. Investigar las características del suelo.
2. Determinar las corrientes máximas de puesta a tierra y del tiempo máximo correspondiente de eliminación del defecto.
3. Hacer un diseño preliminar de la instalación de tierra.
4. Calcular la resistencia del sistema de tierra.
5. Calcular las tensiones de paso y contacto en el exterior de la instalación.
6. Comprobar que las tensiones de paso y contacto calculadas en el punto 7.9.12 son inferiores a los valores máximos definidos por las ecuaciones (7.43) y (7.44).
7. Investigar las tensiones transferibles al exterior por tuberías, raíles, vallas, conductores de neutro, blindajes de cables, circuitos de señalización y de los puntos especialmente peligrosos, y estudiar las formas de eliminación o reducción.
8. Corregir y ajustar el diseño inicial estableciendo el definitivo.

Después de construida la instalación de tierra se deben realizar “in situ” las comprobaciones y verificaciones precisas, y se efectuarán los cambios necesarios que permitan alcanzar valores de tensión aplicada inferiores o iguales a los máximos admitidos.

7.9.17.2. Condiciones difíciles para la puesta a tierra

Cuando por los valores de resistividad del terreno, de la corriente de puesta a tierra o del tiempo de eliminación de la falta, no sea posible técnicamente, o resulte económicamente desproporcionado mantener los valores de las tensiones aplicadas de paso y contacto dentro de los límites fijados, se recurre al uso de medidas adicionales de seguridad a fin de reducir los riesgos a las personas y los bienes. Estas medidas son entre otras:

- Hacer inaccesibles las zonas peligrosas.
- Disponer suelos o pavimentos que aislen suficientemente de tierra las zonas de servicio peligrosas.
- Aislar todas las empuñaduras o mandos que hayan de ser tocados.
- Establecer conexiones equipotenciales entre la zona donde se realice el servicio y todos los elementos conductores accesibles desde la misma.
- Aislar los conductores de tierra a su entrada en el terreno.

7.9.17.3. Elementos de las instalaciones de puesta a tierra y condiciones de montaje

Las instalaciones de puesta a tierra están constituidas por uno o varios electrodos enterrados y por las líneas de tierra que conecten dichos electrodos a los elementos que deban quedar puestos a tierra. En las líneas de tierra deberán existir los suficientes puntos de puesta a tierra, que faciliten las medidas de comprobaciones del estado de los electrodos y la conexión a tierra de la instalación.

a) Líneas de tierra

Los conductores empleados en las líneas de tierra tienen que tener una resistencia mecánica adecuada y ofrecer una elevada resistencia a la corrosión. Su sección debe ser tal, que la máxima corriente que circule por ellos en caso de defecto o de descarga atmosférica no lleve a estos conductores a una temperatura cercana a la de fusión, ni ponga en peligro sus empalmes y conexiones.

A efectos de dimensionado de las secciones, el tiempo mínimo a considerar para duración del defecto a la frecuencia de la red es de un segundo, y no pueden superarse las siguientes densidades de corriente:

- cobre 160 A/mm^2 .
- acero 60 A/mm^2 .

Sin embargo en ningún caso se admiten secciones inferiores a 25 mm^2 en el caso de cobre, y 50 mm^2 en el caso del acero.

Los anteriores valores corresponden a una temperatura final de 200°C . Puede admitirse un aumento de esta temperatura hasta 300°C si no supone riesgo de incendio.

Cuando se empleen materiales diferentes de los indicados, se cuidara:

- Que las temperaturas no sobrepasen los valores indicados anteriormente.
- Que la sección sea como mínimo equivalente desde el punto de vista térmico, a la de cobre que hubiera sido precisa.
- Que desde el punto de vista mecánico, se resistencia sea, al menos, equivalente a la del cobre de 25mm².

Cuando los tiempos de duración del defecto son superiores a un segundo, se calculan las secciones adoptadas en función del calor producido y su disipación.

Pueden usarse como conductores de tierra las estructuras de acero de apoyo de los elementos de la instalación, siempre que cumplan las características generales exigidas a los conductores y a su instalación.

Los conductores de las líneas de tierra tienen que instalarse procurando que su recorrido sea lo mas corto posible evitando trazados tortuosos y curvas de poco radio, se recomienda que sean conductores desnudos instalados al exterior de forma visible.

En el caso en el que tuviera que realizarse la instalación cubierta, tiene que hacerse de forma que se pueda comprobar el mantenimiento de sus características.

En las líneas de tierra no pueden insertarse fusibles ni interruptores. Los empalmes y uniones tienen que realizarse con medios de unión apropiados, que aseguren:

- La permanencia de la unión.
- Que no experimentan calentamientos superiores a los del conductor con el paso de corriente.
- Que están protegidos contra la corrosión galvánica.

b) Electrodo de puesta a tierra

Los electrodos de puesta a tierra están formados por materiales metálicos en forma de varillas, cables, chapas, perfiles, que presentan una resistencia elevada a la corrosión por si mismos, o mediante una protección adicional, tales como el cobre o el acero, en cuyo caso hay que tener especial cuidado de no dañar el recubrimiento de protección durante el hincado. En el caso de utilizar otros materiales hay que justificar su uso.

Los electrodos podrán disponerse de las siguientes formas u otras ya comentadas con anterioridad:

- Picas hincadas en el terreno, constituidas por tubos, barras u otros perfiles, que podrán estar formados por elementos empalmables.
- Varillas, barras o cables enterrados, dispuestos en forma radial, mallada , anular.
- Placas o chapas enterradas.

