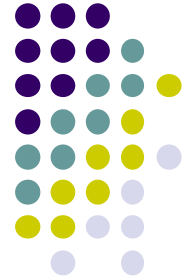


Transitorios de tensión



✚ Según la UNE-EN 50160 se define un **transitorio de tensión**, o **sobretensión transitoria**, como una sobretensión, oscilatoria o no oscilatoria, fuertemente amortiguada en la mayoría de los casos y que dura como máximo algunos milisegundos.

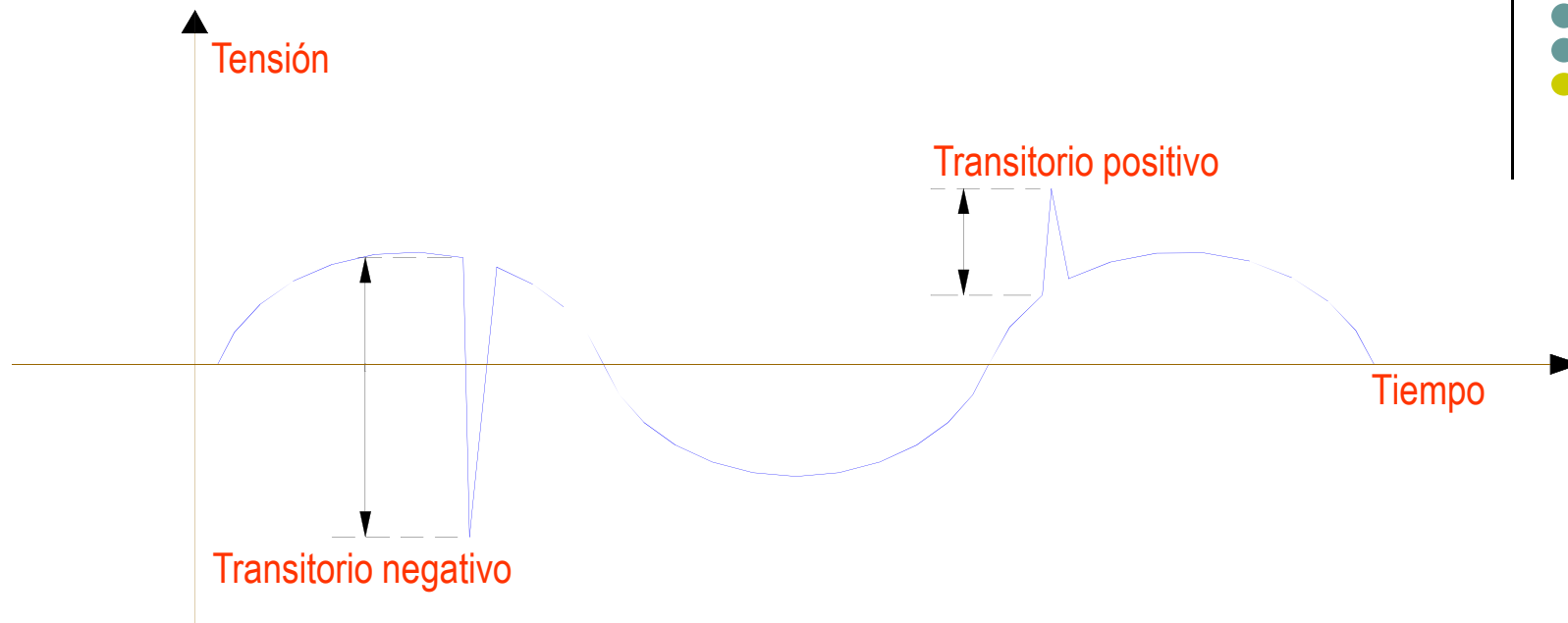
En función de su origen, se pueden distinguir dos tipos de transitorios:

✚ **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.

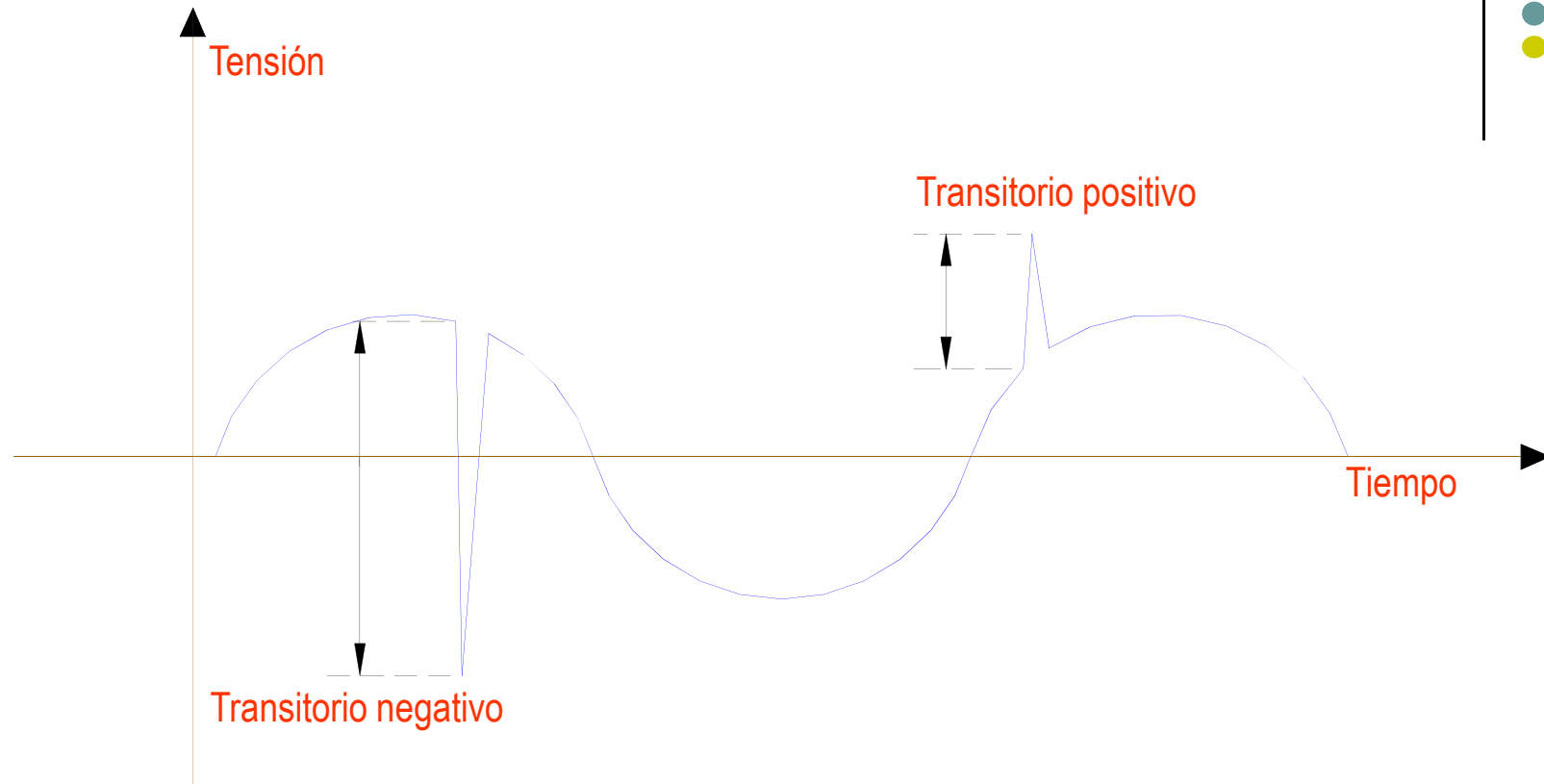
✚ Así pues, los **transitorios de tensión**, son variaciones bruscas del valor instantáneo de la tensión que pueden llegar a superar varias veces el valor máximo de ésta, **la duración está comprendida entre algunos microsegundos y muy pocos milisegundos** (hasta medio ciclo de la tensión senoidal).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

Transitorios de tensión



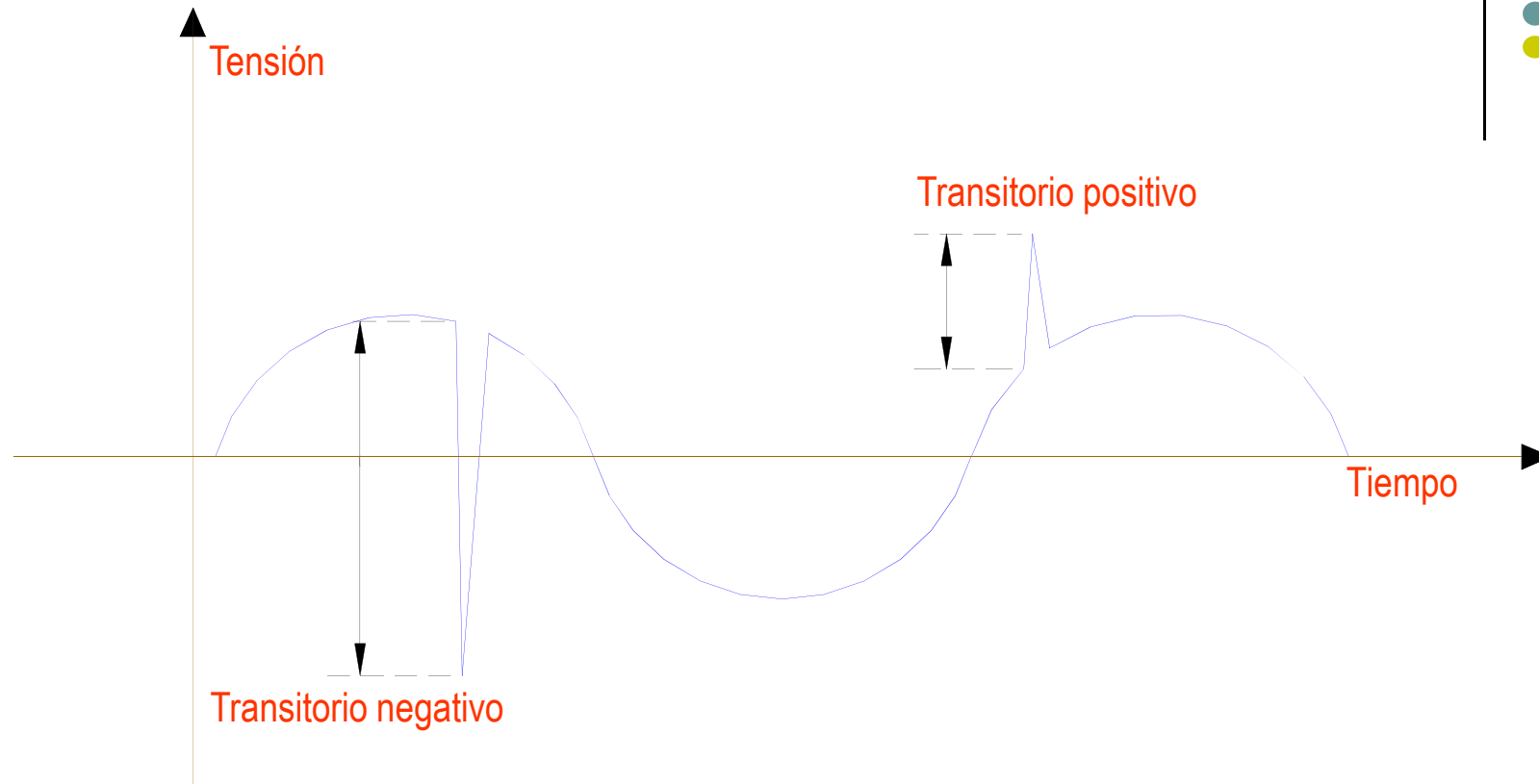
- ✚ Los **transitorios de tensión**, también denominados corrientemente impulsos de tensión, pueden aparecer tanto en las redes eléctricas de potencia como en las de control de forma esporádica, pero es posible también que se repitan a lo largo del tiempo de forma periódica.
- ✚ Pueden manifestarse en 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.

Transitorios de tensión



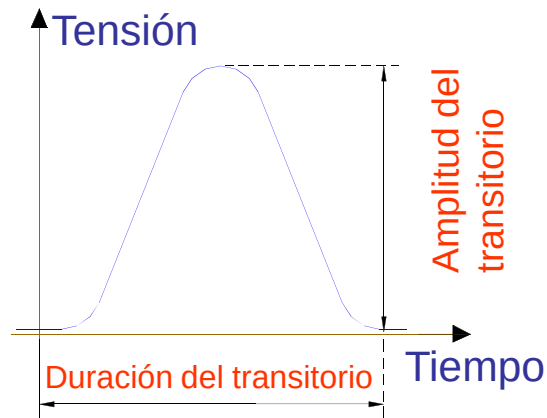
- ✚ Por su amplitud y duración, los transitorios de tensión tienen que ser analizados a partir de valores instantáneos de la onda de tensión y no mediante valores promediados, que son los que habitualmente se utilizan para medir otro tipo de perturbaciones que afectan a la amplitud de la onda.
- ✚ Pueden ser positivos o negativos, siendo sus efectos equivalentes.

