

LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELECTRICAS

Rogelio García Márquez



Alfaomega



marcombo

PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Rogelio García Márquez

Alfaomega



marcombo

Edición original publicada por
MARCOMBO, S. A., Barcelona, España
ISBN: 84-267-0799-8
© Derechos reservados

© 1999 ALFAOMEGA GRIFO EDITOR, S.A. de C.V. Pitágoras 1139, Col. Del Valle 03100, México, D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Registro No. 2317

ISBN 970-15-0486-0

Derechos reservados.

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

Edición autorizada para venta en México, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Venezuela, Chile, Centroamérica, Estados Unidos y el Caribe.

Impreso en Colombia - Printed in Colombia

Presentación

Las Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC) del Reglamento sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación –conocido, abreviadamente, como Reglamento A.T. , fueron aprobadas con la denominación MIERAT, en número de 20, por la Orden Ministerial del 6 de julio de 1984.

Quizás una de las más extensas y sujetas a controversia es la MIE-RAT 13, que versa sobre las Instalaciones de Puesta a Tierra, bajo la óptica fundamental de que el diseño de las mismas minimice, al máximo, el riesgo de accidente para las personas.

No es pretensión de esta publicación constituir un manual de diseño de ese tipo de instalaciones pues, en general, su cálculo, complejo y extenso en muchos casos, debe realizarse con ayuda del ordenador. El lector interesado en esa problemática, sin duda encontrará, en alguna de las obras relacionadas en la abundante bibliografía que se proporciona, la respuesta o solución a su caso particular.

El enfoque que se ha dado a este libro -dirigido, principalmente, a los Ingenieros y Técnicos con responsabilidad en el proyecto, construcción y mantenimiento de instalaciones eléctricas- es el de responder a las preguntas que, necesariamente, surgen al imponerse del contenido de la RAT 13 y aclarar expresiones, conceptos, pasajes y procedimientos que, debido al propio carácter legislativo del Reglamento, están simplemente enunciados en él, con escasa extensión pero que, no obstante, son los que originan las mayores confusiones y polémicas, habiéndose limitado a tabular y resumir aquellos otros apartados de la ITC, meramente descriptivos, que aparecen claramente comprensibles después de una primera lectura.

Cada capítulo va precedido de una breve explicación, a guisa de sinopsis, enunciando el tema que en él se desarrolla y su posible relación secuencia) con otros, también tratados en la obra.

Los números que se encontrarán entre corchetes, [], corresponden al cardinal asignado a la bibliografía principalmente utilizada en su redacción y que, en unión de otros títulos estrechamente relacionados con esta temática, se relacionan al final.

También, a lo largo del texto, se comenta y justifica la razón de las modificaciones que publicó la Orden del 27 de noviembre en 1.987, actualizando la mencionada ITC MIE-RAT 13.

El autor

Índice general

PRESENTACIÓN	3
INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA	7
¿Qué es una instalación de puesta a tierra?	7
Funciones y objetivos básicos de una instalación de puesta a tierra	8
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	11
Naturaleza de la resistencia de los electrodos de puesta a tierra	11
Su dependencia de las características del terreno	13
Factores que influyen en la resistividad del terreno	13
Composición del terreno	14
Sales solubles y su concentración	15
Estado higrométrico del terreno	16
Temperatura	16
Granulometría	17
Compacidad	17
Estratigrafía	18
Otros factores	18
a) Gradientes de potencial elevado	18
b) Calentamiento del suelo por la circulación de corrientes elevadas	19
POTENCIALES Y GRADIENTES	20
Circulación de corrientes por el suelo	20
Reparto de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente en el infinito	21
Reparto de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente por otra	24
Deformación de las superficies equipotenciales en un terreno heterogéneo	25
MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	28
Introducción	28
Métodos de medida	28
Método de los cuatro electrodos	29
Método de Wenner	31
Noción de la profundidad de investigación	31
Elección de la profundidad de investigación	32
Consideraciones sobre las medidas de la resistividad	34
Interpretación de los resultados	35
Elementos necesarios para efectuar las mediciones	36
TENSIONES DE PASO Y CONTACTO	37
Magnitudes eléctricas que caracterizan una puesta a tierra.....	37
Evaluación de las tensiones locales alrededor de las tomas de tierra o de estructuras puestas a tierra	38
Tensión de paso	38
Tensión de contacto	40
Tensiones comunicadas al suelo en lugares alejados	41
Tensiones de paso y contacto aplicadas	42

EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA	44
Umbral de sensibilidad	44
Umbral de no soltar	45
Muerte aparente	45
Fibrilación ventricular y su umbral	46
Parámetros de que depende	46
a) La trayectoria seguida por la corriente	47
b) El valor de la resistencia del organismo	48
c) El tiempo de paso y amplitud de la corriente	52
Influencia de la frecuencia de la corriente	54
Concomitancia de sucesos para originar riesgo de accidente.....	55
 CRITERIOS DE SEGURIDAD FIJADOS POR LA REGLAMENTACIÓN ESPAÑOLA	56
Tensiones máximas aplicables al cuerpo humano	56
Máximas tensiones de paso y contacto admisibles en la instalación	58
Circuitos equivalentes para las diferencias de potencial	
de paso y contacto; justificación de las fórmulas propuestas	59
Tensión de paso	59
Tensión de contacto	61
Comprobación de las máximas tensiones de paso y contacto	
admisibles en la instalación	63
Tensión de paso en el acceso	63
 INTENSIDADES DE EFECTO	65
Determinación de las intensidades de defecto	65
Etapas que comprende	66
Tipos de falta a tierra	66
Componente alterna simétrica de la corriente a	
tierra en el inicio de la falta	67
Efecto de la componente de corriente continua. Factor de	
decremento	68
Efecto de futuras ampliaciones	70
Otros factores a tener en cuenta	70
Efecto de la resistencia de tierra de la instalación	70
Efecto de la resistencia de defecto	70
Efectos de los cables de tierra aéreos	71
Caso de instalaciones de 3.a categoría	71
Neutro aislado	72
Neutro a tierra	73
Valor máximo de la resistencia de puesta a tierra en	
instalaciones de 3. ^a categoría	74
Su determinación	75
Tiempo máximo de eliminación del defecto	76
 DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	79
Prescripciones sobre los elementos que constituyen las	
instalaciones de puesta a tierra	79
Líneas de tierra	79
Electrodos de puesta a tierra; dimensiones	80
Algunos detalles prácticos	85
Picas	85
Conductores horizontales enterrados	85
Redes malladas de conductores enterrados	85
Indicaciones sobre la elección de los tipos de	
electrodos de tierra	85

CÁLCULO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	87
Resistencia de puesta a tierra, potenciales y gradientes	87
Imprecisión del cálculo práctico de las tomas de tierra	87
Propiedades generales de las puestas a tierra	89
COMPROBACIONES Y CORRECCIONES	91
Comprobación de las tensiones de paso y contacto	91
Investigación de las tensiones transferibles al exterior	93
Corrección y ajuste del diseño inicial, estableciendo el definitivo	94
Resumen del procedimiento de diseño	96
INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	97
Instalación de líneas de tierra	97
Instalación de electrodos	97
Procedimientos de conexión de los elementos de la red de tierras	98
Disposiciones particulares de puesta a tierra	99
Elementos de la construcción	99
Estructuras metálicas que constituyen o franquean el límite de una instalación eléctrica	99
Vallas y cercas metálicas	99
Puertas de acceso	100
Raíles	100
Medidas a adoptar en condiciones difíciles de puesta a tierra	101
¿TIERRAS ÚNICAS O SEPARADAS?	104
Puesta a tierra de protección	104
Puesta a tierra de servicio	105
Interconexión de las tomas de tierra	105
Separación de la puesta a tierra del neutro de b.t. de la general del Centro	106
Aislamiento entre las instalaciones de tierra	107
Resistencia de la puesta a tierra del neutro	108
Sistema único de tierras	108
Puesta a tierra en Centros de Transformación conectados a redes de cables subterráneos	109
MEDICIONES	110
Medida de la resistencia de tierra	110
Introducción	110
Método de la caída de potencial	111
Medida de la resistencia de una toma de tierra puntual	113
Medida de la resistencia de una red de tierras extensa	114
Generalidades	114
Métodos por inyección de corriente	114
Procedimiento de medida y precauciones a tomar	115
Medición de las tensiones de paso y contacto aplicadas	116
Relación entre la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto....	117
Aplicación del método de inversión de polaridad en la obtención de los valores aplicados de las tensiones de paso y contacto	118
Acerca de los electrodos de medida	118
Metodología de la medición de las tensiones de paso y contacto aplicadas	120
BIBLIOGRAFÍA	124

Instalaciones de puesta a tierra [1] y [2]

La temática de la puesta a tierra permite enfoques muy variados. El que se ha elegido en esta publicación pretende ir introduciendo al lector, de forma paulatina y natural, en esa materia, tratando de arrancar desde el origen de la "madeja".

No ha de sorprender, por tanto, que el orden seguido en la exposición no concuerde con el presentado en la ITC MIE RAT 13 que, al margen de ser, básicamente, un documento legislativo, está estructurada pensando que el destinatario es un especialista en esa problemática o, al menos, que posee todos los conocimientos previos que su comprensión requiere.

No obstante y pese a que se ha seguido el planteamiento expuesto, confiriendo a cada capítulo un carácter casi monográfico, en alguna ocasión y debido a las interrelaciones existentes, deberán hacerse inevitables referencias a conceptos que se desarrollan en partes más avanzadas del libro o utilizar resultados que se obtienen posteriormente.

¿QUE ES UNA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA?

La unión eléctrica, con la tierra, de una parte de un circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, se efectúa mediante *una instalación de puesta a tierra* que, según puede leerse en la ITC MIE RAT 01, Terminología, es "el conjunto formado por electrodos y líneas de tierra de una instalación eléctrica" y, también, en el apartado 3 de la propia RAT 13:

"Las instalaciones de puesta a tierra estarán 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".

Otros elementos menos significativos de la instalación de puesta a tierra, tales como:

- los puntos de puesta a tierra y
- las líneas de enlace con el electrodo de tierra también deberían considerarse, si se desea tener una visión completa de la red de puesta a tierra, conforme se muestra, de manera esquemática, en la figura 1.

Sobre el primer elemento, el mismo apartado de la RAT 13 añade que: "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".

Las definiciones de todas las partes integrantes, tal como las recoge la mencionada RAT 01, se reproducen al fina de la página.

Obsérvese que, según que esté aislada o no del terreno, la parte de la línea de tierra comprendida entre un punto de puesta a tierra y el electrodo de puesta a tierra, constituirá la línea de enlace o pasará a formar parte del mismo.

FUNCIONES Y OBJETIVOS BÁSICOS DE UNA INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA

La función de la puesta a tierra (p.a.t) de una instalación eléctrica es la de forzar la derivación, al terreno, de las intensidades de corriente, de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya se trate de corrientes de defecto, bajo frecuencia industrial, o debidas a descargas atmosféricas, de carácter impulsional.

Con ello, se logra:

- Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra,
- Posibilitar la detección de defectos a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo, así, el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas.
- Limitar las sobretensiones internas (de maniobra -transitorias- y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones de explotación.
- Evitar que las tensiones de frente escarpado que originan las descargas de los rayos provoquen "cebados inversos", en el caso de instalaciones de exterior y, particularmente, en líneas aéreas.

Electrodo de (puesta a) tierra

Conductor o conjunto de conductores enterrado(s), que sirven para establecer una conexión con tierra. Los conductores no aislados, colocados en contacto con tierra, para la conexión al electrodo, se considerarán parte de éste.

Línea de tierra

Es el conductor o conjunto de conductores que une(n) el electrodo de tierra con una parte de la instalación que se haya de poner a tierra, siempre y cuando los conductores estén fuera del terreno o colocados en él pero aislados del mismo.

Punto de puesta a tierra

Es un punto, situado generalmente fuera del terreno, que sirve de unión de las líneas de tierra con el electrodo, directamente o a través de líneas de enlace con él.

Línea de enlace con el electrodo de (puesta a) tierra

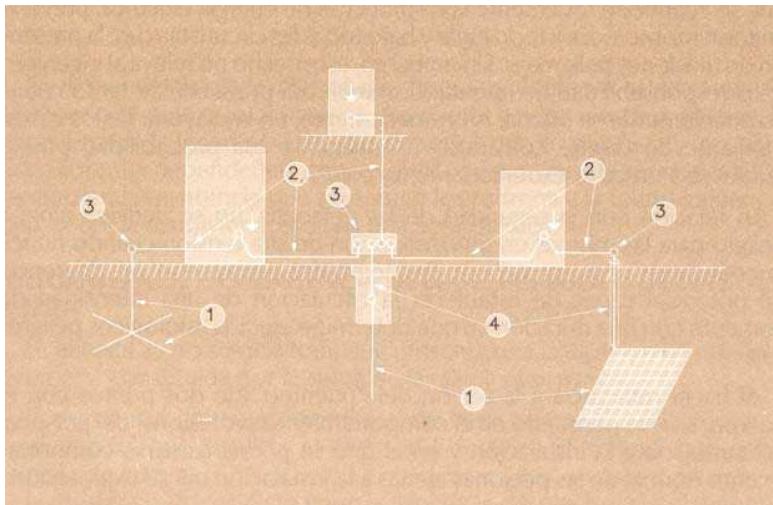
Cuando existiera punto de puesta a tierra, se denomina línea de enlace con el electrodo de tierra a la parte de la línea de tierra comprendida entre el punto de puesta a tierra y el electrodo, siempre que el conductor esté fuera del terreno o colocado aislado del mismo.

La circulación de las intensidades mencionadas por la instalación de puesta a tierra puede originar la aparición de diferencias de potencial entre ciertos puntos, por ejemplo, entre la instalación de p.a.t. y el terreno que la rodea o entre dos puntos del mismo, como se verá en el capítulo siguiente, por cuya razón debe concebirse la instalación de puesta a tierra para que, incluso con la aparición de las diferencias de potencial aludidas se cubran los siguientes objetivos:

- Seguridad de las personas.
- Protección de las instalaciones.

- Mejora de la calidad de servicio.
- Establecimiento y permanecia de un potencial de referencia.

Debe hacerse especial énfasis en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra, lo que no significa que se deje de reconocer la importancia de los otros tres objetivos.



*Figura 1. Esquema de una instalación de puesta a tierra y partes que comprende.
1. electrodo de (puesta a) tierra.
2. línea de tierra.
3. punto de puesta a tierra.
4. línea de enlace con el electrodo de (puesta a) tierra.*

Coincide lo expuesto con la interpretación del legislador, que iniciaba la versión inicial de la MIE RAT 13 de esta manera: "Toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de tierra diseñada en forma tal que, en *ningún punto* normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, *exista* el riesgo de que puedan estar sometidas a una tensión peligrosa durante cualquier defecto de la instalación eléctrica o en la red unida a ella".

Ello induce, equívocamente, a pensar en la posibilidad de una seguridad absoluta.

A este respecto, es oportuno recoger la afirmación que, sobre el riesgo, contiene la IEEE Std.80. Su traducción dice así:

"Un somero análisis mostrará que es absolutamente imposible, a menos que se abandone totalmente la distribución de energía eléctrica, prevenir en todo momento, en todo lugar y bajo todas las circunstancias, la presencia de tensiones peligrosas. Sin embargo, este hecho no releva al ingeniero de la responsabilidad de intentar disminuir esa probabilidad tanto como razonablemente se pueda. Afortunadamente, en la mayoría de los casos, mediante un diseño cuidadoso e inteligente esa probabilidad puede reducirse a un valor extremadamente bajo".

En relación con la seguridad de las personas, no se derivará ningún peligro para las mismas en una instalación de alta tensión cuando nunca puedan llegar a "puenteear" con su cuerpo dos puntos con una diferencia de potencial capaz de establecer la circulación de una intensidad de corriente con una duración tal que determine efectos fisiológicos peligrosos.

Al hacer referencia a la acción del "puenteo" de dos puntos con el cuerpo, se está pensando en el comportamiento profesional del personal actuante sobre la instalación y en el que se podría llamar comportamiento normal de las personas ajenas a la instalación o a su explotación.

En este punto conviene, pues, remarcar que las puestas a tierra no garantizan la inocuidad de las instalaciones eléctricas ante las incalculables conductas, reacciones anómalas, imprudencias y, aún,

despropósitos que las personas pueden llevar a cabo con respecto a una instalación de alta tensión y que, por otro lado, incluso serán elementos coadyuvantes a aumentar la gravedad en caso de accidentes por contactos directos.

Por todo ello, debe valorarse en su justa extensión la referencia del texto de la RAT a "ningún punto normalmente accesible del interior o exterior" de la instalación y hacer uso de ese criterio al diseñar las medidas preventivas, no debiendo esperar de una instalación eléctrica que resulte segura, frente a cualquier actuación sino, solamente, ante las normales de las personas.

En vista de lo que antecede, queda justificado el texto que, con las mínimas modificaciones del primitivo, publica la Orden de 27 de Noviembre de 1987, ajustándose más a la realidad de los hechos: "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, estas queden sometidas, como máximo, a las tensiones de paso contacto (durante cualquier defecto en la instalación eléctrica o en la reunida a ella) que resulten de la aplicación de las fórmulas que se recogen a continuación".

Resistividad del terreno [3], [4], [5] y [6]

Se responde al primer interrogante que, posiblemente, pueda apuntarse sobre qué es lo que caracteriza una puesta a tierra eléctrica, esto es, la naturaleza de la resistencia de los electrodos que la establecen, razonándose sobre la dependencia que, en grado sumo, tiene la resistividad del terreno en la resistencia que presentan los mismos y la fuerte influencia que, sobre la resistividad, ejercen una serie de factores.

NATURALEZA DE LA RESISTENCIA DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

En general, la resistencia total que presenta una instalación de puesta a tierra está constituida por la suma de las siguientes partes:

- la resistencia del conductor (línea de tierra y línea de enlace con el electrodo) que conecta el electrodo de tierra al sistema que debe ponerse a tierra,
- la resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el terreno,
- la resistencia del suelo en el que está enterrado el electrodo.

La resistencia del conductor se puede determinar perfectamente por los procedimientos usuales. La de contacto con el terreno es despreciable por su escaso valor y la parte más significativa es la correspondiente al terreno que rodea al electrodo.

A este respecto, debe señalarse la escasa importancia de la baja resistividad de los materiales utilizados como electrodos frente a la que posee el terreno. En efecto, si se trata de cobre, presenta una resistividad de:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{Cu}_{(20)}} &= \frac{1}{58} \left(\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right) \\ &= \frac{1}{58} \cdot \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{1 \text{m}^2}{10^6 \text{mm}^2} = \frac{1}{58 \cdot 10^6} \left(\frac{\Omega \text{m}^2}{\text{m}} \right)\end{aligned}$$

mientras que para un terreno excelente, en circunstancias favorables, rara vez podrá alcanzarse una $\rho_{\text{terreno}} = 1 \Omega \text{m}^2/\text{m}$ es decir que, en el mejor de los casos, posee una resistividad *58 millones de veces mayor* que la del cobre, circunstancia a veces no tenida en cuenta y por cuya razón poco importa, desde el punto de vista de la resistividad, el metal utilizado como electrodo.

En cuanto a la resistencia que presenta el terreno es función de la resistividad del mismo y de las dimensiones y forma del electrodo y aunque, pese a ello, se considere la tierra como un conductor de ilimitada conductancia, por sus grandes dimensiones, no puede asumirse, por extensión, que las conexiones que a ella se efectúen mediante electrodos —conseguidas de una forma bien distinta de la que es habitual entre conductores, al faltar aquí la presión externa entre los dos medios a interconectar— tenga esa misma propiedad, ya que cualquiera que sea la forma que presenten,

ofrecerán una resistencia definida al paso de la corriente y, en muchos casos, resultará difícil obtener una puesta a tierra de baja resistencia.

Nota:

En relación con las dimensiones de la resistividad del suelo, debe tenerse presente que es práctica usual "simplificar" sus unidades ($\Omega \cdot m^2/m$) e indicarla como $\Omega \cdot m$.

En ocasiones, también se utiliza el $\Omega \cdot cm$ (en realidad, $\Omega \cdot cm^2/cm$), siendo la equivalencia entre ambas:

$$1 \Omega \cdot m = 1000 \Omega \cdot cm$$

Expresada la resistividad del terreno, ρ , en $\Omega \cdot m$, equivale a la resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de 1 m de arista, como se muestra en la figura 2.

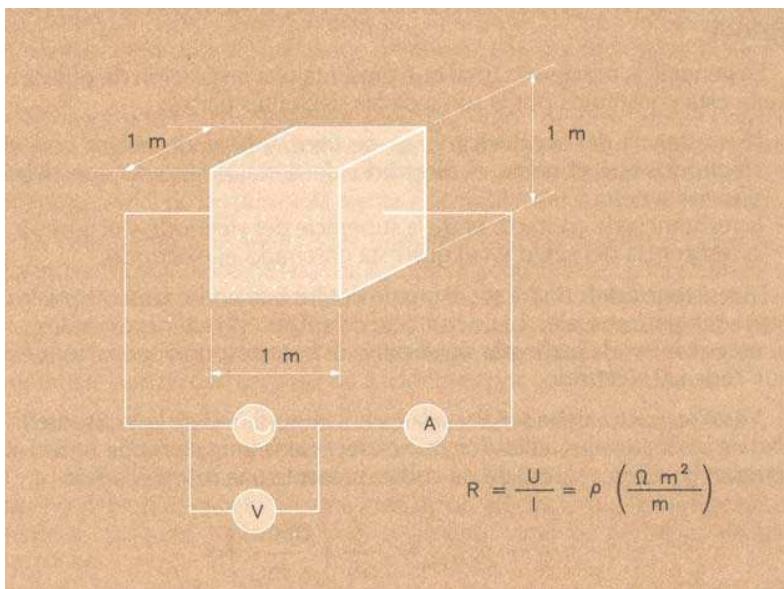


Figura 2. La resistividad del terreno, ρ , expresada en $\Omega \cdot m$ equivale a la resistencia de un cubo de terreno, de 1 metro de arista.

La expresión general de la resistencia es:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

Para el caso de la figura, será:

$$R(\Omega) = \rho \cdot \frac{l(m)}{1(m^2)}$$

De donde:

$$\rho = R \left(\frac{\Omega \cdot m^2}{m} \right) = R(\Omega \cdot m)$$

SU DEPENDENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL TERRENO

Como se ha dicho, el valor de la resistencia de puesta a tierra -y también, como se verá más adelante, el reparto de potencial en el suelo cuando el sistema de puesta a tierra está recorrido por una intensidad de defecto -tienen, fundamentalmente, como factor proporcional determinante la resistencia específica o resistividad del terreno y del subsuelo en el que está enterrada. Es por esta razón que la concepción de una red de puesta a tierra requiere, inicialmente, el análisis de la naturaleza del suelo sobre el que vaya a realizarse y, en esa línea, indica el Apdo. 2 de la RAT 13 la necesidad de tal estudio como primer paso para realizar el proyecto de una instalación de tierra.

Puede parecer que la investigación de la naturaleza y de la estructura geológica, para determinar la variación de la resistividad en función de la profundidad es más propia de la geofísica pero no es así, pues si bien para calcular la resistencia de una toma de tierra puntual es suficiente el conocimiento del perfil de la resistividad aparente de un terreno, no sucede lo mismo en el caso de una malla de gran extensión, como la de una subestación, por ejemplo.

Una de las bases necesarias para determinar la configuración de una red mallada que abarque una gran superficie es el conocimiento de la resistividad a diversas profundidades. En efecto, si bien la presencia de filones profundos muy resistentes o muy conductores puede tener escasa influencia sobre la resistividad aparente del terreno, esas particularidades pueden ser capaces, no obstante, de variar notablemente la resistencia de la red de tierra que se establezca más a flor de la superficie por la deformación que provocan sobre los filetes de corriente. Sin embargo, las resistividades del terreno en la superficie o en profundidad, raramente se conocen antes del establecimiento de las obras y es frecuente que la realización de las redes de tierra sean las que aporten las primeras indicaciones sobre la calidad de los terrenos cuando, en buena lógica, debería ser el proceso inverso el que prevaleciera.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

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

Tabla 1

<i>Naturaleza del terreno</i>	<i>Valor medio de la resistividad, en Ω.m</i>
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

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 a.m, para terrenos orgánicos y húmedos a una decena de miles de Sim para granitos secos.

La tabla 1, recogida de la ITC MI BT 039 muestra valores típicos medios, mientras que la tabla 2, sacada de la MIE RAT 13, proporciona valores orientativos.

Tabla 2

<i>Naturaleza del terreno</i>	<i>Resistividad en Ω.m</i>
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 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 silícea	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10.000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

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 electrólito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno.

En la figura 3 se refleja cómo la cantidad de sales disueltas afectan la resistividad, y en la 4 los distintos efectos de sales diferentes.

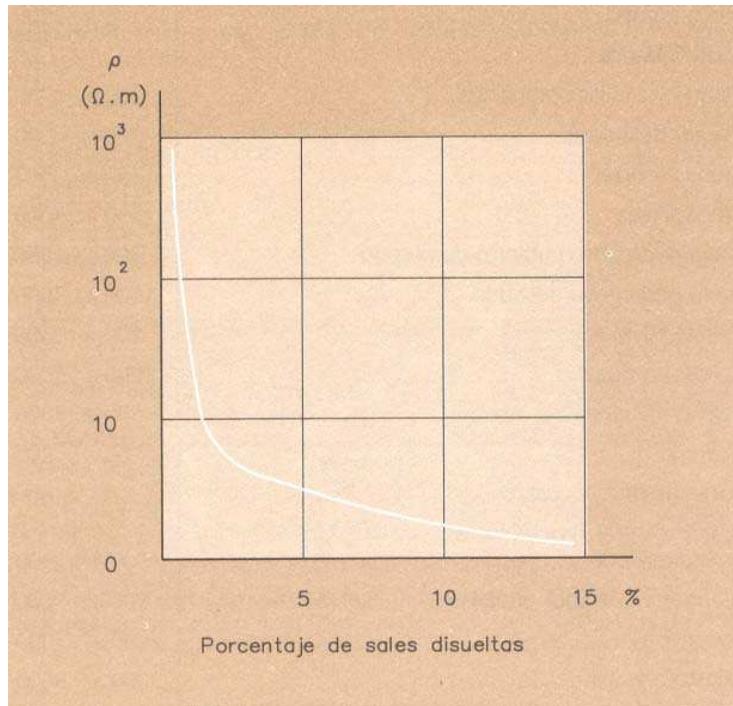


Figura 3. La conductividad del suelo es función, principalmente, de la concentración del electrólito que constituyen las sales al disolverse en el agua ocluida en el terreno. Puede apreciarse cómo el porcentaje de sales disueltas modifica su inversa, la resistividad.

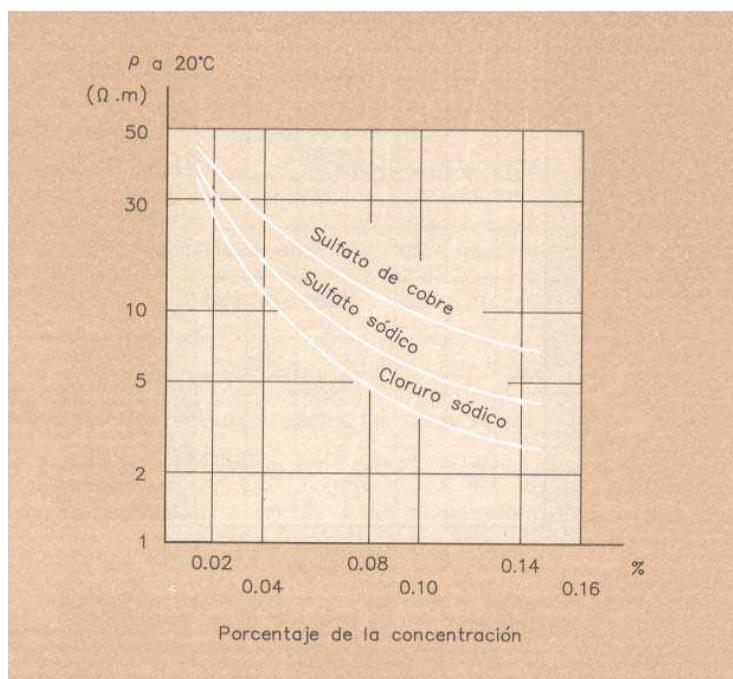


Figura 4. A una temperatura determinada, la mayor o menor solubilidad, así como el grado de dissociación del electrólito depende de los tipos de sales disueltas, que, en consecuencia, afectarán también a la resistividad del terreno.

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 del 15 % en peso, esta disminución es mucho menos acusada, a causa de la práctica saturación del terreno, tal como puede verse en la figura 5.

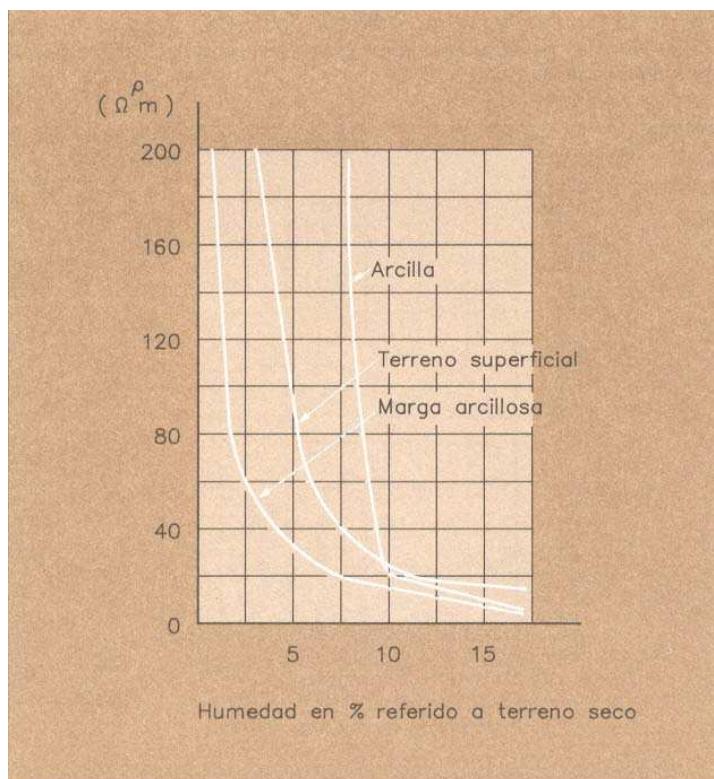


Figura 5. El porcentaje de humedad modifica la resistividad del suelo porque, en definitiva, es el agua y las sales en ella disueltas quienes facilitan la conducción eléctrica. No obstante, su incidencia es mucho menos acusada al alcanzarse la práctica saturación del terreno, lo que sucede en torno a porcentajes del orden de un 15 %, en peso.

En relación con este factor, se dice en el punto 4.3 de la RAT 13, transcripción que no necesita de ningún comentario:

"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".

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 electrólitos -que, como se ha visto, influyen decisivamente en la resistividad del terreno-, elevándose ostensiblemente la misma, tal como se aprecia en la figura 6. Sobre este agente, se indica en la RAT 13 (4.4):

"Al alcanzar el suelo temperaturas inferiores a los 0 °C aumenta mucho su resistividad. Por ello, en zonas con peligro de heladas los electrodos se enterrará a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo».

y en el punto 3.5, relativo a la instalación de electrodos:

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

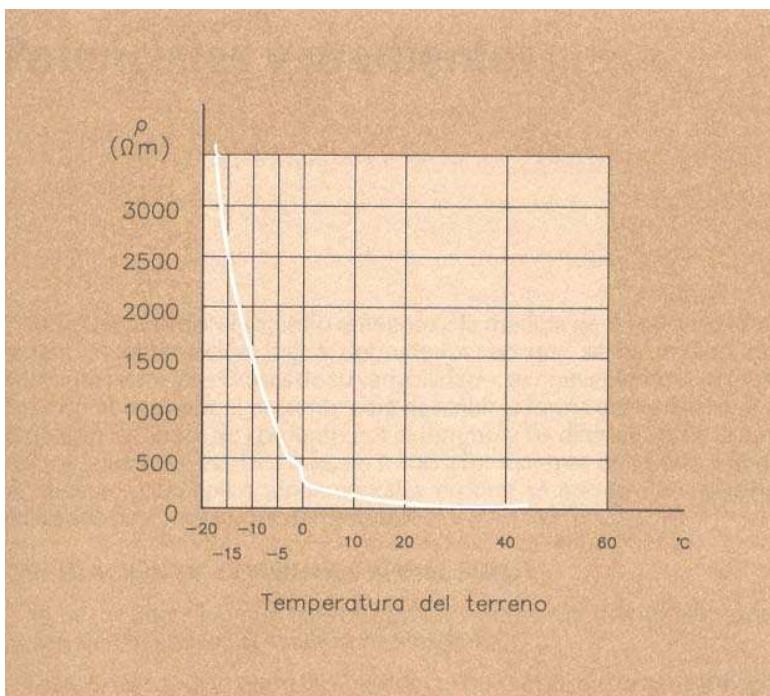


Figura 6. La temperatura, en general, incrementa la solubilidad de las sales en el agua, por cuya razón disminuirá la resistividad. Su descenso por debajo de los 0 °C, aparte de reducir la solubilidad, origina la congelación de electrólito, dificultando notablemente la conducción eléctrica y occasionando un importante incremento de la resistividad.

Granulometría

Es un elemento 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 (gravas, guijarros, etc.) 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.

En el punto 3.5, Instalación de electrodos, de la MIE RAT 13 puede leerse:

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

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 y de la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

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

Puede concluirse en que claramente se vé 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.

OTROS FACTORES

La resistividad del suelo es, en ausencia de efectos secundarios, prácticamente independiente de la intensidad de la corriente que lo recorre, propiedad de la que se hará uso más adelante, en el capítulo referente a Mediciones, para de la utilización de intensidades débiles en las comprobaciones de las tensiones de seguridad y extrapolar esos resultados a regímenes de corriente mucho más importantes.

Existen, sin embargo, otros factores distintos de los ya enumerados que son susceptibles de modificar apreciablemente la resistividad del terreno pero que, por su naturaleza eléctrica, sólo pueden surgir posteriormente al establecimiento de la red de tierra, tales como:

- a) El efecto de gradientes de potencial elevados.
- b) El calentamiento del suelo a consecuencia de la circulación de corrientes de puesta a tierra elevadas o de forma prolongada.

a) Gradiéntes de potencial elevados

Cuando el contacto entre un electrodo y el terreno es mediocre, pueden establecerse -en condiciones de circulación de corriente de defecto y a partir de un cierto valor- pequeñas descargas que, franqueando las delgadas capas aislantes que separan los dos medios, contribuyan a igualar los potenciales de ambos. La resistencia del sistema de puesta a tierra arrojaría, en estas condiciones, valores inferiores a los que se hubieran obtenido cuando no se producía el fenómeno, acusándose principalmente esta reducción en instalaciones de puesta a tierra de pequeñas dimensiones.

Para magnitudes de la corriente de puesta a tierra muy importantes, el gradiente de potencial puede llegar, en las proximidades inmediatas de los electrodos, a alcanzar valores que provoquen la perforación del terreno, dando lugar a la formación de uno o varios arcos que, a partir de puntos del electrodo, se propaguen a través del suelo en diversas direcciones y con eventuales ramificaciones, hasta que se deje de verificar la superación del nivel de tensión crítico (algunos kV/cm).