Dimensiones mínimas de los electrodos de puesta a tierra

- Las dimensiones de las picas se ajustaran a las especificaciones siguientes
 - o Los redondos de cobre o acero recubierto de cobre, no serán de un diámetro inferior a 14 milímetros. los de acero sin recubrir no tendrán un diámetro inferior a 20 milímetros.
 - o Los tubos no serán de un diámetro inferior a 30 milímetros ni de un espesor de pared inferior a 3 milímetros.
 - o Los perfiles de acero no serán de un espesor inferior a 5 milímetros ni de una sección inferior a 350 milímetros cuadrados.
- Los conductores enterrados, sean de varilla, cable o pletina, deberán tener una sección mínima de 50 milímetros cuadrados los de cobre, y 100 milímetros cuadrados los de acero. El espesor mínimo de las pletinas y el diámetro mínimo de los alambres de los cables no será inferior a 2 milímetros los de cobre y 3 milímetros los de acero.
- Las placas o chapas tendrán un espesor mínimo de 2 milímetros las de cobre y 3 milímetros las de acero.
- En el caso de suelos en los que pueda producirse una corrosión particularmente importante, deberán aumentarse los anteriores valores.

En la elección del tipo de electrodos, así como de su forma de colocación y de su emplazamiento, se tienen presentes las características generales de la instalación eléctrica del terreno, el riesgo potencial para las personas y los bienes.

Se utilizan las capas de tierra más conductoras haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno.

Se deberá tener presente la influencia de las heladas para determinar la profundidad de la instalación.

La resistencia de tierra del electrodo, que depende de su forma y dimensiones y de la resistividad del suelo, se calcula con las siguientes formulas que sirven para estimar la resistencia de la tierra en función de la resistividad del terreno y las características del electrodo.

En las fórmulas recogidas en la tabla 7.17., R es la resistencia de tierra del electrodo en ohmios, ρ es la resistividad del terreno en $\Omega \cdot m$, P es el perímetro de la placa en metros, L es la longitud en metros de la pica y la longitud total de los conductores enterrados y r es el radio en metros de un círculo de la misma superficie que el área cubierta por la malla.

Tabla 7.17. Cálculo de la resistencia en tierra del electrodo

TIPO DE ELECTRODO	RESISTENCIA EN OHMIOS
Placa enterrada profunda	$R = 0,8 \frac{\rho}{P}$
Placa enterrada superficial	$R = 1,6 \frac{\rho}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\rho}{L}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \frac{\rho}{L}$
Malla de tierra	$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$

c) Características del suelo a tener en cuenta en los cálculos

Resistividad del terreno

Es necesario investigar las características del terreno, para realizar el proyecto de una instalación de tierra, solo en las instalaciones de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior o igual a 16 km no será imprescindible realizar la citada investigación previa de la resistividad del suelo, bastando el examen visual del terreno, pudiéndose estimar su resistividad por medio de las tablas ya mostradas con anterioridad en las que se dan unos valores orientativos.

Efecto de la humedad

Cuando la humedad del terreno varíe considerablemente de unas épocas del año a otras se tendrá en cuenta esta circunstancia al dimensionar y establecer el sistema de tierra. Se podrán usar recubrimientos de gravas como ayuda para conservar la humedad del suelo.

Efecto de la temperatura

Al alcanzar el suelo temperaturas inferiores a cero grados centígrados aumenta mucho su resistividad. Por ello en zonas con peligro de heladas los electrodos se enterraran a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo.

d) Determinación de las intensidades de defecto para el cálculo de las tensiones de paso y contacto

Hay que tener en cuenta los posibles tipos de defectos a tierra y las intensidades máximas en los distintos niveles de tensiones existentes en la instalación y tomar el valor más desfavorable.

Para el cálculo de las intensidades de defecto y de puesta a tierra, hay que tener en cuenta la forma de conexión del neutro a tierra, así como la configuración y características de la red durante el período subtransitorio.

En el caso de red con neutro a tierra, bien rígido o a través de una impedancia, se considera a efectos del cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso, la elevación del potencial de la instalación a tierra. En

instalaciones de 100 KW o superior con neutro rígido a tierra, se utilizara el 70% del valor de I_E , al tener en cuenta la escasa probabilidad de coincidencia de las condiciones más desfavorables.

En el caso de red con neutro aislado, la intensidad que se considera para el calculo de la tensión aplicada de contacto o paso es el producto de la intensidad capacitiva de defecto a tierra (I_C) por un factor de reducción (k) igual a la relación entre la intensidad de la corriente que contribuye a la elevación del potencial de la instalación de tierra y la homopolar del sistema hacia la falta.

Tabla 7.18. Tabla para el cálculo de intensidades consideradas en un sistema de puesta a tierra.

Tipo de conexión del neutro	Corriente para el cálculo de intensidades de corriente
Aislado	$K I_C$
A través de impedancia	I_E
Rígido	I_E
Tierra	$0,7 I_E$

7.10. El rayo y las instalaciones eléctricas

En redes de tensión nominal inferior a 400 kV las sobretensiones debidas al rayo son más peligrosas que las debidas a otra causa, mientras que por encima de 400 kV las sobretensiones de maniobra suelen ser las más peligrosas.