Transitorios de tensión

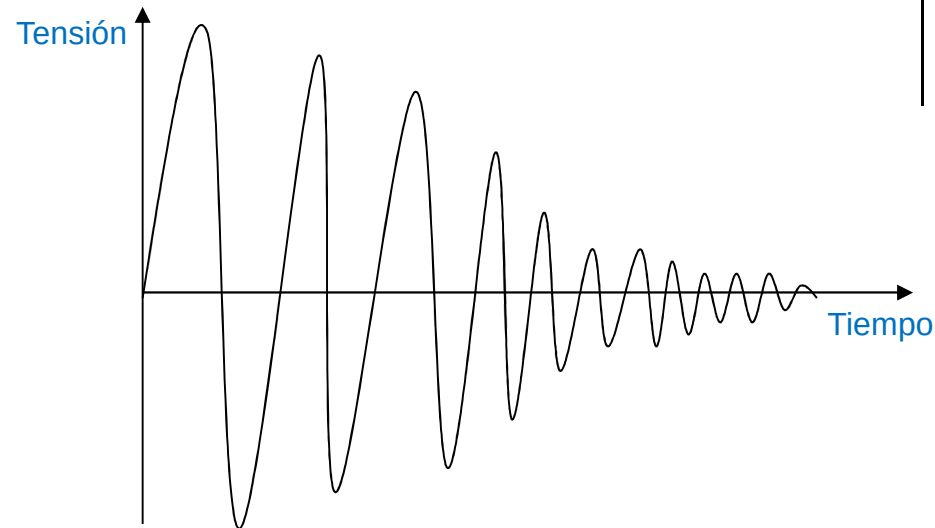


- ✚ Es posible que ciertos transitorios generados en líneas de alta tensión se propaguen por ellas, se transmitan a través del acoplamiento inductivo de los transformadores y aparezcan en las líneas de tensiones más bajas de una forma atenuada. El valor de pico disminuye cuanto más lejos se encuentre del punto de generación.

Transitorios de tensión



Transitorio de tensión simple



Transitorio de tensión complejo

✚ 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 una bajada o **complejos** con una subida y una serie de oscilaciones amortiguadas a lo largo del tiempo. También pueden ser **positivos** y **negativos** independientemente del instante de polaridad de la onda.

Transitorios de tensión

Parámetros característicos



✚ **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

Transitorios de tensión

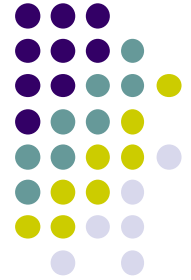
Valores de referencia



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

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

Transitorios de tensión



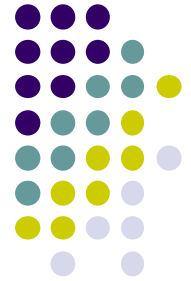
Límites

✚ 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.

Transitorios de tensión

CAUSAS QUE ORIGINAN LOS TRANSITORIOS

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



Transitorios de tensión



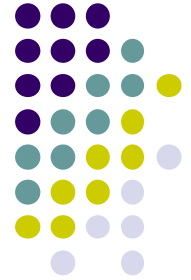
Fuentes externas al sistema eléctrico

Descarga atmosférica, el rayo

- ✚ 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.

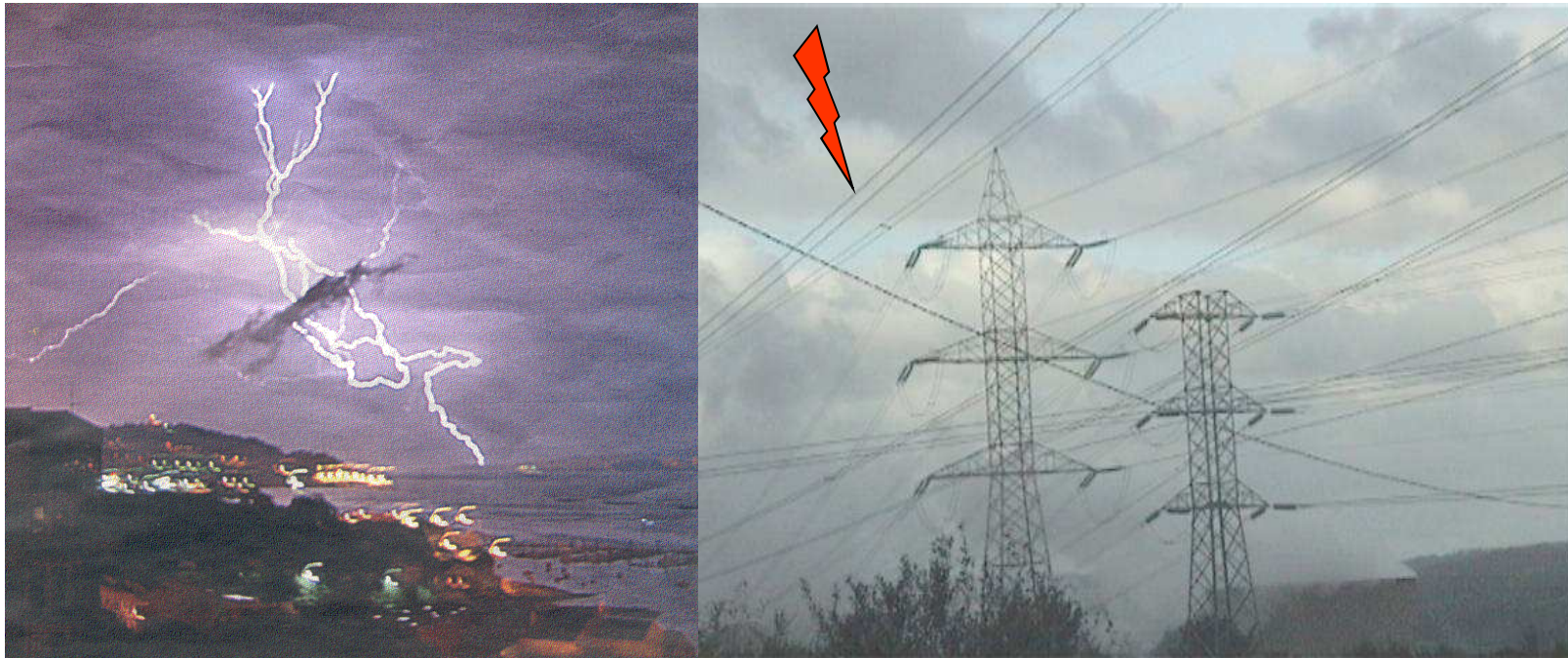


Transitorios de tensión

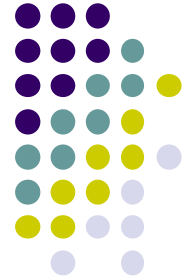


Fuentes externas al sistema eléctrico

- ⚡ Los parámetros de 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.
- ⚡ 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.

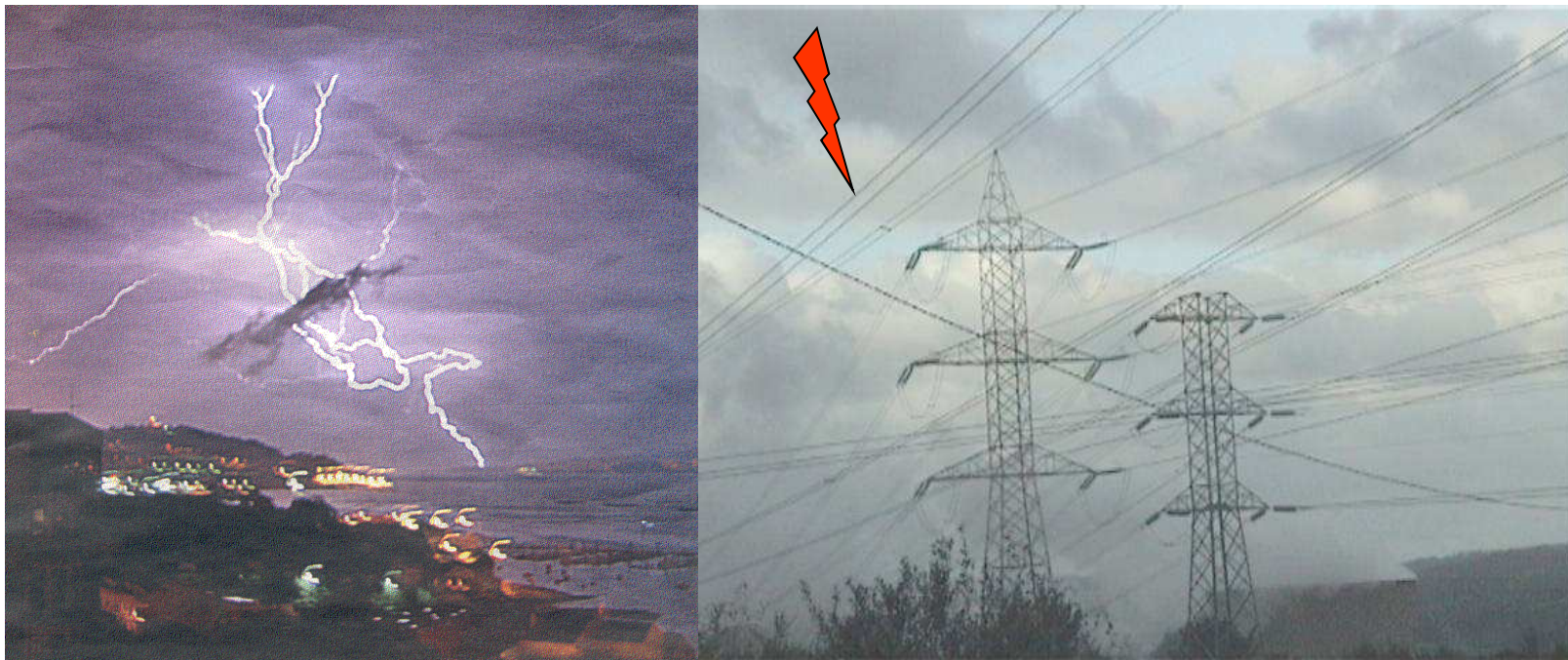


Transitorios de tensión



Fuentes externas al sistema eléctrico

- ✚ El rayo afecta directamente a las redes aéreas. La probabilidad y la frecuencia de aparición de estos transitorios depende de las características geográficas de cada zona, definidas por los “**niveles isoceráunicos**”, que determinan la frecuencia de las descargas atmosféricas..



Transitorios de tensión



Fuentes internas al sistema eléctrico

+ Operaciones de conexión ó desconexión

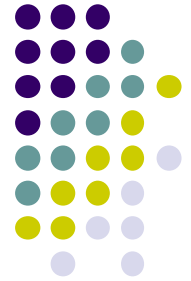
El transitorio de tensión se produce como consecuencia de un cambio brusco de la intensidad que circula por la red derivado de la conexión ó desconexión de cargas. En los casos de desconexión, se pueden generar transitorios de forma compleja cuando en el elemento de corte se producen 'reigniciones' en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

- ▶ Conexión ("energización") y desconexión de líneas eléctricas mediante seccionadores ó interruptores.
- ▶ Conexión y desconexión de transformadores.
- ▶ Conexión de baterías de condensadores.
- ▶ Conexión y desconexión de cargas.

+ Fusión de fusibles

+ Conmutaciones de convertidores electrónicos de potencia.

Transitorios de tensión



Causas internas: Parámetros

- ✚ Los parámetros de los transitorios de tensión generados por cada una de las fuentes internas 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.

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.

Transitorios de tensión



Efectos que producen

- ✚ **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 previsibles 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.

Transitorios de tensión

Efectos en 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.

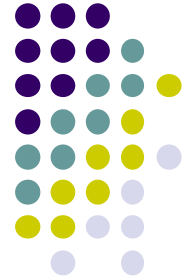
•**Receptores con riesgo de avería.** Básicamente, son los equipos que incorporan semiconductores de potencia:

- ▶ Rectificadores con diodos.
- ▶ Reguladores de velocidad de motores mediante tiristores.
- ▶ Reguladores de velocidad mediante Triacs.
- ▶ Reguladores de velocidad mediante GTO's

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

Transitorios de tensión



Efectos en los receptores

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 CA/CC. 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.

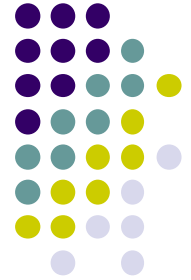
✚ ***Sistemas de control.*** Cuando están contruidos por microprocesadores, se pueden producir rupturas en la función de control.

✚ ***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.

Transitorios de tensión



Efectos que producen.

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

- ✚ **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 del PCC).
- ✚ **Categoría B:** (enchufes cercanos al PCC).
- ✚ **Categoría C:** (tomas de tensión exteriores y terminales de trafos).

Transitorios de tensión



Efectos que producen.

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

		F-F, F-N, F-T		N-T	
Categoría	Grado de exposición	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.

Valores de sobretensión y sobreintensidad máximos recomendados por IEEE con el fin de uniformizar los ensayos de los equipos.

Transitorios de tensión

Métodos de prevención y corrección



- + Reducir la emisión de transitorios, en la fuente de perturbación.
- + Atenuar su propagación.
- + Aumentar la inmunidad de los receptores.