Prescindiendo de la caída de tensión en los arcos, la traducción de este efecto -que sólo será apreciable en el caso de electrodos de pequeñas dimensiones- es prolongar, de alguna manera, las dimensiones de los mismos, que se comportarán como si fueran de mayor tamaño o bien se hubiera reducido la resistividad del terreno pero, por diseño, debe evitarse el establecimiento de tales descargas porque deterioran rápidamente los electrodos.

Tampoco, desde el punto de vista de las descargas atmosféricas, es posible beneficiarse de lo anterior porque la velocidad de propagación de los arcos en el suelo es muy lenta para ser tenida en cuenta durante la breve duración del abrupto frente de la descarga del rayo.

b) Calentamiento del suelo por la circulación de corrientes elevadas

El calentamiento del suelo tiende a aumentar su conductividad mientras no vaya acompañado de desecación. La resistividad de una capa de terreno puede disminuir en una relación de 2 a 1 para temperaturas entre algunos grados y 20 a 25 °C, y en una relación del mismo orden entre 20 y 80 °C.

La cantidad de calor que se genera en un electrodo puede considerarse que se divide en dos partes: la acumulada en el volumen de terreno en contacto directo con el mismo, (terreno que presenta un calor específico medio, y, de $1,75 \cdot 10^6 \text{ ws/m}^3\text{oC}$) y otra parte que la absorben las capas circundantes más frías, circulando a través del terreno (que tiene una conductividad calorífica, A, del orden de $1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^\circ\text{C}$).

El efecto inicial de una circulación prolongada de corriente por una toma de tierra es disminuir su resistencia, con una importancia que depende de la contribución al valor total de la misma de las capas de terreno próximas, pero que no es apreciable más que para las tomas de tierra de dimensiones pequeñas.

Sin embargo, las corrientes que se presentan normalmente en las instalaciones de puesta a tierra son de corta duración, aunque a veces sean de gran magnitud, así que la influencia de la conductividad calorífica del terreno es, prácticamente, despreciable y sólo el calor específico determina la energía que puede disiparse en una toma de tierra, siendo la elevación de temperatura proporcional al tiempo.

La temperatura es máxima en la proximidad inmediata del electrodo, convirtiéndose las condiciones en críticas cuando se acerca a 100°C, al provocarse la evaporización rápida del agua ocluida y dejar al electrodo en contacto con una capa deshidratada muy resistente e, incluso, llegar a producir la calcinación del terreno a su alrededor. La toma de tierra pierde entonces su poder de evacuación y tiende a subir su potencial hasta la tensión simple de la red, situación evidentemente peligrosa. Puede evitarse que se produzca la desecación si las protecciones de la red eliminan la corriente de defecto inicial en un tiempo, t , tal que limiten la corriente, i , evacuada por metro, al valor aproximado de:

$$i = \Pi d \sqrt{\frac{\rho\Theta}{\rho t}} = \Pi d \frac{\sqrt{1,75 \cdot 10^6 \cdot 10^2}}{\sqrt{\rho t}} = 4,156 \cdot 10^4 \frac{d}{\sqrt{\rho t}} \quad \text{A/m}$$

Expresión en que d es el diámetro, en metros, del electrodo. Sobre este particular, en el punto 1.2 de la RAT, Prescripciones en relación con el dimensionado, se dice:

"Se tendrán en cuenta las variaciones posibles de las características del suelo en épocas secas y después de haber sufrido corrientes de defecto elevadas".

Potenciales y gradientes [4], [5] y [6]

Antes de abordar el capítulo referente a la medida de la resistividad del terreno –continuación lógica del anterior, en que se ha tratado este relevante factory las causas de su variabilidad–, es conveniente considerar el inciso abierto por el presente para describir la forma general en que se propagan las líneas de corriente por el terreno y las diferencias de potencial y gradientes eléctricos que, en torno a los sistemas de puesta a tierra, se generan, conceptos fundamentales en que se apoyan los métodos utilizados para realizar las mediciones.

CIRCULACIÓN DE CORRIENTES POR EL SUELO

Ya se ha mencionado que el terreno, medio de tres dimensiones, posee, generalmente, naturaleza heterogénea.

En razón al conocimiento tan imperfecto que se posee de su resistividad y de las posibles variaciones de la misma, tanto en sentido horizontal como en profundidad, no es posible abordar un cálculo preciso de la distribución de las corrientes que lo recorren y hay que contentarse con evaluaciones sencillas cuyo grado de aproximación esté en relación con la incertidumbre de los parámetros de que depende.

De una manera general, haciendo referencia, por ejemplo, a la corriente que se está derivando por una toma de tierra a causa de una línea que presente un defecto, puede observarse que busca la vuelta al circuito por las vías que minimicen la impedancia del recorrido. Alrededor de la toma de tierra, empieza por extenderse en todas las direcciones que se le ofrecen, inflexándose, después, los filetes de corriente y tendiendo a concentrarse en una zona subyacente al trayecto de la línea considerada.

La distribución que se siga es fruto de dos factores antagónicos: por un lado, una amplia dilución de los filetes de corriente reduce las caídas óhmicas, mientras que, por otro, el máximo acercamiento posible al conductor que presenta la falta, minimiza la inductancia del bucle que con él constituyen. La dilución resultante corresponde al régimen en que los dos efectos se contrarresten.

Las corrientes tienden a penetrar más profundamente en el suelo cuanto más elevada sea la conductividad del mismo y, por el contrario, se reúnen hacia la superficie a medida que la frecuencia es más alta. En definitiva, a 50 Hz, la capa de filetes de corrientes de retorno por el suelo puede asimilarse a un conductor difuso único, situado a una profundidad que va desde algunos centenares hasta mil o dos mil metros, según la resistividad del terreno.

La importante profundidad a la cual penetran los filetes de corriente permite considerar que la zona donde radialmente se expanden en torno a la toma de tierra se extiende hasta una gran distancia con respecto a las dimensiones de aquélla, aceptándose, en esos casos, que el retorno de corriente se efectúa a una distancia infinita de las tomas de tierra y en todas las direcciones.

No obstante, también puede contemplarse el retorno de corriente por otra red de tierra más o menos alejada, como sucede, por ejemplo, en el caso de la medición del valor de la resistencia de una puesta a tierra.

Una y otra disposición originarán la aparición de potenciales en torno a la red de tierras, que se van a analizar.

REPARTO DE POTENCIALES EN UNA RED DE TIERRA CON RETORNO DE CORRIENTE EN EL INFINITO

El razonamiento se efectuará, por simplicidad, sobre el tipo de electrodo más cómodo (semiesfera), enterrado en la superficie de un terreno homogéneo, de resistividad ρ .

Los filetes de corriente se distribuirán radialmente en todas las direcciones, determinando superficies equipotenciales que serán semiesferas concéntricas con la del electrodo y cuyas intersecciones con la superficie del suelo, o trazas, tendrán forma circular (figura 7).

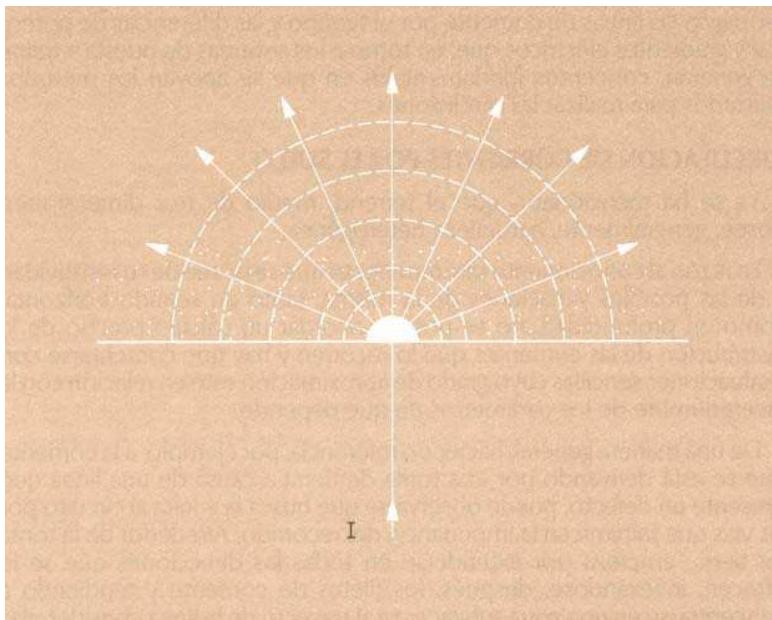


Figura 7. El electrodo esférico es el más simple por ser simétrico en todas direcciones y al enterrar sólo el hemisferio inferior, todavía se simplifica más su análisis. En un terreno homogéneo, las líneas de corriente se esparcirán, radialmente, en todas direcciones si se inyecta una corriente I .

Si el valor de la corriente de puesta a tierra es I (A), la densidad de corriente, i , a una distancia x (m) del centro, será:

$$i = \frac{I}{S} = \frac{I}{2\pi x^2} \quad (\text{A/m})$$

El valor del campo eléctrico, E , (o gradiente de potencial, G), que se creará en ese lugar vendrá dado por:

$$E = G = \frac{dU}{dx} = \rho \cdot i = \rho \cdot \frac{I}{2\pi x^2} \quad (\text{V/m})$$

de forma que la diferencia de potencial entre el electrodo, de radio r , y el punto considerado, U_{r-x} , valdrá:

$$\begin{aligned} U_{r-x} &= \int_r^x e \cdot dx = \int_r^x \frac{\rho I}{2\pi x^2} \cdot dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[-\frac{1}{x} \right]_r^x \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left[-\frac{1}{x} - \left(-\frac{1}{r} \right) \right] = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

El potencial absoluto del electrodo con respecto a un punto de referencia infinitamente alejado ("tierra lejana"), tendrá por expresión:

$$U_{r-\infty} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right) = \frac{\rho I}{2\pi r} = 0,16 \cdot \frac{\rho I}{r} \quad (\text{V})$$

y, análogamente, para cualquier punto que diste x del centro del electrodo, podrá escribirse que el potencial absoluto es:

$$U_x = \frac{\rho I}{2\pi x} = 0,16 \cdot \frac{\rho I}{x} \quad (\text{V})$$

de forma que para una corriente de defecto y un terreno determinado, varía inversamente proporcional a su distancia al centro del electrodo, con *independencia del radio* de éste, siendo la curva que representa su variación una *hipérbola* (figura 8). Puede apreciarse que el valor de la tensión absoluta del electrodo se reduce a la mitad para puntos que disten de la periferia del mismo una distancia igual al radio.

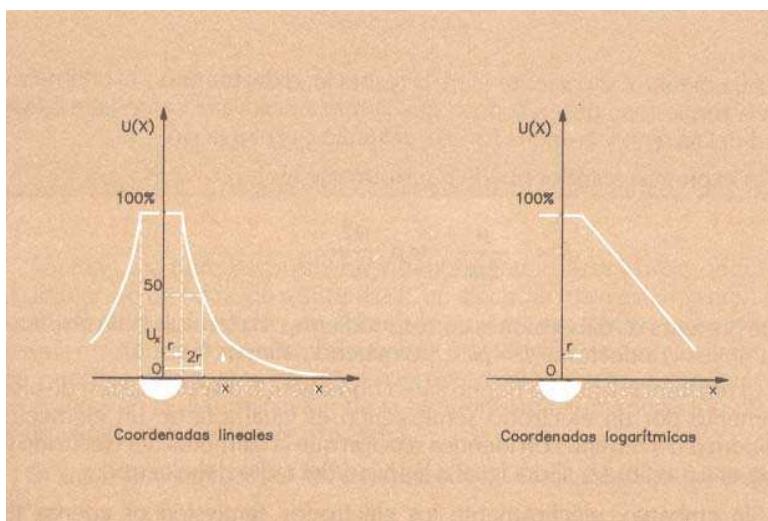


Figura 8. Sobre el electrodo semiesférico, se representa en alzado, utilizando coordenadas lineales, un perfil del potencial que adquiere respecto a un punto de referencia, infinitamente alejado, a potencial cero. Obsérvese cómo a la distancia $2r$ del centro, el potencial se ha reducido a la mitad de su valor. A la derecha, la misma representación en coordenadas logarítmica

El gradiente, sin embargo, aunque tampoco depende de las dimensiones del electrodo, se ha visto que, para una corriente dada, varía con el *inverso del cuadrado de la distancia al centro*, por lo que decrece muy rápidamente.

El electrodo semiesférico posee una resistencia que se puede determinar por el cociente de su potencial absoluto y la intensidad que lo recorre,

esto es:

$$R = \frac{U_{r \rightarrow \infty}}{I} = \frac{\rho I}{2\pi r I} = \frac{\rho}{2\pi r} = 0,16 \cdot \frac{\rho}{r} (\Omega)$$

igual, por tanto, al cociente entre la resistividad del terreno y el perímetro de la semiesfera, observándose que la resistencia varía como la resistividad del terreno y como la inversa del radio del electrodo.

La expresión anterior puede transformarse a:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} = \rho \frac{r/2}{\pi r^2}$$

que presenta las dimensiones correspondientes a la fórmula de la resistencia de los conductores ($R=\rho l/s$), permitiendo afirmar que:

La resistencia opuesta por un suelo homogéneo a la circulación de una corriente por un electrodo semiesférico es igual a la de un elemento cilíndrico del terreno con idéntica sección que la diametral del electrodo y con una longitud o altura igual a la mitad del radio del electrodo.

Sin embargo, prácticamente los electrodos semiesféricos apenas se emplean ya que su forma recogida producen una mala utilización del metal y es preferible hacer que éste tenga una zona de contacto mucho más extensa con el terreno.

En esos casos, el perfil de las superficies equipotenciales evoluciona con su alejamiento del electrodo, adoptando una forma tanto más parecida al electrodo como más próximas estén de él y tanto menos diferentes del de la semiesfera como el electrodo considerado sea de forma más compacta pero, en terreno homogéneo, es importante remarcar que, por irregular que sea la forma del electrodo d tierra, las mencionadas superficies tenderán siempre a acercarse a la que presenta la semiesfera a medida que se alejen del electrodo (figura 9).

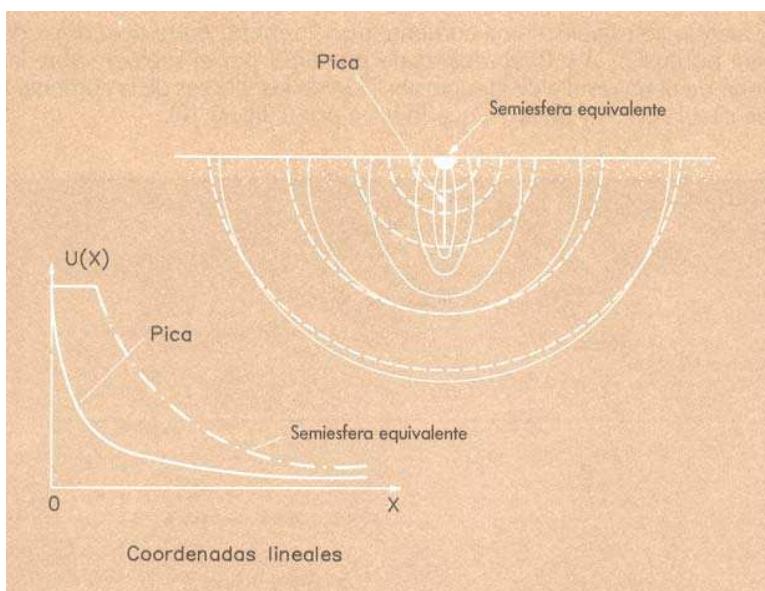


Figura 9. Superficies equipotenciales y reparto de potencial alrededor de una pica y su electrodo semiesférico equivalente. A distancias pequeñas de la pica, las superficies equipotenciales respetan su forma ahusada pero, en el alejamiento, van tiendiendo a las de la semiesfera.

Por tanto, a una *distancia que sea un poco grande respecto a las dimensiones del electrodo*, el potencial *absoluto y el gradiente no dependerán ni de la forma ni de las dimensiones de éste y se pueden expresar por las fórmulas calculadas, en función de la distancia y de la corriente que se evacúe.*

Además, siempre es posible, evidentemente, hacer corresponder a cualquier red de tierra, de resistencia R, un electrodo semiesférico equivalente, de radio r_h de forma que, enterrado en el mismo terreno, presente la misma resistencia de puesta a tierra y que recorrido por la misma corriente de puesta a tierra, alcance el mismo potencial, aspecto que adquiere relevancia en la determinación de la profundidad de investigación de la resistividad, como allí ya se expondrá.

En suelo homogéneo, el radio del electrodo semiesférico equivalente es:

$$r_h = \frac{\rho}{2\pi R} \quad (\text{m})$$

Nota

El radio del electrodo semiesférico equivalente será intermedio entre las tres dimensiones del electrodo real. Una pica es equivalente a una semiesfera de radio próximo a un sexto de su longitud, una placa superficial a una semiesfera de radio del 65 % de la misma.

Por otro lado, es evidente que la resistencia de un electrodo cualquiera será superior a la de todo electrodo semiesférico circunscrito.

REPARTO DE POTENCIALES EN UNA RED DE TIERRA CON RETORNO DE CORRIENTE POR OTRA

Cuando se establece una corriente por el terreno entre dos tomas de tierra puntuales, A y B, el reparto de potencial por el suelo y sobre las tomas de tierra resulta de la superposición de los efectos de la corriente I, que circula por A y de la $-I$, que lo hace por B (figura 10).

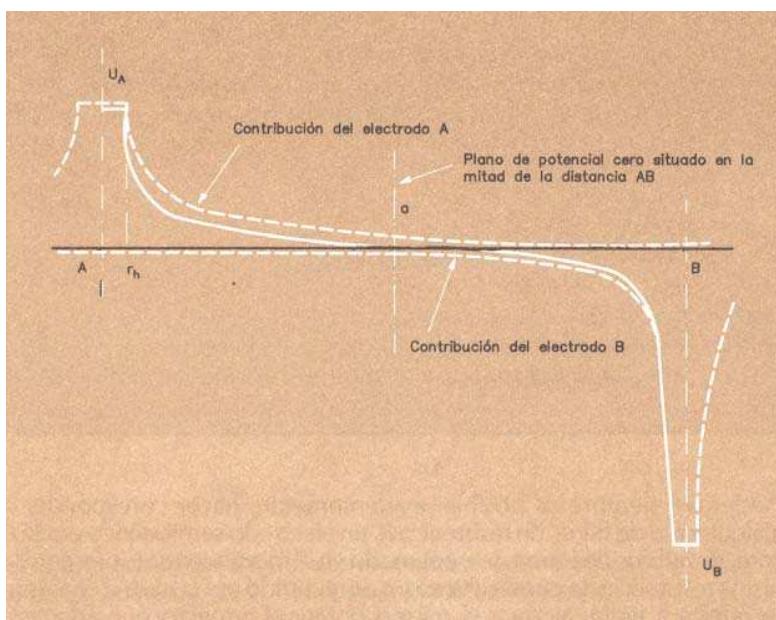


Figura 10. Reparto de potencial en terreno homogéneo, para dos tomas de tierra puntuales, A y B, entre las cuales circula una corriente. El perfil resultante, en trazo continuo, es el obtenido al superponer los potenciales individuales correspondientes a A y B, bajo la circulación de las corrientes I y $-I$, respectivamente.

En la proximidad de cada electrodo, el reparto de potencial difiere tanto menos del que tendría en ausencia del otro electrodo como alejado esté de él.

En el caso de un terreno homogéneo y de dos electrodos de dimensiones pequeñas respecto a su alejamiento, la distribución de las superficies equipotenciales se establece como se muestra en la figura 11. Las superficies equipotenciales son idénticas a las que se producirían por dos cargas eléctricas iguales y de signos contrarios.

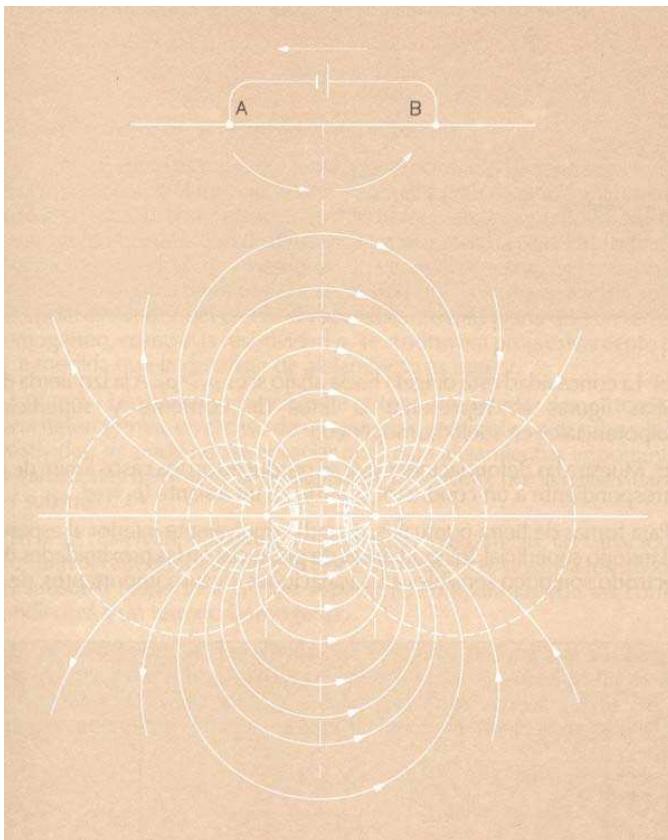


Figura 11. Para las tomas anteriores, la distribución de las superficies equipotenciales (líneas de trazo), serían idénticas a las que producirían dos cargas eléctricas iguales y de signos contrarios. Las líneas de corriente se han dibujado con trazo continuo.

DEFORMACIÓN DE LAS SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES EN UN TERRENO HETEROGRÉNEO

Cuando el subsuelo no es homogéneo, las superficies equipotenciales no son semiesféricas sino que se deforman en función de las variaciones de la resistividad del suelo.

Así, razonando sobre el caso simple de un terreno superficial, de espesor H resistividad ρ_1 , y un subsuelo homogéneo indefinido, de resistividad diferente, ρ_2 , se tendrá que si el subsuelo es más conductor que el terreno superficial y está a una profundidad escasa, tenderá a inflexionar hacia abajo los filetes de corriente que salen del electrodo, mientras que si es más resistente, los dirigirá hacia la superficie, dificultando su expansionamiento en profundidad (figura 12), de forma que penetrarán menos rápidamente en el suelo que cuando éste es homogéneo.

- Si el terreno superficial tiene una resistividad ρ_1 , inferior a la del subsuelo, ρ_2 , las líneas de corriente presentan una concavidad dirigida hacia arriba.
- La concavidad está dirigida hacia abajo si es $\rho_1 > \rho_2$. A la izquierda de ambas figuras se representa la línea de corriente y superficies equipotenciales en suelo homogéneo.

- c) Muestra las deformaciones que se producen en los casos límite de ρ_2 correspondiente a un conductor ($\rho_2=0$) o a un aislante ($\rho_2=\infty$).

Para tomas de tierra puntuales, de radio equivalente inferior al espesor del terreno superficial, los gradientes de potencial en las proximidades del electrodo son poco sensibles a las variaciones, incluso importantes, de la resistividad del subsuelo y prácticamente los mismos que si el suelo fuera homogéneo y de resistividad ρ .

Sin embargo, para distancias iguales o superiores al espesor, H , del terreno superficial, la ley de variación del potencial del terreno está muy afectada por la resistividad del subsuelo:

- Si éste es muy conductor, la mayor parte de los filetes de corriente no tardan en abandonar la capa superficial, disminuyendo rápidamente la tensión alrededor del electrodo, que se acerca a la expresión:

$$U_x = \rho_2 \frac{I}{2\pi x} \quad (\text{V})$$

función exclusiva de la resistividad del subsuelo.

- Si el subsuelo es muy resistente, por el contrario las tensiones tenderán a los valores de la fórmula anterior para una gran distancia, manteniéndose los filetes de corriente mucho más tiempo en la capa superficial, que desempeña aquí un papel de difusor, al circular todavía por ella la mitad de la corriente cuando la distancia es ρ_2/ρ_1 veces el espesor H . Esta trayectoria de las corrientes tiene por consecuencia que la curva de variación del potencial alrededor del electrodo sea bastante más plana que en terreno homogéneo, como si la resistividad ρ_2 se sustituyera progresivamente por ρ_1 , a medida que la distancia de alejamiento es mayor.

La figura 13 ilustra las variaciones de potencial alrededor de una toma de tierra heterogénea, en el caso de un terreno superficial ρ_1 y un subsuelo de resistividad ρ_2 , pudiéndose apreciar que, para alejamientos importantes, las variaciones de potencial están fijadas, sobretodo, por la resistividad ρ_2 del subsuelo.

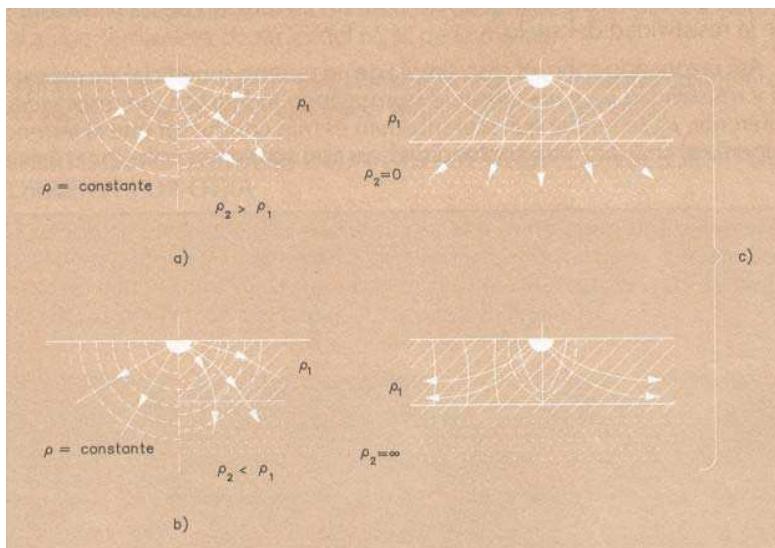


Figura 12. Deformación de las superficies equipotenciales alrededor de una toma de tierra según las variaciones de resistividad de un terreno homogéneo.

En a) se observan, utilizando coordenadas logarítmicas, las variaciones de potencial alrededor de un electrodo semiesférico, según la resistividad del subsuelo respecto a la capa superficial, comparadas con las correspondientes a un terreno homogéneo.

En b) bajo coordenadas lineales, se efectúa esa comparación para el caso concreto de que $\rho_2 = 10 \rho_1$ –curva 1– y la obtenida en un medio homogéneo de resistividad ρ_1 , –curva 2–. Entre ambas curvas, se ha representado el caso en que el espesor $H \approx r$ en la hipótesis de $\rho_2 = 10 \rho_1$.

Medida de la resistividad del terreno [4]

A la luz del conocimiento cualitativo de cómo circulan por el terreno las corrientes eléctricas de defecto, se está en situación de analizar los procedimientos utilizados para llevar a cabo las medidas de resistividad del terreno, objeto de este capítulo y que es una información de importante valor y máxima influencia en la realización de los sistemas de puesta a tierra.

INTRODUCCIÓN

La realización de una instalación de puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del terreno según la profundidad para, de esta forma, facilitar la elección de la disposición de los electrodos de tierra que mejores resultados técnico-económicos proporcione y poder prever las características eléctricas de la red de tierras.

En este sentido, la MIE RAT 13 prescribe, en su punto 4.1, Resistividad del terreno, lo siguiente:

"En el Apartado 2 de esta Instrucción se indica la necesidad de investigar las características del terreno, para realizar el proyecto de una instalación de tierra. Sin embargo, en las instalaciones de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior o igual a 16 kA no será imprescindible realizar la citada investigación previa de la resistividad del suelo, bastando el examen visual del terreno, pudiéndose estimar la resistividad por medio de la tabla 2, en la que se dan unos valores orientativos....", tabla que es la que se ha reproducido en la página 19.

Debe resaltarse, no obstante, que la estimación de la resistividad en base a la clasificación del suelo –involucrando la dificultad de situarlo en el período geológico correspondiente a su formación–, y consiguiente utilización de tablas –con una gama amplia de valores para un terreno determinado–, puede dar lugar a grandes errores, que obligarían a las pertinentes correcciones posteriores, por lo que teniendo presente la relativa simplicidad para establecer la resistividad media por métodos sancionados por la práctica, será aconsejable realizar siempre, incluso en las instalaciones de tercera categoría, las medidas necesarias para determinar el valor de la resistividad.

Nota

MIE RAI 13, Art. 3 Clasificación de las instalaciones.

Tercera categoría. Las de tensión nominal igual o inferior a 30 kV y superiora 1 kV.

MÉTODOS DE MEDIDA

Existen diversos métodos para determinar la resistividad de un terreno pudiendo citarse, en primer lugar, el basado en la toma de muestras y el de los "dos electrodos", pero que sólo proporcionan indicaciones muy locales y, consecuentemente, insuficientes o engañosas para la concepción de las tomas de tierra.

También, en alguna ocasión, se utiliza el sistema consistente en medir la resistencia de tierra de un electrodo que responda a una fórmula bien conocida (pica, por ejemplo) para determinar, a partir de

ahí, la resistividad del terreno que la rodea, método que tiene la ventaja de proporcionar una medida global pero cuya aplicación no resulta adecuada más que si la toma de tierra a implantar es de dimensiones comparables a la de los electrodos utilizados como referencia.

Por otro lado, como que los electrodos de medida también poseen resistencia de tierra y su valor puede ser considerablemente más alto que el que desea medirse –de forma análoga a como ocurre cuando se tienen que efectuar mediciones de resistencias metálicas muy bajas, con resistencias de contacto comparables con ella–, la mejor solución es utilizar el método de los "4 terminales", descrito a continuación.

Método de los cuatro electrodos

Es el más utilizado para determinar la resistividad del terreno. En este procedimiento, se establece la resistividad, en función de la profundidad, en la vertical de un punto, O (figura 14), haciendo circular una corriente, I , –con ayuda de un generador, G– entre dos electrodos puntuales, de pequeñas dimensiones, hincados en el suelo, A y B.

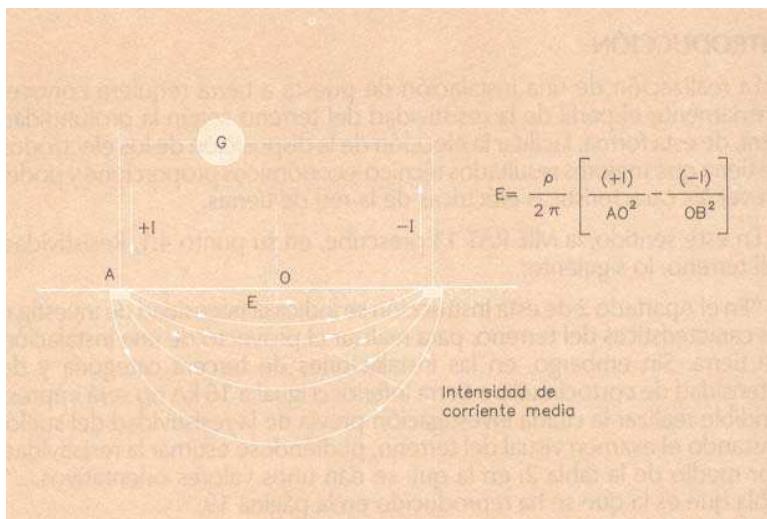


Figura 14. Para conocer, en la vertical del punto O, la resistividad en función de la profundidad, se hace circular una corriente entre dos pequeñas picas, A y B. Si el terreno es homogéneo, el valor del campo eléctrico creado, E, permite determinar la resistividad, ρ , del terreno.

En terreno homogéneo, de resistividad ρ , el valor del campo eléctrico, E , en el punto O, debido a la presencia de las cargas eléctricas de signos contrarios procedentes de A y B, tiene por valor:

$$E = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{(+I)}{(AO)^2} - \frac{(-I)}{(OB)^2} \right]$$

Si el punto O está situado en la mitad de AB, de tal forma que $AO=OB=x$, queda:

$$E = \frac{\rho}{\pi x^2}$$

de donde se deduce la fórmula siguiente de la resistividad del suelo bajo el punto O:

$$\rho = \pi x^2 \frac{E}{I}$$

Puesto que el suelo raramente es homogéneo, realmente la fórmula expresa la resistividad aparente de las capas existentes en el suelo bajo el punto O, justo hasta la profundidad alcanzada por el filete de intensidad de corriente media que circula entre los electrodos A y B.

Prácticamente, el campo eléctrico, E , se determina por el cociente entre la diferente de potencial $U_C - U_D$ que existe entre dos sondas de tierra, C y D, dispuestas simétricamente con relación a O y su separación, L (figura 15).

$$E = \frac{U_C - U_D}{L}$$

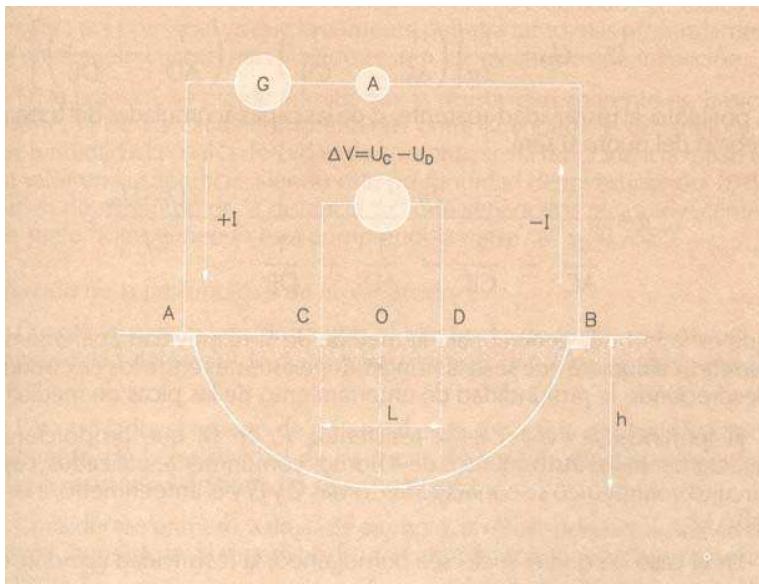


Figura 15. El valor del campo eléctrico que se necesita para calcular la resistividad se establece como cociente entre la diferencia de potencial $U_C - U_D$, medida entre dos puntos de tierra, C y D, situados simétricamente respecto a O y la distancia que existe entre ellos, L .

Expresando la diferencia de potencial en función de la distancia respectiva de los puntos C y D con respecto a las corrientes +/- I , se tiene:

$$U_C - U_D = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} \right) - \left(\frac{1}{AD} - \frac{1}{DB} \right) \right]$$

y, por tanto, la resistividad aparente, ρ , de las capas acumuladas del terreno debajo del punto O será:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AC} - \frac{1}{CB} - \frac{1}{AD} + \frac{1}{DB}} \cdot \frac{U_C - U_D}{I}$$

que es la fórmula general para la medida de la resistividad aparente del terreno, cualquiera que sean las longitudes existentes entre los electrodos, despreciando la profundidad de enterramiento de las picas de medida.

El término $(U_C - U_D)/I$ es la resistencia, R , en Ω , que proporcionan directamente los instrumentos de 4 bornes comúnmente utilizados, cuyo circuito voltmétrico se conecta a las tomas C y D y el amperímetro, a las A y B.

En el caso de que el suelo sea homogéneo, la resistividad aparente es idéntica a la resistividad real.