Figura 7.40. Fotografías de caída de rayos en líneas de red

La importancia de las sobretensiones atmosféricas crece conforme disminuye la tensión nominal de los componentes afectados por el rayo. El valor de las sobretensiones que se pueden producir en una red de distribución, originadas por un rayo, es tan elevado frente al valor de la tensión nominal de la red que tanto el nivel de aislamiento de los componentes como la selección y coordinación de protecciones se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas. En general, el nivel de las sobretensiones de origen interno es inferior o muy inferior al nivel de aislamiento de los componentes de una red de distribución, siendo el número de averías originadas por una sobretensión de este tipo mucho más reducido que el originado por sobretensiones atmosféricas directas o inducidas por el rayo.

Las sobretensiones atmosféricas son una de las mayores causas de contorneamientos en líneas aéreas de distribución. Un rayo puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en otro equipo. La magnitud de las sobretensiones originadas por el rayo es tan elevada frente al valor de la tensión nominal de la línea aérea de distribución que tanto el nivel de aislamiento de los componentes de una red de distribución, como la selección y coordinación de protecciones, se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas.

Aunque la mayoría de líneas de distribución no están apantalladas, un pequeño porcentaje de estas líneas han sido construidas con cable de tierra. El objetivo de los cables de tierra en líneas de distribución es reducir las sobretensiones inducidas por rayos a tierra que caen en las cercanías de la línea y por tanto reducir el número de contorneamientos causados por este tipo de descargas, que en algunos casos puede ser mayor que el número de contorneamientos causados por rayos directos a la línea. Si la línea está apantallada entonces también puede aparecer contorneamiento causado por rayos que impacten en el cable de tierra (cebado inverso).

7.10.1 El rayo sobre una línea

La frecuencia de caída de rayos se calcula teniendo en cuenta la superficie de captura del elemento considerado.

La figura 7.41. da, para una densidad de $N = 4 \text{ CdR} / \text{km}^2 / \text{año}$ (siendo el nivel cerámico de alrededor de 30), la frecuencia de rayo (número de CdR por año) de un asta vertical de altura h y de un conductor horizontal de longitud 100 km a una altura h .

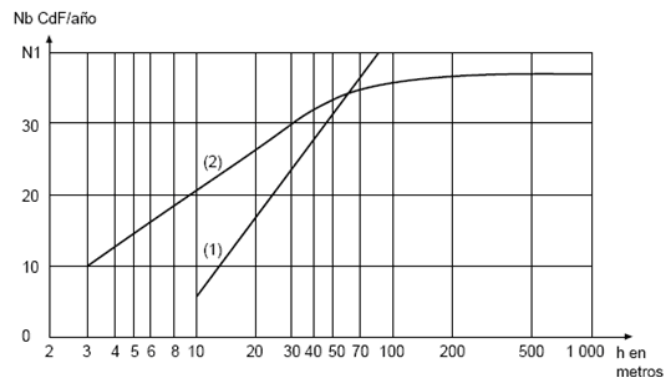


Figura 7.41. Frecuencia del rayo para una densidad $N=4 \text{ Ddr}/\text{Km}^2/\text{año}$:
Curva 1 para un asta vertical de altura h (con $N1 \cdot 10^{-3}$).
Curva 2 para un conductor horizontal de longitud 100 km a una altura h (con $N1$).

La fórmula empírica general que indica la frecuencia de rayo (número total de CdR por año) de una línea (torres, cables de fases y de guarda) corresponde a la expresión (7.71.)

$$N_L = Nd \times \left(\frac{N_1}{30} \times \frac{l}{70} \right) \times \alpha \times \frac{L}{100} \quad (7.71)$$

con:

Nd = nivel cerámico,

NL = frecuencia de rayos en la línea,

$N1$ = frecuencia de rayos en el conductor horizontal más elevado, figura 7.39.

L = longitud de la línea en km.

l = anchura de la línea en m (entre los conductores exteriores).

α = factor de influencia de las torres y los cables de guarda, tabla 7.19.

Tabla 7.19. Distribución de las caídas de rayo en una línea entre las torres y los conductores.

Número de cables de guarda		0	1	2	3
Caída de rayo	Sobre torres (%)	55	35	20	10
	Sobre conductores (%) (cable de guarda y de fases)	45	65	80	90
Factor de influencia	α	1.65	1.40	1.20	1.05

Esta expresión tiene en cuenta:

- la frecuencia de rayo de un conductor (N_1),
- la presencia de los conductores exteriores (l),
- la distribución entre torre y línea, función de la estructura de la línea (α)
- la longitud de la línea (L):

- para un cálculo de coordinación de aislamiento, generalmente se elige $L \approx 1.5$ Km., pues para valores mayores, el efecto del rayo es despreciable.

- para un cálculo de continuidad de servicio, la longitud que se tiene en cuenta es la total de la línea sobre la que los cebados son posibles.

7.10.2. Sobretensiones originadas por rayos directos

7.10.2.1. Impacto en un conductor de fase

El valor de la tensión originada por el impacto de un rayo directo en una línea de distribución es tan elevado que cualquier rayo que alcance un conductor de la línea terminará produciendo contorneamiento.

Cuando se produce el impacto de un rayo en un conductor de fase, que generalmente será el conductor situado en una posición más elevada, la corriente del rayo se dividirá en dos partes iguales que darán lugar a dos tensiones que se propagarán en ambos sentidos. La tensión máxima originada en el conductor donde impacta el rayo vendrá dada por (7.72).

$$V_{c1} = Z_c \cdot \frac{I}{2} \quad (7.72)$$

siendo Z_c la impedancia característica del conductor en Ω , e I la intensidad máxima del rayo en A.