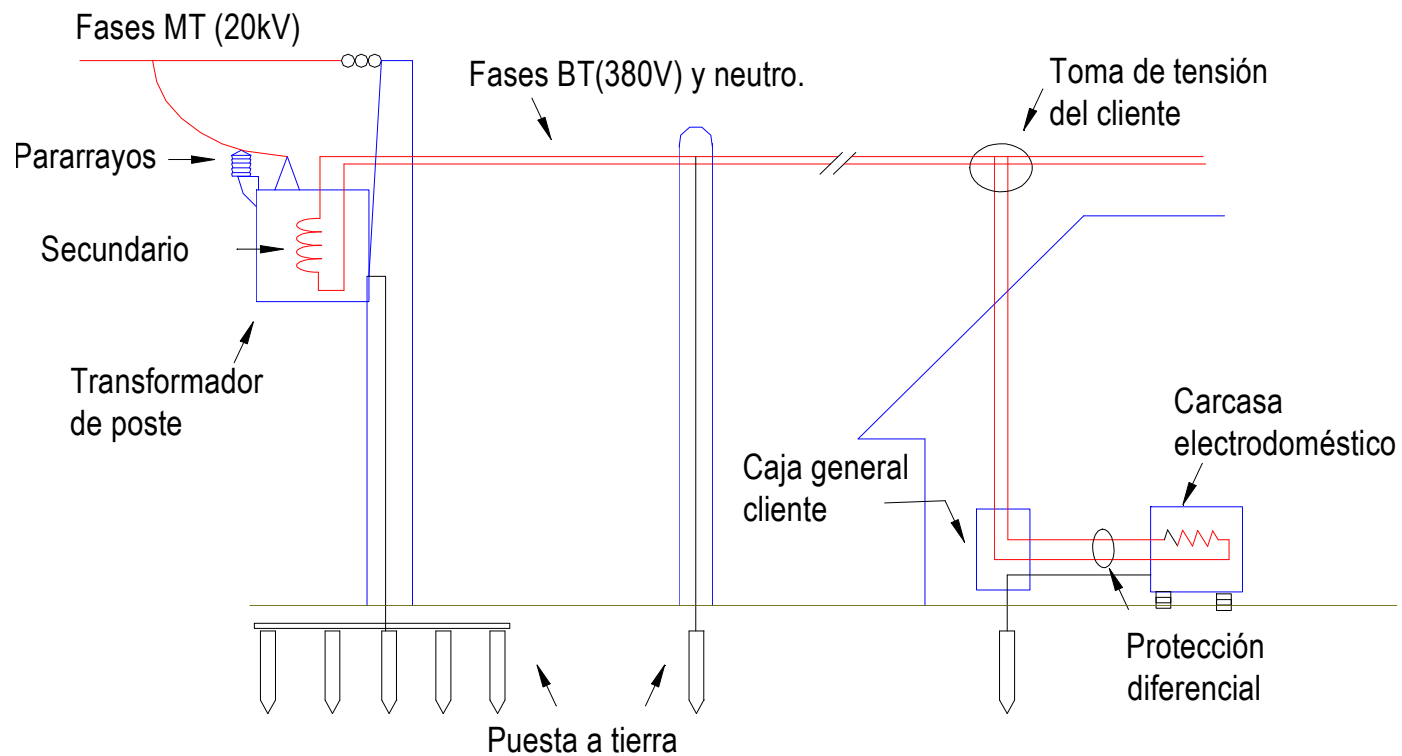
Medidas que puede adoptar la empresa suministradora

- + 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.

Transitorios de tensión

Efectos que producen.

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



Esquema de distribución en BT y puesta a tierra.

Transitorios de tensión



Métodos de prevención y corrección

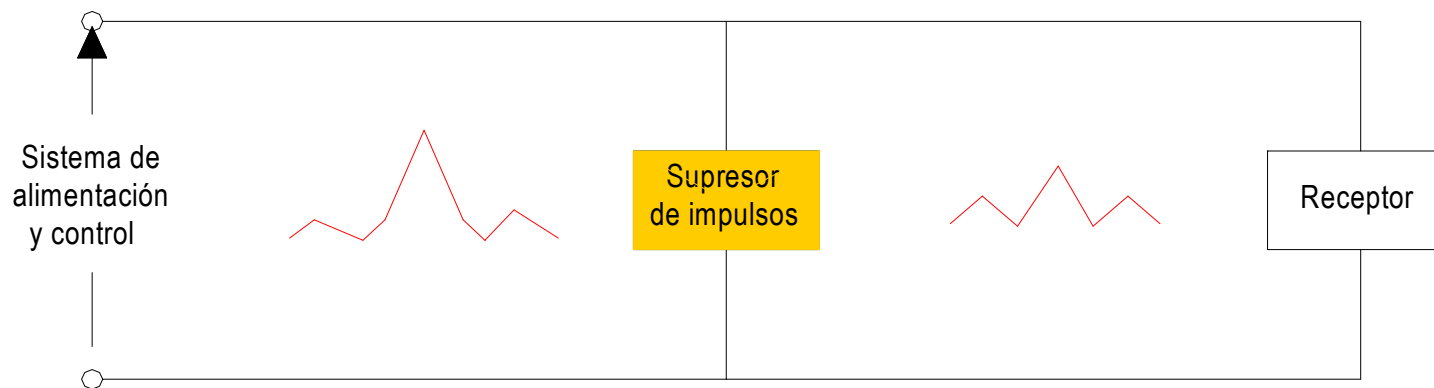
Medidas que puede adoptar el usuario

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.

Supresor de transitorios de tensión.

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 terminales del supresor durante la disipación.



Esquema de funcionamiento de un supresor de transitorios



Transitorios de tensión

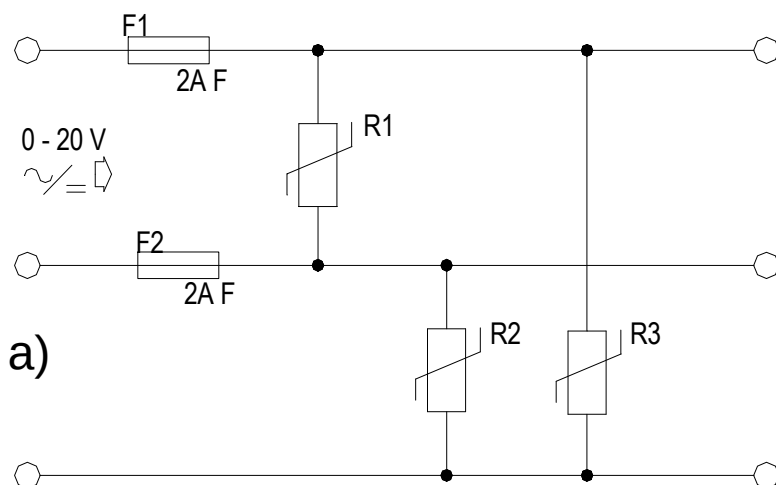
Métodos de prevención y corrección

Supresor de transitorios

Varistores y diodos Zener

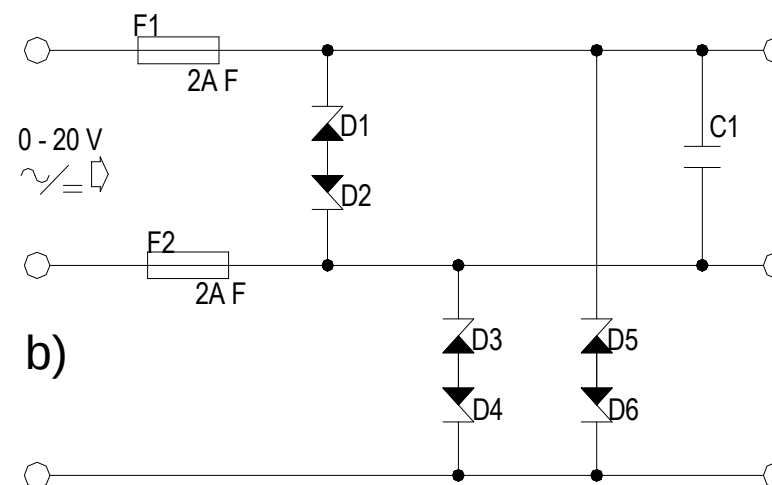
Tiempo de respuesta	nanosegundos
Tensiones nominales	disponibles en baja y media tensión
Picos de corriente admisibles	del orden de kA.

Parámetros característicos de los varistores



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

Parámetros característicos de los diodos Zener

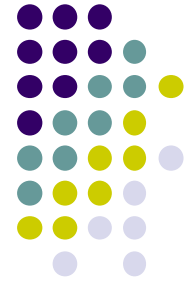


Esquemas de supresores de transitorios: a) con varistores , b) con diodos Zéner.

Transitorios de tensión

Métodos de prevención y corrección

Supresor de transitorios



+ 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 rasgos que se indican a continuación:

+ **Tiempo de respuesta:** microsegundos

+ **Tensiones nominales:** Superiores a 70V y hasta 70kV

+ **Picos de corriente admisibles:** hasta 60A.

+ Equipos protectores de sobretensiones.

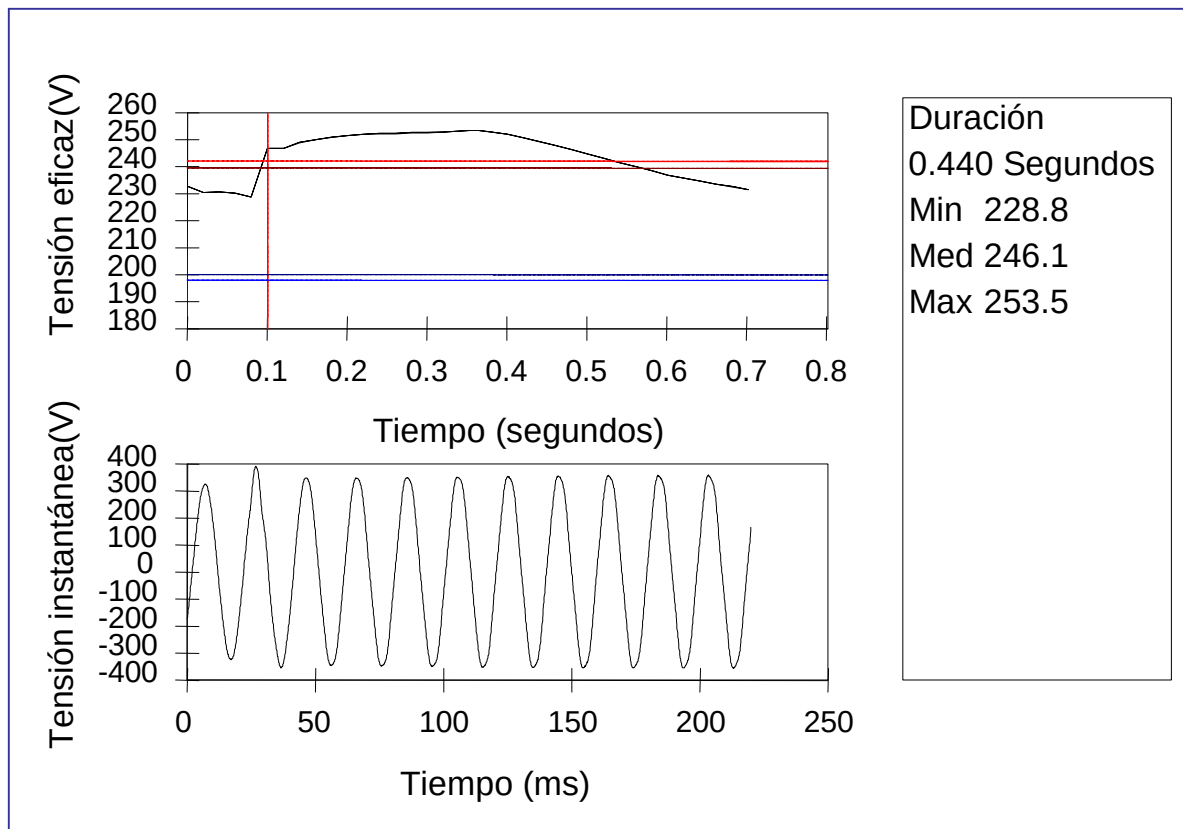
Son equipos conectados en serie en la entrada de la alimentación del receptor, bien en la de CA de BT, bien en la de CC, que lo desconectan de la misma con un determinado retraso de 5 a 10 milisegundos cuando aparece en ella un transitorio de tensión, efectuando a continuación la reposición en un tiempo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

Sobretensiones Temporales



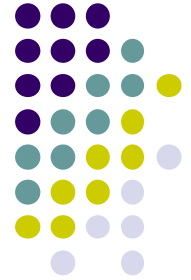
✚ Según la UNE-EN 50160, se define la sobretensión temporal como un aumento de la tensión de alimentación de duración relativamente larga.

✚ 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 de la tensión de referencia.



***Representación
gráfica de una
sobretensión
temporal.***

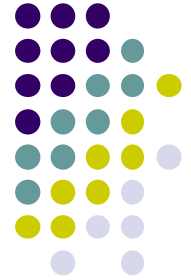
Sobretensiones temporales



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 en el lado de baja tensión mientras dure la corriente de falta.
- ✚ Tales sobretensiones no sobrepasan generalmente el valor eficaz de 1,5 kV.

Sobretensiones temporales



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).

El efecto rayo

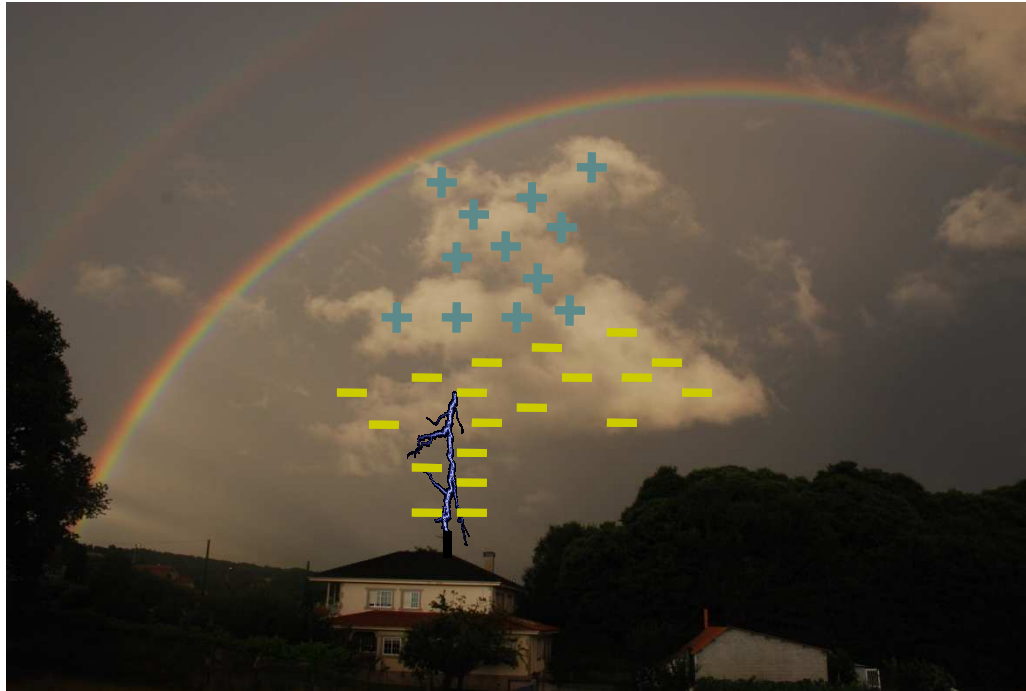


El rayo es un fenómeno perturbador importante en el funcionamiento de todas las instalaciones eléctricas, por varios motivos:

- ▶ 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 a 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 las comunicaciones, industria y comercio.