Método de Wenner

Es un caso particular del método de los 4 electrodos, que se disponen en línea recta y equidistantes, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de las piquetas, que para ello se utilizan, sobrepase los 30 cm.

El aparato de medida es un telurómetro clásico, siendo los dos electrodos extremos los de inyección de la corriente de medida, I , y los dos centrales, los electrodos de medida del potencial (figura 16).

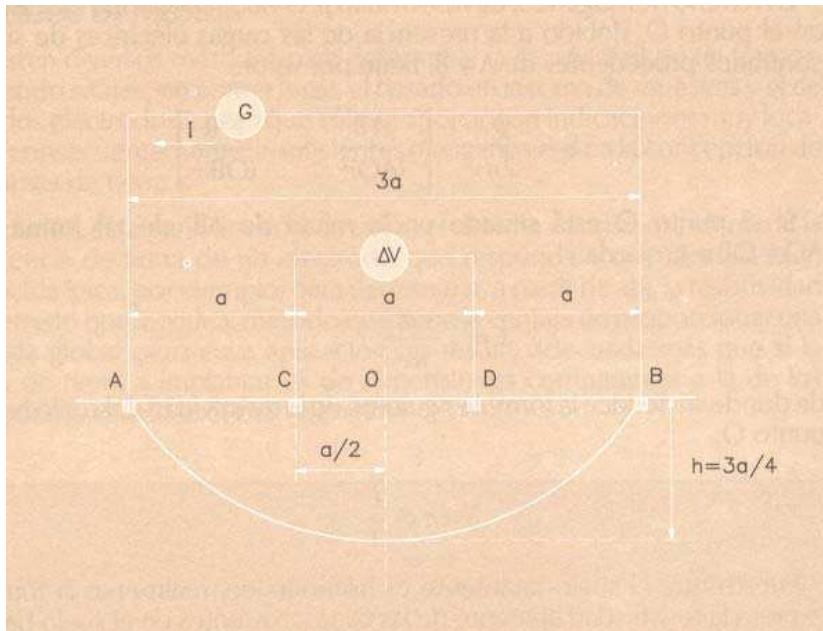


Figura 16. En el método de Wenner, se sitúan 4 electrodos de pequeñas dimensiones alineados en línea recta y equidistantes entre sí "a" metros. Los terminales extremos constituyen la inyección de corriente y los dos centrales, efectúan la medida de la diferencia de potencial $U_C - U_D$. En el equilibrio, el aparato facilita directamente el cociente entre $U_C - U_D/I$, o sea la R y la resistividad, a una profundidad $h = 3a/4$, se calcula por la expresión $\rho = 2\pi a R$

El punto, O, de medida de la resistividad se encuentra en el medio de un sistema simétrico, entre los electrodos de potencial, llamándose base de medida a la distancia "a" entre dos electrodos adyacentes y línea de emisión a la distancia entre los electrodos extremos (igual a "3a" en este método).

En estas condiciones, la fórmula general anterior queda simplificada en:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a}} R = 2\pi a R$$

En relación con este método, deben de tenerse presente los siguientes aspectos:

Noción de la profundidad de investigación

La densidad de la corriente en el suelo decrece regularmente cuando aumenta la profundidad en la vertical de los dos electrodos centrales de medida del potencial ya que la corriente penetra tanto más profundamente en el suelo cuanto más alejados estén los electrodos de inyección.

En la práctica, se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente, la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, siendo esta profundidad de investigación, h , del orden

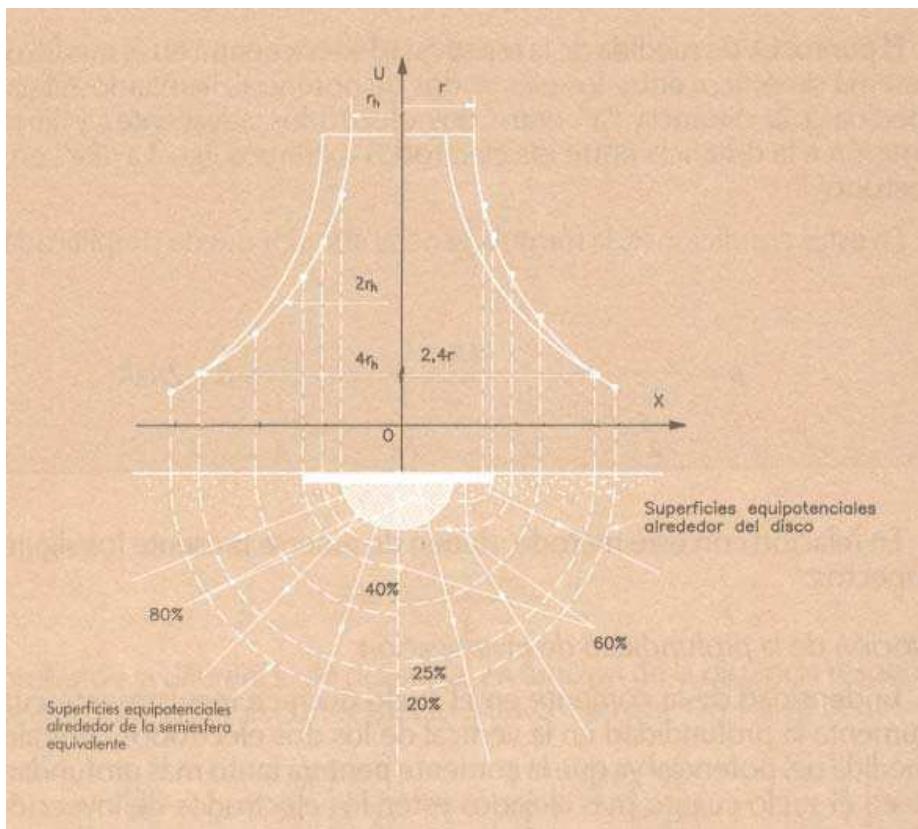
de magnitud de la distancia "a" que separa dos picas adyacentes, en suelo homogéneo (h está comprendida entre "a" y "0,75a").

Elección de la profundidad de investigación

Cuanta mayor extensión ocupe el electrodo de tierra, mayor será la profundidad del suelo de cuyas características dependen las de la red de tierra.

Por otro lado, el reparto de potencial en la superficie es función, principalmente, de la resistividad de las capas de terreno superficial mientras que la resistencia de tierra no depende tanto.

Considérese primero, a título de ejemplo, un electrodo hemisférico de radio r_h hundido en la superficie de un terreno homogéneo, como se ve en la figura 17.



*Figura 17.
Comparación del
reparto de potencial
y de las
líneas de corriente
alrededor
de una placa
circular, de radio
 r , enterrada en la
superficie del
terreno y las del
electrodo
semiesférico
equivalente.*

A una distancia $2r_h$ del centro del hemisferio se ha visto que el potencial de un punto del suelo no es más que el 50 % del que posee el electrodo, mientras que a la distancia $4r_h$, su valor ha disminuido al 25%. Otro ejemplo es el de un disco de radio r , dispuesto a escasa profundidad, que también se ha representado en la misma figura y que es equivalente a aquél.

El potencial del suelo, a una profundidad igual a $2,4r$ (que en el caso de la hemisferia equivalente, corresponde a 3,8 veces el radio, r_h , de la misma), vale el 25 % del que posee el disco.

Al generalizar estos resultados al caso de electrodos de cualquier forma enterrados en suelo homogéneo, se ve que las características eléctricas de una red de tierra están determinadas, esencialmente por la porción de terreno comprendido entre la superficie del suelo y una distancia de alrededor de 4 veces el radio de la semiesfera equivalente a la red de tierra.

En consecuencia, las medidas de la resistividad del terreno por el método de Wenner deben realizarse dentro de esos límites.

En la tabla 3 se facilitan los valores del producto $K=2\pi a$ que, junto con la lectura, R , del aparato, permiten obtener la resistividad del terreno en la franja comprendida entre la superficie y la profundidad $h = 3a/4$.

Cálculo de la resistividad aparente del terreno, ρ , a distintas profundidades				
Distancia entre piquetas a (m)	Profundidad $h = 3a/4$ (m)	Coeficiente $k = 2\pi a$ (m)	Lectura aparato R (Ω)	Resistividad del terreno $\rho = k R$ ($\Omega \cdot m$)
2	1,5	12,57		
4	3,0	25,13		
6	4,5	37,70		
10	7,5	62,83		
12	9,0	75,40		
14	10,5	87,96		
16	12,0	100,53		
18	13,5	113,10		
20	15,0	125,66		
22	16,5	138,23		
24	18,0	150,80		
26	19,5	163,36		
28	21,0	175,93		
30	22,5	188,50		
32	24,0	201,06		
34	25,5	213,63		
36	27,0	226,20		
38	28,5	238,76		
40	30,0	251,33		
42	31,5	263,89		
44	33,0	276,49		
46	34,5	289,03		
48	36,0	301,59		
50	37,5	314,16		

Tabla 3

CONSIDERACIONES SOBRE LAS MEDIDAS DE LA RESISTIVIDAD

Ya se ha indicado que las variaciones climáticas estacionales influyen sobre la resistividad de las capas superficiales de un terreno. Es por ello que las lecturas de resistividad deben incluir anotaciones sobre las condiciones reinantes durante las medidas (temperatura y condiciones de humedad del suelo) y, si es posible, contrastarlas con las que se repitan en épocas diferentes del año.

La presencia en la zona de prospección de cuerpos metálicos (por ejemplo, canalizaciones desnudas) o de filones de terreno muy resistentes o muy conductores, que acaben aflorando a la superficie, puede perturbar las medidas de resistividad, ya que para franquear tales obstáculos, se originan modificaciones de las trayectorias de los filetes de corriente en el suelo y, en consecuencia, del campo eléctrico sobre el punto de medida.

La forma de evidenciar las siempre posibles causas perturbadoras y, también, de verificar que no existen variaciones sensibles en la homogeneidad del subsuelo que se analiza, es efectuar mediciones en diversas zonas del emplazamiento de la instalación de tierra y con distintas separaciones entre los electrodos de medida, –muy particularmente en instalaciones de gran extensión, como centrales y subestaciones, mientras que en centros de transformación y otras instalaciones de 3.a categoría, puede bastar mediciones dentro del solar que ocupen y en su entorno inmediato, tomando el valor medio de los resultados obtenidos como base para el cálculo– para confirmar los resultados u obtener indicaciones de variaciones importantes de la resistividad con la situación o la profundidad.

Mientras más importantes sean las desviaciones, más lecturas deberán tomarse, especialmente si alguno de los valores es tan elevado que haga intuir problemas graves de seguridad.

Para un mismo punto de investigación es preciso efectuar dos medidas como mínimo, según dos ejes perpendiculares entre si que pasen por el punto, recomendándose, no obstante, proceder a medir en otro lugar próximo, situado en la misma zona geológica.

Además, cuando la resistividad varíe apreciablemente con la profundidad, es conveniente utilizar un rango de espaciado, "a", entre electrodos adecuado para que se pueda realizar una estimación precisa, por extrapolación, para otros valores.

Las medidas deben realizarse en condiciones representativas de la situación del electrodo en el futuro, y, por ello, si está previsto modificar las condiciones naturales del terreno, mediante desmontes o terraplenes, deben efectuarse las mediciones una vez realizadas tales tareas o repetirlas, a efectos comparativos, una vez concluidas las mismas.

También es necesario efectuar la determinación de la resistividad en tiempo seco, tratando de reproducir las condiciones más desfavorables y si ello no fuera posible, se deberá aplicar un cierto coeficiente de seguridad que es mayor en los resultados obtenidos.

Otra posible causa de perturbaciones durante las medidas de resistividad del terreno puede tener relación con las características del equipo de medida utilizado, pues, generalmente, se emplea un telurómetro que funciona con corrientes alternas de inyección para las medidas de resistividad de los terrenos. La corriente alterna permite, en efecto, eliminar el efecto parásito de polarización de los electrodos producido por la corriente continua y resulta insensible a las corrientes telúricas y vagabundas pero, a causa del efecto pelicular, penetra menos profundamente en el suelo que la corriente continua, efecto que es tanto más acusado cuanto más elevada sea la frecuencia de la corriente y débil la resistividad del terreno. Por eso, en la práctica habrá que buscar frecuencias para las que este efecto sea despreciable como la de 85 Hz, que proporciona una penetración de 550 m en terrenos de 100 a.m de resistividad y 1700 m cuando la resistividad es de 100 Q.m.

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La evolución del valor de la resistividad aparente en función de la distancia entre los electrodos de medida proporciona una primera indicación cualitativa de la estructura del terreno; si esa curva es decreciente, significa que el subsuelo es mejor conductor que el terreno superficial e inversamente, para una curva creciente.

La determinación cuantitativa de la resistividad del terreno a diferentes profundidades se hace comparando la curva experimental de las variaciones de la resistividad aparente con un juego de ábacos obtenida por cálculo y correspondientes a ciertas estructuras del terreno bien precisas que, generalmente, son:

- Suelo cuya resistividad varía continuamente siguiendo una ley exponencial.
- Suelo constituido por una capa superficial de resistividad uniforme, ρ_1 , y de un subsuelo de resistividad ρ_2 .
- Suelo constituido por tres capas.

La búsqueda de la estructura más adecuada a los resultados experimentales puede hacerse gráficamente o por cálculos mediante ordenador, quedando determinada la estructura del terreno con una precisión que depende, únicamente, de la manera en que los resultados de las mediciones se superpongan con las curvas teóricas, que pueden calcularse con gran precisión.

La figura 18 muestra un ejemplo de curvas de valores de resistividad aparente medidas por el método de Wenner (curvas de trazo continuo y continuo-guion) y su comparación con las de un modelo teórico de dos capas, habiéndose considerado tres alternativas para el valor de ρ_2 .

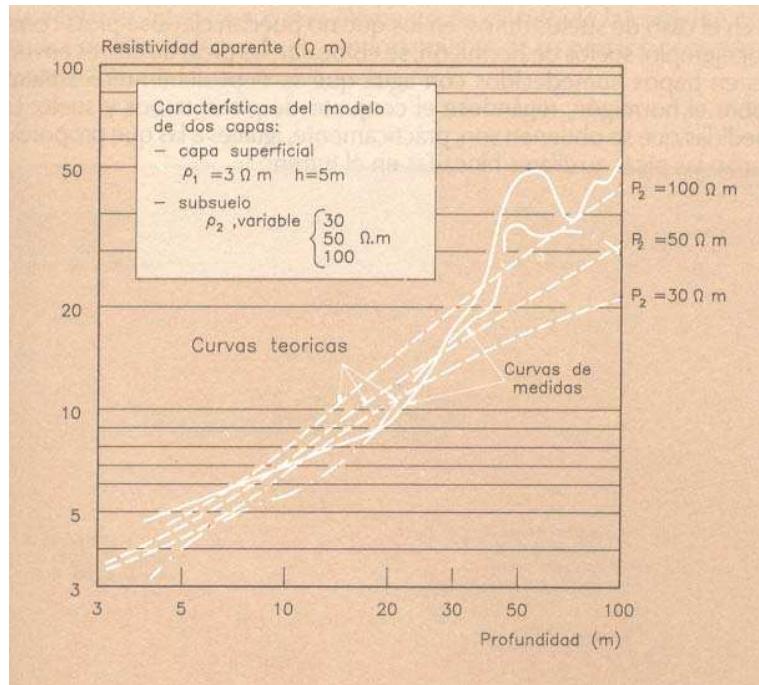


Figura 18. Ejemplo de resultado de las medidas –por el método de Wenner– de la resistividad aparente del terreno y de su comparación con los valores teóricos correspondientes a un modelo de dos capas, la superficial y la del subsuelo. Las curvas teóricas se muestran a trazos y las experimentales, medidas, de forma continua y continua-trazo.

ELEMENTOS NECESARIOS PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES

El material necesario para determinar las resistividades del suelo es el siguiente:

- Un instrumento de medida de resistencia de tierra, que posea 4 bornes.
- Cuatro piquetas metálicas que sirvan de electrodo.
- Cuatro cales aislados para conectar las piquetas a las tomas del instrumento.

Para efectuar mediciones hasta profundidades de unos 40 m será preciso disponer de 2 rollos de cable de un centenar de metros y otros dos de 50 metros, preferiblemente sobre bobinas que permitan, con facilidad, la operación de enrollado y desenrollado de los mismos, siendo cada cable de un color diferente.

En el caso de suelos duros, en los que no puedan clavarse picas como, por ejemplo, suelos de hormigón, se colocarán las picas auxiliares envueltas en os humedecidos con agua que se depositarán directamente sobre el hormigón, regándose el conjunto de picas, trapos y suelo. Las medidas que se obtienen son, prácticamente, iguales a las que proporcionarían las picas auxiliares hincadas en el terreno.

Tensiones de paso y contacto [5], [6] y [7]

Se proporcionan aquí las definiciones de los conceptos básicos en que descansa la filosofía de seguridad que ha adoptado la Administración en relación con las instalaciones de puesta a tierra, como son las posibles tensiones de paso y contacto existentes en la misma y los valores aplicados de esas tensiones al ser humano, facilitándose algunos ejemplos y expresiones sencillas que pueden tomarse como referencias.

MAGNITUDES ELÉCTRICAS QUE CARACTERIZAN UNA PUESTA A TIERRA

Bajo condiciones de defecto, la circulación de una corriente, I , por una toma de tierra sitúa a ésta a una tensión, U_0 , denominada *depuesta a tierra*, en relación con un punto lejano, de potencial cero, definiendo el cociente U_0/I la resistencia, R , de la toma de tierra que, tal como se verá más adelante, interviene como elemento de cálculo de la corriente que circula –de la cual depende el comportamiento de las protecciones– y de la propia tensión U_0 (figura 19).

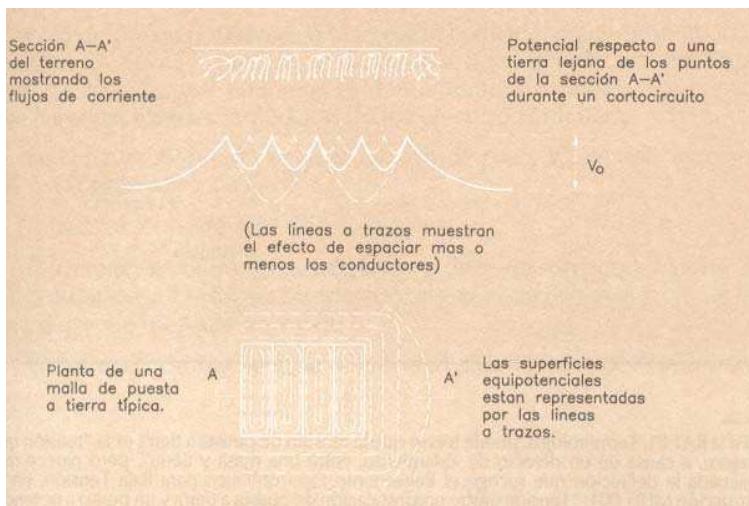


Figura 19. Distribución de las líneas de corriente y potenciales en torno a una malla de puesta a tierra, cuando está recorrida por una corriente de defecto.

No obstante, como se describe a continuación, en los problemas de seguridad intervienen siempre tensiones entre puntos físicamente bastante más cercanos como para que se pueda acceder a ellos simultáneamente, de forma que U_0 no cuenta directamente en estas situaciones, salvo que se produzca alguna de las siguientes particularidades:

- Introducción, de alguna manera, del potencial de referencia en el interior de la instalación, acercando, hasta distancias de contacto, estructuras cuya fijación al suelo esté alejada.
- Propagación del potencial de la instalación (las llamadas tensiones transferidas) a una gran distancia de la misma por un elemento conductor, tal como una línea telefónica, una red de baja tensión, una canalización metálica aislada, etc.

EVALUACIÓN DE LAS TENSIONES LOCALES ALREDEDOR DE LAS TOMAS DE TIERRA O DE ESTRUCTURAS PUESTAS A TIERRA

Alrededor de los electrodos de tierra, la tensión del suelo decrece progresivamente desde el valor $U_0=R/I$ hasta cero, habiéndose definido la tensión U_x a una distancia x del centro de la toma de tierra y el gradiente local correspondiente dU_x/dx .

Tensión de paso

Para este concepto, la MIE RAT 01 proporciona el siguiente texto literal:

"Es la parte de la tensión (de puesta) a tierra que puede ser puenteada por un ser humano entre los dos pies, considerándose el paso de una longitud de 1 metro" aunque resulta más intuitivo el facilitado por la IEEE Standard 81, al destacar la ausencia de la persona en su definición:

"La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo".

El gradiente de potencial en una región coincide, prácticamente, con el valor más elevado que puede alcanzar la denominada *tensión de paso* (figuras 20 y 21), que adquiere, evidentemente, sus valores más elevados en las proximidades inmediatas de los electrodos de tierra.

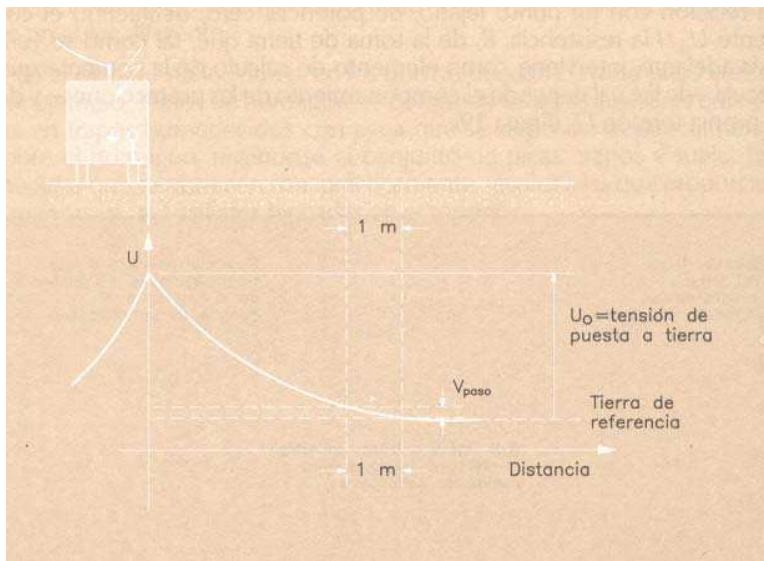


Figura 20. Se representa el perfil de potenciales en torno a un electrodo vertical de puesta a tierra (pica), pudiendo comprobarse la proporción existente entre V_p y U_0 .

En la figura 20 puede verse la *tensión de paso*, V_p , es una fracción de la tensión de puesta a tierra, U_0 . Deben de considerarse dos situaciones:

- Cuando las dimensiones de la toma de tierra son pequeñas respecto a su distancia, x , del lugar considerado, el gradiente de tensión en ese lugar no depende más que de x y de I .

(*) En la RAT 01, Terminología, puede leerse que la tensión de puesta a tierra es la "tensión que aparece, a causa de un defecto de aislamiento, entre una masa y tierra", pero parece mas adecuada la definición que recoge el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, en su Instrucción MI BT 001: "Tensión entre una instalación de puesta a tierra y un punto a potencial cero, cuando pasa por dicha instalación una corriente de defecto".

En terreno homogéneo, de resistividad $\rho(\Omega \cdot \text{m})$, tiene por expresión:

$$C_x = 0,16 \frac{\rho I}{x^2} \quad (\text{V/m})$$

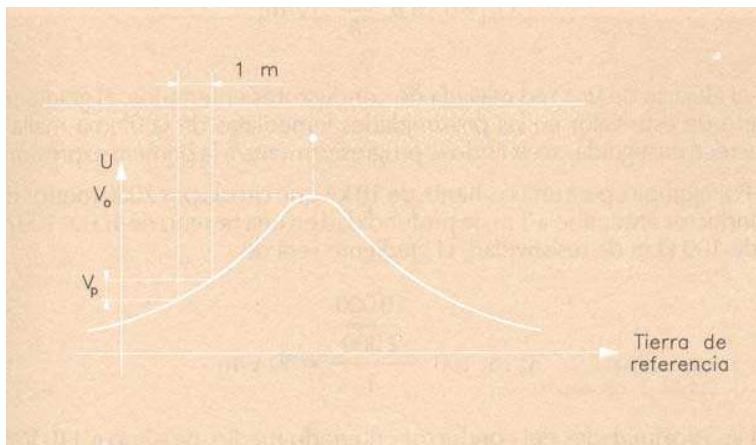


Figura 21. También aquí se representa el reparto de potenciales del suelo, U , y la tensión de paso, V_p , pero, ahora, la existente en las proximidades de un conductor enterrado, por el que circula una corriente de puesta a tierra.

Por ejemplo, si circula una corriente de 5000 A por una toma de tierra en un terreno con una resistividad de 500 $\Omega \cdot \text{m}$, el gradiente a 50 metros del centro de la puesta a tierra es igual a 160 V/m.

- b) Si las tomas de tierra son de gran extensión, están constituidas, generalmente, por conductores enterrados horizontalmente y, en este caso, el gradiente en la proximidad de un conductor depende, esencialmente, de la corriente, i , que evague por metro.

Este gradiente es nulo en la vertiente del conductor y toma su valor máximo a uno y otro lado del mismo, a una distancia semejante a la profundidad de enterramiento, h , teniendo como orden de magnitud:

$$G_M = 0,16 \rho \frac{i}{h} \quad (\text{V/m})$$

Al alejarse de una red mallada de conductores enterrados, el gradiente parte de este valor en las proximidades inmediatas de la última malla y decrece enseguida, acercándose progresivamente a la primera expresión.

Por ejemplo, para una corriente de 10 kA que circula por 2000 metros de conductor enterrado a 1 m de profundidad en un terreno de 100 x 100 m y de 100 $\Omega \cdot \text{m}$ de resistividad, el gradiente será de:

$$0,16 \cdot 100 \frac{\frac{10000}{2000}}{1} = 80 \text{ V/m}$$

en las proximidades del conductor enterrado medio, próximo a 110 V/m en las cercanías de un conductor periférico y descenderá a:

$$0,16 \frac{100 \cdot 10000}{100^2} = 16 \text{ V/m}$$

a 100 m del centro.

Tensión de contacto

Sin embargo, tal como se analiza en el siguiente capítulo, en la mayor parte de los casos, el peligro más grande para las personas durante la circulación de una corriente de puesta a tierra no resulta de las tensiones de paso –que son principalmente peligrosas para los grandes cuadrúpedos– sino del doble contacto del cuerpo, por una parte, con una estructura unida a los electrodos de tierra por sus superficies de apoyo o fijación, a la tensión U_0 y, por otra, la del terreno, U_x , a una distancia del orden del metro, (o una estructura solidaria a la tensión U_x), en un lugar donde este potencial difiera de U_0 .

El riesgo está, entonces, en relación con la tensión $U_0 - U_x$, o tensión de contacto (figura 22) V_c , que puede alcanzar, en determinadas situaciones, una fracción importante de la tensión total, U_0 .

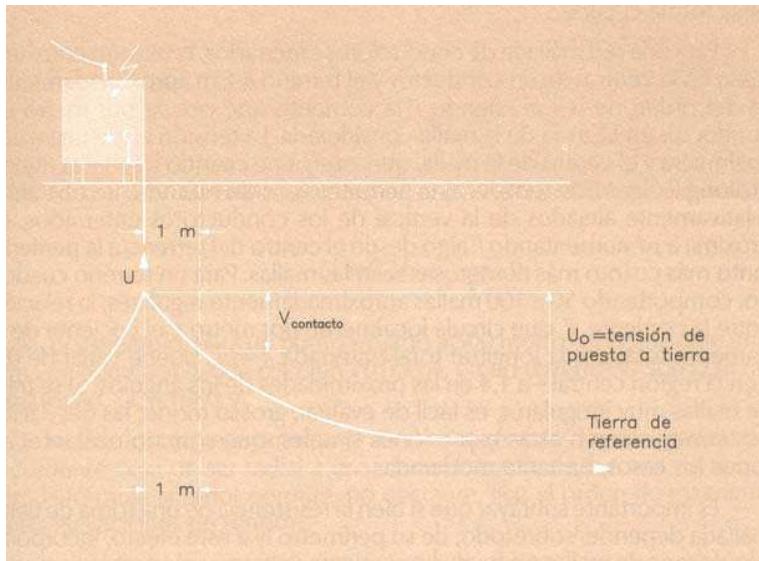


Figura 22. Sobre el mismo perfil de potenciales de la figura 20, está indicada esta diferencia de potencial preexistente –es decir, antes de la presencia de la persona– V_c , destacándose su proporción respecto a U_0 .

En la MIE RAT 01 queda definida así:

"Es la fracción de la tensión de puesta a tierra que puede ser puenteada por una persona entre la mano y el pie (considerando un metro) o entre ambas manos", aunque, a semejanza de la de paso, resulta también más intuitiva la proporcionada por la IEEE Standard 81, que reza así:

"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 se puede alcanzar, o sea, aproximadamente, 1 metro".

También, aquí, juegan un papel primordial las dimensiones de la toma de tierra. En efecto:

- En el caso de tomas de tierra de pequeñas dimensiones, esta fracción es importante, pues ya se ha indicado que para un electrodo semiesférico, la tensión desciende a la mitad entre el borde del electrodo y una circunferencia de radio doble y, para un electrodo vertical o pica, la tensión, a 1 m, puede alcanzar la mitad o las 3/4 partes de la tensión total, U_0 .

Teniendo en cuenta las posibles prolongaciones horizontales de las estructuras, debe contemplarse que el cuerpo pueda shuntar la parte más grande de la tensión total del electrodo.

- Cuando las tomas de tierra son de gran extensión en superficie, las tensiones entre las estructuras fijadas al suelo y éste, a una distancia de 1 metro, son, generalmente, una fracción más débil de la tensión total.

Se mencionan algunas cifras que pueden servir de referencia:

- Para conductores enterrados horizontalmente en una zanja en línea recta o en bucle, en un terreno de resistividad ρ ($\Omega \cdot \text{m}$), la tensión entre una masa en la vertical del conductor y el terreno, a 1 m, es próxima a $0,5 \rho i$ (V), es decir, 1/4 aproximadamente de la tensión total, al suponer el terreno homogéneo.
- En el caso de un bucle circular, de dimensiones cualesquiera, enterrado a escasa profundidad en terreno homogéneo, se calcula fácilmente que la tensión absoluta del suelo en el centro del bucle es ρi , del orden de la mitad de la tensión total, permaneciendo próxima a ese valor para bucles cuadrados o cualquier otra disposición que no se aparte exageradamente de la forma circular.
- Para una red mallada de conductores enterrados, la tensión entre una masa en la vertical de un conductor y el terreno a 1 m aproximadamente, es del orden de $0,5 \rho i'$, siendo i' la corriente que circula por metro de conductor en la zona de la malla considerada. La tensión entre una masa cualquiera y el centro de la malla, que interviene cuando las masas tienen prolongaciones horizontal que permiten tocarlas estando, no obstante, relativamente alejadas de la veinte de los conductores enterrados, es próxima a $\rho i'$ aumentando i' algo desde el centro del terreno a la periferia, tanto más cuanto más numerosas sea las mallas. Para un terreno cuadrado, comportando 50 a 100 mallas aproximadamente regulares, la relación entre la corriente, i , que circula localmente por metro y el cociente de la corriente total por la longitud total enterrada, $i=i/L$, puede variar de 0,7 –en la región central– a 1,4 en las proximidades de los ángulos. Si se trata de mallas muy irregulares, es fácil de evaluar, grosso modo, las desviaciones con relación a estas expresiones simples, que son, no obstante, en todos los casos, bastante moderadas.
- Es importante subrayar que si bien la resistencia de una toma de tierra mallada depende, sobretodo, de su perímetro (y a este efecto, incorporar una decena de mallas no hace disminuir gran cosa su valor), es la corriente que circula por metro, –que depende, sobre todo, de la longitud total de conductores enterrados–, quien determina las diferencias de potencial locales en el interior de la instalación y en las proximidades inmediatas de su entorno. Solamente en los casos, relativamente raros, donde estas tensiones locales tengan que considerarse que constituyen un peligro, puede ser útil aumentar el desarrollo de los circuitos enterrados más allá de lo que es estrictamente necesario para conectar entre sí los diversos aparatos y estructuras que deben ponerse a tierra.

TENSIONES COMUNICADAS AL SUELO EN LUGARES ALEJADOS

La elevación natural de potencial en lugares relativamente alejados de una toma de tierra por la que circule una fuerte corriente de defecto puede ser importante. Se ha visto que, independientemente de su forma, a una distancia, x , importante del lugar del defecto, en el caso de una dispersión radial en terreno homogéneo, el potencial absoluto era:

$$U_x = 0,16 \rho \frac{I}{x} \quad (\text{V})$$

o sea, por ejemplo, para un punto situado a 500 metros del centro de una toma de tierra por la que circulen 10000 A, en un terreno de 500 $\Omega \cdot \text{m}$ de resistividad, $U_x=1600$ V.

De hecho, los terrenos raramente son homogéneos y la propagación de la corriente cesa de ser radial a una cierta distancia de la toma de tierra, pero la fórmula anterior permite, no obstante, fijar el orden de magnitud de las elevaciones de tensión.

Es un hecho experimental que, a menudo, las corrientes en el suelo pasan desapercibidas a distancias importantes del lugar donde se produce una falta de aislamiento por el valor, generalmente débil, de los gradientes locales, unido a otros factores que hacen los accidentes poco probables, como se resaltará en el capítulo siguiente.

Sin embargo, debe ponerse atención a estos problemas cuando las corrientes evacuadas son muy elevadas, principalmente en zonas de alta resistividad, sobre todo cuando el terreno es heterogéneo, en que fallas húmedas puedan concentrar los filetes de corriente o bien, cuando existan canalizaciones susceptibles de llevar puntos no muy separados físicamente a potenciales muy diferentes.

TENSIONES DE PASO Y CONTACTO APLICADAS

Debe destacarse que los valores de las tensiones de paso y contacto que se acaban de describir son, respectivamente, los que se medirían sobre el terreno, entre dos puntos separados entre sí por la distancia de 1 metro, o entre una masa metálica y un punto del terreno, a 1 m de distancia, valiéndose de un voltímetro de alta impedancia interna para que la lectura no se viera alterada por el consumo del aparato.

Sin embargo, si esas diferencias de potencial preexistentes son puenteadas por una persona, se constituye un divisor de potencial entre todas las resistencias que intervienen en el circuito, de forma que el sujeto no queda sometido a la totalidad de la tensión de paso o contacto existente en la instalación sino a una fracción de la misma, que constituye la denominada tensión de paso o contacto aplicada.

A resaltar, tal como se muestra en la figura 23, que la calificación de aplicada está asociada a la existencia de la persona en la instalación. Como quiera que en el circuito intervienen otras resistencias más, las tensiones de paso y contacto aplicadas resultan ser fracciones, respectivamente, de las tensiones de paso y contacto preexistentes.