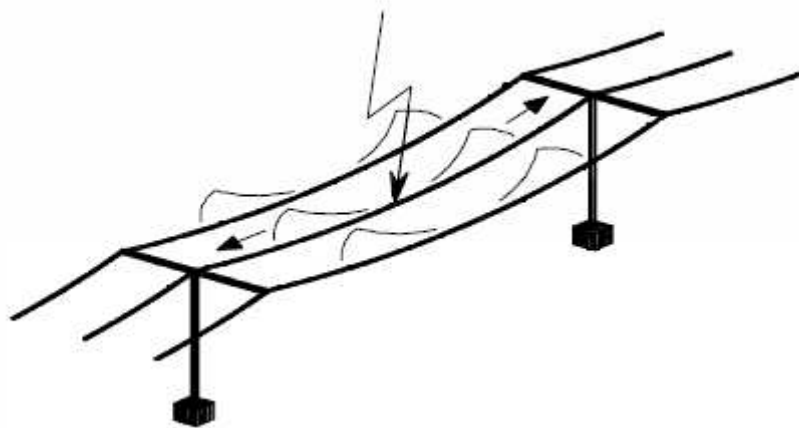


Figura 7.42. Impacto en un conductor de fase.

La impedancia de onda de un conductor se encuentra en función de su altura media h y de su radio r_c , y se puede con la expresión (7.73).

$$Z_c = 60 \cdot \ln \left(\frac{2h}{r_c} \right) \quad (7.73)$$

En las otras fases de la línea también se originarán sobretensiones por acoplamiento. Si K es el factor de acoplamiento entre dos fases, la tensión máxima inducida en otra fase será (7.74).

$$V_{C2} = K \cdot V_{C1} = K \cdot Z_C \cdot \frac{I}{2} \quad (7.74)$$

El contorneamiento en la línea puede originarse:

- entre conductores de fase si la diferencia de tensiones

$$V_{C1} - V_{C2} = (1 - K) \cdot Z_C \cdot \frac{I}{2} \quad (7.75)$$

es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores

- en la cadena de aisladores más próxima al impacto si las tensiones que se propagan desde el punto de impacto superan la tensión crítica de contorneamiento.

7.10.2.2. Impacto en un conductor de tierra

Existen dos posibilidades que se pueden presentar: el rayo impacta en un conductor de tierra en un punto situado en medio del vano o justo en el poste.

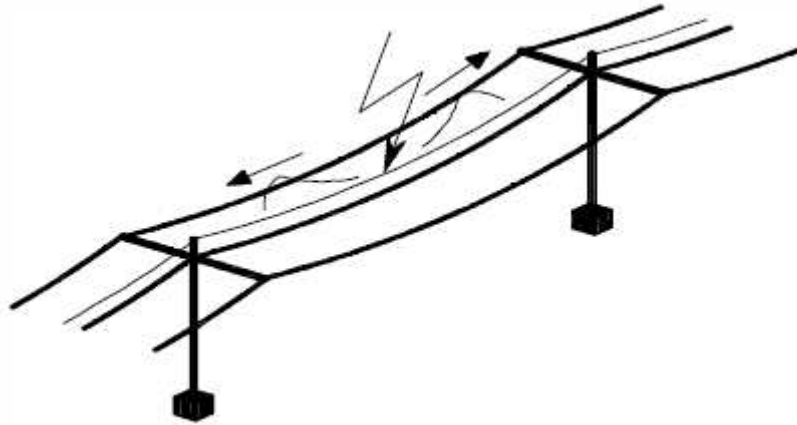


Figura 7.43. Impacto en medio del vano.

Si el impacto se produce en el conductor de tierra, figura 7.43. el análisis inicial es similar al anterior. Las tensiones originadas en este conductor y en el conductor de fase serán

$$V_{CT} = Z_{CT} \cdot \frac{I}{2} \quad (7.76)$$

$$V_C = K \cdot V_{CT} \quad (7.77)$$

siendo Z_{CT} la impedancia característica del cable de tierra, y K el factor de acoplamiento entre el cable de tierra y un conductor. Este coeficiente de acoplamiento se puede obtener a partir de la impedancia característica del cable de tierra, Z_{CT} , y a partir de la impedancia mutua entre cable de tierra y conductor, Z_{CT-C} , según la siguiente expresión

$$K = \frac{Z_{CT-C}}{Z_{CT}} \quad (7.78)$$

$$Z_{CT} = 60 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{CT}}{r_{CT}} \right) \quad (7.79)$$

$$Z_{CT-C} = 60 \cdot \ln \left(\frac{D_{CT-C}}{d_{CT-C}} \right) \quad (7.80)$$

donde h_{CT} es la altura del cable de tierra en m, r_{CT} es el radio del cable de tierra en m, D_{CT-C} es la distancia entre la imagen del cable de tierra y el conductor en m, y d_{CT-C} es la distancia entre el cable de tierra y el conductor en m.

Si la diferencia entre las tensiones obtenidas

$$V_{CT} - V_C = (1 - K) \cdot V_{CT} \quad (7.81)$$

es suficientemente grande, entonces el contorneamiento se producirá entre el cable de tierra y el conductor de fase en el punto de impacto. Si no es así, las ondas de tensión que se produjeron en el punto de impacto alcanzarán los postes más próximos donde se originarán ondas que viajarán a tierra. A partir de este punto el proceso será más complejo.