Formación del rayo



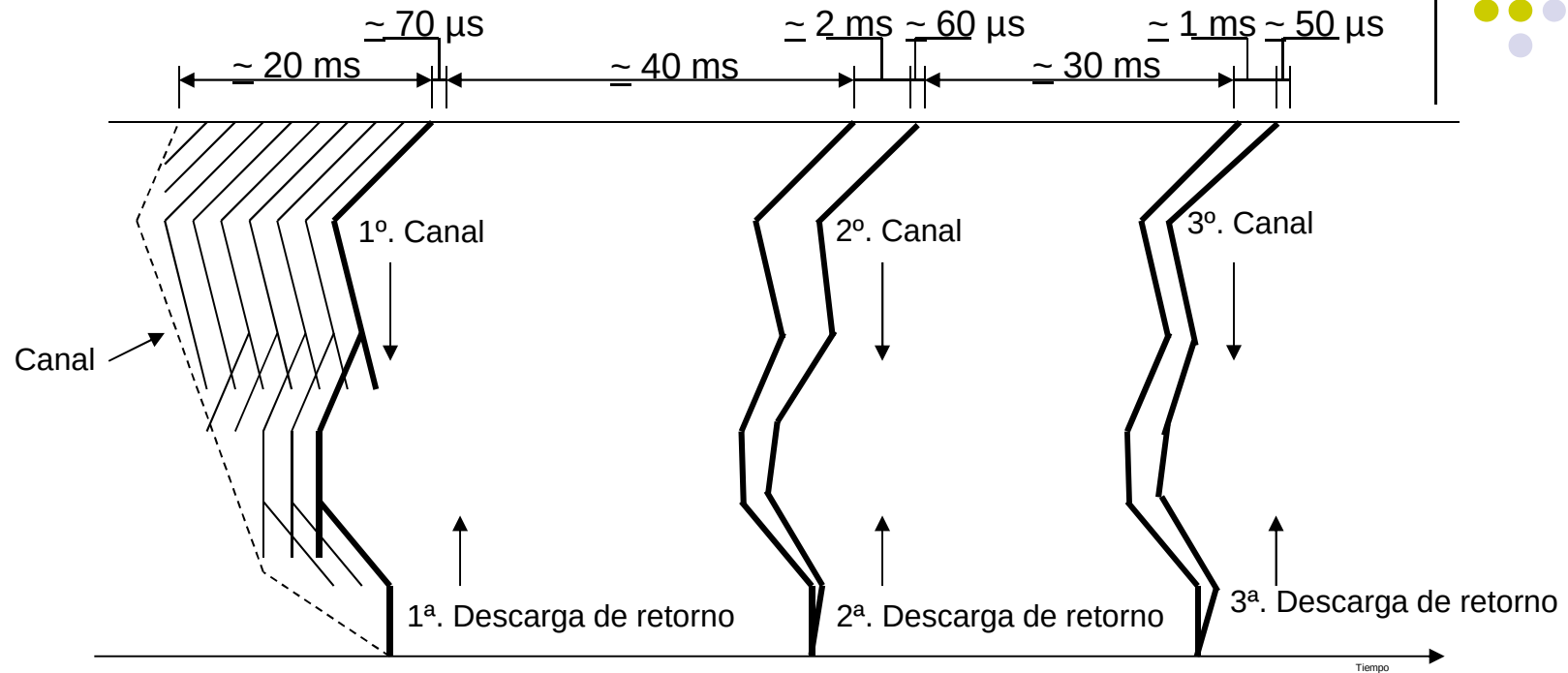
La tierra y la **electrosfera**, zona conductora de la atmósfera (con una altura del orden de 50 a 100 km), constituyen un condensador esférico natural que se carga por ionización, originando un campo eléctrico dirigido hacia el suelo, del orden de varios centenares de voltios/metro.

La nube de tormenta denominada **cúmulo-nimbus** es la fuente de la producción de rayos

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).

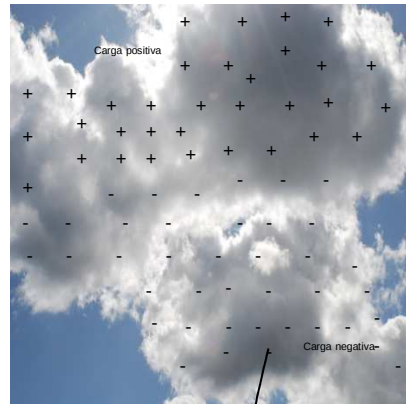
El campo eléctrico nube-suelo puede alcanzar 15 a 20 kV/m sobre un suelo plano. Pero la presencia de obstáculos, deforma y aumenta localmente este campo con factores de 10 a 100 y hasta 1.000 según la configuración de las irregularidades (fenómeno denominado «**efecto de punta**»). El gradiente de ionización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

Formación del rayo

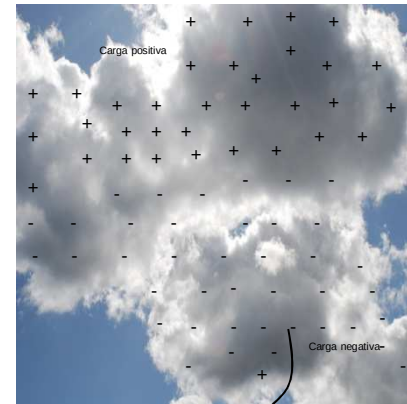
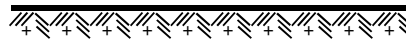


El inicio de la descarga en una primera instancia es invisible, en la cual varios trazadores se acercan a tierra, a modo de ramificaciones. Cuando el camino formado por los trazadores queda ionizado, se inicia la descarga de retorno principal, originando las descargas visibles. Globalmente, a escala 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.

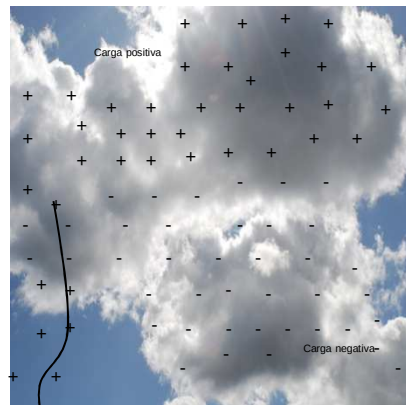
Descargas tipo rayo



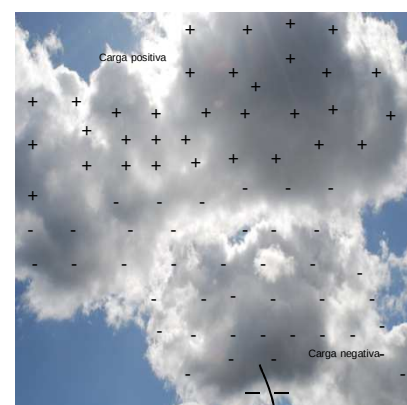
1



2



3



4



1- 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.

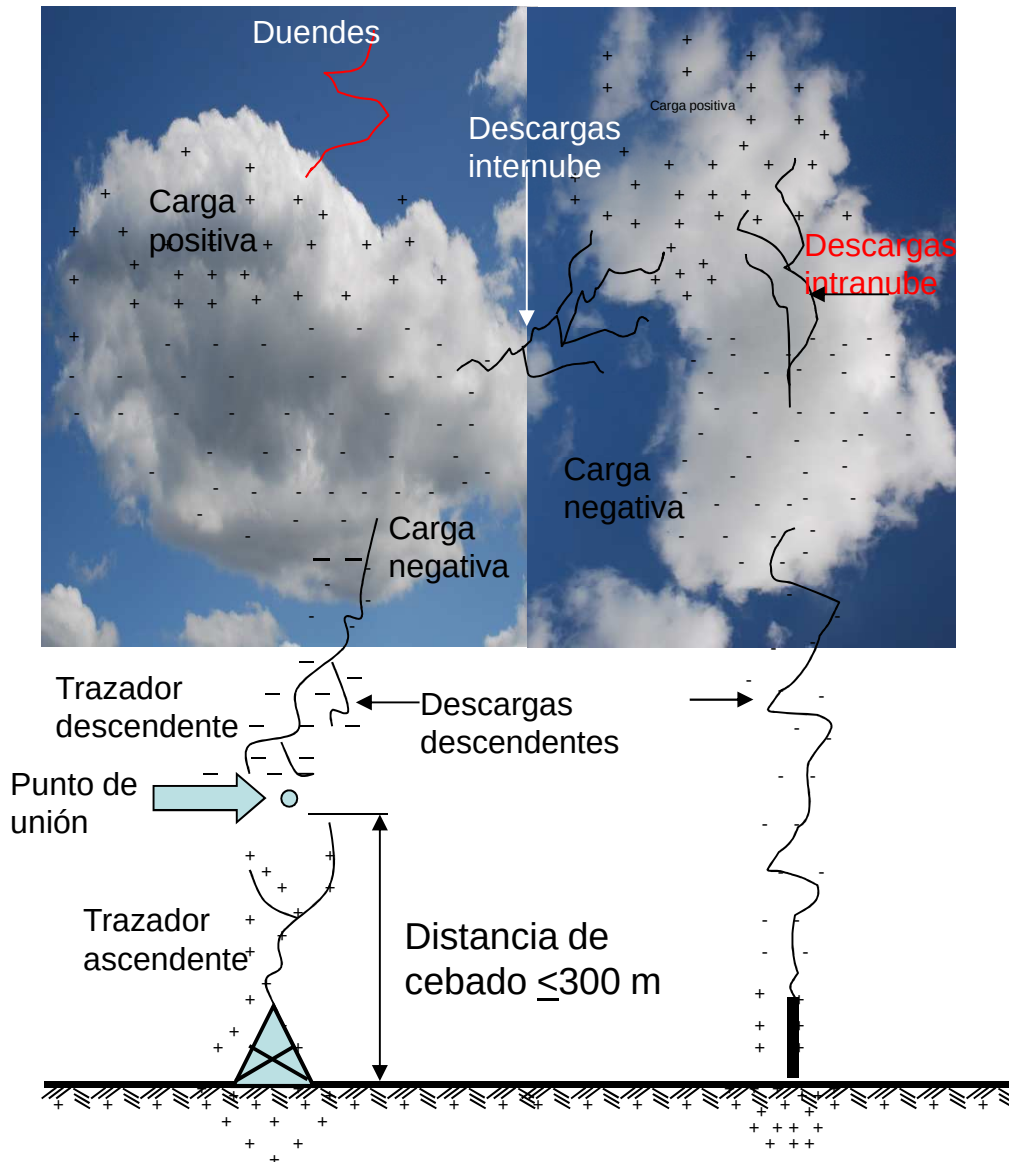
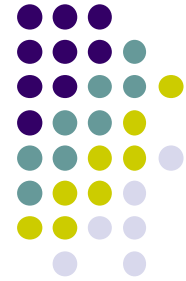
2- Descargas ascendentes. El trazador parte del suelo, desde un objeto que sobresale del terreno como un elemento puntiagudo y produce arborescencias abiertas hacia arriba. Es usual que se produzca en terrenos montañosos.

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

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

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

Descargas tipo rayo



Otro tipo de descargas rayo, son:

- **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.

Efectos del rayo



- ✚ **Efectos visibles:** El relámpago
- ✚ **Efectos acústicos:** el aire en el canal de la descarga se calienta y se expande en forma de una onda de choque (**trueno**)
- ✚ **Efectos térmicos:** liberación 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 inmerso en ese campo 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.

Tipos de accidentes causados por el rayo:

- ▶ ***Aquellos causados por un golpe directo***
- ▶ ***Aquellos causados indirectamente:***

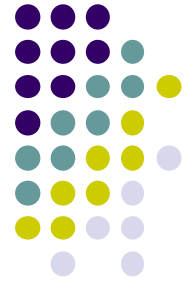
Efectos del rayo



✚ **Cargas electrostáticas durante la formación del líder.** El campo eléctrico presente es de alta tensión y genera el efecto punta en la parte más alta de la instalación. En el caso de la punta de un pararrayos, **las cargas electroestáticas 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 electroestático 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.