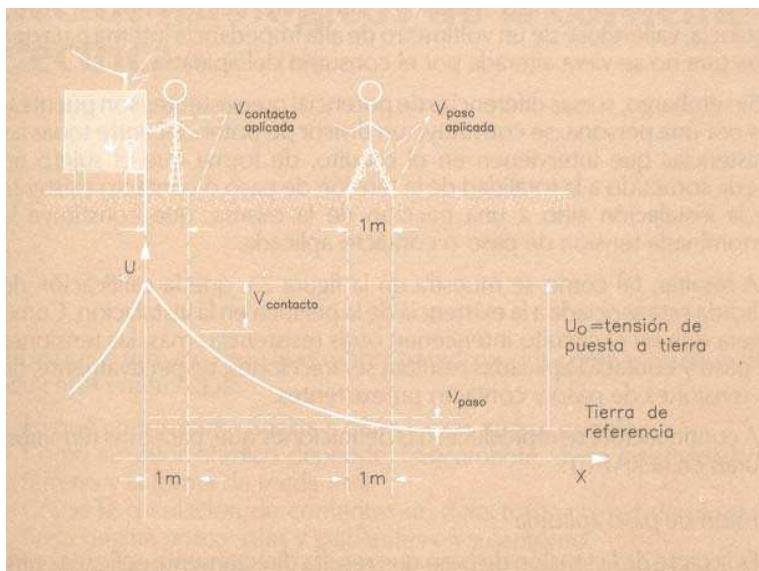


Figura 23. Sobre el dibujo ya conocido por las figuras 20 y 22, se ha dispuesto una persona para insistir en que los términos tensión de paso aplicada y tensión de contacto aplicada están asociados, necesariamente, a la presencia humana que, a los efectos eléctricos, queda simulada por una resistencia de 1000 ohmios.

A continuación, se reproducen las definiciones que, para esos términos, figuran en la RAT 01:

Tensión de paso aplicada

Es la parte de la tensión de paso que resulta directamente aplicada entre los pies de un hombre, teniendo en cuenta todas las resistencias que intervienen en el circuito y estimándose la del cuerpo humano en 1000 ohmios.

Tensión de contacto aplicada

Es la parte de la tensión de contacto que resulta directamente aplicada entre dos puntos del cuerpo humano, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito y estimándose la del cuerpo humano en 1000 ohmios".

Efectos Fisiológicos de la corriente eléctrica [8], [9] y [10]

Un breve sumario de lo hasta ahora tratado podría compendiarse en los siguientes enunciados:

- En qué consiste una puesta a tierra y para qué se establece.
- Cómo su valor óhmico depende, básicamente, de la resistividad del terreno y la forma de medir ésta.
- Cómo la circulación de corrientes de defecto por la red de puesta a tierra origina potenciales y gradientes en su entorno.
- La denominación de los mismos, según las posibles formas de que queden aplicados al ser humano.

Ahora, se va a hacer mención de los efectos fisiológicos que el paso de la corriente eléctrica produce al recorrer el organismo, etapa previa para estar en condiciones de comprender y valorar las expresiones de las tensiones de seguridad que recoge la RAT 13 y que serán objeto del capítulo siguiente a éste.

UMBRAL DE SENSIBILIDAD

El establecimiento de los límites a partir de los cuales la corriente eléctrica resulta peligrosa presenta notables dificultades.

Puede dar idea de ello las dispersiones que aparecen en la determinación del umbral de sensibilidad sobre el paso de corriente eléctrica, definido como el valor de la intensidad mínima que percibe una persona al hacer circular una corriente de mano a mano.

La figura 24, según Dalziel, muestra la variabilidad del límite de percepción entre diferentes sujetos.

Mientras que algunos 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.

La línea de trazos de la izquierda destaca que las mujeres tienen, netamente, una mayor sensibilidad sobre el paso de la corriente que los hombres.

Si se mide este umbral sobre otros órganos, también se pone de manifiesto la diferente sensibilidad de los mismos. Por ejemplo, el tejido más sensible del organismo es la retina (100 veces más que la mano), originándose sensaciones bajo la forma de fosfeno con corrientes de 0,02 mA aplicadas al ojo, mientras que la lengua acusa los 0,05 mA.

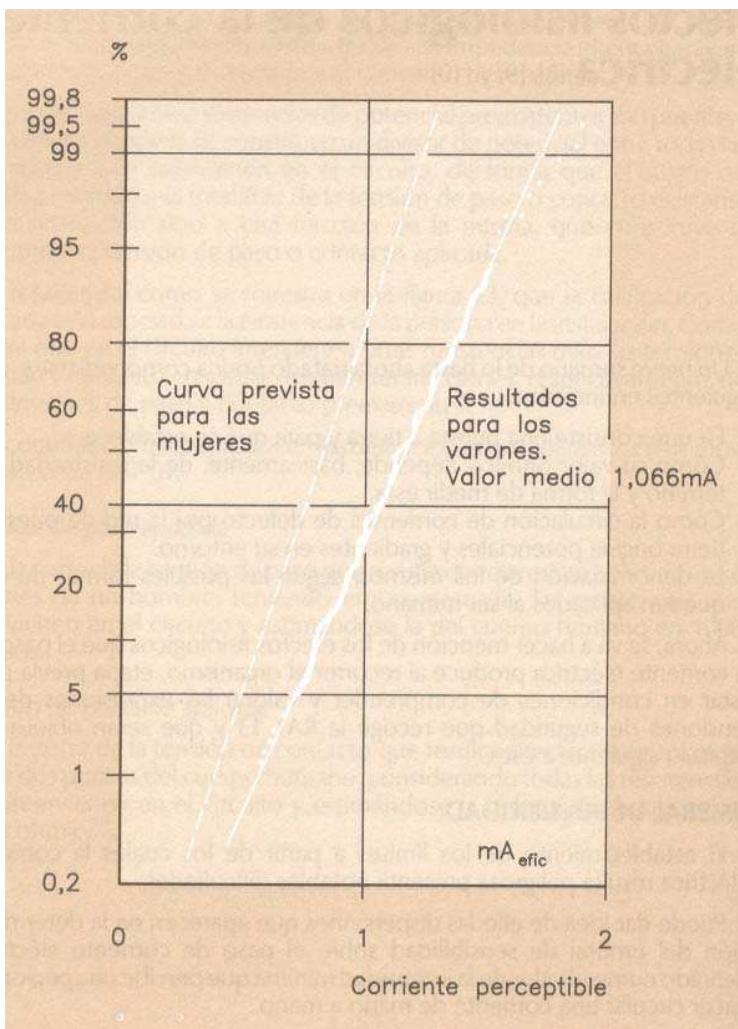


Figura 24. Umbral de percepción de la corriente (según Dalziel). El valor de la intensidad de corriente mínima que percibe una persona cuando el circuito se establece a través de las dos manos, es decir, el umbral de sensibilidad o percepción de la corriente, es muy variable según los individuos (de 0,5 a 2 mA).

UMBRAL DE NO SOLTAR

También la contracción muscular y los umbrales de "no soltar" (nor lácher o let-go current) ratifican la dificultad anteriormente expuesta. Este fenómeno tiene lugar por la excitación de nervios y músculos flexores bajo la acción de la corriente eléctrica, de forma que al quedar contraídos, inhabilitan al individuo a dejar el conductor, toda vez que los extensores son menos potentes que los flexores.

La figura 25, según Dalziel, pone de relieve las variaciones de este umbral, al existir sujetos que quedan "enganchados" con intensidades de menos de 10 mA, mientras que otros pueden liberarse con intensidades dos veces superiores.

Puede remarcarse la diferencia de las curvas según el sexo de las personas sujetas a la experiencia.

MUERTE APARENTE

Cuando la intensidad que atraviesa el organismo se eleva por encima del umbral de no soltar, pueden verse afectadas las grandes funciones fisiológicas, respiración y circulación, y el paso de la corriente acarrea, entonces, una detención respiratoria o circulatoria que viene acompañada, rápidamente, de un estado de muerte aparente.

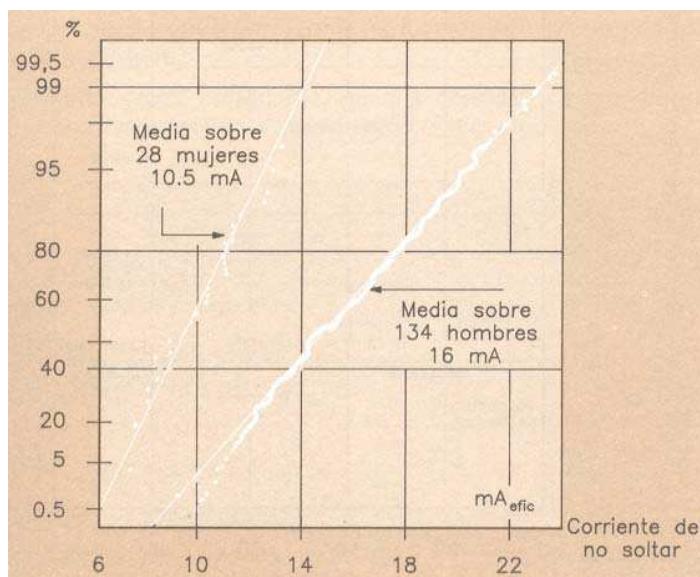


Figura 25. Umbral de corriente de "no soltar" (según Dalziel). También en el umbral de corriente de "no poder soltar" liberándose de los conductores eléctricos asidos el género femenino muestra una mayor sensibilidad que el masculino (de 6 a 14 mA, frente a 8 hasta 24 mA).

En efecto, para intensidades del orden de 20 a 30 mA, la contracción muscular puede difundirse y alcanzar los músculos respiratorios (intercostales, pectorales, diafragma), originando una parada circulatoria, –central o periférica–, que ocasiona una asfixia con cianosis para desembocar, rápidamente, en un estado de muerte aparente y en una parada circulatoria.

Si el accidentado se sustraе rápidamente de la acción de la corriente y se le proporciona una asistencia respiratoria –antes de que sobrevenga la parada cardíaca y, en consecuencia, las lesiones anóxicas del encéfalo–, estos fenómenos son reversibles.

FIBRILACIÓN VENTRICULAR Y SU UMBRAL

Desgraciadamente, no sucede lo mismo cuando el estado de muerte aparente se debe a una fibrilación ventricular.

Esta situación está caracterizada por una contracción anárquica y asíncrona de cada una de las fibras del miocardio, lo que se traduce, rápidamente, en una parada circulatoria y una anoxia que alcanza, primero, al cerebro y después, al mismo corazón.

La figura 26 muestra la extrapolación al hombre de experiencias realizadas sobre animales y, también, deducciones sobre accidentes eléctricos, particularmente bien estudiados. Las dos rectas inferiores, aplicables al ser humano, resultan de extrapolaciones realizadas sobre animales y de resultados de análisis de accidentes eléctricos, estudiados minuciosamente.

Se observa una proporcionalidad entre el peso corporal y la intensidad necesaria para la fibrilación, situándose este umbral, según Dalziel, en 70 a 100 mA.

Parámetros de que depende

En realidad, este umbral no puede definirse por una sola cifra, puesto que varía grandemente con las condiciones fisiológicas del sujeto y también con los parámetros físicos del accidente: tensión y tipo de contacto, pero, fundamentalmente, con:

- La trayectoria seguida por la corriente.
- El valor de la resistencia del organismo.

c) El tiempo de paso y amplitud de la corriente.

a) La trayectoria seguida por la corriente, función de los puntos de aplicaciones de la tensión.

Es el primer factor importante, pues la densidad de corriente que atraviesa el corazón es muy variable según el recorrido.

Trayectoria de la corriente	Factor de corriente del corazón, F
Mano izquierda - pie derecho	1
Mano izquierda - pie izquierdo	1
Mano izquierda - dos pies	1
Dos manos - dos pies	1
Mano derecha - mano izquierda	0,4
Mano derecha - pie izquierdo	0,8
Mano derecha - pie derecho	0,8
Mano derecha - dos pies	0,8
Mano derecha - espalda	0,3
Mano izquierda - espalda	0,7
Mano derecha - pecho	1,3
Mano izquierda - pecho	1,5
Mano izquierda - nalgas	0,7
Mano derecha - nalgas	0,7
Dos manos - nalgas	0,7
Pie derecho - pie izquierdo	# 0

Tabla 4. Factor de corrección de la densidad de corriente que atraviesa el corazón, en función del trayecto.

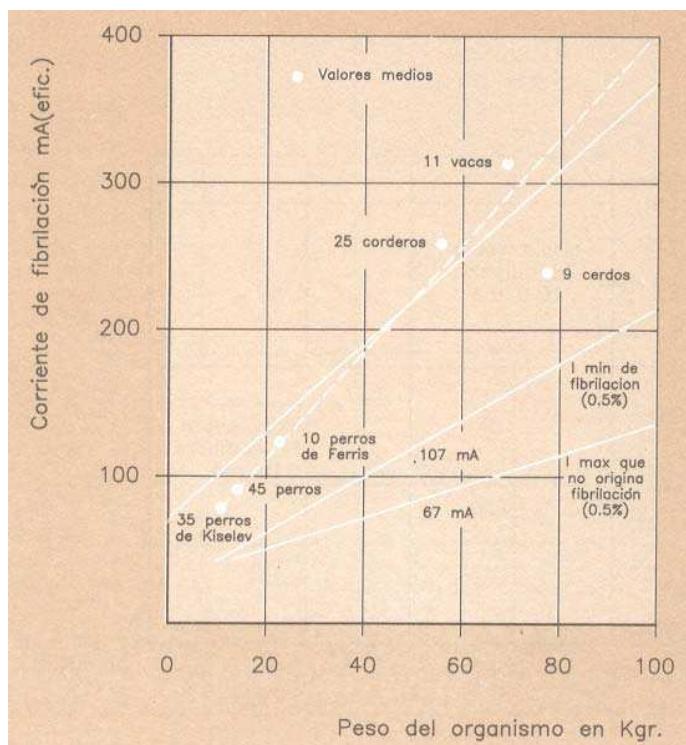


Figura 26. Umbral de fibrilación, en función del peso del organismo (según Dalziel). Según el autor, para una persona de 50 kg de peso, ese umbral está comprendido entre 67 y 107 mA.

Según la CEI 479-84, los factores por los que hay que multiplicar la corriente que atraviesa el corazón cuando el trayecto es diferente del trayecto ti o –miembro superior derecho a miembros inferiores–, están relacionados en la tabla 4.

Por ejemplo, una corriente de 300 mA con trayectoria mano derecha a espalda, tiene el mismo efecto que:

$$0,3 \times 300 = 90 \text{ mA}$$

para una trayectoria mano izquierda-pie.

b) El valor de la resistencia del cuerpo humano

Es otro parámetro importante, al ser la intensidad inversamente proporcional a ella.

Las primeras mediciones fueron efectuadas por Weber en 1897. Al ser realizadas con bajas tensiones, los resultados estaban influidos por la impedancia de la piel -que varía mucho con la superficie y la presión de contacto, la temperatura y la humedad-, por lo que eran variables y parecían contradictorios y poco fiables.

Otras medidas más prácticas las efectuó la Asociación Electrotécnica Suiza en 1929, pero siempre con valores inferiores a 100 V, por lo que hasta las experiencias de Freiberger, en 1930, no se conoció con más precisión la impedancia del organismo. Este autor utilizó cadáveres para tensiones de hasta 5.000 V y personas vivas, para unos valores de tensión de hasta 50 V.

Sus resultados han permitido establecer un esquema para las impedancias del cuerpo humano (figura 27) y han sido utilizados en la elaboración de la CEI 479-84.

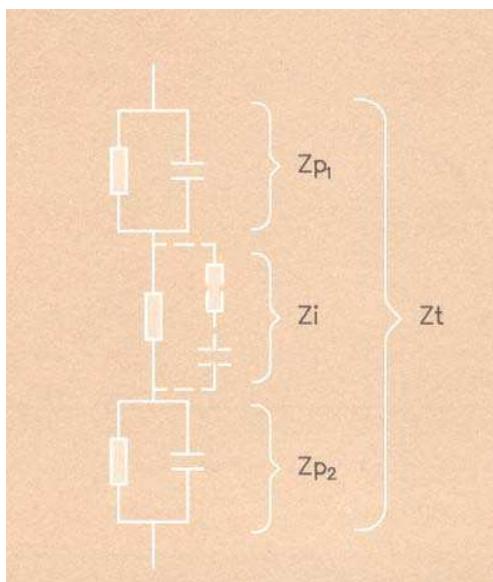


Figura 27. Equivalente circuital de la impedancia del cuerpo humano.

Z_j : *impedancia interna.* Z_{p1} ,

Z_{p2} : *impedancia de la piel, en las zonas de entrada y salida de la corriente.*

Z_t : *impedancia total ($Z_j + Z_{p1} + Z_{p2}$).*

Como puede verse en la figura, la impedancia comprende tres partes: las dos impedancias de la piel, Z_{p1} y Z_{p2} , al nivel de los puntos de contacto y la impedancia interna, Z_j .

La suma vectorial de la impedancia interna del cuerpo y las de la piel constituye la impedancia total, Z_t , del cuerpo humano.

La impedancia interna puede considerarse como resistiva, principalmente; su valor depende, esencialmente, del trayecto de la corriente y, en cierta medida, de la superficie de contacto pero las mediciones parecen indicar que posee, también, una componente capacitiva.

Los porcentajes de la impedancia interna del cuerpo humano para diversas trayectorias de la corriente, en relación con la trayectoria mano a mano, han sido determinados por Sam.

Las dos impedancias de la piel pueden considerarse como una red de resistencias y capacidades, debiendo resaltarse que para diferencias de potencial de contacto de algunas decenas de voltios, su valor varía ampliamente con la superficie de contacto, la temperatura, la transpiración, etc., incluso para una misma persona.

Para diferencias de potencial de contacto entre 50 y 100 V disminuye considerablemente y es despreciable después de la perforación de la misma. Sobre este particular, han profundizado autoridades como Wagner, Biegelmeier y Miksch.

En el instante en que se aplica la diferencia de potencial de contacto, las capacidades del cuerpo están descargadas y presentan una impedancia nula, por lo que las Z también lo son y la resistencia inicial que presenta el organismo es, prácticamente, Z_j .

El oscilograma de la figura 28 pone claramente de manifiesto esta circunstancia y muestra el desfase que se produce entre la tensión y la intensidad, confirmando el carácter no resistivo puro de la impedancia corporal. Obsérvese cómo el pico de la corriente inicial confirma la anulación de las Z_p al establecerse la conexión –por estar descargadas las capacidades paralelo que comportan– y, también, el avance de la intensidad respecto a la tensión, en el ángulo q ?, ratificando el carácter no resistivo puro de la impedancia corporal.

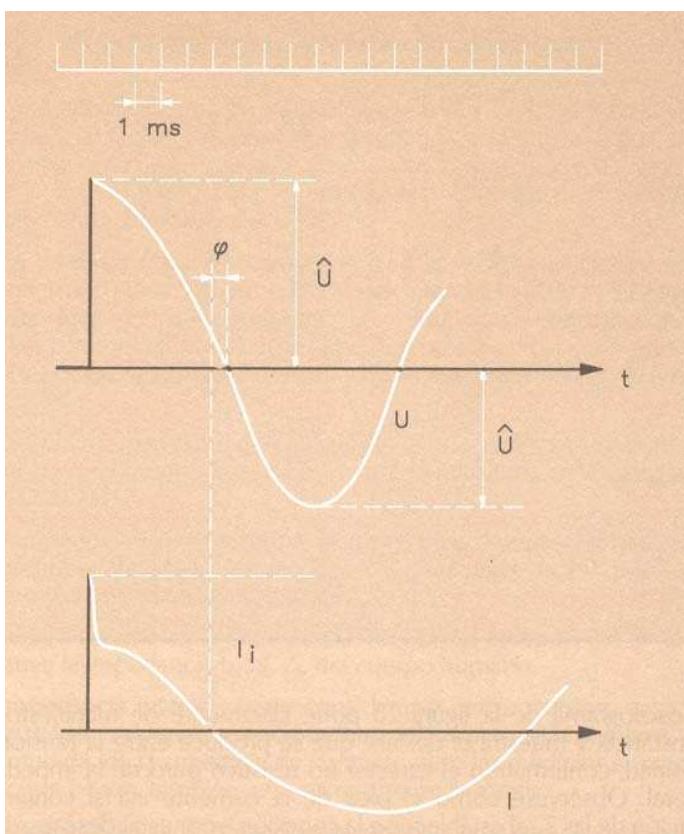


Figura 28. Diferencia de potencial de contacto y corriente que atraviesa el organismo cuando se efectúa la aplicación de la primera al alcanzar su máxima amplitud la tensión alterna utilizada.

Más recientemente, se han realizado medidas sobre un gran número de personas vivas con tensiones alternas de hasta 200 V, a 50 Hz, con el fin de llegar a valores estadísticos fiables sobre la impedancia.

Los voluntarios estaban protegidos por cadenas de interruptores diferenciales, de diferente sensibilidad, que se iban eliminando paulatinamente, a la vez que se obtenían registros oscilográficos de todas las magnitudes y electrocardiogramas de los individuos para poder atender cualquier eventualidad.

Todos estos resultados y los efectuados sobre cadáveres, con tensiones mucho más elevadas, han sido extrapolados, estadísticamente, por el Grupo de Trabajo que redactó la CEI 479-84, resultando los datos que se muestran en la figura 29, para trayectoria mano a mano y grandes zonas de contacto. Las diferentes curvas representan, en orden ascendente, los valores de las impedancias totales que no son superados por un porcentaje (grado de percentil), del 5, 50 y 95 % de la población. Atener en cuenta los valores medidos por Freiberger para una trayectoria de la corriente mano-pies, que difiere escasamente de los valores representados en la figura anterior, el G.T. estableció los valores de la impedancia total, Z_t , del cuerpo humano según la figura 30 que se reproduce y tabla 5 que representa los conocimientos más modernos sobre esta materia.

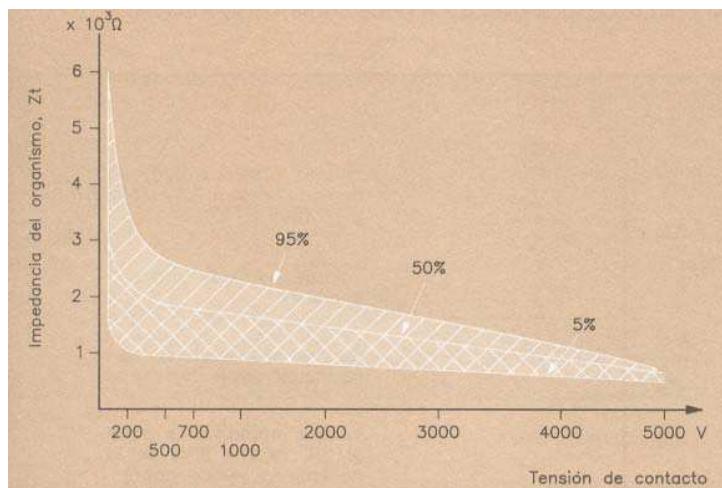


Figura 29. Gama de valores de impedancia totales (Ω) del cuerpo humano para trayectos de la corriente mano-mano o mano-pie y grandes zonas de contacto.

Diferencia de potencial de contacto (V)	Valores para las impedancias totales del cuerpo (Ω) que no son excedidos por un porcentaje (grado de percentil) del		
	5 % de la población	50 % de la población	95 % de la población
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1625	2875
220	1000	1350	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
valor asintótico	650	750	850

Tabla 5. Valores de la impedancia total del cuerpo, Z_t , para un trayecto de corriente mano-mano o mano-pie y amplias zonas de contacto (80 cm^2 - 100 cm^2).

Se admite que una resistencia de 10000 constituye una buena aproximación para la resistencia media del cuerpo humano, si bien puede observarse que no es lineal y presenta valores más elevados para tensiones reducidas.

Aunque todas las medidas se han efectuado sobre adultos, los valores pueden aplicarse, también, a los infantes puesto que, aunque sus extremidades sean más cortas, su sección transversal es también más pequeña, pero la validez de tal aseveración debe confirmarse todavía.

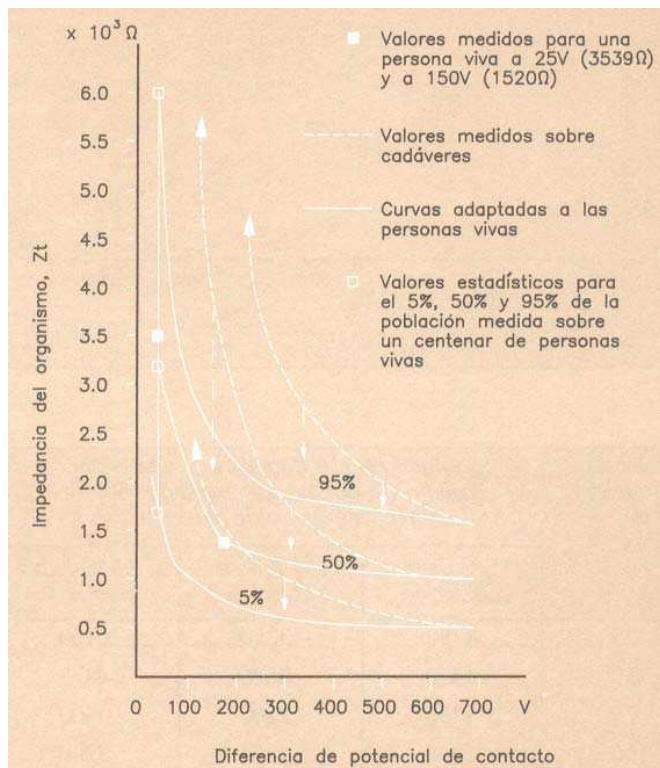


Figura 30. Obtención estadística de los valores de las impedancias totales del cuerpo para personas vivas, lograda adaptando los valores medidos sobre cadáveres, bajo débiles diferencias de potencial de contacto, a los medidos sobre personas vivas con la misma tensión de contacto.

La figura 31 representa, en función de la resistencia, un área de fibrilación en la zona en que puede tener lugar, es decir, entre 70 ÷ 80 mA y 4 A, aproximadamente, pues por encima de ese valor, la corriente actúa, a la vez, como agente de fibrilación y de desfibrilación. La curva A representa la corriente que recorre el organismo si la resistencia del mismo es pequeña (1000 ohmios bajo 100 V) y la B, la correspondiente a una resistencia elevada (100 000 ohmios bajo 100 voltios).

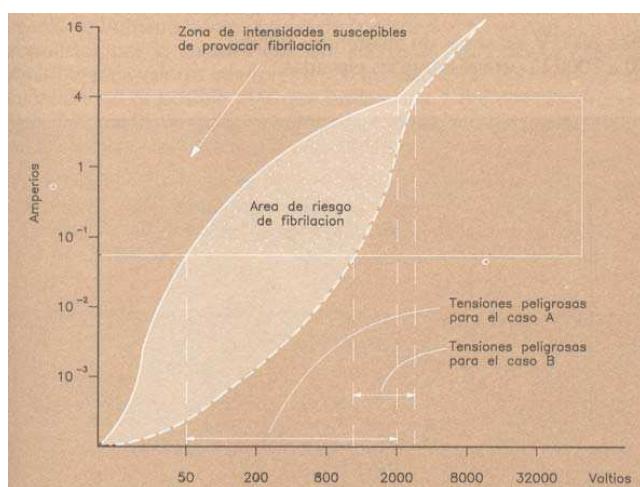


Figura 31. Zona de fibrilación en función de la intensidad, de la tensión y de la resistencia del cuerpo.

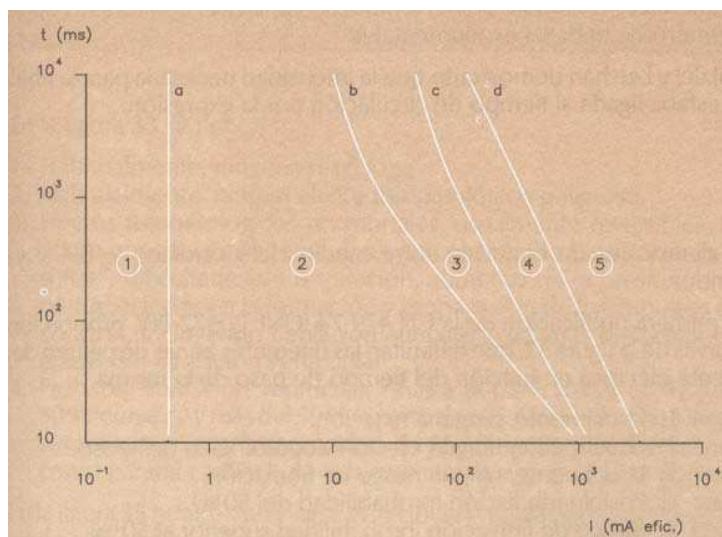


Figura 32. Zonas de efecto de la corriente alterna sobre el cuerpo humano (CEI 479-74 y UNE 20572-80). Las curvas a, b, c y d, delimitan las diferentes zonas de peligro.

Sobre ella, pueden verse las tensiones peligrosas:

70 a 2000 V, en casos de resistencias débiles, 500 a 2000 V, para resistencias elevadas.

c) El tiempo de paso y la amplitud de la corriente

Es otro factor de variación del umbral de fibrilación que ha sido objeto de numerosos trabajos experimentales.

Dalziel y Lee han demostrado que la intensidad necesaria para la fibrilación estaba ligada al tiempo de circulación por la expresión:

$$I = \frac{K}{\sqrt{t}}$$

para duraciones de contacto entre medio ciclo cardíaco (~0,4 s) y 5 segundos.

La primera publicación de la CEI 479-74 (UNE 20572-80), proporcionó las curvas de la figura 32, que delimitan las diferentes zonas de peligro de la corriente eléctrica en función del tiempo de paso de la misma.

Zona 1: Usualmente, ninguna reacción.

Zona 2: Usualmente, ningún efecto fisiopatológico peligroso.

Zona 3: Usualmente, ningún riesgo de fibrilación.

Zona 4: Posible fibrilación (probabilidad del 50%).

Zona 5: Riesgo de fibrilación (probabilidad superior al 50%).

Posteriormente, la CEI 479-84 (Prop. UNE 20572-1), con un mejor conocimiento del ciclo cardíaco (trabajos de Antoni) y del comportamiento del organismo humano frente al paso de la corriente, ha revisado los valores propuestos por la anterior edición, aceptando una mayor relación $i(t)$ admisible para valores inferiores a 500 ms (figura 33), al considerar que la fibrilación no es posible más que en la onda T del electrocardiograma (figura 34), con lo que la curva $i = f(t)$ adoptada es la c_1 , más compleja que la anterior c , al presentar una discontinuidad con:

- Un umbral superior para tiempos cortos de aplicación de la corriente, inferiores a un semiciclo cardíaco.

- Un umbral inferior para tiempos más largos, del orden de tres o cuatro ciclos cardíacos.

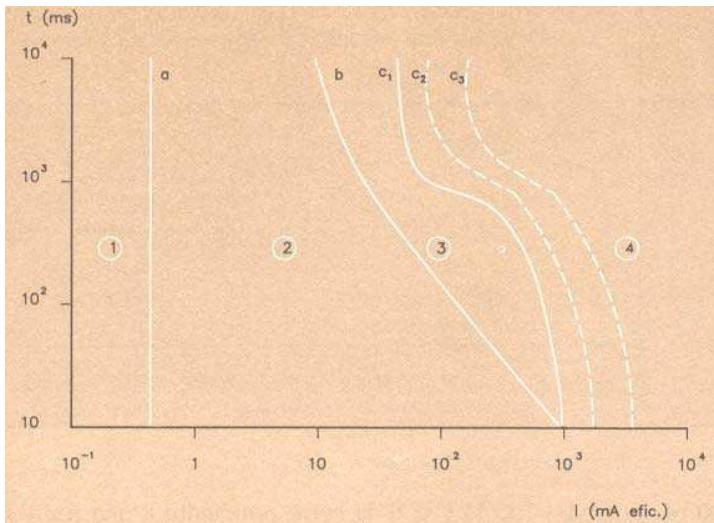


Figura 33. Zonas de efectos fisiológicos en función del tiempo de paso de la corriente alterna 50 ÷ 60 Hz (CE1479-84 y Propuesta UNE 20572-1).

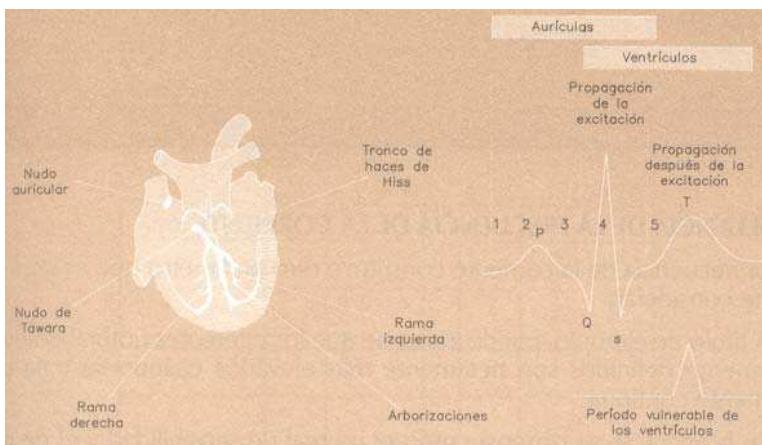


Figura 34. Ocurrencia del período vulnerable de los ventrículos durante la onda T del ciclo cardíaco, indicado por la traza inferior al electrocardiograma. Los números sobre el ECG permiten establecer la secuencia de las etapas de propagación de la excitación sobre la sección del corazón representado a la izquierda de la figura.

En la figura 33 se tiene:

1. Habitualmente, ninguna reacción.
2. Habitualmente, ningún efecto fisiopatológico peligroso.
3. Efectos fisiopatológicos no mortales, usualmente reversibles, tales como contracciones musculares por encima de los valores de "no soltar", dificultades de respiración, aumento de la presión arterial, perturbaciones en la formación y propagación de los impulsos en el corazón, incluyendo fibrilación auricular y paradas temporales cardíacas, sin fibrilación ventricular.
4. Probable fibrilación ventricular –hasta del 5 % (curva c_2), hasta del 50 % (curva c_3) y más del 50% (a partir de c_3) y efectos fisiopatológicos aumentando con la intensidad de la corriente y el tiempo, tales como parada cardíaca, parada respiratoria y quemaduras graves.

En la figura 35 puede observarse el inicio de la fibrilación ventricular en el período vulnerable, –detectado por un electrocardiograma– así como la caída de la presión arterial en esas circunstancias.

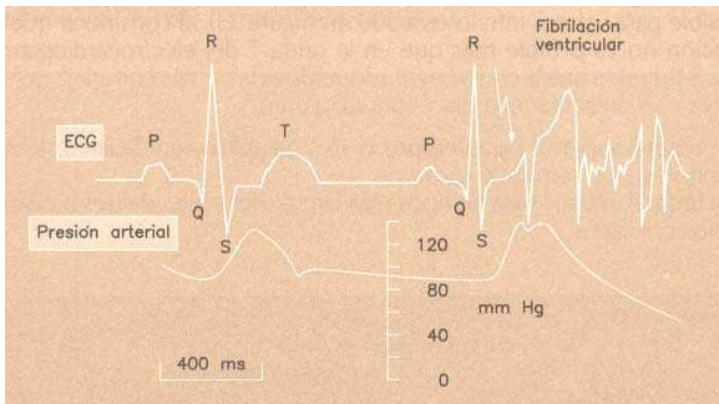


Figura 35. Este electrocardiograma refleja las contracciones anárquicas asíncronas que caracterizan a fibrilación ventricular, apreciéndose que su inicio ha tenido lugar en el período vulnerable -onda T- del ciclo cardíaco.

INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA DE LA CORRIENTE

La frecuencia de la corriente constituye otro parámetro que es importante considerar.

A título de ejemplo, puede indicarse que los diferentes umbrales anteriormente definidos son netamente más elevados cuando se trata de corriente continua.

En la figura 36 se observa como el umbral de sensibilidad y el de no soltar quedan poco modificados para frecuencias entre 10 y 1000 Hz pero que se elevan rápidamente cuando la frecuencia aumenta.