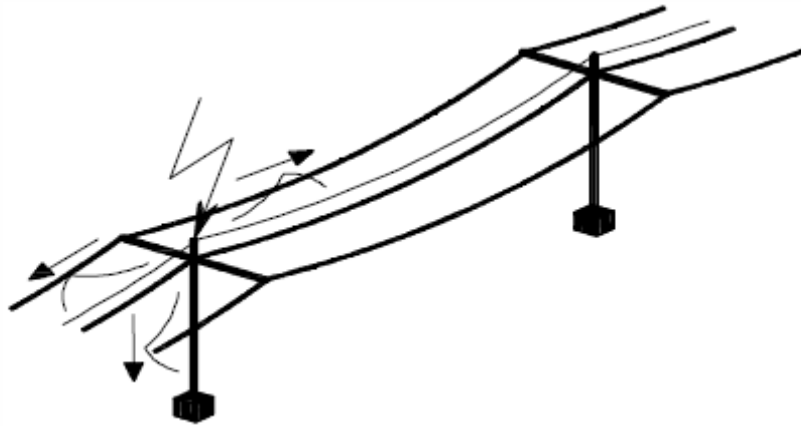


Figura 7.44. Impacto en el poste.

Si el impacto se produce directamente en el punto de conexión con el poste, figura 7.44., la corriente del rayo se dividirá entre una parte que viajará a tierra a través del poste, y otra que se dividirá a su vez en dos partes iguales que se propagarán en ambos sentidos a través del cable de tierra.

A continuación se describe el procedimiento adoptado por el IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines para calcular la tensión que aparece en los aisladores como consecuencia del impacto de un rayo en el cable de tierra o en un poste, y para calcular la corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará el contorneamiento.

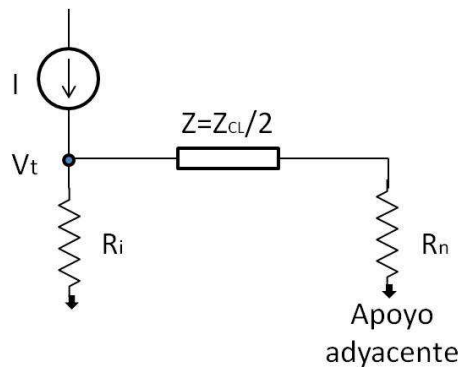


Figura 7.45. Modelo simplificado para calcular la tensión, V_t , que aparece en la parte alta del poste

$$V_t = \frac{t}{2} \left[Z_I - \frac{Z_w (1 - \varphi^N)}{1 - \varphi} \right] + \tau \cdot Z_w \left[\frac{(1 - \varphi^N)}{(1 - \varphi)^2} - \frac{N \cdot \varphi^N}{1 - \varphi} \right] \quad (7.82)$$

$$Z_w = \frac{2R_i^2 Z}{(Z + R_i)^2} \cdot \frac{(Z - R_n)}{(Z + R_n)} \quad (7.83)$$

$$Z_I = \frac{R_i Z}{(Z + R_i)} \quad (7.84)$$

$$\varphi = \frac{(Z - R_i)(Z - R_n)}{(Z + R_i)(Z + R_n)} \quad (7.85)$$

obtenida para un tiempo t de subida del rayo de $2 \mu s$. Se tienen en cuenta las reflexiones en el apoyo adyacente. Donde V_t es la tensión en la parte alta del apoyo en kV/kA, Z_{ct} es la impedancia característica del cable de tierra en Ω , R_i es la resistencia de puesta a tierra en Ω , R_n es la resistencia de puesta a tierra del apoyo adyacente en Ω , τ es el tiempo de propagación de la onda de tensión a lo largo del vano, y N es el número de onda en el que se alcanza el instante $t/2\tau$.

La tensión que aparece en un conductor se calcula mediante la expresión

$$V_C = V_t \cdot (1 - K) \quad (7.86)$$

donde K es el factor de acoplamiento entre cable de tierra y conductor.

La corriente crítica del rayo a partir de la cual se originará el contorneamiento se obtiene de la siguiente expresión

$$I_c = \frac{V_{\max}}{V_c} \quad (7.87)$$

donde $V_{\max}$ es la tensión máxima de contorneamiento que puede ser calculada a partir de la tensión crítica de contorneamiento (CFO - Critical FlashOver Voltage) según la siguiente expresión

$$V_{\max} = 1.5 \cdot CFO \quad (7.88)$$

7.10.3. Distribución en BT y puesta a tierra

En la figura 7.46., se representa un esquema típico de distribución en BT, se alimenta un transformador de poste mediante una línea de 20 kV a tres hilos, el primario está conectado en triángulo y el secundario en estrella con el neutro puesto a tierra.

Los usuarios reciben en su domicilio una de las fases y el neutro (230 V), la puesta a tierra del neutro que se lleva a los clientes se realiza en el poste siguiente de BT, y es independiente de la puesta a tierra de la cuba del transformador. De esta forma, se evita la transferencia de la sobretensión de la cuba al hilo del neutro. Esta constituye la única medida de protección de los usuarios, aunque sería conveniente, no se suele poner pararrayos en BT.

Para proteger el transformador se instala un juego de pararrayos entre las tres fases de MT y la cuba, estos pararrayos se instalan sobre la misma cuba para reducir al mínimo la longitud de los cables de conexión.