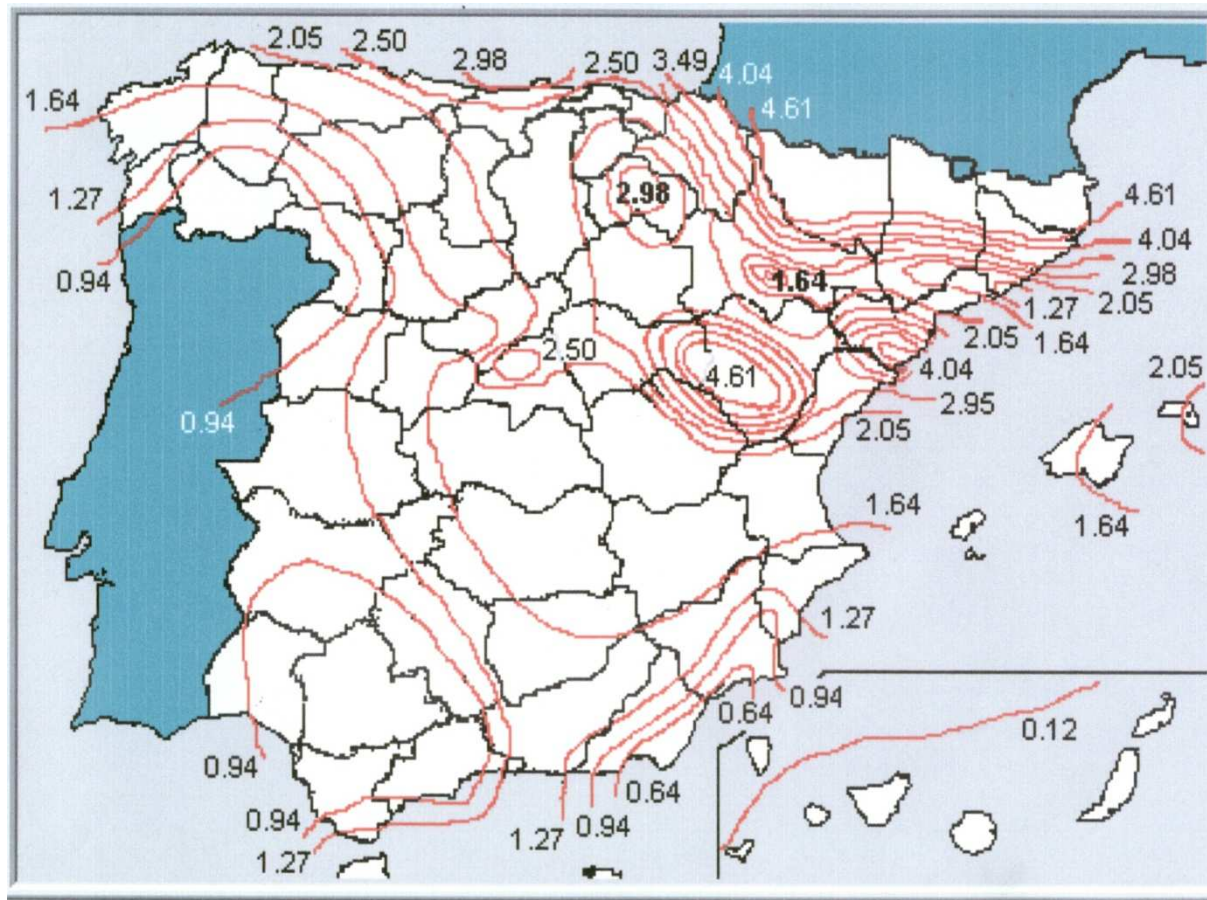
Efectos del rayo



✚ ***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 energía radiada por el pulso electromagnético en el aire, viaja a la velocidad de la luz induciendo por acoplamiento en 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.

Nivel Ceráunico



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



Densidad de rayos



Densidad de rayos N. Es la densidad anual de caídas de rayos (CdR) al suelo, expresada en CdR / km² / 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, N_k , conocido como **nivel ceráunico**, o al número de horas de tormenta al año, T_h , que se registran en un punto determinado.

Se puede establecer una relación entre los dos parámetros considerados: N_k y N :

$$N = k \cdot N_k^a$$

Donde N_k es el nivel ceráunico 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 siguiente:

$$N = 0.04 \cdot N_k^{1,25}$$

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

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:

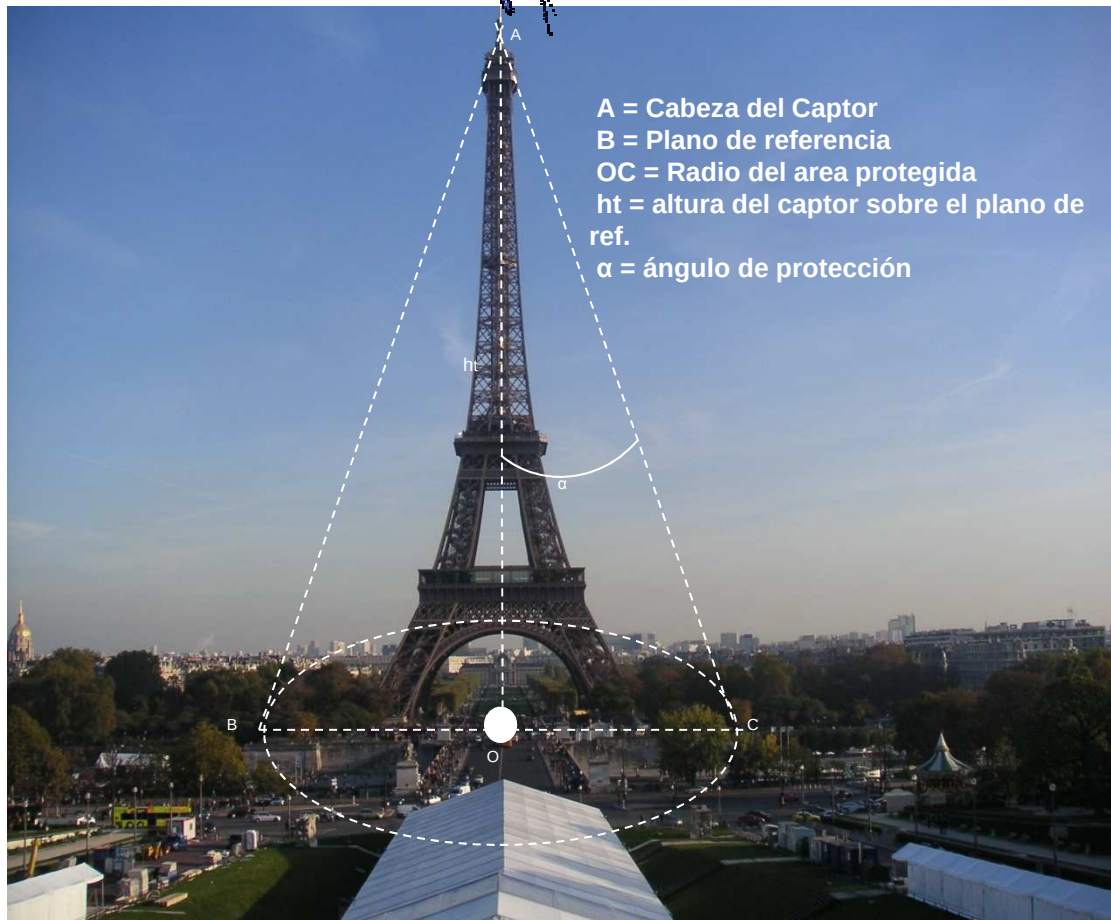
- **Cabezal captador (cactor).** Tiene la función de asegurar la formación del trazador ascendente.
- **Mástil.** Elemento extensible que permite dar la altura necesaria al cabezal captador para cubrir el radio de acción de la zona a proteger.
- **Anclaje.** Elemento que permite la sujeción del mástil.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

Cabezales captadores



- *captor de varilla simple*
- *captor de punta única*
- *captor de cinco puntas*
- *Captor tipo EMS (Early Streamer Emitter)*
- *Captor PDCE (pararrayos desionizador de cargas electrostáticas)*

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 probabilidad de recibir una descarga.

Sistema de puesta a tierra

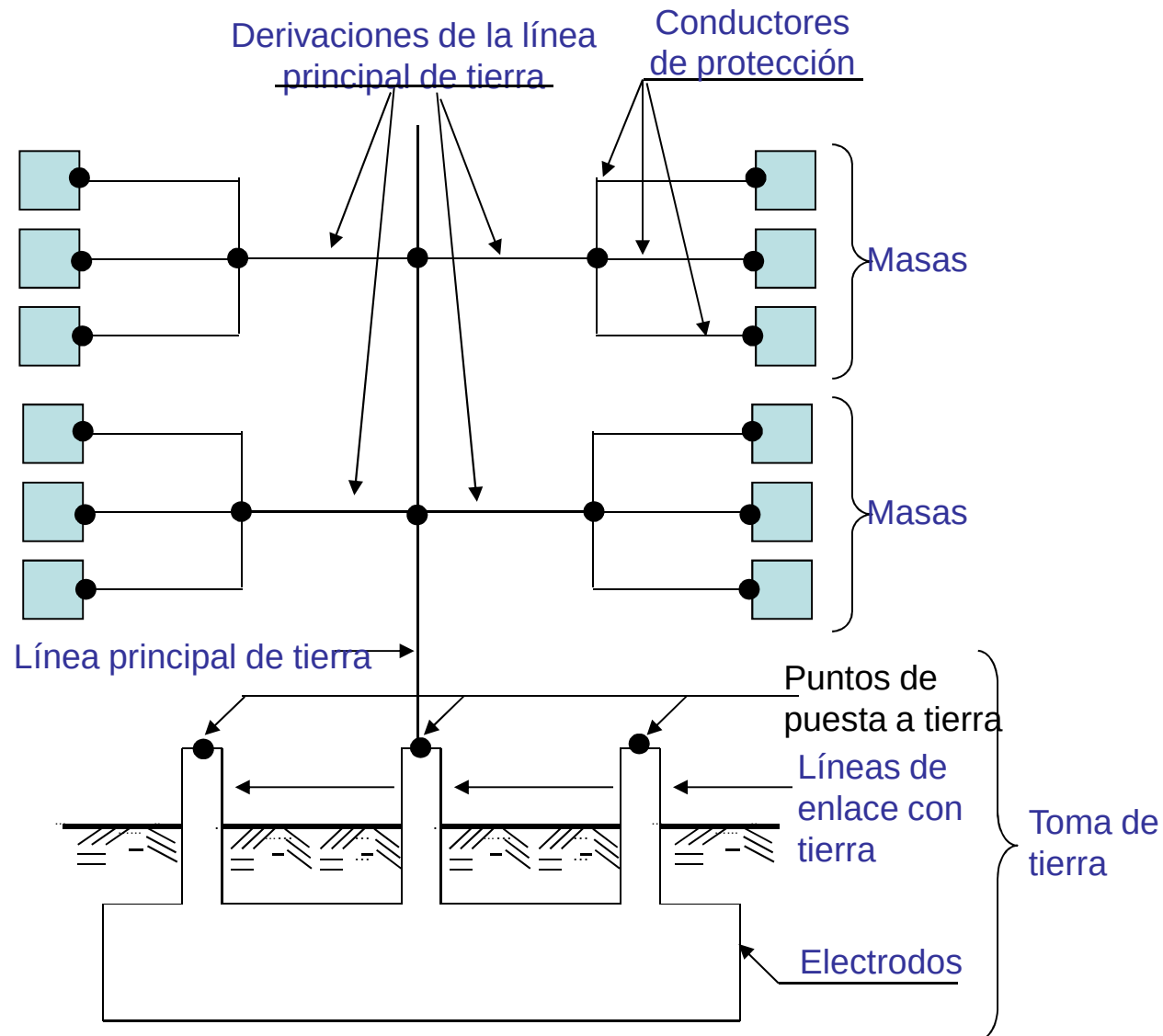


Un sistema de puesta a tierra consiste en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar que se dañen los equipos en caso de una corriente transitoria peligrosa, o también que por falta de aislamiento en uno de los conductores y al quedar en contacto con las placas de los contactos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

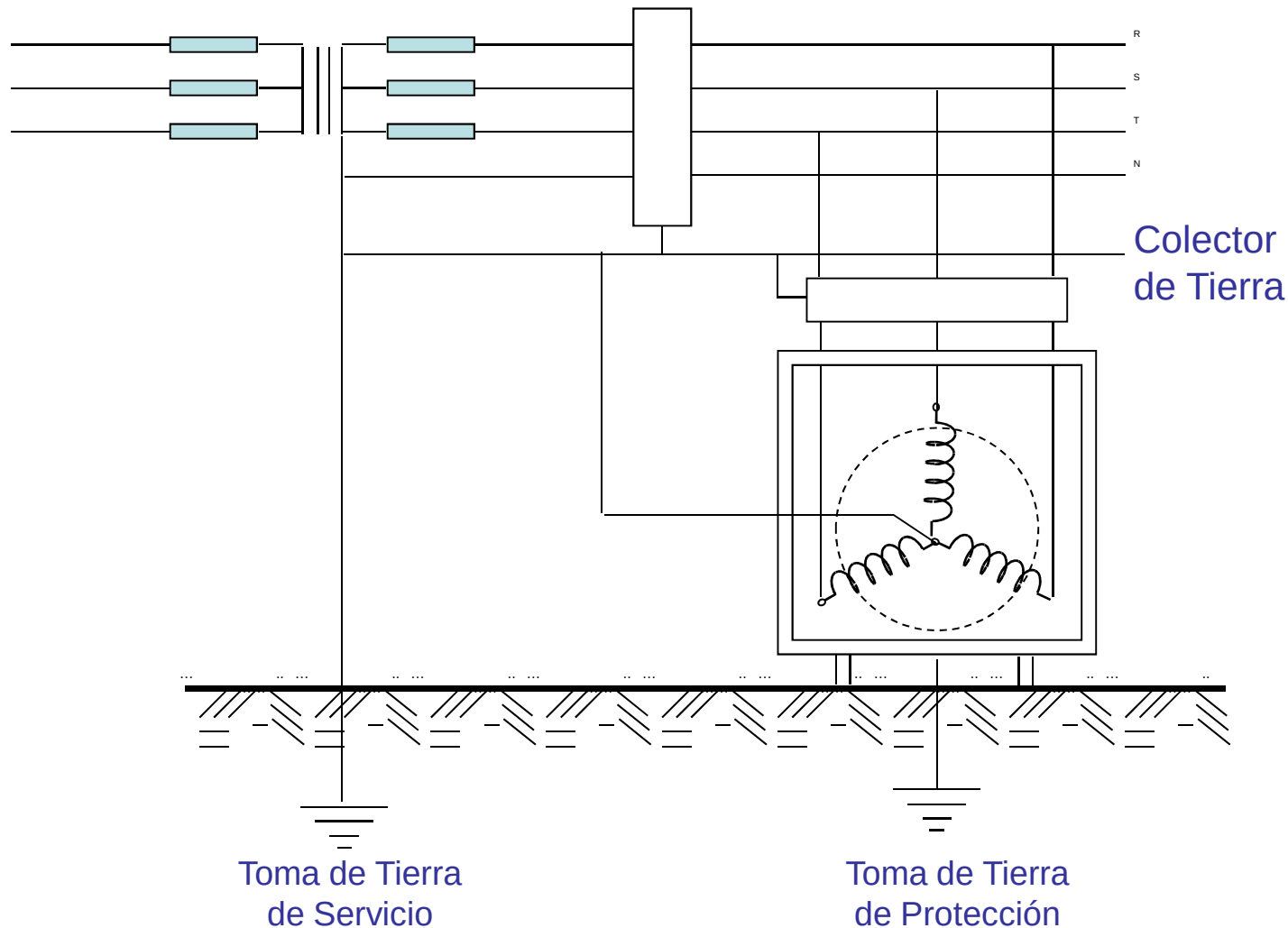
El objetivo de un sistema de puesta a tierra es:

- ▶ 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.