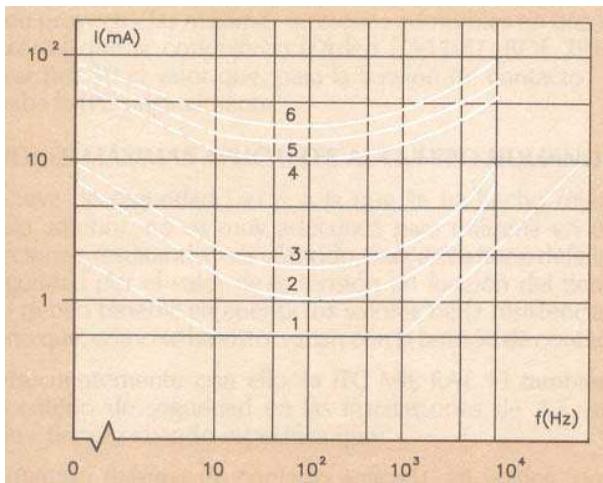


Figura 36. Umbral de percepción y de "no soltar, en función de la frecuencia.

Curva 1: Límite convencional de los valores de corriente que no dan lugar, normalmente, a ninguna reacción.

Curva 2: Umbral de percepción para el 50% de las personas examinadas (las otras, no han percibido nada).

Curva 3: Umbral de percepción para el 99,5 % de las personas examinadas (las otras, no han percibido nada).

Curva 4: Corriente de "soltar" para el 99,5 % de las personas examinadas (el 0,5 % restante, no podía soltar).

Curva 5: Corriente de "soltar" para el 50 % de las personas examinadas. (el 50% restante, no podía soltar).

Curva 6: Corriente de "soltar" para el 0,5 % de las personas examinadas (el 99,5 % restante, no podía soltar).

CONCOMITANCIA DE SUCESOS PARA ORIGINAR RIESGO DE ACCIDENTE

Debe insistirse en que las curvas de seguridad sólo señalan una probabilidad de que ocurran determinados efectos fisiológicos cuando la persona está realmente sometida a binomios intensidad-tiempo concretos.

Es por ello que, a la hora de considerar el riesgo de accidente por la puesta a tierra en una instalación eléctrica, debe tenerse en cuenta que éste sólo se producirá cuando concurren sucesos aleatorios independientes como son:

- Aparición de un defecto o falta a tierra en la instalación.
- Existencia de una resistividad del terreno y una distribución en el mismo de la corriente de defectos tales que puedan darse puntos con altos gradientes de potencial.
- Presencia de una persona en ese punto, en ese momento y en una posición tal que su cuerpo quede sometido a ese alto gradiente.
- No existencia de una resistencia de contacto suficiente ni de cualquier otra resistencia en serie que limite la corriente que circule a través del cuerpo a un valor no peligroso.
- Duración de la falta y el contacto con el cuerpo el tiempo suficiente para que se transgreda la curva de seguridad.

Nota:

En este capítulo, no se ha hecho mención de los efectos electrotérmicos de la corriente -única verdadera quemadura eléctrica-, debidos al paso de la corriente a través del organismo por ser más propios de los accidentes eléctricos ocasionados por contactos directos que de los indirectos, que pudieran derivarse de las instalaciones de puesta a tierra.

Criterios de seguridad fijados por la reglamentación española [1], [4] y [12]

Las descripciones de las tensiones de paso y contacto existentes en la instalación y las de la misma denominación aplicada, fueron introducidas, dos capítulos atrás, sólo con el detalle suficiente para alcanzar la comprensión de esos conceptos bajo un aspecto general.

Ahora, va a realizarse una profundización más completa, exponiéndose también las simplificaciones que ha recogido la Administración cuando propone las fórmulas (2) y (3) de la RAT 13 como válidas para determinar, a nivel de proyecto, las máximas tensiones admisibles en una instalación y las razones que la condujeron (Orden 27-11-87, BOE 291, 5-12-87) a multiplicar por 10 el valor que, para la tensión de contacto –fórmula 2– adoptaba la ITC originalmente.

TENSIONES MÁXIMAS APLICABLES AL CUERPO HUMANO

La curva de seguridad $i=f(t)$, a la que se ha hecho referencia en el capítulo anterior, no es muy adecuada para utilizarla en el diseño de instalaciones, resultando más cómodo, para estos fines, definir los criterios de seguridad por el valor de la tensión en función del tiempo, a cuyo efecto deben tenerse en cuenta los valores de la resistencia del cuerpo humano que, como se ha visto, varían con la tensión de contacto aplicada.

Consecuentemente con ello, la ITC MIE RAT 13 también establece, como criterio de seguridad en las instalaciones de A.T., una relación tensión–tiempo cuando especifica que:

"La tensión máxima de contacto *aplicada*, en voltios, que se puede aceptar se determina en función del tiempo de duración del defecto, según la fórmula siguiente:

$$(1) \quad V_{ca} = \frac{K}{t^n}$$

siendo

$K = 72$ y $n = 1$ para tiempos inferiores a 0,9 segundos

$K = 78,5$ y $n = 0,18$ para tiempos superiores a 0,9 segundos e inferiores a 3 segundos

t = duración de la falta en segundos

Para tiempos comprendidos entre 3 y 5 segundos, la tensión de contacto aplicada no sobrepasará los 64 V. Para tiempos superiores a 5 segundos, la tensión de contacto aplicada no será superior a 50 V.

Salvo casos excepcionales justificados, no se considerarán tiempos inferiores a 0,1 segundos".

Para obtener una visión global de la variabilidad de esta tensión con el tiempo, se ha representado gráficamente en la figura 37, pudiendo destacarse de la misma que, para los tiempos normales de actuación de las protecciones, las tensiones máximas de contacto pueden estar comprendidas entre 80 y 400 voltios.

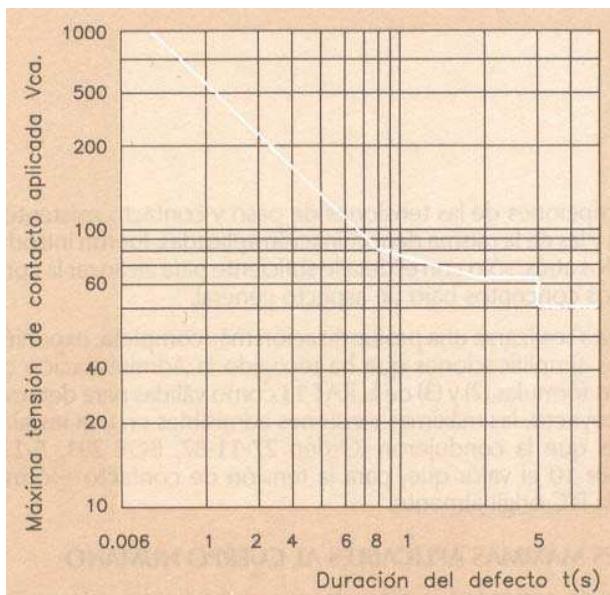


Figura 37. Representación, en coordenadas logarítmicas, de la tensión máxima de contacto aplicada, en función de la duración del defecto.
Para $0.9 < t < 0.1$ segundos
 $Vca = 72/t$ (V)
 $3 > t > 0.9$ segundos
 $Vca = 78.5/t^{0.18}$ M
 $5 > t > 3$ segundos
 $Vca = 64$ V
 $t > 5$ segundos
 $Vca = 50$ V

Trasladando la función dada a una característica $i=f(t)$, teniendo en cuenta la variación de la resistencia del cuerpo humano con la tensión aplicada, esta curva (figura 38) se ajusta bastante bien a la curva c_1 de la figura 33 y solamente para valores inferiores a 0,2 s se entraría en zona de posible fibrilación pero, en la práctica, esos tiempos tan cortos carecen de interés.

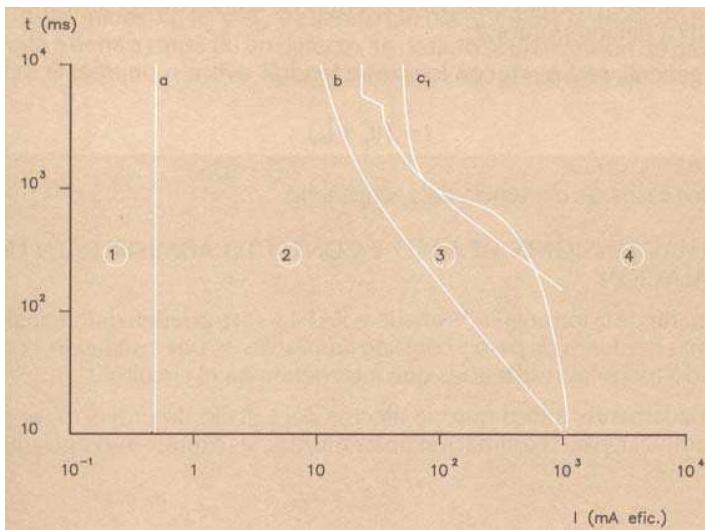


Figura 38. Sobre las zonas de efectos fisiológicos en función del tiempo de paso de la corriente alterna, que se reproduce en la figura 33, se ha trasladado la función tensión-tiempo que prescribe la Reglamentación española, teniendo en cuenta la variación de la resistencia del cuerpo humano con la tensión aplicada.

La RAT 13 añade:

"En caso de instalaciones con reenganche automático rápido (no superior a 0,5 segundos), el tiempo, t, a considerar en la fórmula será la suma de los tiempos parciales de mantenimiento de la corriente de defecto".

Tal como se aprecia en la figura 39, que representa el oscilograma de intensidades de una fase con defecto, en la que se produce una reconexión automática sin que haya desaparecido la falta, el tiempo a considerar es:

$$t = t_1 + t_2$$

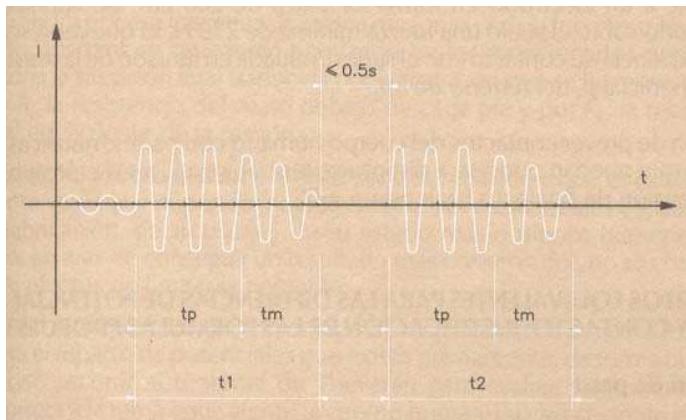


Figura 39. En el caso de instalaciones con reenganche rápido (no superior a 0,5 segundos), el tiempo, t , a considerar en la fórmula de la tensión de contacto aplicada será la suma de los tiempos parciales de mantenimiento de la corriente de defecto.

Estando constituido cada sumando por el tiempo que el elemento protectivo, t_p , tarda en medir y ordenar la apertura de la línea más el de respuesta mecánica del interruptor, t_m .

En general, será $t_1 = t_2$ con lo que se tendrá:

$$t = 2(t_p + t_m)$$

para los casos de existencia del reenganche.

MÁXIMAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO ADMISIBLES EN UNA INSTALACIÓN

"A partir de la fórmula (1)" –añade la RAT 13– "se pueden determinar las máximas tensiones de paso y contacto admisibles en una instalación, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito".

Seguidamente, indica que, "a efectos del cálculo de proyecto, se podrán emplear, para la estimación de las mismas, las expresiones siguientes:

$$(2) \text{ Tensión de paso} \quad V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right) \quad (\text{V})$$

$$(3) \text{ Tensión de contacto} \quad V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1000} \right) \quad (\text{V})$$

que responden a un planteamiento simplificado del circuito, al despreciar la resistencia de la piel y del calzado, y que se han determinado suponiendo que la resistencia del cuerpo humano es de 1000 ohmios, y asimilando cada pie a un electrodo en forma de placa de 200 cm^2 de superficie, ejerciendo sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N, lo que representa una resistencia de contacto con el suelo evaluada en función de la resistividad superficial ρ_s del terreno de $3\rho_s$.

Si son de prever contactos del cuerpo humano con partes metálicas no activas que puedan ponerse a distinto potencial, se aplicará la fórmula (3) de la tensión de contacto haciendo $\rho_s=0$ ".

CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA LAS DIFERENCIAS DE POTENCIAL DE PASO Y CONTACTO; JUSTIFICACIÓN DE LAS FÓRMULAS PROPUESTAS

Tensión de paso

El circuito equivalente para la tensión de paso –o contacto establecido entre pie y pie– sobre los puntos A y B, del terreno, se muestra en la figura 40.

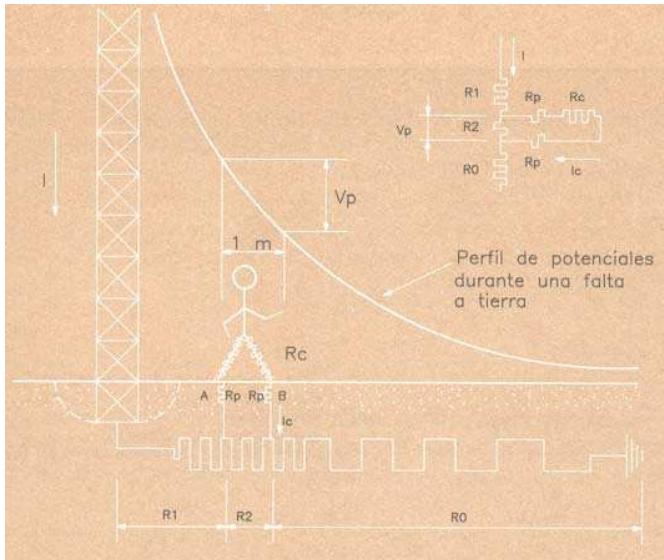


Figura 40. Circuito equivalente para la determinación de la tensión de paso aplicada.

La resistencia del circuito de puesta a tierra de la instalación es la suma de los términos R_1 , R_2 y R_0 , y cuando circula por ellos la intensidad, I , de puesta a tierra a causa de un defecto, se desarrolla una tensión de paso, V_p , sobre el término resistivo R_2 existente entre los puntos A y B.

Si ahora por ese lugar transitara una persona y, en un momento determinado, sus pies se estuvieran apoyando en los mencionados puntos, se tendría la situación final traducida por la figura, en que se ha representado por R_p la resistencia del suelo debajo de cada pie y por R_c , la resistencia total equivalente de la persona.

En rigor, debería incluirse la resistencia del calzado –que es extremadamente variable y depende, notablemente, de los materiales utilizados en su fabricación, de su usura y de su estado más o menos humedecido– pero, en aras de conseguir un resultado más conservador, no se considera a los efectos de limitar la corriente.

El circuito que han constituido $R_p + R_c + R_p$ al entrar en paralelo sobre R_2 , altera el reparto de potenciales que existía previamente, de forma que será preciso recurrir al teorema de Thevenin para evaluar la corriente que recorrerá a la rama equivalente al cuerpo humano como cociente entre la tensión de paso preexistente, V_p , y la resistencia resultante de la puesta en paralelo de $(R_1 + R_0)$ con R_2 , en serie con la rama que materializa a la persona, $R_p + R_c + R_p$.

Sin embargo, es lícito recurrir al siguiente razonamiento simplificador:

La magnitud de la corriente derivada por el individuo (del orden de los mA), no alterará, de forma sensible, el valor de la corriente de puesta a tierra (en general, de varios centenares o quizás millares de A), de forma que puede despreciarse cualquier modificación de la tensión preexistente, V_p , y

considerada como una fuente de tensión ideal, esto es, con impedancia interna nula, obre o no sobre ella la carga $R_p + R_c + R_\rho$.

Por otro lado, esta forma de proceder proporciona valores aún más conservadores que la expresión rigurosa, al resultar así intensidades de corriente superior a las reales.

Se tiene, en consecuencia, el circuito simplificado de la figura 41, en el que se va a evaluar la resistencia del terreno bajo los pies, R_ρ .

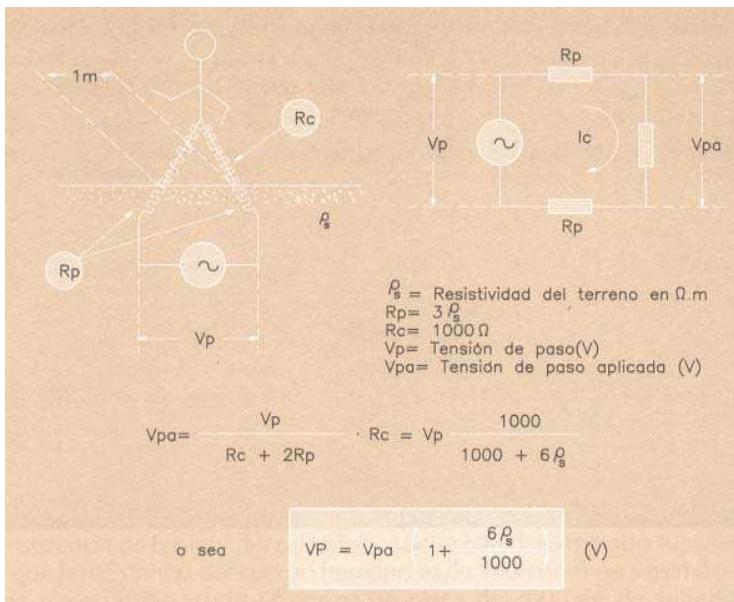


Figura 41. Circuito equivalente simplificado para la evaluación de la tensión de paso existente en la instalación, en función de la aplicada.

Un pie posado sobre el suelo es asimilable a una placa circular de un radio próximo a 10 cm, por lo que su resistencia de tierra, expresada en función de la resistividad del terreno superficial, $\rho_s (\Omega \cdot m)$, puede venir dada al suprimir hojas, no se verá, por la fórmula que se indica a continuación:

$$R_\rho = \frac{\rho_s}{4r} = \frac{\rho_s}{4 \cdot 0,1} = 2,5\rho_s (\Omega)$$

Dado que, en el paso, los dos pies no están nunca posados completamente en el suelo de forma simultánea, se asocia a cada pie una superficie inferior (200 cm^2 en lugar de 314 cm^2) y una resistencia de tierra mayor, $3\rho_s$.

Por tanto, la tensión de paso aplicada vendrá dada por:

$$V_{pa} = \frac{V_p}{R_c + 2R_p} R_c$$

y recordando lo dicho en el capítulo anterior sobre la resistencia media del cuerpo humano, ($R_c=1000 \Omega$), será:

$$V_{pa} = V_p \frac{1000}{1000 + 6\rho_s}$$

de donde, para obtener la máxima tensión de paso admisible en la instalación, V_p , bastará con despejarla de esa expresión y adoptar, para la tensión de paso aplicada, el máximo valor permisible, o sea:

$$V_p = V_{pa_{max}} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right) \quad (\text{V})$$

Al comparar este resultado con la fórmula (2) de la RAT, puede establecerse la correspondencia:

$$\boxed{V_{pa} = \frac{10K}{t^n}} \quad \Rightarrow V_{pa} = 10 \cdot V_{ca}$$

al comprobar que se trata de la misma expresión que, aunque no esté explícitamente recogida en la ITC, subyace claramente en su actual contenido.

Nota

La primera versión de la fórmula (2) era:

$$V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right)$$

es decir, 10 veces menor, y originaba verdaderas dificultades para su cumplimentación cuando la resistividad del suelo era elevada y las instalaciones eléctricas no tenían las grandes dimensiones de las Subestaciones y Centrales.

Apoyándose en que la propia IEEE Std 80–1976, al recoger las experiencias de Loucks, en Alemania, indica que, cuando la trayectoria es pie-pie, para producir los mismos efectos en el corazón que cuando lo es mano-pie, se requiere una intensidad de corriente 25 veces mayor (efecto comprensible al pensar que, en este último caso, la corriente encuentra en su recorrido partes del organismo conteniendo órganos vitales como el corazón y pulmones) y recordando, a tal efecto, la tabla de valores del llamado "factor del corazón" –visto en el capítulo anterior– que corrobora, también, esta línea de pensamiento, se propuso a la Administración que se considerase una fórmula específica para la tensión de paso aplicada que, atendiendo a los razonamientos aludidos, siguiera contemplando valores suficientemente conservadores, convenientes en los fenómenos de tipo probabilístico.

Este fundamental punto es uno de los actualizados por la Orden de 27 de noviembre de 1987 (BOE 291, sábado 5 diciembre 1987), cuando se dice:

"... introducir ciertas modificaciones, como el estudio y consideración de la tensión de paso en las instalaciones de puesta a tierra.

No se tiene conocimiento de accidentes en las personas a causa de esta tensión de paso y, por otra parte, estudios realizados han puesto de manifiesto que los efectos producidos por la tensión de paso aplicada son de menor peligrosidad que los ocasionados por una tensión de contacto aplicada de igual valor. Teniendo en cuenta igualmente que la mayoría de los reglamentos europeos hasta ahora no han tomado en consideración la tensión de paso, justifica se admite en el valor de la misma un margen mayor del tolerado en la anterior normativa".

Tensión de contacto

El circuito equivalente para la tensión de contacto aplicada -contacto establecido entre mano y pie, descansando sobre los puntos A, de la masa metálica, y B, del terreno, respectivamente- está representado en la figura 42.

La resistencia del circuito de puesta a tierra de la instalación está, ahora, formado por la suma de R_1 y R_0 y al ser recorrida por una corriente de puesta a tierra como consecuencia de un defecto de aislamiento, se desarrollará una diferencia de potencial, (tensión de contacto), V_0 sobre la fracción R_1 de la misma, existente entre los puntos A y B.

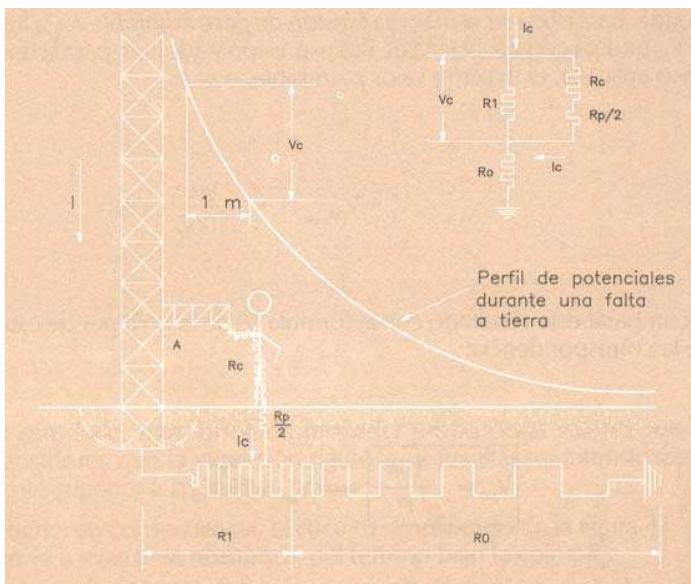


Figura 42. Circuito equivalente para la determinación de la tensión de contacto aplicada. Sobre el perfil de potenciales entre la masa metálica y una tierra distante, se ha señalado la tensión de contacto preexistente, V_c , que se obtendría entre los puntos A y B al circular una corriente de puesta a tierra, antes de que una persona situara la mano y pies sobre ellos, respectivamente.

La presencia entonces de una persona con los pies juntos, sobre B, tocando con la mano el punto A de la masa, conduce al estado final reflejado en la figura, para la que se sigue despreciando la resistencia del calzado y se omite la resistencia de contacto entre la mano y la estructura metálica, que sería función de la superficie y de la presión de contacto, principalmente.

A través del mismo razonamiento simplificador expuesto para la tensión de paso, se llega al circuito elemental de la figura 43, en la que debe evaluarse la resistencia del terreno bajo los pies juntos, $R_p/2$.

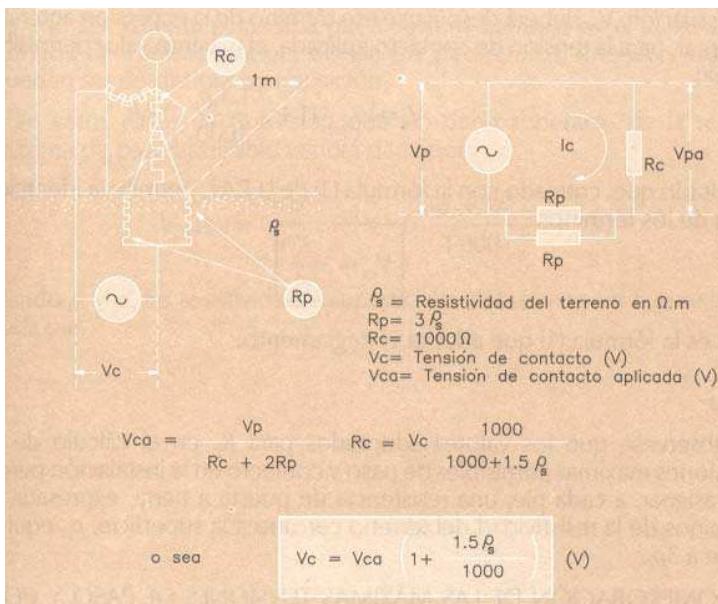


Figura 43. Circuito equivalente simplificado para el cálculo de la tensión de contacto existente en la instalación, en función de la aplicada.

A causa de la interacción entre los dos pies, que ahora están juntos, debe adoptarse para la resistencia de tierra de los mismos, en paralelo, un valor ligeramente superior a la mitad de la resistencia de cada pie:

$$R_p \approx 1.5 \rho_s \text{ (en lugar de } 1.25 \rho_s)$$

con lo que la tensión de contacto aplicada será:

$$V_{ca} = \frac{V_c}{R_c + R_p/2} R_c = V_c \frac{1000}{1000 + 1,5\rho_s}$$

de donde, si se desea deducir la máxima tensión *de contacto admisible* en la instalación, V_c , deberá despejarse ese término de la expresión anterior y adoptar, para la tensión de contacto aplicada, el máximo valor permisible, o sea:

$$V_c = V_{ca_{max}} \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1000} \right) \quad (V)$$

resultado que, cotejado con la fórmula (3) de la RAT, permite la identificación de los términos:

$$V_{ca} = \frac{K}{t^n}$$

que es la fórmula (1) que adopta el Reglamento. Nota

Obsérvese que los valores adoptados para R_p en el cálculo de las tensiones máximas admisibles de paso y contacto en la instalación permiten asignar, a cada pie, una resistencia de puesta a tierra, expresada en términos de la resistividad del terreno cercano a la superficie, ρ_s , equivalente a $3\rho_s$.

COMPROBACIÓN DE LAS MÁXIMAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO ADMISIBLES EN LA INSTALACIÓN.

En relación con estas tensiones, se acababa indicando en la primera versión de la RAT 13 que:

"El proyectista de la instalación de tierra deberá comprobar por un procedimiento de cálculo sancionado por la práctica, que los valores de las tensiones de paso y contacto calculadas por las fórmulas anteriores, en las circunstancias más desfavorables, no son superadas en ninguna zona del terreno afectada por la instalación de tierra", redacción que fue objeto de repetidas y frecuentes interpretaciones dudosas, hasta que la mencionada Orden de 27 de noviembre de 1987 la modificó como sigue:

"El proyectista de la instalación de tierra deberá comprobar, mediante el empleo de un procedimiento de cálculo sancionado por la práctica, que los valores de las tensiones de paso, V'_p , y contacto, V'_c , que 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, las calculadas por las fórmulas (2) y (3) en ninguna zona del terreno afectada por la instalación de tierra", redacción obviamente más clara que la anterior y que resalta la necesidad de calcular y comparar:

$$\begin{aligned} & V'_p \text{ con } V_p & (2) \\ & \text{y } V'_c \text{ con } V_c & (3) \end{aligned}$$

como se insistirá más adelante.

TENSIÓN DE PASO EN EL ACCESO

Esta situación, aunque no está contemplada en la RAT 13, conviene tenerla presente cuando pueda suceder que la resistividad superficial del terreno sea distinta para cada pie, como es habitual en el

acceso a los Centros de Transformación, donde los pavimentos, interior y exterior, pueden ser de distinta composición.

En estos casos, la expresión que no debe superarse de la tensión máxima de paso admisible vendrá dada por:

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

siendo ρ_s y ρ'_s las resistividades superficiales del terreno en que se apoya cada pie.

Intensidades de defecto [1], [11] y [12]

La aplicación de las fórmulas del capítulo anterior para determinar las máximas tensiones de paso y contacto que le pueden ser aplicables al cuerpo humano, así como las máximas tensiones de paso y contacto admisibles en la instalación, requieren del conocimiento del tiempo máximo de eliminación de la falta, aspecto éste necesariamente ligado a la magnitud de la intensidad de defecto y al sistema protectorivo que se utilice.

Es sobre estos particulares que se va a tratar ahora, poniendo especial énfasis en la casuística presentada por las instalaciones de 3^{ra} categoría que constituirán, sin duda, el escenario más corriente en que pueda encontrarse el proyectista que no pertenezca a una Compañía Eléctrica que, generalmente, será la llamada a solventar la problemática que planteen las Centrales Eléctricas y Subestaciones y, en relación a la cual, no se indicarán más que las líneas generales.

DETERMINACIÓN DE LAS INTENSIDADES DE DEFECTO

Se comenzará reseñando lo que, a este respecto, especifica la RAT 13 en su Apartado 5:

"El proyectista deberá 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 tomará el valor más desfavorable.

Para el cálculo de las intensidades de defecto y de puesta a tierra, se ha de 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 considerará a efectos del cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso, la intensidad de la corriente de puesta a tierra (I_E) que provoca la elevación del potencial de la instalación a tierra. En instalaciones a 100 kV o superior con neutro rígido a tierra, se utilizará 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 cálculo de la tensión aplicada de contacto o paso será 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.

Lo anteriormente expuesto se indica en la tabla 6.

Tipo de conexión del neutro	Corriente utilizable para el cálculo de las tensiones de paso y contacto
Aislado	$K \cdot I_C$
A través de impedancia	I_E
Rígido a tierra	I_E
	$0,7 I_E$

Tabla 6. Intensidades de defecto para el cálculo.

En el texto reproducido se hace referencia a *intensidades de defecto y de puesta a tierra*, conceptos que conviene, ante todo, diferenciar. Esta última, I_E , la constituye la totalidad de la corriente que se deriva a tierra, a través de la puesta a tierra de la instalación, y es la que provoca la elevación del potencial de la misma pero no ha de coincidir, necesariamente, con la *intensidad de defecto a tierra*, siendo, en general, una parte de ésta.

ETAPAS QUE COMPRENDE

Las etapas que comprende la determinación del valor correcto de la corriente de defecto a tierra a utilizar en los cálculos de diseño de un sistema de puesta a tierra, en general, son:

- Establecer cuál de los posibles tipos de falta a tierra originará la mayor circulación de corriente entre la puesta a tierra y el terreno y, por tanto, la mayor elevación de potencial y los mayores gradientes en la zona de la instalación.
A pesar de que se utilice el valor más desfavorable de los correspondientes a los distintos niveles de tensión existentes en la instalación, no se tomará en consideración la posibilidad de defectos simultáneos en ellos, tal como se autoriza en el Apartado 1.2 de la RAT 13.
- Calcular el máximo valor eficaz, simétrico, I_d'' , de esta corriente de defecto que circulará entre la instalación de puesta a tierra y el terreno, en el instante inicial de la falta.
- Aplicar un factor de corrección, cuando proceda, para contemplar la componente de corriente continua que pudiera aparecer y la posterior atenuación de las componentes transitorias alterna y continua.
- Introducir un factor mayorador que tenga en cuenta, si es el caso, los incrementos de las corrientes de defecto debidas a la futura expansión del sistema.

Tipos de falta a tierra

Conviene realizar un esquema simplificado, a semejanza de los que componen la figura 44, que represente la situación que se analiza y que incluya la presencia de posibles hilos de tierra conectados al sistema de puesta a tierra de la instalación; por lo dicho acerca de la corriente de puesta a tierra de que puede ser una fracción de la corriente de defecto.

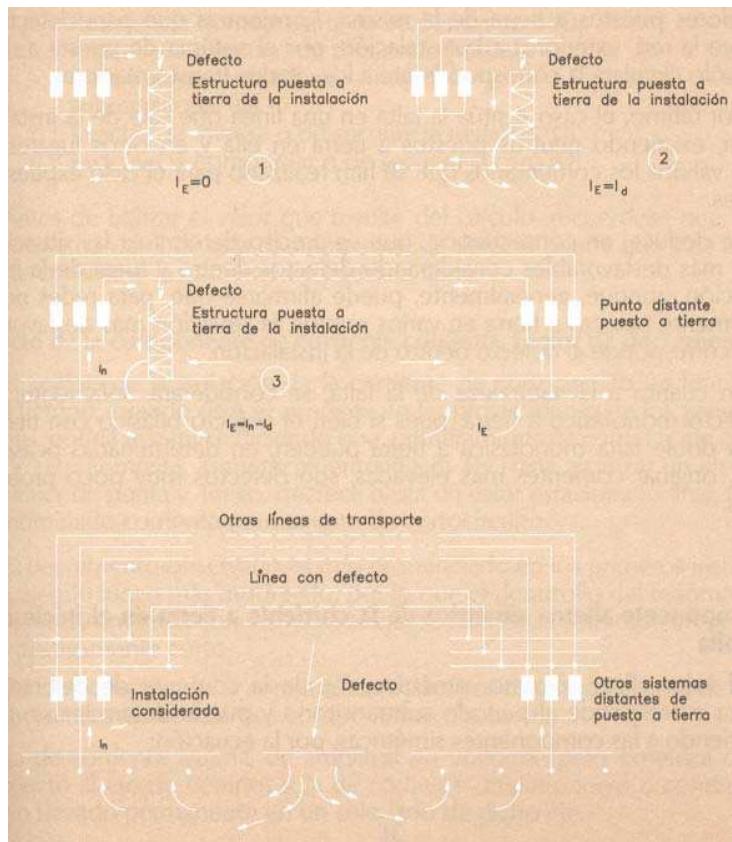


Figura 44. Esquematización de algunos casos típicos de defecto a tierra para poner de manifiesto cómo la corriente de puesta a tierra, I_E aunque motivada por la de defecto, I_d puede ser sólo una fracción de la misma.

Por ejemplo, en el caso 1 de la figura, en que la instalación es la única que tiene los neutros de los transformadores puestos a tierra, la corriente de puesta a tierra, I_E , para falta dentro de la instalación (situación representada) es nula, circulando toda la intensidad de defecto, i_d , por el sistema de puesta a tierra hacia la red, sin pasar a tierra.

Sin embargo, de considerar el defecto fuera de la instalación, I_E coincidiría con i_d .

En el caso 2, en que los neutros están a tierra en otras instalaciones, serían iguales la corriente de falta y la de puesta a tierra para el caso de defecto dentro de la instalación pero si la falta fuera externa, no existiría I_E para la instalación que se comenta.

El caso 3 reproduce la existencia de neutros a tierra en la instalación considerada y en otros lugares de la red.

Entonces, para faltas situadas dentro de la instalación, la I_E vendrá dada por la diferencia entre i_d y la aportada al defecto por los transformadores puestos a tierra de la misma, i_n , mientras que para defectos sobre la red, exteriores a la instalación, por el sistema de puesta a tierra sólo circulará la correspondiente a los citados transformadores.