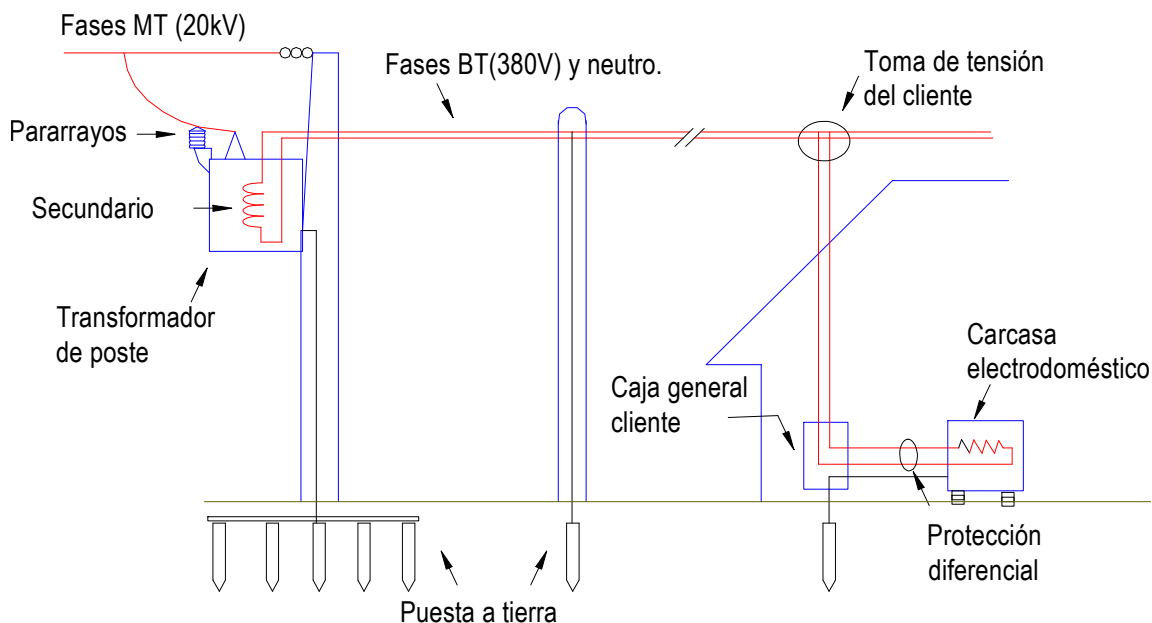


Figura 7.46. Esquema de distribución en BT y puesta a tierra.

7.10.4. Sobretensiones originadas por rayos indirectos

La radiación emitida por el impacto del rayo con un objeto (farola, árbol, pararrayos...) próximo a líneas eléctricas, de telefonía, de datos... induce corrientes transitorias que también son transmitidas por la red. Cuando el rayo cae directo a tierra o a través de una estructura conectada a tierra, la corriente de la descarga del rayo, puede elevar el potencial de tierra a varios miles de voltios como consecuencia de la corriente que circula por el terreno y también causar una sobretensión en el cableado cercano.

7.10.5. Propagación de la onda

Cualquier modificación del estado eléctrico de un conductor en uno de sus puntos se propaga a gran velocidad, de 150000 a 300000 km/s, según el dieléctrico que envuelva el conductor; a la frecuencia industrial de 50 Hz, se recorre a una distancia de 3 000 a 6 000 km en un período.

En el campo industrial, esta distancia es, salvo casos particulares, de un orden de magnitud diferente a la normal en los conductores empleados. Es aceptable, lógicamente, simplificar y considerar que la transmisión de ondas es instantánea sobre cualquier punto de la instalación.

En el caso del rayo, se trata de fenómenos «a alta frecuencia», de algunas decenas de kHz a varios MHz, en comparación con la baja frecuencia industrial de 50 Hz o 60 Hz.

- Particularidades de los fenómenos en «alta frecuencia»

En este dominio de frecuencias, las leyes de la electricidad utilizadas habitualmente no son suficientes:

- de una parte, la hipótesis de casi estacionalidad, que supone que la tensión se transmite instantáneamente a todos los puntos de la red, resulta falsa: el tiempo de transmisión no es despreciable ante el período de los fenómenos estudiados (ejemplo: a 1MHz, el período es de $1 \mu s$ ó 300 m),
- de otra parte, las capacidades parásitas de los elementos, el efecto pelicular, el acoplamiento electromagnético... se tornan importantes, cuando no preponderantes.

- y consecuencias prácticas en cuanto a los estudios

Para tratar cuantitativamente los efectos del rayo, debemos:

- primeramente, considerar las leyes de propagación de las ondas, conocidas con el nombre de «ecuaciones del telegrafista». Tener en cuenta que con las distancias recorridas (algunos metros o algunos kilómetros), el régimen de las ondas, no se establece instantáneamente, ni en el espacio ni en el tiempo,

- seguidamente, tener en cuenta las leyes de la reflexión, refracción en los puntos de discontinuidad y de superposición de las ondas en cada instante y en cada zona,
- finalmente, adaptar el modelo que describe las ecuaciones físicas de funcionamiento de los elementos para tener en cuenta los fenómenos preponderantes en alta frecuencia.

Ejemplo: un transformador sometido a un transitorio no se comporta, a esta frecuencia, como una inductancia en serie con una relación de transformación, sino como un divisor capacitivo (capacidades AT/tierra, BT/tierra y AT/BT). En este caso la relación de transformación AT/BT puede ser totalmente diferente de su valor a frecuencia industrial.

7.10.6. Atenuación de la propagación debido al efecto corona

El efecto corona se presenta cuando el potencial de un conductor en el aire se eleva hasta valores tales que superan la rigidez dieléctrica del aire que rodea al conductor. El efecto corona se manifiesta por luminiscencias o penachos azules que aparecen alrededor del conductor, mas o menos concentrados en las irregularidades de su superficie.