Esquema de un sistema de puesta a tierra



Esquema de un sistema de puesta a tierra



Las tomas de tierra de una instalación eléctrica pueden clasificarse de acuerdo con su funcionalidad en dos tipos:

- de **protección**
- de **servicio**.

Un esquema de ambas se presenta en la figura

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 AT
- ▶ 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.

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.

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.

Instalación de toma de tierra



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.

Instalación de toma de tierra



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.

Efecto de la corriente por el cuerpo humano



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.

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

Efecto de la corriente por el cuerpo humano



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

1. Valor de la intensidad de la corriente eléctrica
2. Valor de la tensión
3. Tiempo de paso de la corriente eléctrica
4. Valor de la resistencia óhmica que presenta el organismo
5. La trayectoria que siga la corriente por el organismo
6. Naturaleza de la corriente
7. Valor de la frecuencia en el caso de c.a.
8. Capacidad de reacción del organismo

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

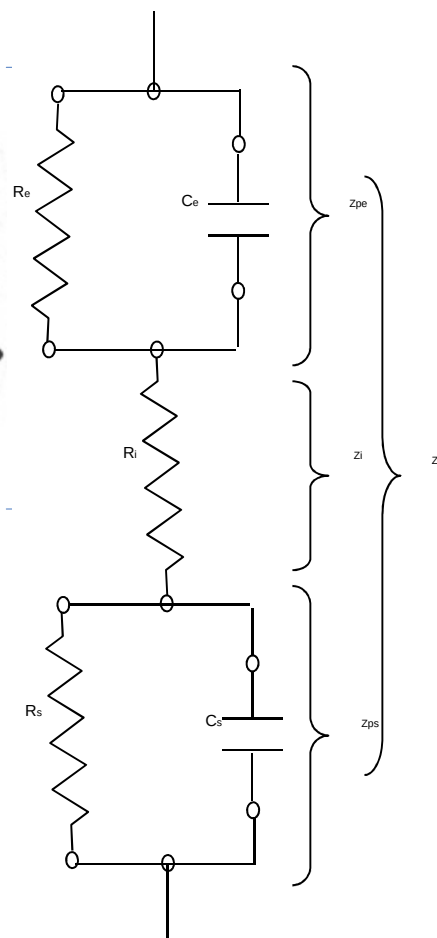
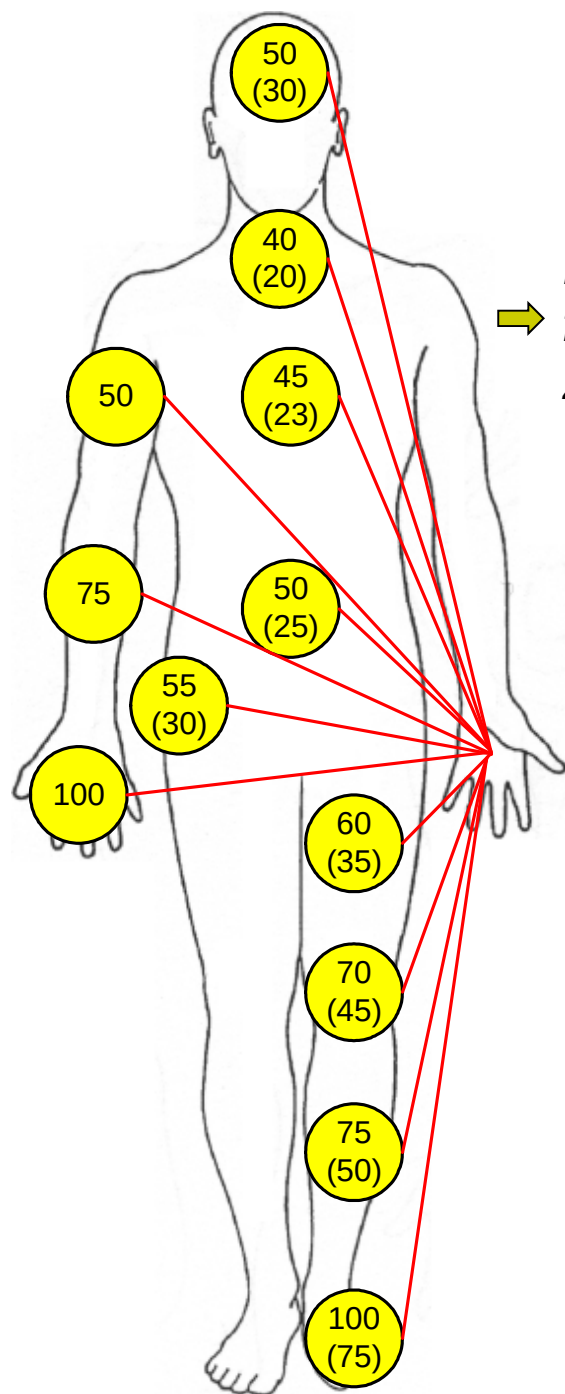
En general se puede decir que cuando una corriente eléctrica se deriva por el cuerpo humano, la intensidad de esta corriente viene dada por la Ley de Ohm:

$$\bar{I} = \frac{\bar{U}_t}{\bar{Z}_t + \bar{Z}_r} \quad \left\{ \begin{array}{l} U_t = \text{tensión de contacto} \\ Z_t = \text{impedancia total del cuerpo humano} \\ Z_r = \text{impedancia de retorno (circulo exterior al cuerpo).} \end{array} \right.$$



Impedancia del cuerpo humano

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



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

$$R_e = R_{ce} + R_{pe} \quad R_s = R_{cs} + R_{ps}$$

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

Impedancia del cuerpo humano

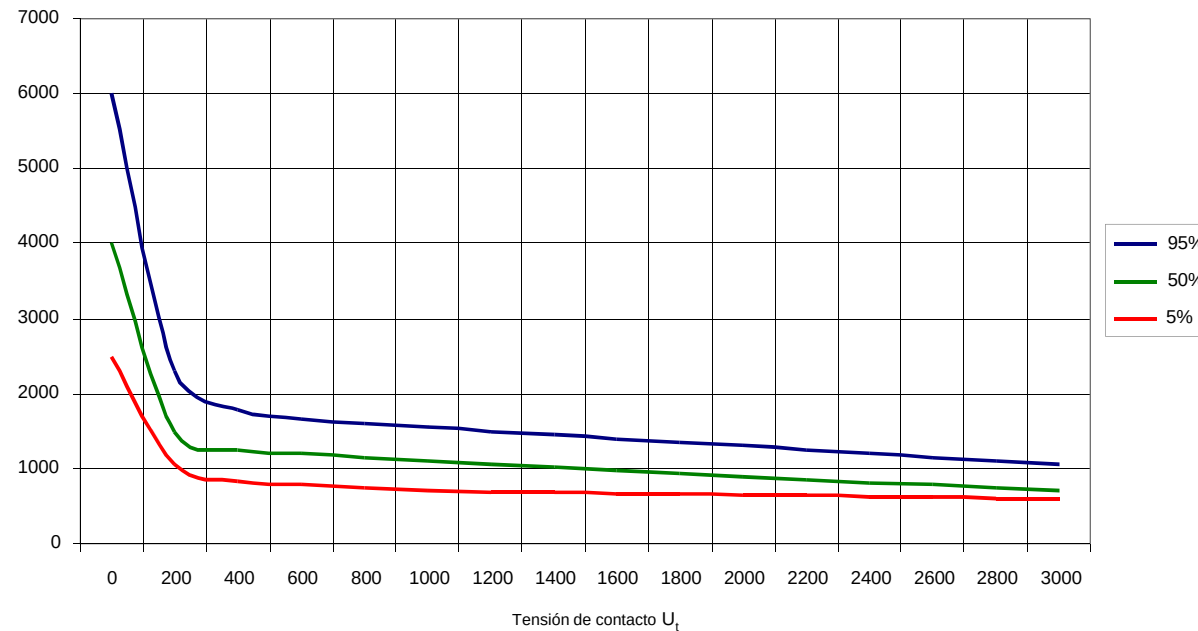


Valores de la impedancia total del cuerpo humano

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

Los valores de la impedancia total del cuerpo humano indicados en la tabla, 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 cm²) de piel seca.

Impedancia del cuerpo humano



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

Impedancia del cuerpo humano



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

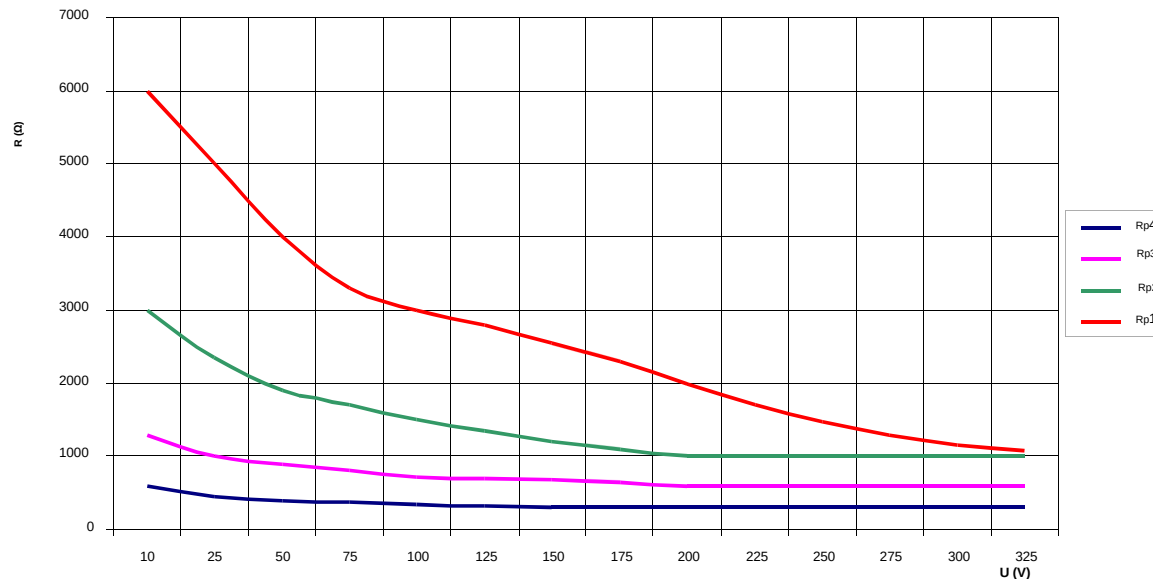
Impedancia del cuerpo humano (Z_t) en función de la humedad de la piel (en Ohmios).

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.