Por último, el caso 4 sitúa la falta en una línea que sale de la instalación, existiendo neutros puestos a tierra en ella y en otros lugares y son válidos los comentarios que se han realizado para el caso expuesto antes.

Se deduce, en consecuencia, que es preciso determinar las situaciones más desfavorables considerando defectos dentro y fuera de la instalación, aunque, generalmente, puede afirmarse que, para redes normalmente puestas a tierra en varios puntos, la situación más desfavorable corresponde al defecto dentro de la instalación.

En cuanto a la naturaleza de la falta, se considerará, solamente, el defecto monofásico a tierra, pues si bien el defecto bifásico con tierra o la doble falta monofásica a tierra pueden, en determinadas ocasiones, originar corrientes más elevadas, son defectos muy poco probables.

Componente alterna simétrica de la corriente a tierra en el inicio de la falta

El valor eficaz máximo, simétrico, I''_d , de la corriente de defecto a tierra corresponde al período subtransitorio y puede determinarse, recurriendo a las componentes simétricas, por la ecuación:

$$I''_d = \frac{3\vec{E}}{3R + 3R_f + (R'_f + R_2 + R_0) + j(x''_1 + x_2 + x_0)} \quad (\text{A})$$

Si bien, en la mayoría de los casos, podrá despreciarse el efecto de los términos resistivos, con lo que la expresión se reducirá a la forma más simple:

$$I''_d = \frac{3E}{x''_1 + x_2 + x_0}$$

Los términos que aparecen en estas expresiones contemplan el sistema desde su origen hasta el punto donde se supone el defecto y significan:

E: Fuerza electromotriz simple (V) (*)

* En rigor, la fuerza electromotriz considerada debería ser la subtransitoria, E'' , cuyo valor, según e tipo de máquina, está situado entre 0,8 y 1,12 veces E , siendo corriente utilizar el promedio, 1,1.

- R : Resistencia global a tierra, estimada, de la instalación (Ω)
 R_f : Mínima resistencia estimada del propio defecto (Ω)
 R_1 : Resistencia directa o de secuencia positiva (Ω)
 R_2 : Resistencia inversa o de secuencia negativa (Ω)
 R_0 : Resistencia homopolar o de secuencia cero (Ω)
 x''_1 : Reactancia directa o de secuencia positiva (para los generadores, se consigna la subtransitoria) (Ω)
 x_2 : Reactancia inversa o de secuencia negativa (Ω)
 x_0 : Reactancia homopolar o de secuencia cero (Ω)

Antes de utilizar el valor que resulte del cálculo, recuérdese que, tal como se ha visto, de esta corriente total de defecto puede que sólo una parte constituya la corriente de puesta a tierra.

Efecto de la componente de corriente continua. Factor de decremento

El análisis de la variación de la corriente de cortocircuito en función del tiempo, cuando éste se produce en las proximidades de los generadores, podría resumirse diciendo que, primeramente, la corriente de cortocircuito aumenta, asimétricamente (figura 45) hasta alcanzar un elevado valor de punta y, luego, decrece hasta un valor estacionario final, I_{ccp} , denominado corriente permanente de cortocircuito.

El decremento observado es más pronunciado en los primeros instantes, siendo luego más moderado, por lo que el desarrollo del fenómeno en forma asimétrica con respecto al eje de referencia sólo dura un tiempo relativamente corto.

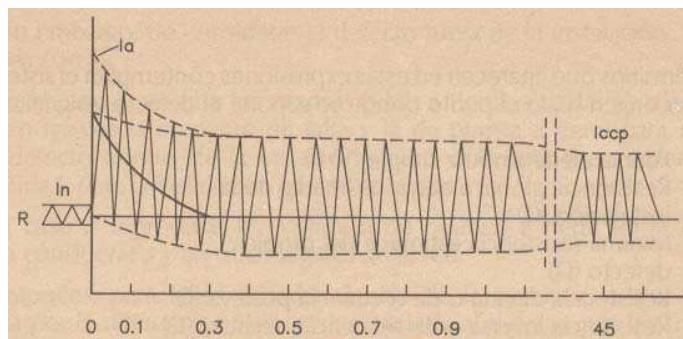


Figura 45. Evolución de la corriente de cortocircuito cuando el defecto está próximo a la generación. Obsérvese el importante valor inicial de punta asimétrica que luego decrece, de forma exponencial, hasta quedar reducido al valor denominado de cortocircuito permanente

Puede considerarse la corriente de cortocircuito como la suma de los valores instantáneos de dos componentes (figura 46):

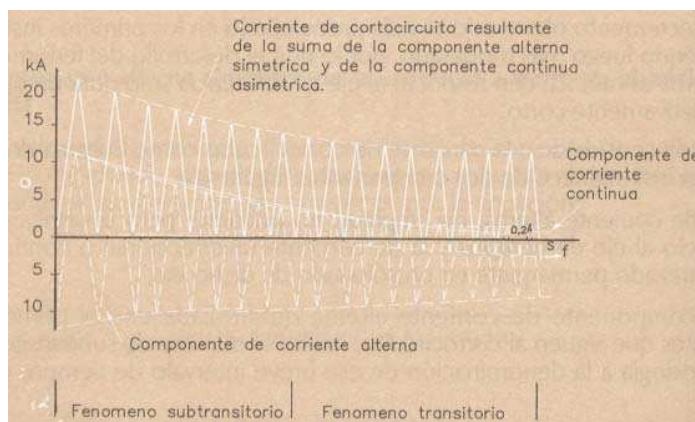


Figura 46. Detalle de la parte inicial del fenómeno para apreciar la brevedad del período subtransitorio y cómo la forma de onda final puede considerarse la resultante de la suma de dos componentes de amplitud decreciente: la de alterna, simétrica respecto al eje de tiempos y la continua, cuyo trazado permanece siempre en un sólo lado del eje. El máximo valor de pico de la corriente de cortocircuito es $1.8\sqrt{2} \cdot I''$

La de corriente alterna, de amplitud no uniforme pero simétrica con respecto al eje de tiempos y la de corriente unidireccional o continua, cuyo trazado permanente en un sólo lado de dicho eje.

La componente de corriente alterna desarrollada en los primeros instantes que siguen al cortocircuito, recibe el nombre de *subtransitoria*, por analogía a la denominación de ese breve intervalo de tiempo, y su valor depende de la reactancia subtransitoria, X'' , del generador.

Después de algunos períodos, disminuye hasta un valor que depende de la reactancia transitoria, X' , y, finalmente, decrece, en forma relativamente lenta, hasta adquirir su valor estacionario, es decir, hasta el valor permanente de cortocircuito, que depende de la reactancia síncrona, X_s , del generador.

Por otra parte, la componente de corriente continua, superpuesta a la componente alterna, depende del instante de iniciación del cortocircuito y provoca la asimetría de la corriente de cortocircuito durante los primeros instantes.

El máximo valor de pico que puede resultar para la corriente de cortocircuito es $1,8\sqrt{2} \cdot I''$ veces el valor inicial de la corriente subtransitoria de cortocircuito, I'' ; y es el valor que es necesario asumir, al ser aleatorio el instante en que se produzca la falta y considerar, además, que la presencia de la persona y el consiguiente contacto pudieran ya existir en el momento de iniciarse el defecto.

Sucede, no obstante, que los datos relacionados con la posibilidad de fibrilación están basados en corrientes alternas sinusoidales de amplitud constante, por lo que será necesario determinar el valor eficaz de una onda de intensidad senoidal, I_E , que equivalga a la asimétrica presentada por la corriente de defecto, durante el intervalo de tiempo que se estime que puede durar la falta y supuesto que toda la intensidad de ésta constituya la corriente de puesta a tierra.

Debe buscarse un factor, D , que satisfaga, por tanto que:

$$I_E = D I''_d$$

De donde

$$D = \frac{I_E}{I''_d}$$

y como el valor eficaz es, por definición:

$$I_E = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_a^2 \cdot dt}$$

queda

$$D = \frac{1}{I''_d} \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_d^2 \cdot dt}$$

siendo

- I_E : Valor eficaz de la corriente equivalente a la de defecto a tierra, en amperios.
- I_d : Valores instantáneos, en función del tiempo, de la corriente de falta.
- t : Duración del intervalo en que persiste el defecto, en segundos.
- D : Factor decremento, que contempla el máximo valor de la componente de corriente continua y el decremento que sufren las componentes alternas y continua de la corriente de defecto.

Dada la complejidad que representa la resolución de la anterior integral, se recurre a valores tabulados de D , para diferentes tiempos de duración de la falta, t , como los mostrados en la tabla 7.

Duración de la falta <i>t</i>		Factor decremento <i>D</i>
Segundos	Ciclos (para 50 Hz)	
0,1	5	1,25
0,25	12,5	1,10
0,5 o más	25 o más	1,00

Tabla 7. Factor decremento, D, en función de la duración del intervalo considerado.

En esta tabla se obtienen, por interpolación lineal, los valores de *D* correspondientes a tiempos intermedios.

No obstante, si el defecto se produce en un lugar muy alejado del generador, las impedancias de éste pierden su papel preponderante frente a las que presenta la red y el valor inicial de la corriente de cortocircuito no difiere, apreciablemente, del valor estacionario final.

Efecto de futuras ampliaciones

El incremento de la potencia de generación del sistema o la realización de nuevas interconexiones originará aumentos de las corrientes de defecto, con la consiguiente repercusión en el cumplimiento de los requisitos de seguridad.

Como que la posterior adecuación de la instalación a los nuevos valores es menos conveniente y más costoso que haberlos contemplado en el proyecto original, es usual prever un margen en el sistema de tierras, obtenido mediante la introducción de un factor de corrección que disminuya el valor de la impedancia global a tierra del sistema o, directamente, aumente el valor de la corriente de defecto calculada, como es práctica usual, al considerar la relación entre la potencia de cortocircuito previsible en un plazo determinado y la actual, y utilizar ese cociente como factor mayorador.

OTROS FACTORES A TENER EN CUENTA

Efecto de la resistencia de tierra de la instalación

Como se ha indicado, en la mayoría de las ocasiones es suficiente calcular la corriente de defecto utilizando, únicamente, los valores de las reactancias del sistema, despreciando las resistencias del mismo, así como la global a tierra de la instalación y la propia del defecto.

El error así cometido es, normalmente, pequeño y a favor de la seguridad.

Sin embargo, pueden haber casos menos corrientes en donde el valor estimado de la resistencia global a tierra sea importante frente al de las reactancias y resulte adecuado tenerlo presente pero, por no estar todavía proyectada la instalación, no es un dato conocido.

Se entra en un círculo vicioso, pues la resistencia de tierra de la instalación depende del diseño del sistema de puesta a tierra y éste, a su vez, de la corriente de defecto, que es lo que se está tratando de calcular pero, para *grandes instalaciones*, puede salirse del mismo mediante el razonamiento simplificador que sigue.

La resistencia del sistema de puesta a tierra de las mismas –una vez determinada la resistividad, ρ , del terreno–, depende, principalmente, de la superficie que ocupan y ésta se conoce ya, siquiera aproximadamente, desde las primeras etapas del diseño, de forma que un primer valor estimado será:

$$R = \frac{\rho}{4r} \quad (\Omega)$$

que puede perfilarse más si se valora la longitud total, L , de conductores enterrados a utilizar en la realización de los electrodos (probablemente, del tipo malla, a la que será ventajoso recurrir para constituirlos, como oportunamente se indicará) y agregarlo, como segundo sumando, a la expresión anterior, que quedará:

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

siendo, en ambas expresiones,

R : Resistencia de tierra de la instalación (Ω).

ρ : Resistividad media ($\Omega \cdot \text{m}$)

r : Radio de un círculo con igual área que la ocupada por la instalación de puesta a tierra (m)

L : Longitud total de conductores enterrados (m).

Efecto de la resistencia del defecto

Aún cuando puede aceptarse que su valor es nulo en el caso de un defecto de aislamiento dentro de la instalación, también es posible considerar un valor mínimo de resistencia de defecto, R_d , para faltas exteriores si se tiene la seguridad de que va a ser así en todas las condiciones.

En cualquier caso, despreciar su valor es una postura conservadora, a favor de la seguridad

Efectos de los cables de tierra aéreos

Las líneas de transporte de alta tensión tienen, normalmente, cables de tierra aéreos, de diferente longitud y material, y que pueden estar aislados o no del sistema de puesta a tierra de la instalación.

Cuando están conectados a la puesta a tierra de la instalación, pueden derivar, fuera de la misma, una parte sustancial de la corriente de defecto a tierra, lo que supone una reducción del valor de la corriente de defecto que se establece por el electrodo de tierra y, a tal efecto, hay factores de reducción aceptados normalmente.

Debe mencionarse que si bien esa derivación de corriente por las líneas de tierra disminuye el riesgo dentro de la instalación, lo incrementa en las bases de los apoyos de la línea que estén situados a menos de $3 \div 5$ km de la instalación pues tales apoyos, caso de no tener conectados sus cables de tierra a la tierra de la instalación, sólo estarían afectados por los defectos de aislamiento locales o descargas atmosféricas sobre ellos, mientras que en la situación que se comenta, experimentan todos los incrementos de potencial que afecten al sistema de puesta a tierra de la instalación.

Contrariamente, a consecuencia de estar conectados a la tierra de la instalación, si ocurre un defecto de aislamiento en uno de esos apoyos, disminuirá la magnitud de los gradientes en sus alrededores.

CASO DE INSTALACIONES DE TERCERA CATEGORÍA ($1 \text{ kV} < U_n \leq 30 \text{ kV}$)

La determinación, con rigor, de la corriente máxima de puesta a tierra obliga a efectuar el cálculo de la corriente de defecto mediante el uso de las componentes simétricas, como ya se ha visto.

Este proceder, aunque laborioso, resulta claramente justificado en Centrales y Subestaciones, pero no parece el más adecuado para instalaciones de menor entidad, como son las de 3.^a categoría.

En estos sistemas, es muy frecuente explotar las redes en disposición radial (antena) y, generalmente, con el neutro puesto a tierra a través de una reactancia o resistencia limitadora de la corriente de defecto a tierra (en algún caso especial, ambos elementos en serie) en la subestación de alimentación, aunque debe citarse que todavía persisten sistemas en que el neutro está aislado.

No obstante, los parámetros de la red que definen la corriente de defecto a tierra, como son la resistencia y la reactancia de las líneas, son muy variables por la frecuencia con que se intercalan nuevos circuitos y subestaciones.

Para no condicionar el valor de la corriente de defecto a la disposición del esquema de alimentación en el momento de los cálculos, resulta obligado simplificar los mismos incluyendo, en la aproximación, las consideraciones que hagan posibles que las variaciones posteriores –en forma de nuevas instalaciones y/o modificaciones de explotación, físicas o eléctricas–, no alteren las condiciones de seguridad que se establezcan para cada instalación.

Como el aspecto más decisivo a tener en cuenta en el cálculo de la corriente máxima de defecto a tierra es el tratamiento del neutro de la red, se van a analizar las variantes que se pueden dar en este tipo de instalaciones, que son:

- Neutro aislado.
- Neutro unido a tierra
 - Directamente
 - mediante impedancia (X_n , R_n o $X + R_n$).

El neutro unido directamente a tierra puede considerarse como un caso particular de la conexión mediante impedancia, dado que la conexión a tierra siempre presenta una resistencia de cierto valor, por reducido que éste sea.

Debe resaltarse que como, en general, las distancias que median entre estas instalaciones y la generación son importantes, no se considerarán las asimetrías descritas para el caso de las grandes instalaciones, utilizándose aquí, exclusivamente, los valores permanentes de las corrientes de cortocircuito.

Neutro aislado

La intensidad de defecto a tierra es la corriente capacitiva de la red respecto a tierra, que resulta directamente proporcional a la longitud de las mismas pero que no es constante, ya que el sistema se va ampliando con el transcurso del tiempo.

Para contemplar esa circunstancia, deja de tenerse en cuenta el coeficiente reductor que indica la RAT 13 y al que se ha hecho referencia en el principio del capítulo y, salvo aquellos, casos en los que el proyectista justifique otros valores, puede hacerse uso de la expresión:

$$I_d = \frac{E}{\sum Z_i} = \frac{U\sqrt{3}}{\sqrt{(3R_t)^2 + \frac{1}{[3cu(\sum C_i)]^2}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{cu}(C_a L_a + C_s L_s)}{\sqrt{1 + \omega^2(C_a L_a + C_s L_s)^2 + (3R_t)^2}} \quad (\text{A})$$

siendo:

- E : Tensión sencilla de la red (V)
 U : Tensión compuesta de la red (V)

- C_a : Capacidad homopolar de las líneas aéreas (F/km)
 L_a : Longitud total de las líneas aéreas de alta tensión, subsidiarias de la misma transformación AT/AT (km)
 C_s : Capacidad homopolar de los cables subterráneos de alta tensión, subsidiarios de la misma transformación AT/AT.
 L_s : Longitud total de los cables subterráneos de alta tensión, subsidiarios de la misma transformación AT/AT.
 R_t : Resistencia de la puesta a tierra general de la instalación que se estudia (Ω).
 ω : Pulsación de la corriente, de valor $2\pi f$.

considerándose, salvo la determinación concreta de otras cifras, los siguientes valores para las capacidades homopolares:

$$C_a = 0,006 \cdot 10^{-6} \text{ F/km} \quad C_s = 0,250 \cdot 10^{-6} \text{ F/km}$$

que corresponden a los conductores de las secciones más utilizadas normalmente en este tipo de instalaciones, bajo tensiones nominales de la red de 20 kV.

Neutro a tierra

En este caso, la intensidad de defecto a tierra es inversamente proporcional a la impedancia total del bucle que debe recorrer.

Como caso más desfavorable y para simplificar los cálculos –salvo que el proyectista desee justificar otros aspectos–, puede prescindirse de todas las impedancias intermedias existentes entre la cabecera de la línea o líneas que alimentan la instalación considerada y ésta, adoptándose el valor más elevado de la corriente que resulta de suponerla limitada, exclusivamente, por la impedancia de puesta a tierra del neutro del sistema y la resistencia de tierra que presentará la instalación que se está proyectando, figura 47, consiguiéndose, así, independizar los resultados.

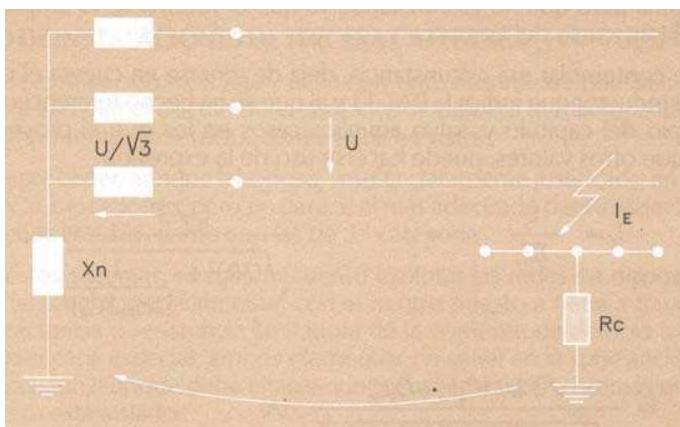


Figura 47. En las instalaciones de 3.I categoría que disponen del neutro unido a tierra a través de una reactancia limitadora, X_n , puede establecerse el valor de la intensidad de defecto a tierra considerando nulas todas las impedancias del bucle de defecto, con excepción de X_n y R_t

Esta simplificación es, no obstante, favorable ala seguridad pues proporciona una magnitud de la corriente de defecto superior, a todas luces, a la que circulará en realidad y es el sistema adoptado por las compañías eléctricas en cálculos de esta naturaleza para los centros de transformación en sus redes de distribución.

Es frecuente, en los transformadores que alimentan estas redes, encontrarse grupos de conexión estrella-tríangulo que obliguen a la creación de un neutro artificial conectable a tierra (lado triángulo)

mediante una bobina en disposición zig-zag, tal como se representa en la figura 48, donde se a indicado la circulación de corriente en el caso de un defecto monofásico a tierra.

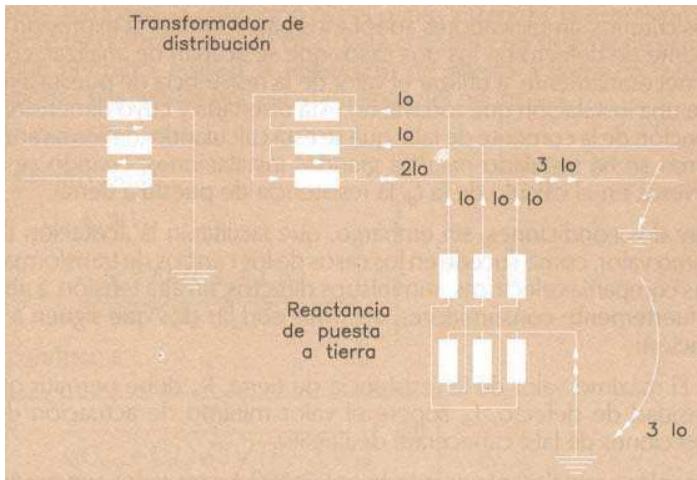


Figura 48. Obtención de un neutro artificial para conectar a tierra redes cuyo devanado alimentador esté dispuesto en triángulo, a la vez que se consigue un efecto limitador de la corriente de defecto a tierra semejante al que proporciona la reactancia insertada en el camino del neutro de la figura anterior.

Puede razonarse no obstante, como si el arrollamiento secundario estuviera conectado en estrella y existiera una reactancia monofásica intercalada entre su centro y el sistema de puesta a tierra, ya que esta hipotética sustitución sólo afecta la distribución de las corrientes en el propio transformador pero no en el lado de la red.

$$I_d = \frac{3E}{\sqrt{(3X_n)^2 + (3R_t + 3R_n)^2}} = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{X_n^2 + (R_t + R_n)^2}} \quad (\text{A})$$

donde:

- E : Tensión sencilla de la red (V)
- U : Tensión compuesta de la red (V)
- R_n : Resistencia de la puesta a tierra del neutro de la red..
- R_t : Resistencia de la puesta a la tierra general de la instalación (Ω).
- X_n : Reactancia de la puesta a tierra del neutro de la red.

siendo R_n y X_n característicos de cada red.

VALOR MÁXIMO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE 3.^a CATEGORÍA

Los criterios simplificadores adoptados para formular la expresión de la corriente de defecto en los dos casos que se acaban de analizar, conducen, necesariamente, a utilizar el valor de la resistencia de puesta a tierra, R , de una instalación que todavía no está diseñada y cuyo dimensionado es función de la corriente de falta que se está calculando (de forma análoga a como se ha señalado para las grandes instalaciones, cuando se hace intervenir, en el cálculo de la I_d , la resistencia de puesta a tierra).

Hay dos condiciones, sin embargo, que facilitarán la acotación de su máximo valor, como sucede en los casos de los centros de transformación de las compañías eléctricas, suministros directos, en alta tensión, a abonados fuertemente consumidores, etc., que son las dos que siguen a continuación:

- a) El máximo valor de la resistencia de tierra, R_t , debe permitir que la intensidad de defecto, I_d , supere el valor mínimo de actuación de las protecciones de la(s) cabecera(s) de línea(s). Un valor normalmente aceptado es $I_d \geq 100 \text{ A}$ para redes con neutro no aislado. Si se trata de sistemas con neutro aislado, no existe valor mínimo pues el defecto se eliminará por sistemas de detección de tensión homopolar, tal como prescribe la MIE RAT 09 para esas redes.
- b) El máximo valor del potencial absoluto, V_d , que alcanza el sistema de puesta a tierra de la instalación, en caso de defecto a tierra, no debe exceder la tensión soportada, a frecuencia industrial, del material de la instalación de baja tensión, V_{bt} .

Como quiera que:

$$V_d = R_t \cdot I_d$$

y ha de satisfacerse que

$$V_d \leq V_{bt}$$

se tendrá, finalmente:

$$R_t \cdot I_d \leq V_{bt}$$

expresión que tiene validez independientemente del tratamiento del neutro del sistema.

SU DETERMINACIÓN

Puede agruparse la condición b) del punto anterior y la expresión de la corriente de defecto, en cada caso, para constituir un sistema de ecuaciones que permitirá evaluar la resistencia de puesta a tierra en todas las situaciones planteadas por el tratamiento del neutro.

Así, se tendrá, para:

- Neutro aislado

$$\left. \begin{aligned} I_d \cdot R_t &\leq V_{bt} \\ I_d &= \frac{\sqrt{3}U\omega(C_aL_a + C_sL_s)}{\sqrt{1 + \omega^2(C_aL_a + C_sL_s)^2 + (3R_t)^2}} \end{aligned} \right\}$$

que conduce a sin limitación en su mínimo valor.

$$\left. \begin{aligned} R_t &= \frac{V_{bt}}{\omega(C_aL_a + C_sL_s)\sqrt{3}\sqrt{U^2 - 3V_{bt}^2}} \quad (\Omega) \\ I_d &\leq \frac{V_{bt}}{R_t} \quad (A) \end{aligned} \right\}$$

- Neutro unido a tierra

$$\left. \begin{aligned} I_d \cdot R_t &\leq V_{bt} \\ I_d &= \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}} \end{aligned} \right\}$$

$$R_t = \frac{-R_n V_{bt}^2 \pm V_{bt} \sqrt{R_n^2 V_{bt}^2 - (V_{bt}^2 - E^2)(R_n^2 + X_n^2)}}{V_{bt}^2 - E^2} \quad (\Omega)$$

$$I_d \leq \frac{V_{bt}}{R_t} \quad (A)$$

aunque la expresión de R_t en general, es más sencilla pues la puesta a tierra del neutro suele únicamente constar de R_n o X_n , pero no las dos a la vez, resultando, entonces:

para $R_n = 0$

$$R_t = \frac{\pm V_{bt} X_n \sqrt{E^2 - V_{bt}^2}}{V_{bt}^2 - E^2} \quad (\Omega)$$

y si $X_n = 0$

$$R_t = \frac{R_n V_{bt} (-V_{bt} \pm E)}{V_{bt}^2 - E^2} \quad (\Omega)$$

tomándose, naturalmente, sólo la solución positiva.

Aquí deberá satisfacerse, además, el requisito expuesto en a) de que:

$$I_d \geq 100 \text{ A}$$

TIEMPO MÁXIMO DE ELIMINACIÓN DEL DEFECTO

El tiempo de despeje de una falta está estrechamente ligado al tipo de protecciones que se utilicen y a las características mecánicas y eléctricas de la aparamenta que tiene que efectuar la interrupción, puesto que la eliminación del defecto se consigue mediante la actuación de un elemento de corte, ordenada por un dispositivo de protección que, de alguna manera, detecta la existencia de la falta.

En instalaciones de 1.^a y 2.^a categoría, pueden encontrarse, para las protecciones, familias que van desde soluciones electromagnéticas, totalmente analógicas, a las estáticas, que ya incorporan en sus últimas versiones, uno o varios microprocesadores y tratamiento digital de las magnitudes a controlar (intensidad, impedancia, reactancia, comparación de fases, etc.).

Por lo que respecta a los aparatos de corte, siempre del tipo interruptor automático, utilizan técnicas de extinción del arco variadas, pues el medio puede ser aire comprimido, hexafluoruro de azufre, aceite, etc.

Para estas instalaciones, resulta, por tanto, prácticamente imposible aportar unos datos de validez general, que deberán ser determinados en cada caso concreto, en función del sistema protector y aparamenta utilizada.

Sobre este particular, recuérdese que debe contabilizarse por partida doble el tiempo de eliminación de la falta, dado que la MIE RAT 09 hace casi obligada la existencia de reenganche automático en este tipo de instalaciones.

En instalaciones de 3.^a categoría, aunque las técnicas de corte sean, también, muy variadas –se emplea aceite, aire (soplado magnético), vacío y hexafluoruro de azufre–, no sucede lo mismo con las

protecciones que, en el caso de neutro no aislado, las constituye, de ordinario, un relé de sobreintensidad que será quien establezca el tiempo de detección, t' .

El tiempo final resultante, t , será $t' + t_m$, incorporando en t_m , el tiempo de la maniobra de apertura del interruptor y el de extinción del arco.

No se considerarán los cortacircuitos fusibles como elementos de interrupción de las intensidades de defecto a tierra, salvo que se justifique lo contrario.

En estas instalaciones, las variantes normales respecto a los tiempos de actuación de los relés son:

- tiempo independiente,
- tiempo dependiente.

En la primera, el tiempo de actuación –que es prefijado– no depende del valor de la sobreintensidad, I_d , y se inicia cuando ésta supera el valor llamado de arranque, I_a .

Para los de tiempo dependiente, el tiempo de actuación está en relación inversa con la sobreintensidad y, en general, responden a la expresión:

$$t' = \frac{k}{\left(\frac{I_d}{I_a}\right)^x - 1} \quad \alpha = \frac{K'}{r^x - 1} \quad (s)$$

siendo:

k y x : Parámetros que dependen del tipo de característica intensidad – tiempo del relé.

a : Curva elegida dentro de una familia.

K' : Constante obtenida por la multiplicación de k y a .

r : Cociente entre la intensidad de defecto a tierra, I_d , y la de arranque del relé, I_a , referida al primario.

Las curvas más utilizadas se muestran en la tabla 8.

Tipo de curva			
	Normal inversa $x=0,02$	Muy inversa $x=1$	Extremadamente inversa $x=2$
K'	0,014	1,35	8
	0,028	2,70	16
	0,042	4,05	24
	0,056	5,40	32
	0,070	6,70	40
	0,084	8,10	48
	0,098	9,45	56
	0,112	10,80	64
	0,126	12,15	72
	0,140	13,50	80

Tabla 8. Parámetros que caracterizan a los relés de sobreintensidad de tiempo dependiente.

Para definir el tiempo de actuación, t' de las protecciones a tiempo dependiente, debe indicarse la característica del relé, el tipo de curva, x , la constante K' y la intensidad a la que está ajustado el arranque, I_a .

Como ya se ha dejado dicho, en el caso de que exista reenganche rápido, el tiempo a considerar será la suma de los correspondientes a la primera actuación y a la posterior desconexión, tras la reconexión automática, aunque esta segunda no tenga lugar por tratarse de un defecto fugitivo, o sea:

$$t = 2(t' + t_m)$$

Conviene, sin embargo, señalar que esta suma de los tiempos parciales es una hipótesis conservadora pues, en general, se acepta que, en caso de descargas consecutivas, si bien existe un cierto efecto acumulativo de las mismas sobre el cuerpo humano, las consecuencias finales son inferiores a las que resultarían de una aplicación continuada con duración igual a la suma de los tiempos parciales.

Diseño preliminar del sistema de puesta a tierra [5], [13] , [14] y [15]

Una vez determinada la resistividad del terreno, la corriente máxima de puesta a tierra y el tiempo de eliminación del defecto, procede efectuar el diseño preliminar del sistema de puesta a tierra, lo que requiere algún conocimiento sobre los elementos que la componen, sus dimensiones y/o secciones autorizadas y pequeñas indicaciones para facilitar la decisión sobre el tipo de instalación que se va a elegir, aspectos éstos que son tratados aquí.

PRESCRIPCIONES SOBRE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

Tras indicar la RAT, en su apartado 1.2, que:

"El dimensionado de la instalación de tierra es función de la intensidad que, en caso de defecto, circula a través de la parte afectada de la instalación de tierra y del tiempo de duración del defecto" y "... se hará de forma que no se produzcan calentamientos que puedan deteriorar sus características o aflojar elementos desmontables", se hace referencia a los elementos que la constituyen.

Líneas de tierra

Sobre esta parte de la instalación de puesta a tierra, puede leerse en el apartado 3.1 de la RAT:

"Los conductores empleados en las líneas de tierra tendrán una resistencia mecánica adecuada y ofrecerán una elevada resistencia a la corrosión.

Su sección será tal, que la máxima corriente que circule por ellos en caso de defecto o de descarga atmosférica no lleve 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 será de un segundo, y no podrán superarse las siguientes densidades de corriente:

Cobre	160 A/mm ²
Acero	60 A/mm ²

Sin embargo, en ningún caso se admitirán secciones inferiores a 25 mm² en el caso de cobre y 50 mm² en el caso de 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, lo que equivale a dividir por 1,2 las secciones determinadas de acuerdo con dicho anteriormente, respetándose los valores mínimos señalados.

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

- Que las temperaturas no sobrepasen los valores indicados en el párrafo anterior.
- 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, su resistencia sea, al menos, equivalente a la del cobre de 25 mm².

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

Podrán 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."

Especificaciones que no requieren mayores aclaraciones.

Una tabla de valores prácticos de la ampacidad momentánea (o intensidad admisible de corta duración), función de la duración del paso de la corriente, se reproduce a continuación, para facilitar un dimensionado rápido.

Sección del conductor mm ²	Corriente admisible (kA), en función del tiempo de circulación de la corriente (segundos), sin superar los 200 °C					<i>Tabla 9. Ampacidad momentánea de los cables de cobre</i>
	1"	2"	5"	10"	15"	
16	2,65	1,86	1,18	0,84	0,68	
25	3,68	2,60	1,65	1,16	0,95	
35	5,80	4,07	2,57	1,83	1,50	
50	8,25	5,80	3,68	2,60	2,12	
70	11,50	8,10	5,20	3,63	2,95	
95	14,00	9,35	6,25	4,40	3,60	
120	19,70	13,00	8,80	6,25	5,05	
185	25,60	17,40	11,00	7,90	6,35	
200	30,50	21,60	13,60	9,70	7,85	
240	39,50	28,00	17,60	12,70	10,20	
300	49,50	35,00	22,20	15,70	12,80	
360	65,75	46,40	29,40	20,80	17,00	

Electrodos de puesta a tierra; dimensiones

También para esta parte de la instalación de puesta a tierra existe pronunciamiento legal, que desarrolla la RAT 13 en su apartado 3.3 cuando dice:

"Los electrodos de puesta a tierra estarán formados por materiales metálicos en forma de varillas, cables, chapas, perfiles, que presenten una resistencia elevada a la corrosión por sí mismos, o mediante una protección adicional, tales como el cobre o el acero debidamente protegido, en cuyo caso se tendrá especial cuidado de no dañar el recubrimiento de protección durante el hincado.

Si se utilizasen otros materiales habrá de justificarse su empleo. Los electrodos podrán disponerse de las siguientes formas:

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

así como acerca de las dimensiones mínimas de los mismos (apartado 3.4 de la RAT):

- "a) Las dimensiones de las picas se ajustarán a las especificaciones siguientes:
 - Los redondos de cobre o acero recubierto de cobre, no serán de un diámetro inferior a 14 mm. Los de acero sin recubrir no tendrán diámetro inferior a 20 mm.
 - Los tubos no serán de un diámetro inferior a 14 mm. Los de acero sin recubrir no tendrán diámetro inferior a 20 mm.
 - Los tubos no serán de un diámetro inferior a 30 mm ni de un espesor de pared inferior a 3 mm.
 - Los perfiles de acero no serán de un espesor inferior a 5 mm ni de una sección inferior a 350 mm².
- b) Los conductores enterrados, sean de varilla, cable o pletina, deberán tener una sección mínima de 50 mm² los de cobre y 100 mm² los de acero. El espesor mínimo de las pletinas y el diámetro mínimo de los alambres de los cables no será inferior a 2 mm los de cobre y 3 mm los de acero.
- c) las placas o chapas tendrán un espesor mínimo de 2 mm los de cobre y 3 mm las de acero.
- d) En el caso de suelos en los que pueda producirse una corrosión particularmente importante, deberán aumentarse los anteriores valores.
- e) Para el cálculo de la sección de los electrodos se remite a lo indicado en el apartado 3.1 (líneas de tierra)".