La descarga va acompañada de un sonido silbante y de olor de ozono. Si hay humedad apreciable, se produce ácido nitroso. La corona se debe a la ionización del aire. Los iones son repelidos y atraídos por el conductor a grandes velocidades, produciéndose nuevos iones por colisión. El aire ionizado resulta conductor (si bien de alta resistencia) y aumenta el diámetro eficaz del conductor metálico.

En las líneas de transmisión, el efecto corona origina pérdidas de energía y, si alcanza cierta importancia, produce corrosiones en los conductores a causa del ácido formado.

El efecto corona es función de dos elementos: el gradiente potencial en la superficie del conductor y la rigidez dieléctrica del aire en la superficie, valor que a su vez depende de la presión atmosférica y la temperatura.

Por ello las sobretensiones atmosféricas que se propagan a lo largo de los conductores se deforman a causa del efecto corona (pérdidas por ionización del aire que envuelve el conductor, importante para $U > 1 \text{ MV}$).

Ello se traduce en una atenuación de la amplitud y la pendiente de su frente. Se estima que después de 1,5 km las sobretensiones atmosféricas no presentan peligro para los centros de transformación.

7.10.7. Efectos debidos al rayo

En este apartado, que complementa al apartado 7.8.6, se especifican de forma resumida los principales efectos, directos e indirectos, consecuencia de la propagación del rayo. Hay que indicar que si la corriente entra por la parte de alta tensión, puede afectar a todos los circuitos (perturbaciones por conducción y radiación). Estos efectos, que comprenden todos los niveles de tensión, son:

- térmicos (fusión de elementos, incendios, explosiones),
- mecánicos, debidos a los esfuerzos electrodinámicos entre conductores paralelos próximos,
- de choque eléctrico, como consecuencia de los incrementos de potencial al propagarse la onda a través de las impedancias que presentan los conductores,
- de pérdida de aislamiento, por contorno de un aislador o cadena de aisladores de una fase, provocando una «corriente de fuga» a tierra a frecuencia industrial,
- elevación del potencial de tierra: 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 sus gradientes asociados con valores muy elevados, en las proximidades de las tomas de tierra, incluso a distancias de decenas de metros,
- electromagnéticos de alta frecuencia (espectro muy largo), radiaciones parásitas, inducción y acoplamiento de circuitos,
- también electroquímicas, acústicas y fisiológicas.

Todos estos fenómenos son causa de:

- degradación del material, de forma brutal, como las perforaciones dieléctricas por sobretensión o por envejecimiento prematuro a causa de las solicitaciones no destructivas inmediatamente pero sí por repetición,

- disfuncionamiento de las instalaciones, particularmente a través de los circuitos de corrientes débiles como: perturbaciones parásitas en los equipos de mando y control de comunicaciones,
- reducción de la continuidad de servicio por las interrupciones largas (caso de destrucción de material) o cortas (disfuncionamiento de los automatismos de las redes),
- peligro para los seres humanos y los animales, sobre todo por la aparición de tensiones de paso que pueden provocar una electrización causante de electrocución.

7.11. Referencias bibliográficas

- [1] American Institute of Electrical Engineers, "Application guide on methods of substation grounding", Transactions vol 73 III-A, 271-274, (1954).
- [2] American Institute of Electrical Engineers, "Guide for safety in alternating current substation grounding", Public (1961).
- [3] Sverak J.G. et al., "Safe substation grounding (Part I)", IEEE trans on power apparatus and systems, vol 100, 4281-4290, (1981).
- [4] Sverak J.G. et al., "Safe substation grounding (Part II)", IEEE trans on power apparatus and systems, vol 101, 4006-4023, (1982).
- [5] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "Guide for safety in alternating current substation grounding", Public (2000).
- [6] Rudenberg R., "Grounding principles and practices. I-Fundamental considerations on ground currents", Electrical Engineering, vo. 64, 1-13, (1945).
- [7] Biddle Company J. G., "Manual on ground resistance testing", Publ. 25 J, (1952).
- [8] Kinyon A. L., "Correlation of measured and calculated substation ground grid resistance", AIEE Trans., vol 78 part I, 698-701, (1959).
- [9] Tagg G. F., "Earth resistances", Pitman Publishing Corporation, (1964).
- [10] Wenner F., "A method for measuring earth resistances", Bulletin of the Bureau of Standards, vol 12, 469-482, (1916).
- [11] Dawalibi, Mukhedkar. *Earth Resistivity Measurements in a Two Layer Earth Structure*. IEEE Paper C 74 1996.
- [12] Comisión Permanente del Código Eléctrico Nacional, (1991). *Código Eléctrico Nacional*. Venezuela. Comité de Electricidad (CODELECTRA)
- [13] IEEE *Guide for Safety in AC Substation Grounding*, ANSI/IEEE Standard 80, 1983
- [14] IEEE Std 81 1993 *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*.
- [15] IEEE Std 142-1991. *Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. Green Book
- [16] IEEE Std. 1100 - *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*, IEEE Emerald Book.
- [17] Manrique O. (2004). *Modelo de mantenimiento Centrado en Confiabilidad en los SPAT de las Estaciones de Digitel C.A*. Tesis de Post-Grado no publicada, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional. Maracay
- [18] Martinez, M; R. Montano; M. Aristizabal. "Uso del ATP/EMTP para el estudio de las sobretensiones inducidas en líneas aéreas considerando el efecto de cables de guarda y neutro". Revista Latinoamericana de Usuarios del EMTP/ATP. Buenos Aires, Argentina . Julio. 2002. Vol 3
- [19] M. Martinez, Jorge Ramirez, Levys Laffont, Alexander Da Silva. "Estudio de Sobretensiones Inducidas en Sistemas de Media Tension considerando la resistividad del suelo". Simposio Internacional sobre Calidad de Energia Electrica (SICEL 2001). Bogota D.C., Colombia. Noviembre 2001.
- [20] J. Ramirez, M. Martinez, J. Rodriguez, E. Da Silva, S. Davila. "Modelación de la ruptura del aislamiento en líneas aéreas de media tension, ante la ocurrencia de descargas atmosféricas". II Congreso Venezolano de Ingeniería Eléctrica. Merida. Venezuela. Octubre 2000. Volumen I. Pág. 41-47.
- [21] Diaz Luis; Martinez, M; Rodriguez, J; Ramirez, J.. "Efecto de la variación temporal de la resistividad del suelo y los días de tormenta en la tasa de salida". CIGRE- II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica. Porlamar, Venezuela. Junio 2009. CD. pp. 1 - 8
- [22] Rodriguez, J; Ramirez, J.; Martinez, M. "Efecto de las condiciones de operación a frecuencia industrial (60 Hz) en la capacidad de protección de los descargadores de sobretensiones en sistemas de distribución". II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica. Porlamar, Venezuela. Junio 2009.
- [23] Gabriela Rodriguez; Syam Singh; Martinez, M; Cesar Dacchille. "Establecimiento de valores de sobrecarga en circuitos subterráneos de distribución de la c.a. la electricidad de Caracas.". II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica. Porlamar, Venezuela. Junio 2009. CD