Impedancia del cuerpo humano

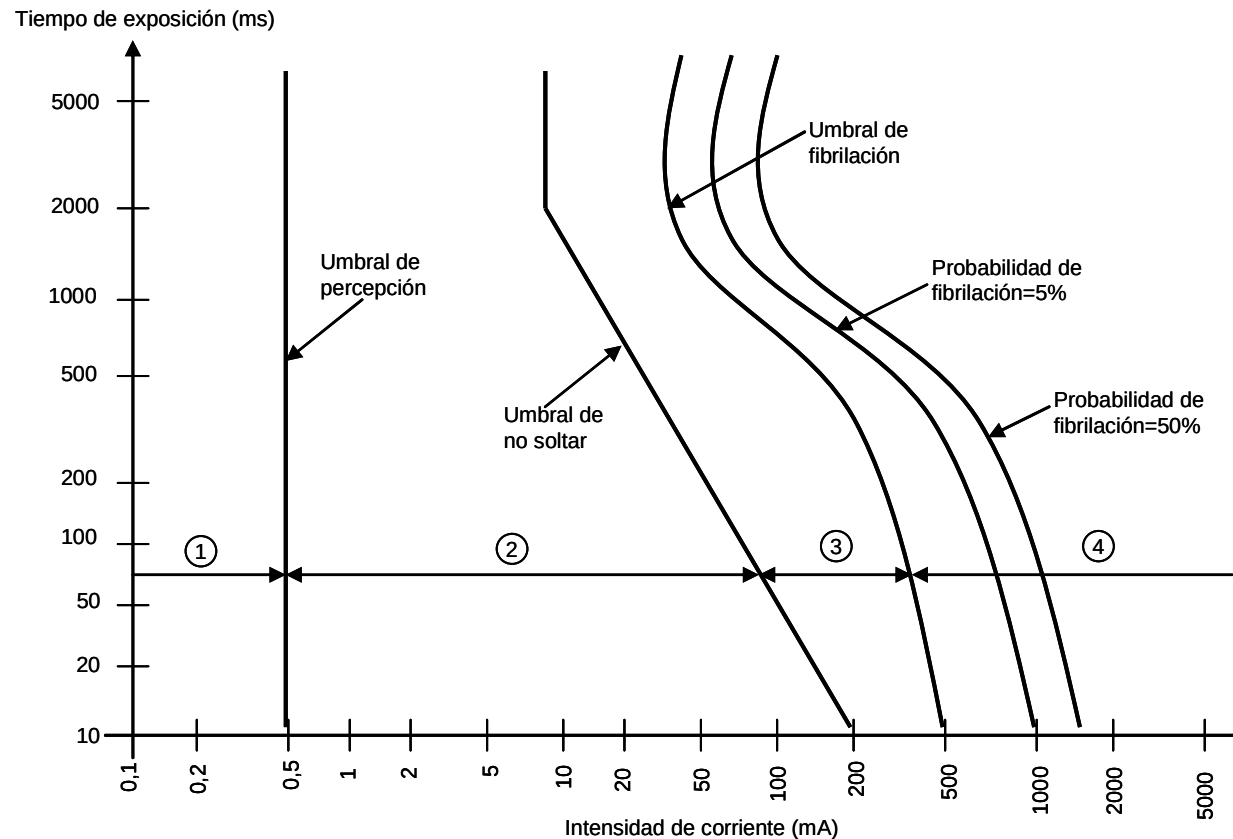


Variación de la resistencia del cuerpo humano en función de la tensión

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

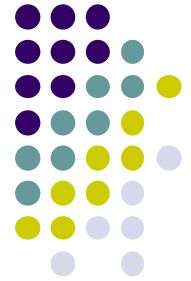
Umbral de percepción



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.

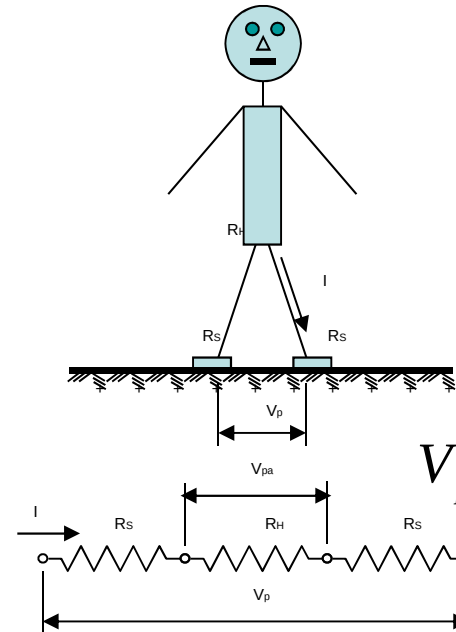
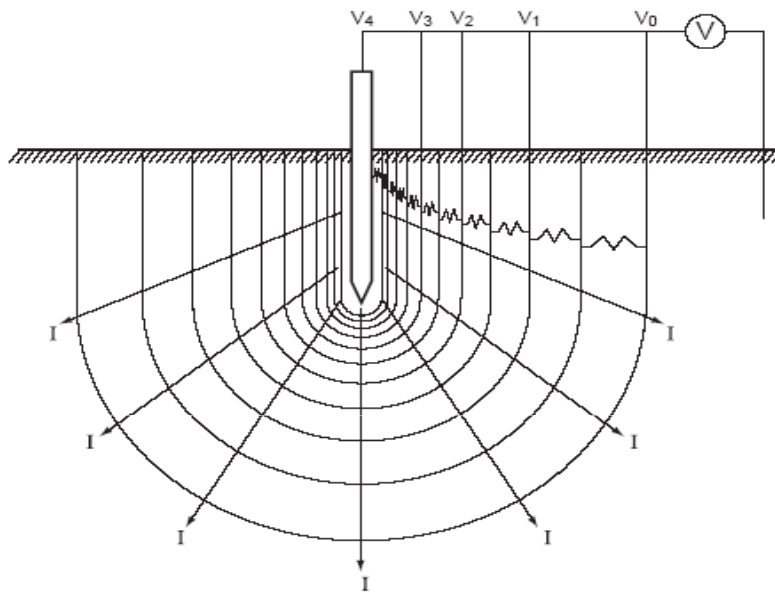
El establecer los límites a partir de los cuales la corriente eléctrica resulta peligrosa, presenta serias dificultades. Puede dar idea de ello las dispersiones que aparecen en la determinación del **umbral de sensibilidad sobre el paso de la corriente eléctrica, definido como el valor de la intensidad 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

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



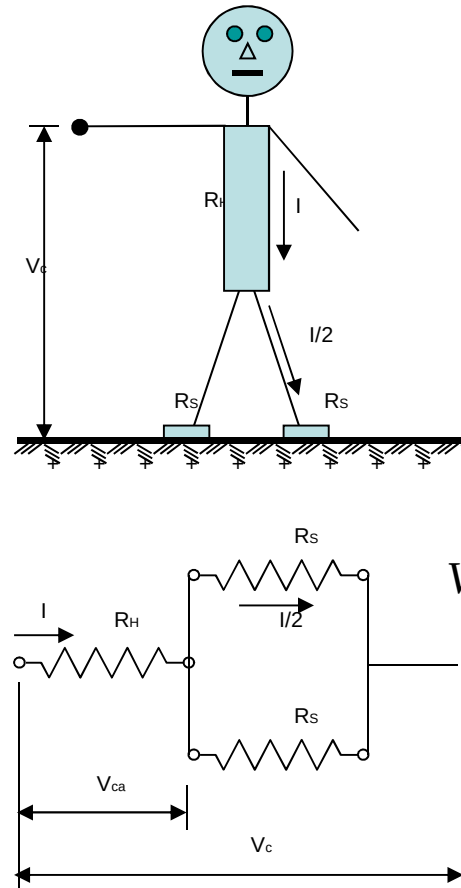
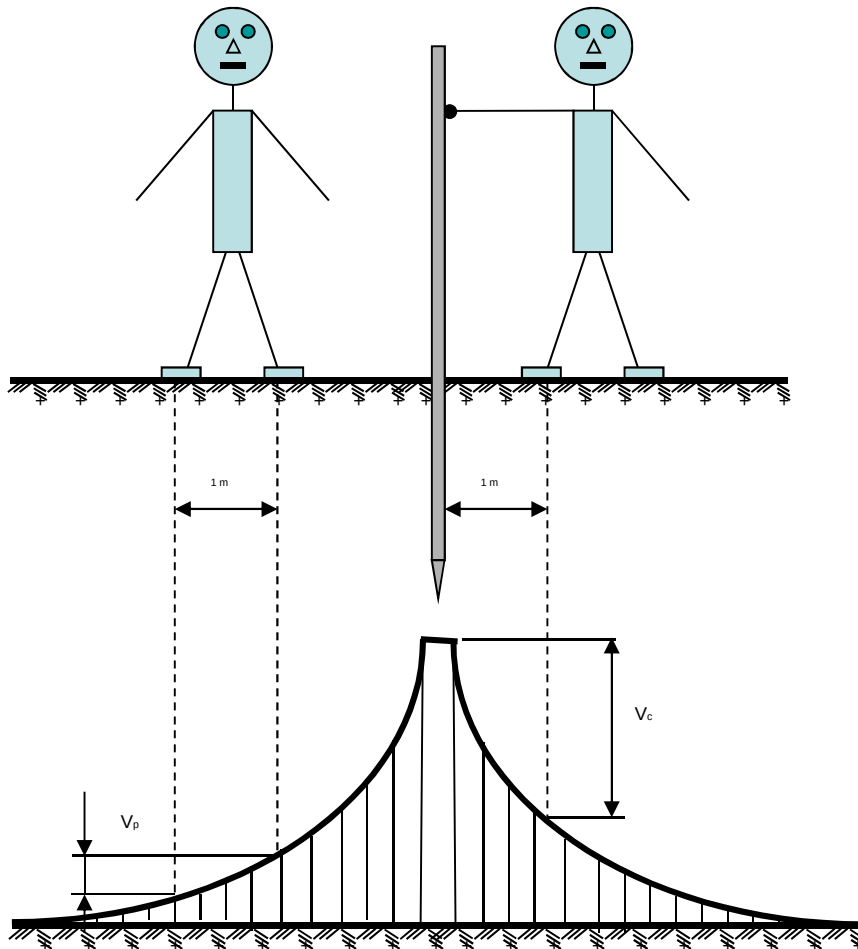
$$I = \frac{V_{pa}}{R_H} = \frac{V_p}{R_S + R_H + R_S}$$

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

ρ_s y ρ'_s son las resistividades superficiales del terreno sobre el que se apoya cada pie

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”.

Tensión de contacto



$$I = \frac{V_{ca}}{R_H} = \frac{V_C}{R_H + \frac{R_S}{2}}$$

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

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**”.

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 asiente 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 por su importancia la **porosidad** del mismo, la cual permite la circulación del agua, la renovación del aire y la penetración de las raíces.

Parámetros del suelo



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

► Parámetros de identificación:

- **plasticidad** (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua)
- **granulometría** (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado)

► Parámetros de estado:

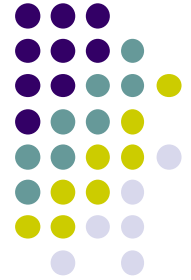
- **humedad** (contenido en agua del agregado),
- **densidad**, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes

► **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:

- **resistencia al esfuerzo cortante,**
- **deformabilidad**
- **permeabilidad.**

Como es sabido, los constituyentes elementales del suelo (arenas, limos, arcillas, materiales orgánicos, etc) no se presentan aislados sino que se encuentran unidos entre sí dando agregaciones. Estos agregados son observables a nivel macromorfológico, directamente en el perfil del suelo, en el campo, pero pueden ser analizados de una manera mucho más exhaustiva en el microscopio

Proceso de formación del suelo



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.

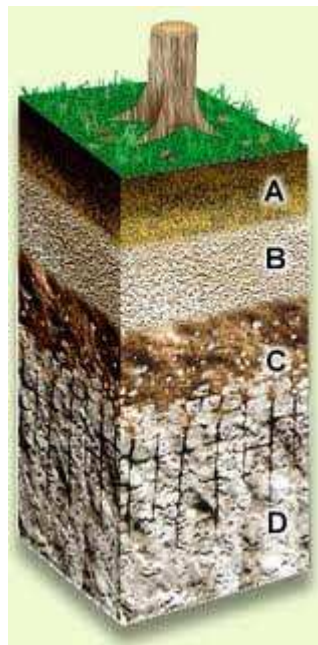
► **Residual.** Este suelo se ha formado por la meteorización de las rocas en el mismo lugar donde ahora se encuentra, con escaso o nulo desplazamiento de las partículas

► **Relleno artificial.** Estos son contruidos por el hombre para los más diversos fines.

Horizontes del suelo

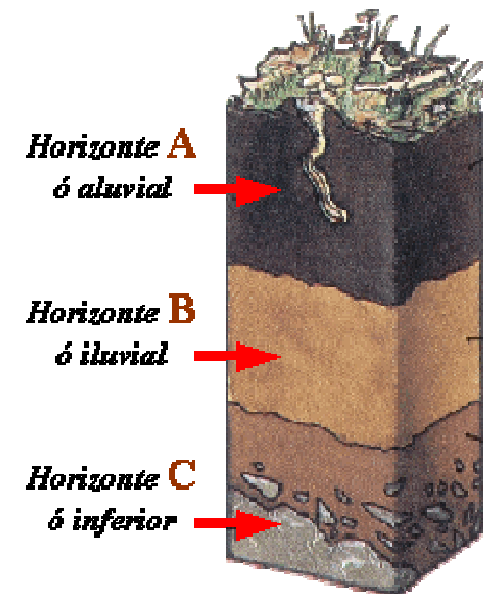


Se llama horizonte, a un nivel en el perfil edáfico, más o menos paralelo a la superficie, con unas **características edáficas** (*propiedades físicas, químicas y composición*), que le hacen diferente a los niveles adyacentes. En general la diferenciación de horizontes se hace más patente a medida que 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**. (*Horizontes A,B,C,E,H,O,R*).

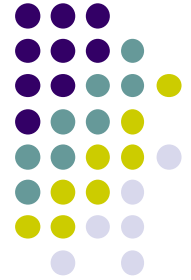


Perfil edáfico

Horizontes



Horizontes del suelo



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.

Factores que influyen en la resistividad del terreno



✚ Si bien algunos de los componentes más importantes del terreno son, en estado seco: aislantes (sílice, óxido de aluminio, etc.) y 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

Resistividad eléctrica del suelo



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

Resistividad eléctrica del suelo



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

Resistividad eléctrica del suelo

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	100
Humus	150
Turba húmeda	100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	200
Margas del jurásico	40
Arena arcillosa	500
Arena silíceas	3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	500
Suelo pedregoso desnudo	3.000
Calizas blandas	300
Calizas compactas	5.000
Calizas agrietadas	1.000
Pizarras	300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	10.000
Granitos y gres muy alterados	600
Hormigón	3.000
Balasto o grava	5.000



Resistividad eléctrica del suelo

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, calizos (jurásico) secos	3×10^3
Granitos antiguos (húmedos)	2×10^3
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	4×10^2
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 grafiticos (húmedos y secos)	Menos de 5
Agua de mar	1
Soluciones salinas	0,1 - 0,001
Minerales conductores	0,01
Grafitos	0,0001



Medida de la resistencia de tierra



Existen varios métodos para realizar la medición de la resistencia de tierra. Se puede utilizar el clásico **telurómetro** o bien el **medidor de resistencias de bucle**.