Para una mayor facilidad de utilización, se recopilan todos estos valores en la figura 49.

En relación con el metal utilizado como electrodo, ha de indicarse que su elección debe atender a la resistencia que presente frente a la corrosión, ocasionada por causas tales como ataque químico, biológico (anarábico), oxidación, formación de pares electrolíticos entre metales diferentes o entre un metal y los productos de su alteración, electrólisis, corriente de circulación en el terreno (vagabundas, debidas a la tracción eléctrica), etc.

En la práctica, los metales más utilizados son el cobre –por su alta resistencia a la corrosión– y los aceros cromoníquel (AISI 302 o 304), que resisten a la corrosión por pasivación, o los galvanizados, si bien éstos presentan una vida útil dependiente de la duración de su capa protectora de zinc.

Aunque pudiera concluirse que el empleo del cobre es siempre preferible, hay que tener presente, sin embargo, los inconvenientes resultantes de la formación de pares electrolíticos cobre-hierro o cobre-plomo con las estructuras metálicas en contacto con el suelo (pies de apoyos de líneas, carpinterías y canalizaciones metálicas, cables bajo cubierta de plomo, etc.) que serán objeto de corrosión.

El suelo es, generalmente, un medio heterogéneo y, en función de su composición, presenta grandes variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Así, en un suelo natural, se puede separar, fundamentalmente, arena, arcilla, carbonato cálcico y humus, componentes que, mezclados en diferentes proporciones, darán lugar a distintos grados de agresividad.

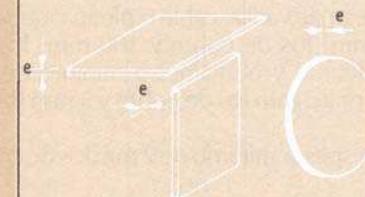
TIPO DE ELECTRODO	Representación	naturaleza	diámetro d (mm)	espesor e (mm)	sección s (mm²)
PICAS	redondos o barras		cobre y acero recubierto de cobre	≥14	— 154
			acero sin recubrir	≥20	— 314
	tubos		—	≥30	≥ 3 254
			acero	—	≥5 350
	perfíles		—	—	—
			acero	—	≥5 350
CONDUCTORES ENTERRADOS	varillas y barras		cobre	≥ 8	—
			acero	≥11,3	—
	cable		cobre	≥ 2	≥50(Cu)
			acero	≥ 3	≥100(Ac)
	pletina		cobre	—	≥ 2
			acero	—	≥ 3
PLACAS o CHAPAS		cobre	—	≥ 2	≥25(Cu)
		acero	—	≥ 3	≥50(Ac)

Figura 49.
Recopilación de las dimensiones o secciones mínimas de los diferentes tipos de electrodos, según la RAT 13. (Ver página anterior)

En suelos en que pueda producirse una corrosión particularmente importante, deberán aumentarse los anteriores valores.

Para duraciones del defecto, a la frecuencia de la red, de 1 segundo, las densidades máximas son:

Cobre 160 A/mm²

Acero 60 A/mm²

El diagrama de clasificación del suelo de Steinrath (figura 50), muestra que no son agresivos los terrenos arenosos, margo-arenosos, margocalcáreos y calcáreos, siendo condicionalmente agresivos los arcillosos y agresivos, de por sí, las turbas, los humus libres de cal y, también, los suelos cenagosos y de aluvión.

Los suelos artificiales, esto es, formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción, residuos domésticos e industriales son, asimismo, agresivos.

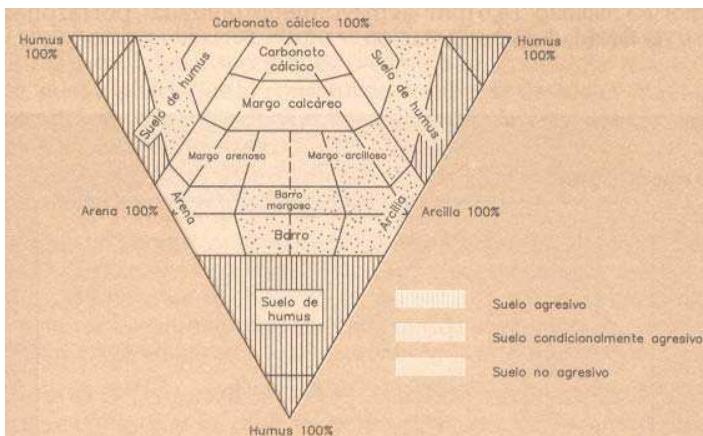


Figura 50. La velocidad de corrosión de los metales enterrados depende, fundamentalmente, de la composición del terreno, que es la que determina la agresividad del mismo.

La corrosión es más activa a medida que el terreno contiene mayor humedad y sales, elementos desencadenantes de la generación de soluciones electrolíticas, fuertemente ionizadas, que confieren al terreno una cierta acidez denominada "agresividad", y como esas condiciones son las determinantes de una menor resistividad, mayor será la corriente galvánica que circule y mayor el ataque o corrosión que sufrirá el ánodo, papel que desempeña el menos electropositivo de los metales que constituyan la célula de corrosión, mientras que el contrario –cátodo– permanece inalterado.

La tabla 10 muestra el grado de agresividad del suelo, en función de su resistividad.

Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Grado de agresividad
menos de 10	muy fuerte
10 a 100	fuerte
100 a 200	moderado
más de 200	escaso

Tabla 10. Grado de agresividad del terreno en función de la resistividad.

Para evitar la corrosión puede estañarse la superficie del electrodo o utilizar el cinc como electrodo de sacrificio, aunque también pueden protegerse las superficies ferreas con pinturas plásticas o recubrimientos asfálticos, utilizar tuberías no metálicas si se trata de canalizaciones, proteger catódicamente, etc.

Esta última técnica, se basa en la existencia de un potencial de inmunidad, al cual es suficiente llevar el metal a proteger para detener la corrosión.

Si se trata del hierro, por ejemplo, el diagrama de Pourbaix (figura 51) sitúa este potencial en -0,62 V con relación al electrodo de hidrógeno normal, para un pH del medio comprendido entre 0 y 9.

Para proteger con ánodos de sacrificio, basta con situar el hierro en contacto eléctrico con un metal o aleación de potencial más bajo, que se corroerá de forma sacrificial.

Del examen de la tabla 11, en que se han relacionado los potenciales estándar o normales, de reducción con respecto al hidrógeno, se desprende que para conseguir que el hierro queda protegido catódicamente, puede utilizarse cualquier metal que esté por encima de él en la serie electroquímica, pero deben utilizarse los que tengan pequeña tendencia a la pasividad, siendo el cinc, el aluminio, el magnesio y sus respectivas aleaciones los más corrientemente utilizados.

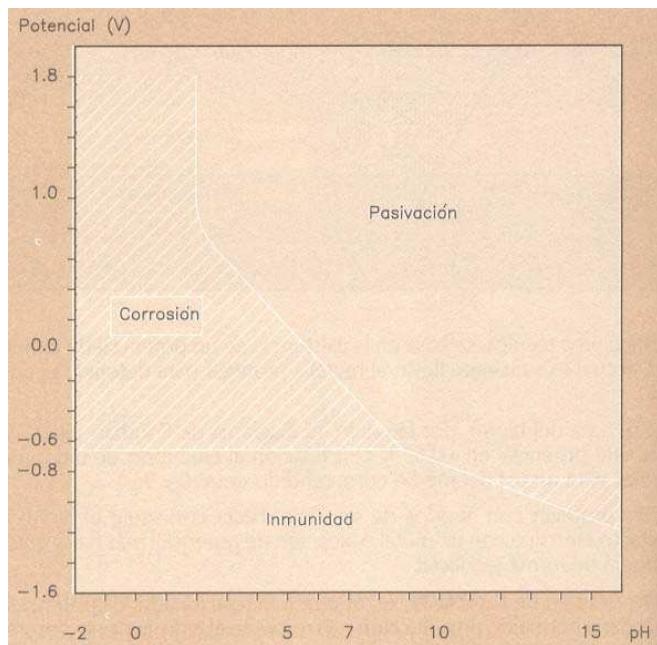


Figura 51. El diagrama de Pourbaix delimita las zonas de corrosión, pasivación e inmunidad, para el sistema Fe-H₂O a 25°C, en función del potencial y del pH.

Tabla 11. Potenciales estándar o normales de reducción, con respecto al electrodo normal de hidrógeno.

Iones	Potencial (V)
Li+	-3,022
Rb+	-2,924
K+	-2,925
Na+	-2,715
Mg++	-1,866
Al+++	-1,67
Zn++	-0,762
Cr+++	-0,71
Fe++	-0,441
Cd++	-0,397
Tl+	-0,336
Co++	-0,29
Ni++	-0,22
Sn++	-0,136
Pb++	-0,129
H+	±0,000
Bi+++	+0,226
Cu++	+0,344
Te++++	+0,558
Hg ₂ ++	+0,798
Ag+	+0,799
Pt++	+1,2
Au+++	+1,42

ALGUNOS DETALLES PRÁCTICOS

Picas

Las picas han de presentar una resistencia mecánica adecuada para permitir el hincado por percusión, incluso en terrenos de penetración difícil.

Como el diámetro influye poco en la disminución de la resistencia y, sin embargo, la energía necesaria para el hincado crece proporcionalmente al cuadrado del mismo (por ejemplo, adoptar 17 mm en lugar de 14 supone incrementar la energía de hincado en un 50%), resulta muy adecuado el valor mínimo de 14 mm que, como se ha visto, establece la reglamentación y que ya proporciona una buena resistencia mecánica, presentando ese valor (en realidad, 14,6 mm) las mayormente utilizadas, por razones de costo y de facilidad de implantación.

La longitud, en la práctica, está normalmente fijada en 2 metros (con menor longitud, no se logra uniformidad frente a las variaciones climáticas y mayor, requeriría de andamios para el hincado), si bien es posible empalmarlas, debiendo presentar, en este caso, los manguitos de acoplamiento unas características adecuadas, tanto mecánicas como eléctricas.

De ordinario, las picas utilizadas son de acero recubierto de cobre pero no en forma de camisa -pues al no constituir cuerpo con el alma, se desplazaría sobre ella en el curso del hincado- sino por una especial deposición electrolítica, de importante espesor, que lleva a una unión molecular de los dos metales, no alcanzable por los procedimientos de galvanotecnia usuales. Las características de las mismas, especialmente, la dureza del núcleo de acero y el espesor mínimo de recubrimiento, están perfectamente recogidas en la Recomendación UNESA 6501 F87.

Conductores horizontales enterrados

Si bien pueden utilizarse, como se ha descrito, barras, cables o conductores masivos, a igual sección, es preferible un conductor masivo a un cable, pues los hilos que lo constituyen siempre se destruyen más rápidamente que un conductor de alma llena, razón por la que no se considera el empleo de trenzas flexibles.

Redes malladas de conductores enterrados

Aunque un conductor tiene menor efectividad como electrodo cuando se producen cruces con otros, éstos son necesarios para prever varios caminos de paso de la corriente de puesta a tierra, evitando caídas de potencial excesivamente altas en el electrodo y asegurando la continuidad del mismo, aún en el caso de una rotura fortuita de alguno de los cables.

Con el fin de asegurar la suficiente resistencia mecánica, una malla típica se puede componer de cable de cobre, desnudo, de 95 mm^2 de sección (recuérdese que 50 mm^2 es el mínimo, para el cobre), enterrado a una profundidad comprendida entre 0,40 y 1 metro y manteniendo una separación entre conductores de 2 a 6 metros pero que, por razones prácticas, conviene que coincida con la que fijan las alineaciones de las estructuras y demás equipamiento, para facilitar las conexiones de puesta a tierra. Para reducir las tensiones de contacto puede preferirse, no obstante, utilizar conductores de menor diámetro (si la densidad de corriente lo permite) en una malla más tupida, siendo lo importante lograr un equilibrio entre la seguridad y el coste de la instalación y del material.

INDICACIONES SOBRE LA ELECCIÓN DE LOS TIPOS DE ELECTRODOS DE TIERRA

Conocida la planta de la instalación eléctrica y la disposición de sus elementos, el diseño preliminar del sistema de puesta a tierra se realiza considerando, como base de partida, el hecho de que debe de estar adaptado a las características topológicas de la instalación y estructurado de tal forma que,

con la red mínima necesaria, se permita la conexión más racional de todos los elementos que lo precisen, aunque, obviamente, puede extenderse, a juicio del proyectista, para mejorar su eficacia.

La elección de un tipo de electrodo de tierra viene impuesta, a menudo, por las condiciones eléctricas a satisfacer y por consideraciones técnicas y económicas, en que la naturaleza del terreno juega un papel importante.

En instalaciones de 3.^a categoría, como, por ejemplo, los centros de transformación AT/BT, con corrientes de puesta a tierra relativamente moderadas, pueden emplearse los electrodos de tierra de geometría simple.

Para controlar las tensiones de paso en el exterior del recinto, si las condiciones del entorno lo permiten, puede convenir, en alguna ocasión, extender el electrodo de puesta a tierra fuera de la instalación o aumentar, artificialmente, la resistividad del terreno, mediante aceras o caminos perimetrales. También, en esos casos, si el solar disponible es superiora las necesidades de la instalación, se puede separar la red de tierras del perímetro exterior.

En instalaciones clasificadas en esa categoría, podrá recurrirse a la utilización de placas en el caso de terrenos de escasa consistencia, en los que el trabajo de excavación de una fosa no resulte muy costoso y donde sea suficiente una toma de tierra de pequeñas dimensiones con resistencia relativamente elevada (por ejemplo, la conexión –que se citará– del neutro de baja tensión de los transformadores).

El empleo de picas verticales, sobre todo si se dispone de medios mecánicos para hincarlas, conduce a soluciones más económicas, pudiendo situar varias de ellas en paralelo si fuera necesario, aunque, en ese caso, para lograr la máxima eficacia, deberán disponerse de forma que la distancia que guarden entre sí sea, al menos, igual a la longitud enterrada de las mismas.

También es posible alcanzar mayores profundidades, empalmando una a continuación de otra, –tal como se indica en la transcripción efectuada de lo que prescribe la RAT sobre los electrodos de tierra– lo que, a veces, tiene la ventaja de interesar capas de terreno más conductoras que las superficiales.

El uso de conductores en zanjas horizontales resulta particularmente económico cuando tales zanjas se abren para otros fines, por ejemplo, para establecer las fundaciones de la instalación. Por otra parte, este sistema es el más indicado para casos de subsuelos de naturaleza dura, recubiertos de un escaso espesor de terreno blando.

Un bucle enterrado, circundando el perímetro del terreno disponible es la solución que proporciona la resistencia más baja a igualdad de longitud enterrada de conductor. Combinado o no con picas verticales, constituye la solución adoptada por las Compañías eléctricas para resolver las puestas a tierra de sus Centros de Transformación.

Por último, las tomas de tierra en disposición radial son adecuadas para la puesta a tierra de estructuras de pequeñas dimensiones, cuando no son suficientes los conductores sencillos para obtener la resistencia deseada.

En el caso de instalaciones eléctricas de 1.^a y 2.^a categoría, como suelen ser las Centrales y Subestaciones de gran extensión, la configuración más lógica para los electrodos de puesta a tierra son las redes malladas de conductores enterrados (o mallas, sencillamente), pues constituyen el resultado natural que se obtiene cuando deben conectarse a tierra un número importante de aparatos dispersos, así como carpinterías y otros soportes metálicos existentes.

En estas instalaciones, es frecuente el que la máxima corriente de defecto puede presentar valores normalmente elevados, de forma que no es fácil conseguir una resistencia global a tierra lo suficientemente reducida para asegurar que, en ningún caso, se sobrepasen los valores de las tensiones de seguridad para las personas, en caso de contacto.

Cálculo del sistema de puesta a tierra [5], [6] , [12] y [16]

La realización del proyecto de una instalación de puesta a tierra exige que pueda establecerse el comportamiento de los distintos tipos de electrodos que se puedan adoptar para la realización de la misma.

Para los tipos más normales de electrodos (al menos, los de geometría más sencilla) existen expresiones que pueden utilizarse para la determinación de los valores de resistencia obtenidas con ellos así como los potenciales y gradientes correspondientes, permitiendo esto verificar la bondad del diseño preliminar del sistema de puesta a tierra elegido y, también, si es que en la evaluación de la corriente de falta se ha hecho intervenir la resistencia de tierra, el posible reajuste de aquélla, al valorar el desvío entre la estimación previa de la resistencia y la obtenida por el cálculo.

Si se adoptan combinaciones de electrodos, los cálculos son extremadamente laboriosos y complejos de forma que, generalmente, sólo podrán llevarse a cabo con la ayuda del ordenador. Tanto las expresiones correspondientes al empleo de electrodos simples como la descripción del procedimiento a seguir cuando se utilicen disposiciones más complejas no se recogerán aquí, al quedar, por su extensión, fuera del propósito de esta obra.

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA, POTENCIALES Y GRADIENTES

Se conoce como resistencia de puesta a tierra o resistencia de (una toma) de tierra, la que existe entre una toma de tierra y un punto, lo suficientemente alejado del terreno para que su potencial no se modifique sensiblemente cuando circule una corriente por el electrodo. Ese punto se considerará como el origen o referencia de los potenciales de todos los elementos, denominándose potencial absoluto la diferencia de potencial entre ellos y el punto lejano.

La resistencia de un sistema de puesta a tierra se determina por el cociente entre el potencial absoluto que alcanza y el valor de la corriente que circula por ella.

Sin embargo, para caracterizar el comportamiento de una puesta a tierra no basta con determinar su resistencia pues es preciso conocer, además, el potencial y el gradiente de potencial de los puntos de la superficie del terreno que rodean al electrodo.

El primero, para conocer la diferencia de potencial entre el electrodo y los puntos próximo a él; el segundo, para conocer la diferencia de potencial entre dos puntos próximos del terreno, cuyo valor viene expresado, con suficiente aproximación, por el citado gradiente.

Las dos diferencias de potencial indicadas constituyen, respectivamente, las llamadas tensiones de contacto y paso, –ya definidas en otro lugar– y que son fundamentales para el diseño y cálculo de una instalación de puesta a tierra.

IMPRECISIÓN DEL CÁLCULO PRÁCTICO DE LAS TOMAS DE TIERRA

Las incertidumbres sobre la resistividad del terreno, sus variaciones estacionales y las heterogeneidades del mismo –que ya se han comentado–, unidas a la más o menos buena calidad de los contactos, hacen que, en la práctica, el cálculo de las tomas de tierra no sea muy preciso.

A lo sumo, si se tiene una idea de las resistividades, se puede determinar el orden de magnitud de las resistencias y de los gradientes de potencial en sus cercanías o, inversamente, evaluar el orden de dimensión que hay que conferirles para obtener resistencias o gradientes dentro de los límites deseados.

En instalaciones de no muy gran extensión, es posible hacer uso de electrodos sencillos, simplificándose extraordinariamente el diseño de la puesta a tierra, ya que ese tipo de electrodos permite la formulación de planteamientos matemáticos conducentes a expresiones de relativa facilidad de aplicación.

Debe tenerse presente, no obstante su aparente precisión, que tales fórmulas teóricas únicamente proporcionarán resultados aproximados a los obtenidos, por mediciones, en la realidad, no sólo por la rigurosidad de los modelos matemáticos adoptados sino, también, por las simplificaciones que, a veces, se introducen, al amparo de la escasa variación de términos logarítmicos contenido dimensiones básicas, distancias o profundidades de enterramiento de los electrodos, para obtener expresiones fáciles de retener y suficientes en la práctica.

Para estos sistemas de puesta a tierra, de dimensiones relativamente reducidas, se acepta, sin cometer grandes errores, que la disipación de corriente es uniforme a lo largo del electrodo, supuesto éste en un medio homogéneo.

Haciendo uso de un método de cálculo como el basado en la descomposición del electrodo en infinitas esferas diferenciales, el potencial en un punto quedará determinado integrando el aporte de cada una de las esferas diferenciales, que disipa dl ; dada la discontinuidad que existe en el medio en que se halla el electrodo, –debida al plano que delimita el terreno con el aire–, se considera la existencia de dos medios diferentes para salvarla, constituyendo este planteamiento el método de las imágenes:

- Un medio infinito y homogéneo, en el cual se encuentra el electrodo objeto del análisis.
- Una imagen del mismo en el aire, con respecto al plano de tierra.

Si el electrodo de tierra lo forma un elemento de geometría simple (una pica, un conductor horizontal, etc.), la integración del aporte de las esferas diferenciales mencionadas conduce a la obtención de fórmulas matemáticas que permiten determinar, directamente, los valores de la resistencia de tierra y de las tensiones de paso y contacto.

Cuando el electrodo de tierra presenta una geometría más compleja o irregular (por ejemplo, anillos o pequeñas mallas, combinados ambos con picas, etc.), resulta imposible traducir el comportamiento del mismo mediante una fórmula y, entonces, la resistencia y el potencial puede establecerse (*método de Howe*) mediante la subdivisión del electrodo en elementos más simples, de comportamientos conocidos o sobre los que puedan plantearse modelos matemáticos adecuados, y recurrir, seguidamente, al teorema de la superposición –dado el carácter lineal de las variables analizadas–, que proporcionará los valores buscados como resultado de la suma de una serie de fórmulas, cada una de ellas correspondiente a los distintos elementos en que se ha subdividido el electrodo.

Utilizando este procedimiento, y que es perfectamente aplicable a todas las instalaciones de 3.^a categoría pero, en especial, a las muy numerosas y de carácter repetitivo, las compañías eléctricas han tipificado a una treintena de casos, con el auxilio de programas de ordenador, los sistemas de puesta a tierra de los centros de transformación AT/BT, recogiendo las superficies y dimensiones más usuales (de 2x2 hasta 8x4 metros) y contemplando, para cada uno de esos tipos, las configuraciones de:

- Bucle o anillo perimetral.
- Bucle con 4 picas verticales (en los vértices del recinto).
- Bucle con 8 picas (en los vértices y en la mitad de los lados del recinto).
- Picas alineadas, exteriores al Centro transformador.

Se consideran dos profundidades diferentes de enterramiento del bucle (0,5 y 0,8 m) y longitudes de 2, 4, 6 y 8 metros de las picas.

El resultado, en forma de tablas, presenta para cada uno de los recintos y los diferentes tipos de electrodos, las expresiones de las resistencias de puesta a tierra (K_r) y de las tensiones de paso (K_p) y contacto (K_c) pero, en lugar de facilitarlas en función de una gama de valores de la resistividad y de la corriente de puesta a tierra, están determinadas para una resistividad de 1 $\Omega \cdot \text{m}$ y una corriente de puesta a tierra de 1 A, de manera que, multiplicando, sencillamente, esas expresiones por el valor de la resistividad que se esté considerando y de la corriente de defecto que se haya calculado, se obtienen, fácilmente, los valores de la resistencia y de las tensiones de paso y contacto buscados.

Será, por tanto;

$$R_t = K_r \cdot \rho \quad V'_p = K_p \cdot \rho \cdot I_d \quad V'_c = K_c \cdot \rho \cdot I_d$$

Otra situación diferente es la planteada por los electrodos correspondientes a instalaciones de gran extensión (como los requeridos en centrales de generación y subestaciones), en que resulta imposible admitir la hipótesis de la disipación uniforme de corriente por los mismos

En estos casos, pueden obtenerse resultados bastante rigurosos siguiendo uno cualquiera de los procedimientos que se enuncian a continuación:

- Admitir, en principio, la disipación uniforme y aplicar, posteriormente, coeficientes correctores obtenidos de estudios experimentales sobre modelos en cubas electrolíticas (método de la IEEE).
- Hacer uso de métodos de cálculo numérico con ordenador, subdividiendo el electrodo filiforme (generalmente, una malla) en un número de pequeños segmentos elementales rectilíneos, tanto más elevado como compleja sea la geometría de la toma de tierra, a los que se les asignan intensidades de disipación diferentes, que pueden determinarse mediante el establecimiento de tantas ecuaciones como subdivisiones se hagan del electrodo, de forma que se cumpla la equipotencialidad del mismo.
- Utilizar un método iterativo, basado, también, en la citada equipotencialidad.

PROPIEDADES GENERALES DE LAS PUESTAS A TIERRA

Pueden citarse las siguientes:

- a) La resistencia de una toma de tierra, de forma y dimensiones dadas, es proporcional a la resistividad del terreno.

En efecto, considérese una toma de tierra en un terreno homogéneo; el aumento o disminución de la resistividad del terreno no modifica la distribución de las líneas de corriente pero hace variar, en la relación de aquéllas, todas las caídas de tensión locales para una corriente dada.

- b) La resistencia varía en razón inversa a las dimensiones lineales del electrodo, para tomas de tierra homotéticas.

Ello es así porque si bien las secciones de paso de corriente varían como el cuadrado de las dimensiones lineales, los trayectos de la corriente entre dos superficies equipotenciales lo hacen, solamente, con su valor, resultando la resistencia dividida por la relación de homotecia.

- c) La resistencia de las tomas de tierra de forma longitudinal depende poco de las dimensiones transversales y varía, aproximadamente, como la inversa de la dimensión predominante.

De no ser así, de las dos primeras propiedades resultaría que para obtener una resistencia dada en un terreno de resistividad 100 veces mayor, se requeriría un trabajo de excavación correspondiente a un volumen 10^6 veces mayor.

- d) A medida que el terreno es peor conductor, mayor es el interés en recurrir a tomas de tierra de forma muy alargada.
- e) La resistencia de una toma de tierra de forma simétrica respecto a un plano horizontal se reduce a la mitad cuando pasa de un semienterramiento a estar enterrada a profundidad muy grande.

Comprobaciones y correcciones [2] y [12]

Las etapas del proyecto del sistema de puesta a tierra que se van a describir y que deben abordarse después de haber calculado la resistencia de puesta a tierra, así como las tensiones de paso y contacto que pueden presentarse en el interior y exterior de la instalación, son:

- Comprobación de que las referidas tensiones no son excesivas.
- Investigación de las tensiones transferidas y de la forma de evitarlas.
- Corrección y ajuste del diseño preliminar del sistema de puesta a tierra.

COMPROBACIÓN DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Tal y como estaba redactado este paso, en la primera publicación de la RAT 13 –punto 7 del apartado 2.1, relativo al Procedimiento para la realización del proyecto de instalaciones de puesta a tierra–, que lo enunciaba como "cálculo de las tensiones aplicadas", carecía de sentido pues las tensiones aplicadas no se calculan sino que se miden.

Por eso, las modificaciones de la RAT, promulgadas por la Orden 27 de noviembre de 1987, indican que su redacción debe ser:

"Comprobar que las tensiones de paso y contacto calculadas en los puntos 5 y 6 son inferiores a los valores máximos definidos por las ecuaciones (2) y (3)"

Y, también, abundando en ello, las modificaciones insisten (final apartado 1.1):

"El proyectista de la instalación de tierra deberá comprobar, mediante el empleo de un procedimiento de cálculo sancionado por la práctica, que los valores de las tensiones de paso, V'_P , y de contacto, V'_c , que 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 del terreno, no superen, en las condiciones más desfavorables, las calculadas por las fórmulas (2) y (3) en ninguna zona del terreno afectada por la instalación de tierra.»

Sobre estos particulares, en instalaciones de 1.^a y 2.^a categoría, normalmente de extensión importante, debe señalarse que las tensiones de paso y contacto dentro de la instalación pueden disminuirse hasta donde se deseé, con tal de hacer más cerradas las retículas de la malla, ordinariamente empleada como electrodo de tierra, si bien la situación es diferente en la zona inmediatamente exterior al perímetro de la misma, donde deben estudiarse, con especial atención, los puntos próximos a sus esquinas.

Conviene, también, tener presente que la utilización de grava en la superficie interior de la instalación no garantiza que, en el exterior, no aparezcan tensiones excesivas; de la misma forma, habrá que estudiar con más detalle las tensiones que puedan surgir y resolver, localmente, los problemas con el fin de que sean admisibles, allí donde existan importantes irregularidades en la geometría del electrodo o en la resistividad del terreno. Merecen especial atención los mandos o palancas de interruptores, seccionadores, etc., en razón a una mayor probabilidad de aparición de condiciones adversas, por la presencia obligada de un operador en las proximidades de la estructura puesta a tierra, conviniendo que el dimensionado de la red de tierras haya contemplado esos lugares de forma preferente, para que las tensiones de paso y contacto estén ampliamente por debajo de los límites de seguridad.

Dado que el margen admisible para la tensión de contacto es reducido, el lograr que la tensión que se puede originar, en caso de defecto, no supere sus límites, puede representar en muchas situaciones, tener que establecer unos electrodos muy dimensionados, cuya configuración no será viable, físicamente, en instalaciones de reducida extensión como son, generalmente, las de 3.^a categoría y cuyo coste, de no existir esa limitación, sería difícilmente asumible.

Algunos centros de transformación de las compañías eléctricas se encuentran en esta situación que han resuelto, de una manera genérica, adoptando las medidas de seguridad adicionales siguientes:

Centros de Transformación interiores

Instalación de un mallazo electrosoldado, sobre el piso, con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, que formen una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m, conectada a la tierra general del centro en dos puntos, preferentemente opuestos, y que luego se cubre con una capa de hormigón de 10 cm de espesor, como mínimo (figura 52).

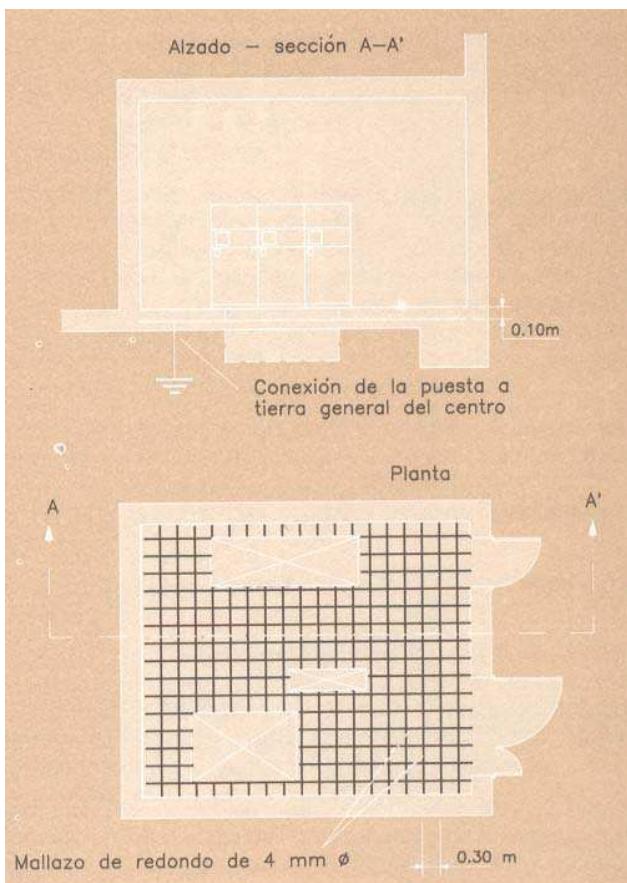


Figura 52. Como medidas adicionales para reducir las tensiones de contacto a valores despreciables, en los Centros de Transformación de interior se dispone de un mallazo electrosoldado.

Por otro lado, se dispone que las puertas y rejillas metálicas que den al exterior no tengan contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión a causa de defectos o averías.

Centros de Transformación exteriores, sobre poste

Colocación de un mallazo electrosoldado en torno al apoyo y hasta 1 m de las aristas exteriores de su base, de las mismas características que el descrito anteriormente e igualmente soldado, al menos en dos puntos, al sistema de tierra.

Sobre él, se cimenta una losa de hormigón, de espesor no inferior a 20 cm, que cubra, como mínimo, hasta 1,20 m de las aristas exteriores de la fundación del apoyo (figura 53).

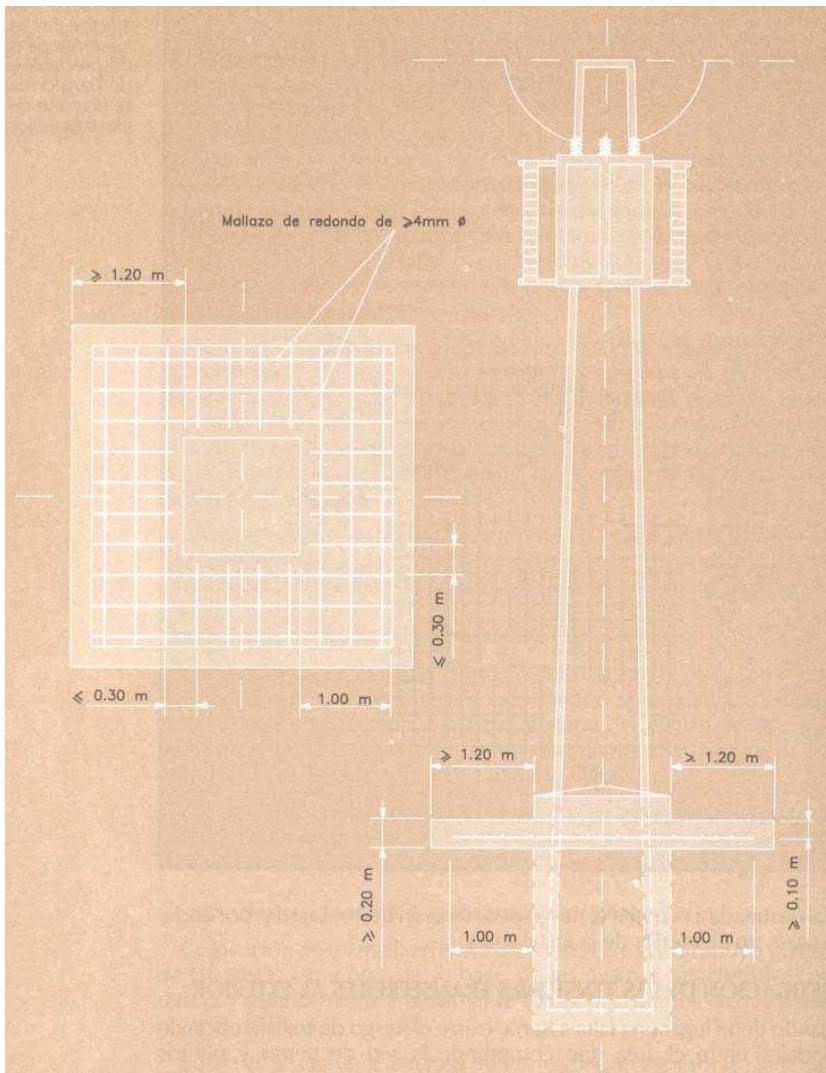


Figura 53. En los Centros de transformación exteriores, sobre poste, se recurre, también, al empleo de una superficie equipotencial para evitar las tensiones de contacto.

En uno y otro caso, el mallazo no se considera como parte del electrodo de puesta a tierra –situación que contribuiría a reducir la resistencia de puesta a tierra de la instalación sino, únicamente, como superficie equipotencial destinada a eliminar el riesgo de la tensión de contacto y, por ende, la de paso, en el interior de la instalación.

INVESTIGACIÓN DE LAS TENSIONES TRANSFERIBLES AL EXTERIOR

Cuando tiene lugar una falta a tierra, existe el riesgo de transferencia de potenciales entre el área que comprende la red de tierras y puntos exteriores de la misma, incluso sin nexo metálico de unión, que pueden alcanzar valores importantes de potencial dando lugar a tensiones peligrosas, de magnitud próxima a la que presenta el sistema de puesta a tierra.