- [24] Re, V. (1979). *Instalaciones de Puesta a Tierra*. Barcelona, España: Ediciones Marcombo S.A.
- [25] Tagg, G. (1964). *Earth Resistance*. New York – U.S.A.: Pitman Publishing Corporation.
- Angel Rodríguez Montes. “Rayos NO gracias”. www.pararrayos.org. Actualización 21.08.2007.
- [26] Ignasi Colominas, “Cálculo y diseño asistido por ordenador de tomas de tierra de instalaciones eléctricas”, Tesis Doctoral, Universidad de La Coruña. (1995).
- [27] Aller, J. M., “Diseño de Sistemas Complejos de Puesta a Tierra en Terrenos con Estratos Múltiples y con Consideración de su Comportamiento en Régimen Transitorio”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, (1993).
- [28] Montoliu Gili, Antonio de. “Puesta a tierra: módulo de seguridad”. Publicación Barcelona : Enher, 1995
- [29] “Instalaciones de puesta a tierra”. Publicación Madrid : Ediciones de Autor Técnico, 1999
- [30] Moreno Clemente, Julián. “Instalaciones de puesta a tierra en centros de transformación”. Málaga : Julián Moreno Clemente, 1991
- [31] Martínez Requena, Juan José “Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas”. Publicación Madrid : Paraninfo, 1997
- [32] García Márquez, Rogelio. “La Puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el R.A.T.”. Publicación Barcelona : Marcombo, D.L. 1990
- [33] Re, Vittorio . “Instalaciones de puesta a tierra”. Publicación Barcelona : Marcombo, D.L. 1988
- [34] “Guía técnica sobre cálculo, diseño y medida de instalaciones de puesta a tierra en redes de distribución “. Publicación [S.l.] : UNESA, 1985
- [35] “Los esquemas de conexión a tierra en BT (regímenes de neutro)” Scheneider Electric Ed
- [36] “Los esquemas de las conexiones a tierra en el mundo y su evolución” Scheneider Electric Ed
- [37] “El rayo y las instalaciones eléctricas en AT” Scheneider Electric Ed
- [38] C.T.R. Wilson, “Investigations on lightning discharges and on the electrical field of thunderstorms”. Philosophical Tr., Royal Society, 1920.
- [39] Bell, E. y Price, A. “Lightning investigations on the 220 kV system of Pennsylvania power and light Co.” (1930). AIEE Tr. Vol. 50-1931.
- [40] Whitehead , Gilman. “The mechanism of lightning flashover on HV and EHV lines”. Electra, March, 1973.
- [41] Brown, G.G. y Whitehead, E.R. “Field and analytical studies on transmission line shielding”. IEEE-PAS, Vol. 88-1969.
- [42] Hagenguth, J.H. et al. “Determination of lightning response of transmission lines by means of geometrical models”. AIEE Tr. Feb, 1960.
- [43] Wagner, C.F. y Hileman, A.R. “The lightning stroke”. AIEE Tr. Junio 1958.
- [44] Wagner, C.F. y Hileman, A.R. “A new approach to the calculation of lightning performance of lines: Pt III”. Tr. Oct. 1960.
- [45] Wagner, C.F. y Hileman, A.R. “A new approach to the calculation of lightning performance of lines: Pt II”. Dec. 1959.
- [46] Dommel, L, H.W. y Scott Meyer, W. “Computation of electromagnetic transients “. IEEE-PAS. Jul 1974.
- [47] “A method of estimating lightning performance of transmission lines”. AIEE COMITÉ REPORT – Tr. Vol. 69, 1950.
- [48] Anderson, J.G. “Montecarlo computer calculation of transmission line lightning performance”. AIEE Tr. Ago 1961.
- [49] Sato, A. “Estimating transmission line lightning outages by stochastic calculations”. IEEE-PAS. May-Jun 1980.
- [50] Cayton, J.M. y Young, E.S. “Estimating lightning performance of lines”. IEEE-PAS. Nov. 1964.