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

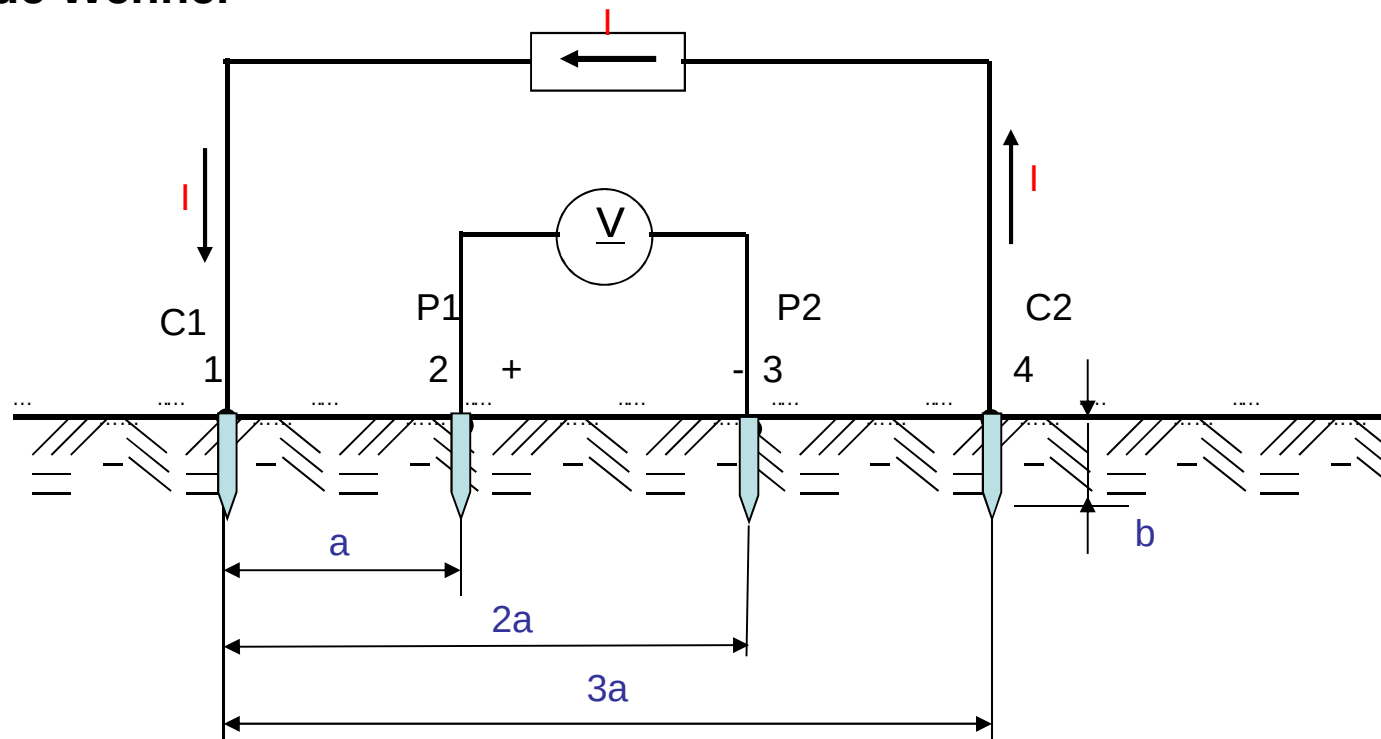
- ▶ El instrumento puede medir resistencia y resistividad con 2, 3 ó 4 electrodos.
- ▶ El equipo puede alimentarse con pilas estándar tipo C o con baterías.
- ▶ Las medidas pueden simplificarse usando pinzas de corriente.



Medida de la resistividad eléctrica del suelo



Método de Wenner



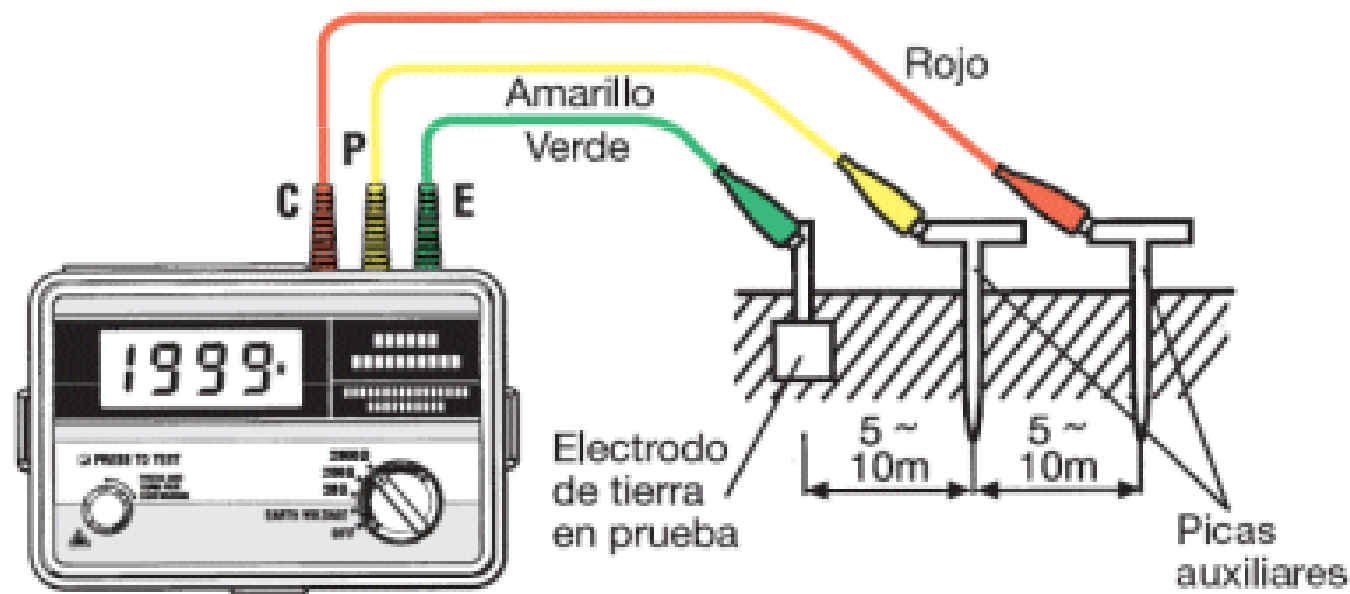
El método consiste en inyectar una corriente conocida a través de los electrodos de ensayo C_1 y C_2 y medir la diferencia de potencial, V_{23} , entre los electrodos P_1 y P_2 . La resistividad del terreno viene dada entonces por la expresión:

$$\rho = 2\pi a \frac{V_{23}}{I}$$

Medida de la resistencia de tierra

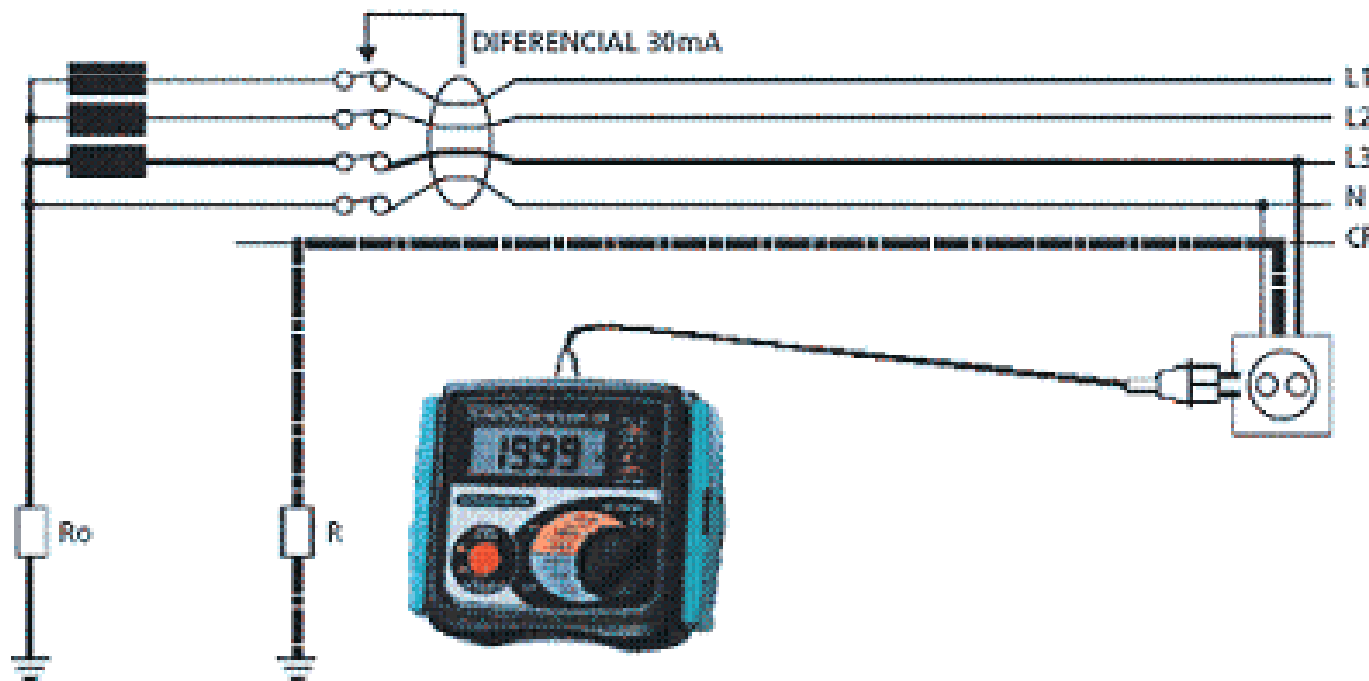


Método Voltio Amperimétrico utilizando el clásico medidor de tierra o **telurómetro** se clavan dos picas auxiliares en el terreno en línea recta a una distancia comprendida entre 5 y diez metros.



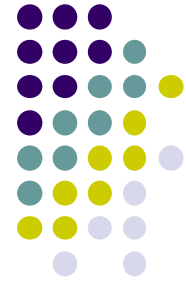
Medida de la resistencia de tierra

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.



Neutro a tierra o Sistema TT

El sistema de distribución del neutro que obligatoriamente tienen las redes de distribución públicas según lo establecido en el RBT, toda instalación conectada a un transformador de distribución de compañía debe tener esta configuración. El neutro de la alimentación está unido directamente a tierra en el centro de transformación y en líneas de distribución de cierta longitud, cada cierta distancia. Las masas de los equipos están interconectadas a través de un conductor de protección (CP) y unidas a tierra en un punto diferente a la toma de tierra del neutro.



Métodos directos

Modelo multiestratificado

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:

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

donde k es el coeficiente de reflexión entre los medios que se define de acuerdo con la expresión:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

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.

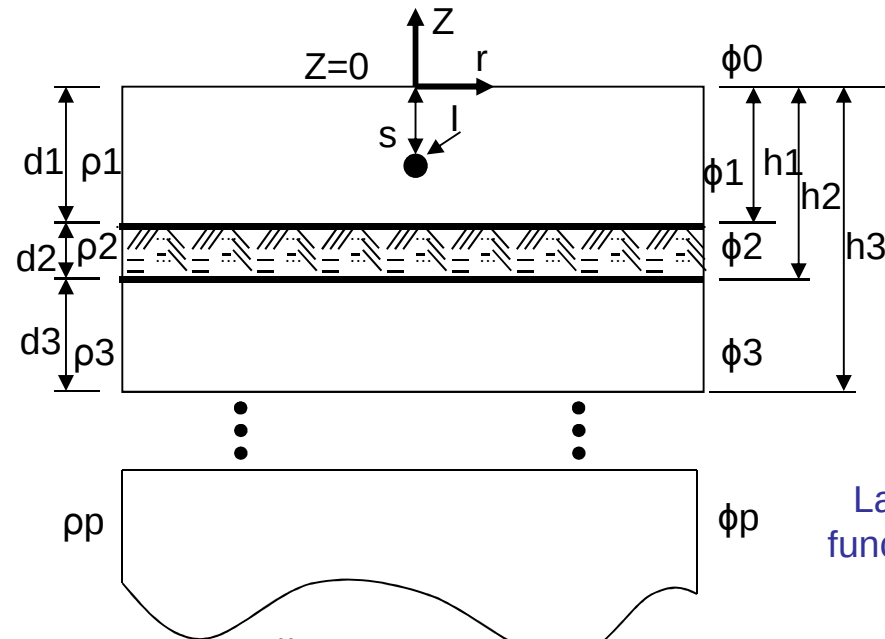


Métodos directos

Modelo multiestratificado



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.



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

Soluciones generales para los potenciales (*)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi(z, r) = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \int_0^\infty \left(e^{-m|z+s|} + f_1(m)e^{-mz} + g_1(m)e^{mz} \right) J_0(mr) dm; 0 < z < -h_1 \\ \Phi_k(z, r) = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \int_0^\infty \left(f_k(m)e^{-mz} + g_k(m)e^{mz} \right) J_0(mr) dm; -h_{k-1} < z < -h_k; k \neq 1 \end{array} \right.$$

Métodos directos

Modelo multiestratificado

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 siguiente ecuación:

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

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 de un terreno multiestratificado se puede calcular de una manera aproximada usando el método de Wenner para la medición de la resistividad como:

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

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

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