Aunque, como se ha visto, es obligado que los elementos metálicos que salen fuera del recinto de la instalación estén conectados a la instalación de tierra general en varios puntos, si su extensión es grande, la RAT 13, en el punto 8 de su apartado 2.1.8, especifica que se efectúe una "investigación de

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 estudio de las formas de eliminación o reducción."

Estos aspectos, tratándose de instalaciones de nueva construcción, estarán contemplados desde la fase inicial del proyecto, al conocerse qué instalaciones, ajenas a la eléctrica, existen o van a existir en el subsuelo o en la superficie, con lo que se habrán aplicado las soluciones adecuadas para evitar las posibles transferencias.

Debe tenerse presente, no obstante, que si se desea sustraer eficazmente, por ejemplo, una canalización de las elevaciones de tensión de una red de tierras próximas, no bastará con suprimir cualquier unión metálica entre ellas sino que será preciso reducir, también a un débil valor, el acoplamiento por el terreno.

Si son canalizaciones desnudas, esto no puede conseguirse más que distanciándolas considerablemente entre sí, mientras que si se recurre al aislamiento de la canalización, puede adoptarse dos sistemas: interponer juntas aislantes, que desolidaricen la parte de la canalización próxima a la red de tierras de las más alejadas de ella, de longitud adecuada para asegurar un desacoplamiento suficiente, o hacer uso de recubrimientos aislantes, estudiados para que soporten las tensiones susceptibles de aparecer entre la canalización y el suelo próximo.

En Centros de Transformación, deberá estudiarse la posible transferencia de tensiones al exterior, a través de la puesta a tierra del neutro.

CORRECCIÓN Y AJUSTE DEL DISEÑO INICIAL, ESTABLECIENDO EL DEFINITIVO

El último punto del apartado 2.1 de la RAT, bajo el título del epígrafe, establece que:

"Después de construida la instalación de tierra, se harán las comprobaciones y verificaciones precisas "in situ", tal como se indica en el apartado 8.1 (Mediciones de las tensiones de paso y contacto aplicadas) y se efectuarán los cambios necesarios que permitan alcanzar valores de tensión aplicada inferiores o iguales a los máximos admitidos".

Obviamente, estos cambios también deberán realizarse antes de construir la instalación, en la etapa de comprobación de las tensiones de paso y contacto, V'_p y V'_c , que no son las aplicadas, si resultan superiores a las máximas que se pueden aceptar en la instalación, V_p y V_c , determinadas por las fórmulas (2) y (3). En efecto, si los cálculos basados en el diseño preliminar ya proporcionan indicaciones de que pueden aparecer diferencias de potencial excesivas en la instalación, deberán buscarse posibles soluciones y adoptar, en cada caso, la más idónea.

Pueden apuntarse como tales las que, a continuación, se enumeran:

- Disminución de la resistencia de la red de tierras, ampliando en extensión su cobertura, el número de electrodos o su longitud, lo que se traduce en una reducción del potencial de la misma.
- Limitación del valor de la corriente de cortocircuito o reducción del tiempo de eliminación de la falta.
- Utilización de disposiciones especiales en los electrodos, como puede ser el recurrir a electrodos de atenuación, que consiste en hacer uso de electrodos en anillo –envolviendo los puntos de potencial máximo–, unidos entre sí y colocados a profundidades crecientes con el radio del anillo, como muestra la figura 55.

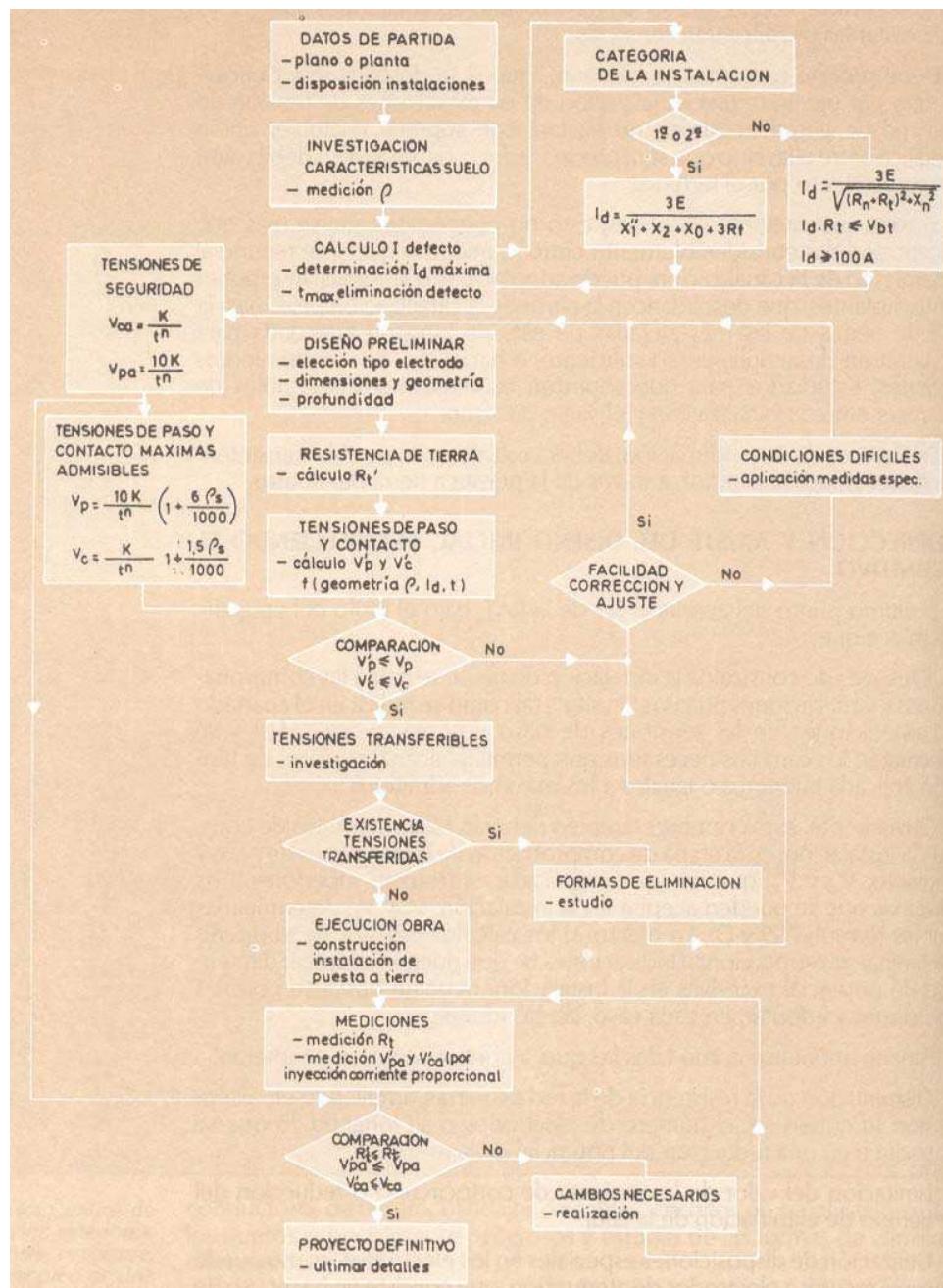


Figura 54. Diagrama de bloques de las etapas del procedimiento de diseño de las instalaciones depuesta a tierra según el apartado 2.1 de la RAT 13.

A este efecto, deben contemplarse, también, las indicadas en el capítulo Instalación, bajo el apartado *Condiciones difíciles de puesta a tierra*.

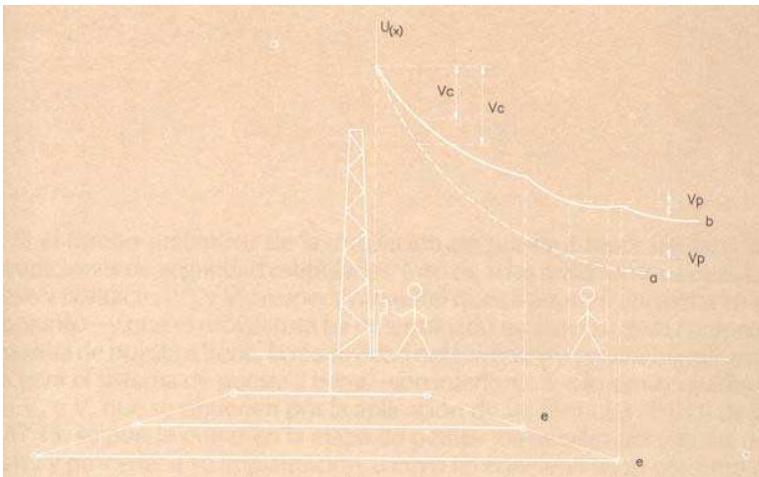


Figura 55. El empleo de electrodos de atenuación, como el aquí mostrado, reduce, considerablemente, los valores de las tensiones de paso y contacto que se desarrollan en las cercanías del electrodo de tierra.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Las etapas que deben seguirse en el procedimiento de diseño de una instalación de puesta a tierra y que son objeto del apartado 2.1 de la RAT 13, se han traducido, para una mayor claridad, en un diagrama de bloques, tal como se ha representado en la figura 54.

Instalación del sistema de puesta a tierra [4], [5] y [16]

Si el diseño preliminar de la instalación de puesta a tierra satisface las condiciones de seguridad estipuladas, esto es, si las máximas tensiones de paso y contacto (V'_p y V'_c respectivamente) que se pueden presentar en el conjunto –y que el proyectista ha determinado en función de la corriente máxima de puesta a tierra, la resistividad del terreno y la geometría adoptada para el sistema de puesta a tierra– son inferiores o, a lo sumo, iguales a las V_p y V_c que se obtienen por la aplicación de las fórmulas (2) y (3) de la RAT 13, se puede entrar en la etapa de perfilar los detalles del sistema de tierra y proceder a su implantación, a cuyo fin conviene tener presente el contenido de este capítulo, que versa sobre aspectos de la instalación del mismo, las disposiciones particulares que deben observarse y algunas reglas para resolver aquellos casos que respondan a condiciones difíciles de puesta a tierra.

INSTALACIÓN DE LÍNEAS DE TIERRA

Sobre este particular, la RAT 13, en su apartado 3.2, especifica que:

"Los conductores de las líneas de tierra deben instalarse procurando que su recorrido sea lo más corto posible, evitando trazados tortuosos y curvas de poco radio. Con carácter general, se recomienda que sean conductores desnudos instalados al exterior de forma visible. En el caso de que fuera conveniente realizar la instalación cubierta, deberá serlo de forma que pueda comprobarse el mantenimiento de sus características."

En las líneas de tierra no podrán insertarse fusibles ni interruptores. Los empalmes y uniones deberán realizarse con medios de unión apropiados, que aseguren la permanencia de la unión, no experimenten al paso de la corriente calentamientos superiores a los del conductor y estén protegidos contra la corrosión galvánica."

Abundando en ello, puede agregarse que las uniones en el trayecto de las líneas de tierra deben requerir el empleo de útiles para deshacerlas y, especialmente en los puntos de puesta a tierra, donde la línea de enlace con el electrodo penetra en el terreno, pueden ser convenientes medidas protectoras tales como refuerzo de las secciones y baños o capas protectoras.

Las conexiones a las líneas de tierra de masas o estructuras deben efectuarse directamente o por derivaciones, sin posibilidad de interrumpir la continuidad, como resultaría disponiéndolas en serie.

INSTALACIÓN DE ELECTRODOS

Es el apartado 3.5 de la RAT el que indica que:

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

Se procurarán utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación del electrodo 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."

También en el punto 1.2 se hace referencia a la instalación cuando se señala que:

"Los electrodos y demás elementos metálicos llevarán las protecciones precisas para evitar corrosiones peligrosas durante la vida de la instalación".

Siempre es bueno remarcar que los electrodos de tierra deben estar en buen contacto con el terreno que los recibe, siendo ventajoso que éste presente una granulometría fina, tanto en lo que concierne al contacto como en lo que respecta a la retención de humedad.

Cuando el terreno no es favorable, puede ser útil mejorar el contacto disponiendo los electrodos en un lecho de tierra grasa, de carbón de madera molido, etc., compactando el terreno alrededor, aunque todo ello siempre en función del costo de los procedimientos de mejora, que depende del volumen de terreno a tratar.

Las zanjas tendrán, a poder ser, una profundidad entre 0,5 a 1 m, mientras que las fosas para disponer placas o anillos de pequeño desarrollo, deben ser más profundas, con el fin de reducir las influencias estacionales sobre la resistencia.

Las placas son, corrientemente, de 1 x 0,5 m y es preferible disponerlas verticales, de tal forma que su borde superior esté, si es factible a 1 m, como mínimo, de profundidad.

Las picas pueden hincarse oblicuamente cuando esto permite penetraciones de mayor longitud.

Por último, destacar que debido a la imposibilidad que supone, generalmente, la inspección visual de los electrodos de puesta a tierra, es conveniente prever que, aún en el caso de daño mecánico de una de sus partes, siempre quede, al menos, un conductor que de continuidad al conjunto.

PROCEDIMIENTOS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED DE TIERRAS

La bondad de una red de puesta a tierra depende, en gran parte, —a semejanza de los circuitos activos de una instalación— de la calidad de las uniones de los elementos constitutivos, acompañada de una buena resistencia a la corrosión, además de las calidades de resistencia mecánica y de contacto eléctrico indispensables. Las conexiones entre las líneas de tierra y los electrodos deben ejecutarse de manera que garanticen uniones conductoras seguras y permanentes y en el caso de uniones entre metales diferentes, tanto si están enterrados como expuestos a la intemperie, es necesaria una protección mediante un recubrimiento o tratamiento adecuado.

Por otro lado, en el todo que constituye una red de tierras no debe suceder que el simple desmontaje o interrupción de una conexión pueda, en un momento determinado, interrumpir o modificar la configuración del sistema.

A tal efecto, deben evitarse las conexiones mecánicas realizadas entre los electrodos de tierra y en los puntos de cruzamiento, aconsejándose la conexión por procedimientos metalúrgicos.

Tampoco deben sacarse al exterior del terreno bucles de los circuitos enterrados, destinados a la conexión de las carpinterías metálicas y aparatos que requieran la puesta a tierra de sus masas.

Es más racional efectuar un latiguillo que salga al exterior, mediante una derivación en T, realizada con soldadura o aluminotermia, para proporcionar, en el llamado punto de puesta a tierra, la conexión al aparato o elemento metálico que la requiera o a la línea de tierra, que acaba, también, proporcionándosela.

Por razones de seguridad, conviene reunir al menos dos elementos, diametralmente opuestos, de un mismo equipo metálico a la red de tierra siendo, preferentemente, los medios de conexión a utilizar la

soldadura eléctrica o la oxiacetilénica (con un metal de aportación adecuado) o la unión por procedimientos aluminotérmicos.

DISPOSICIONES PARTICULARES DE PUESTA A TIERRA

Elementos de la construcción

En el apartado 7.4 de la RAT se lee:

"Los elementos metálicos de la construcción en edificaciones que alberguen instalaciones de alta tensión, deberán conectarse a tierra de acuerdo con las siguientes normas:

En los edificios de estructura metálica, los elementos metálicos de la estructura deberán ser conectados a tierra. En estas construcciones, los restantes elementos metálicos como puertas, ventanas, escaleras, barandillas, tapas y registros, etc., así como las armaduras en edificios de hormigón armado, deberán ser puestos a tierra cuando *pudieran* ser accesibles y ponerse en tensión por causa de defectos o averías.

Cuando la construcción estuviera realizada con materiales tales como hormigón en masa, ladrillo o mampostería, no es necesario conectar a tierra los elementos metálicos anteriormente citados, más que cuando pudieran ponerse en tensión por causa de defecto o averías y, además, pudieran ser alcanzados por personas situadas en el exterior de los recintos de servicio eléctrico".

Estructuras metálicas que constituyen o franquean el límite de una instalación eléctrica

Las consideraciones de seguridad pueden tener aspectos antagónicos según que se considere el exterior o interior de una instalación eléctrica, debiendo sopesarse, entonces, los diversos riesgos.

Vallas y cercas metálicas

La equipotencialidad en el recinto de una instalación eléctrica delimitada por una valla está favorecida, en caso de defecto de aislamiento, por la conexión de los elementos conductores de la valla al circuito de tierra.

Sin embargo, las tensiones de contacto con la valla desde el exterior tenderán a valores más elevados que en la ausencia de tales conexiones, de forma que si hay una probabilidad importante de tránsito y, sobre todo, de estacionamiento de público en la proximidad inmediata de la cerca, es preferible, a menudo, no conectarla a la red de tierra y evitar que ésta o canalizaciones metálicas interiores se encuentren separadas menos de dos metros de la valla, siendo la distancia función de la importancia del acoplamiento entre ambas.

La preocupación por los gradientes de potencial en las proximidades de la valla se acrecenta cuando las corrientes de defecto son muy elevadas, las dimensiones de la instalación pequeñas, el suelo muy resistente y los alrededores del cierre muy transitados.

Cuando la valla no esté unida ala red de tierra y existan líneas aéreas que la sobrevuelen, con el riesgo de que, en la rotura de algunas de ellas, quede retenido un conductor sin que toque al terreno en otros puntos, convendrá dotarla de puesta a tierra para asegurar la circulación de una corriente de defecto que provoque el disparo de las protecciones de la línea y dimensionarla de forma que los potenciales, especialmente de contacto, se reduzcan, dentro y fuera del cierre, a límites aceptables para intensidades de defecto del mismo orden que las previstas en la instalación.

Estas circunstancias están contempladas por la RAT 13 que, en su apartado 7.6, refiriéndose a los cerramientos, comenta:

"Para su puesta a tierra, pueden adoptarse diversas soluciones en función de las dimensiones de la instalación y características del terreno.

- a) Pueden ser incluidas dentro de la instalación de tierra general y ser conectadas a ella.
- b) Pueden situarse distantes de la instalación de tierra general y conectarse a una instalación de tierra separada o independiente.
- c) Pueden situarse distantes de la instalación de tierra general y no necesitar instalación de tierra para mantener los valores fijados para las tensiones de paso y contacto."

Puertas de acceso

Las probabilidades de tránsito, de estacionamiento y de contactos tienden a ser mayores delante de la puerta de acceso a una instalación eléctrica que alrededor del resto del cierre de la misma.

En consecuencia, generalmente es preferible evitar la conexión voluntaria de las puertas metálicas a la red de tierras, que no hará más que agravar el peligro para las personas que acceden desde el exterior, pero puede ser que esa conexión exista por construcción o que sea difícil asegurar un buen aislamiento, de manera que la ausencia de unión eléctrica entre puertas y red de tierras no evita, si el peligro lo justifica, de tener que disponer electrodos de repartición del campo delante del umbral o de recurrir a revestimientos de gran resistividad.

La seguridad en el interior de las instalaciones, sobre todo cuando son poco espaciosas, exige que se evite solidarizarlas con todo potencial exterior diferente del de la red de puesta a tierra.

Lo reglamentado sobre ellas ya se ha expuesto al tratar sobre los elementos de la construcción.

Raíles

Las diferencias de potencial entre ellos y el terreno que puedan aparecer en el interior de la instalación, cuando circule una corriente a tierra, es posible suprimirlas o reducirlas al mínimo conectándolos a la red de tierras, mejorando así las uniones que, de hecho, existen por acoplamientos, incluso en ausencia de toda conexión intencional.

Es buena medida de precaución establecer una esmerada conexión equipotencial entre los mismos y los dispositivos que los sobrevuelen, como puentes rodantes, por ejemplo.

No obstante, las diferencias de potencial que se eviten en el interior, pueden transferirse al exterior.

Si los raíles están en contacto directo con el suelo, se los puede considerar como una extensión de las tomas de tierra y calcular la fracción de la corriente que los recorre que, para longitudes moderadas, será del orden de la relación entre la longitud simple de los raíles y la suma de esta longitud y el perímetro de la instalación, con lo que la tensión de contacto entre rail y el terreno vendrá dada por el semiproducto de la resistividad del terreno y la corriente que circule, por metro de rail.

Si los raíles son de gran longitud, la vía debe tratarse como una larga canalización en que las caídas longitudinales no serán despreciables, resultando, en general, tensiones locales moderadas.

Cuando el examen de la situación conduzca a pensar que subsiste un peligro apreciable, una medida de seguridad puede consistir en separar la parte de la vía situada en la instalación de la exterior por una cierta longitud de raíles aislados de una y otra parte, suficiente para que no pueda ser shuntada al descansar sobre el balasto.

En torno a estos elementos, dice la RAT (apartado 7.5):

"Los elementos metálicos que salen fuera del recinto de la instalación, tales como raíles y tuberías, deben estar conectados a la instalación de tierra general en varios puntos si su extensión es grande. Será necesario comprobar si estos elementos pueden transferir al exterior tensiones peligrosas, en cuyo caso deben adoptarse las medidas necesarias para evitarlo mediante juntas aislantes u otras medidas, si fuera necesario."

MEDIDAS A ADOPTAR EN CONDICIONES DIFÍCILES DE PUESTA A TIERRA

Ante situaciones de imposibilidad técnica de mantener los valores de las tensiones de paso y contacto dentro de los límites de seguridad (bien sea por los valores de la resistividad del terreno, de la corriente de puesta a tierra o del tiempo de eliminación de la falta) y, también, cuando resulte económicamente desproporcionando su consecución, deberá recurrirse al empleo de medidas adicionales de seguridad con el fin de reducir los riesgos para las personas y los bienes.

Las disposiciones más idóneas que se pueden apuntar son las destinadas a suprimir el riesgo mismo, impidiendo la exposición a las tensiones de paso y contacto en las zonas peligrosas, como pudiera ser mediante la utilización de cerramientos u obstáculos de protección (fijados en forma segura y resistente a los esfuerzos mecánicos usuales que puedan presentarse en su función) para hacer inaccesibles tales zonas.

Por otro lado, las medidas de seguridad contra las tensiones producidas por la circulación de intensidades de puesta a tierra, pueden basarse en dos principios diferentes, por supuesto, combinables: aislando o igualando potenciales.

En efecto, el peligro de contacto con un elemento bajo tensión se elimina ya sea:

- a) protegiéndolo de todo otro objeto o medio conductor con el que se pueda contactar simultáneamente, mediante un aislamiento o, al menos, por un revestimiento que presente una resistencia suficiente para limitar el paso de corriente a través del cuerpo a un nivel no peligroso o
- b) según el otro principio, haciendo que estén, prácticamente, al mismo potencial uno y otro.

De la utilización del primer principio se deriva una medida para aumentar la seguridad, a base de disponer suelos o pavimentos que aislen suficientemente de tierra las zonas de servicio peligrosas.

Este proceder se traduce en sustituir, en las expresiones de las tensiones máximas de paso y contacto admisibles en la instalación, la resistividad superficial del terreno por otra, ρ_s' , mucho más importante (del suelo o pavimento con elevada capacidad aislante), lo que permitirá aceptar valores más elevados para esas posibles tensiones presentes, manteniendo, sin embargo, las aplicadas dentro del límite de seguridad Kit'.

Siguiendo con el mismo principio, aunque sólo válido para las tensiones de contacto, podría recurrirse a la disposición consistente en aislar todas las empuñaduras o mandos que hayan de ser tocados.

La intercalación de aisladores entre tales elementos y los órganos sobre los que actúan, o el revestimiento de los mismos con aislantes adecuados, hace que la tensión de contacto permisible que se presente en la instalación pueda tener por valor:

$$V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5 \rho_s + R_a}{1000} \right)$$

tanto más elevada cuanto mayor sea la resistencia del aislamiento, R_a .

Naturalmente, en esta situación, las partes metálicas accesibles de los elementos aislados no deben ser puestas a tierra.

Basado en el segundo principio, está el sistema de protección a base de establecer conexiones equipotenciales entre la zona donde se realice el servicio y todos los elementos conductores accesibles desde la misma.

Esto se consigue uniendo todas las masas de la instalación a proteger, entre sí y a los elementos conductores simultáneamente accesibles, con lo que se impide que puedan aparecer, en un momento dado, diferencias de potencial peligrosas entre ambos.

Esta medida puede incluir, también, la unión de las conexiones equipotenciales a tierra, evitando así, igualmente, las diferencias de potencial que puedan presentarse entre las masas o elementos conductores y el suelo, lo que supondrá una medida de protección completa, pero solamente en la zona donde sea utilizada, ya que estas conexiones equipotenciales pueden dar lugar a poner bajo tensión elementos metálicos muy separados del lugar donde se haya producido un defecto a masa, alcanzando, incluso, a lugares desprovistos de instalación eléctrica.

En consecuencia, el empleo de este sistema de protección requiere del análisis previo, en cada caso, de las situaciones que puede crear su aplicación, ya que será preciso, generalmente, introducir partes aisladas en los elementos conductores unidos eléctricamente a las masas, en particular, en raíles y conducciones metálicas diversas, para evitar la propagación de un defecto a masa a otros lugares desprovistos de una medida de protección adecuada.

Esta extensión de la zona en cuyos límites se pueden plantear problemas de seguridad es la contrapartida de este sistema, que tiene la ventaja de poderse realizar simplemente, con pocos gastos y con una fiabilidad satisfactoria.

Del conocimiento de que la disposición aislada de los conductores que enlazan las líneas principales de tierra con el electrodo o conjunto de electrodos de la toma de tierra, disminuye los potenciales y sus gradientes en la superficie del terreno, puede derivarse otra medida de seguridad.

Razonando para un caso usual como es un electrodo cilíndrico vertical o pica, sucede que para una misma longitud útil de electrodo, si se entierra su cabeza a una profundidad h y se establece la conexión con ella mediante conductor aislado, se consigue la misma reducción del gradiente máximo que la lograda con una valla rodeando a la pica no aislada, a una distancia de ella de 3 o 4 h .

La figura 56 muestra, en trazo continuo, el potencial y su gradiente cuando la referida conexión está aislada y en trazo discontinuo cuando está en contacto con el terreno.

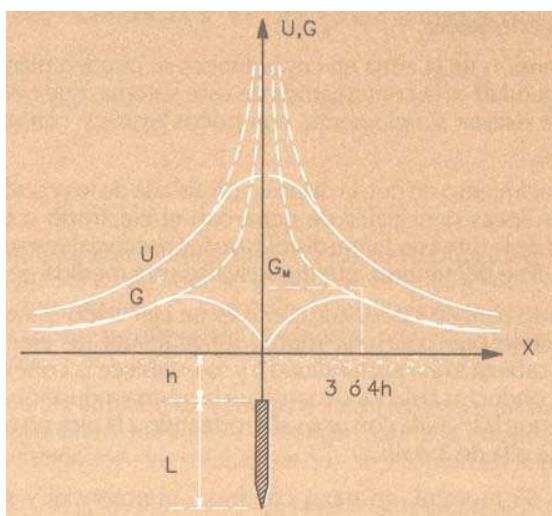


Figura 56. El aislamiento de la conexión a una pica, con su cabeza enterrada a la profundidad h , reduce, para una misma longitud útil del electrodo, el potencial el gradiente máximo a vares semejantes a los conseguidos mediante un vallado, que rodeara a la pica, a una distancia de 3 o 4 h metros.

En base a ello, se puede citar la posibilidad de *aislar los* conductores de tierra a su entrada en el terreno, debiéndose resaltar, no obstante, que si bien esta medida puede situar la tensión de paso dentro de los límites admisibles, no sucede lo mismo con la de contacto.

Aparte de las posibilidades aquí recogidas (que son las enumeradas por la RAT, en su apartado 2.2) y de otras que pudieran adoptarse, debe disponerse el suficiente número de rótulos avisadores, con instrucciones adecuadas, en las zonas peligrosas y como medios de protección adicionales, basados en el aislamiento, el personal de servicio debe tener, a su disposición, calzado aislante, guantes, banquetas o alfombrillas aislantes.

¿Tierras únicas o separadas? [12] y [16]

En este capítulo, se pretenden clarificar los conceptos sobre los diferentes tipos de puesta a tierra que se distinguen –reminiscencias de anteriores disposiciones legales– (*), con el fin de facilitar la respuesta a la interrogación de la cabecera, que suele surgir en el proyecto de un sistema de puesta a tierra.

Se comentarán, también las ventajas e inconvenientes de su interconexión y las disposiciones particulares que rigen para los Centros de Transformación, describiéndose las soluciones que se adoptan en la práctica.

En resumen, el proyectista de esos centros puede optar por:

- a) Unirlas, si verifica que no se producirán tensiones elevadas en la baja tensión, o bien lo es de aplicación lo legislado sobre centros de transformación alimentados por cables subterráneos.
- b) Disponerlas separadas, en cuyo caso debe cumplimentar lo prescrito sobre el aislamiento entre las instalaciones de tierra.

PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN

En terminología (RAT 01), se describe así:

"Es la conexión directa a tierra de las partes conductoras de los elementos de una instalación no sometidos normalmente a tensión eléctrica, pero que pudieran ser puestos en tensión por averías o contactos accidentales, a fin de proteger a las personas contra contactos con tensiones peligrosas." Y en el apartado 6.1 de la RAT 13, bajo este mismo epígrafe, se indica:

"Se pondrán a tierra las partes metálicas de una instalación que no estén en tensión normalmente pero que puedan estarlo a consecuencia de averías, accidentes, descargas atmosféricas o sobretensiones.

Salvo las excepciones señaladas en los apartados que se citan, se pondrán a tierra los siguientes elementos:

- a) Los chasis y bastidores de aparatos de maniobra.
- b) Las envolventes de los conjuntos de armarios metálicos (Ver apartado 7.3).
- c) Las puertas metálicas de los locales (Ver apartado 7.4).
- d) Las vallas y cercas metálicas (Ver apartado 7.6).
- e) Las columnas, soportes, pórticos, etc.
- f) Las estructuras y armaduras metálicas de los edificios que contengan instalaciones de alta tensión (Ver apartado 7.4).
- g) Los blindajes metálicos de los cables (Ver apartado 7.5).

* Deben significarse que la distinción entre tierras de protección y servicio no tiene, en la actualidad, un verdadero sentido físico, al no existir una instalación específica que reúna, exclusivamente, las puestas a tierra de protección y otra, separada, para las puestas a tierra de servicio, sucediendo, por el contrario, que una misma línea de tierra, recibe, indistintamente, conexiones de puesta a tierra de una y otra naturaleza y constituye, así, lo que se denomina una tierra general.

- h) Las tuberías y conductos metálicos (Ver apartado 7.5).
- i) Las carcchas de transformadores, generadores, motores y otras máquinas.
- j) Los hilos de guarda o cables de tierra de las líneas aéreas".

PUESTA A TIERRA DE SERVICIO

Su definición según RAT 01, es la siguiente:

"Es la conexión que tiene por objeto unir a tierra *temporalmente* parte de las instalaciones que están normalmente bajo tensión o permanentemente ciertos puntos de los circuitos eléctricos de servicio.

- Directas: cuando no contienen otra resistencia que propia de paso a tierra.
- Indirectas: cuando se realizan a través de resistencias o impedancias adicionales.

recogiendo el apartado 6.2 de la RAT 13 las partes que reciben ese tipo de puesta a tierra:

"Se conectarán a la tierra los elementos de la instalación necesarios y entre ellos:

- a) Los neutros de los transformadores que lo precisen, en instalaciones o redes con neutro a tierra de forma directa o a través de resistencias o bobinas.
- b) El neutro de los alternadores y otros aparatos o equipos que lo precisen.
- c) Los circuitos de baja tensión de los transformadores de medida.
- d) Los limitadores, descargadores, autoválvulas, pararrayos, para eliminación de sobretensiones o descargas atmosféricas.
- e) Los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra".

INTERCONEXIÓN DE LAS TOMAS DE TIERRA

La interconexión de las diversas tomas de tierra –de servicio y protección– de una instalación permite obtener, con el mínimo costo, la resistencia global más pequeña así como reducir las diferencias de tensión locales entre las partes de la instalación a su mínima expresión.

También es el sistema que, de la forma más simple, permite prever el comportamiento de las partes, bajo cualquier circunstancia, sin necesidad de conocer los acoplamientos existentes, a veces mal definidos o mal controlados, como es el caso de dos sistemas de tierra independientes que puedan quedar reunidos, inadvertidamente, a consecuencia de trabajos en la instalación. Este último caso se presenta, sobre todo, para la tierra del punto neutro de baja tensión de los transformadores que alimentan a consumidores distantes, desde un Centro de Transformación. En caso de defecto de aislamiento entre la alta tensión y las masas de esa instalación, la interconexión de la tierra del neutro de baja tensión (tierra de servicio) con la tierra de las masas de la instalación (tierra general, de protección y servicio) propagaría a aquéllos un potencial que podría, en ciertos casos, ser excesivo.

Resulta, entonces, indicada la separación de una y otra tierra, salvo que el examen de la situación, teniendo en cuenta los valores de las corrientes de defecto y las resistencias de tierra, muestre que la interconexión no reviste peligro.

Cuando se establezca la separación de los circuitos de tierra, deben tomarse las precauciones necesarias para que no resulte inoperante, debiendo estar las tomas de tierra separadas suficientemente alejadas para que el acoplamiento por el terreno quede limitado a un valor pequeño y aislados los conductores o aparatos conectados a una toma de tierra diferente de la general, respecto a ella, para un valor de la tensión al menos igual al susceptible de aparecer entre los circuitos de tierra, pormenores éstos que se analizan seguidamente.

Sobre la interconexión de las tierras, el apartado 6.3 de la RAT 13 concreta que: "Las puestas a tierra de protección y servicio de una instalación deberán interconectarse, constituyendo una instalación de tierra general.

Excepcionalmente, de esta regla general deben excluirse aquellas puestas a tierra a causa de las cuales puedan presentarse, en algún punto, tensiones peligrosas para las personas, bienes o instalaciones eléctricas.

En este sentido, se preverán tierras separadas, entre otros, en los casos siguientes:

- Los señalados en la presente instrucción para Centros de Transformación.
- Los casos en que fuera conveniente separar de la instalación de tierra general los puntos neutros de los devanados de los transformadores.
- Los limitadores de tensión de las líneas de corriente débil (telefónicas, telegráficas, etc.) que se extiendan fuera de la instalación.

En las instalaciones en las que coexisten instalaciones de tierra separadas o independientes, se tomarán medidas para evitar el contacto simultáneo inadvertido con elementos conectados a instalaciones de tierra diferentes, así como la transferencia de tensiones peligrosas de una a otra instalación."

Señalándose, en el apartado específico para los C.C.T.T., 7.7.1 de la RAT, que:

"Para evitar tensiones peligrosas, provocadas por defectos en la red de alta tensión, los neutros de baja tensión de las líneas que salen fuera de instalación general, pueden conectarse a una tierra separada."

SEPARACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO DE B.T. DE LA GENERAL DEL CENTRO

La circulación de corriente por la red de puesta a tierra, como consecuencia de un defecto de aislamiento en la instalación, origina una elevación del potencial de aquélla que, para una determinada magnitud de la corriente de defecto, depende del valor de su resistencia de tierra.

En la figura 57, se muestra el esquema simplificado de la red, en el caso más usual de efectuar la puesta a tierra del neutro de A.T. mediante una reactancia limitadora, en la hipótesis de un defecto a tierra franco en la instalación, pudiendo observar como la tensión simple del sistema ($U/\sqrt{3}$) se reparte, vectorialmente, entre las caídas de tensión correspondientes a la resistencia de puesta a tierra general de la instalación (R_t) y la reactancia limitadora (X_L), al suponer despreciable la impedancia del circuito existente entre ellas.

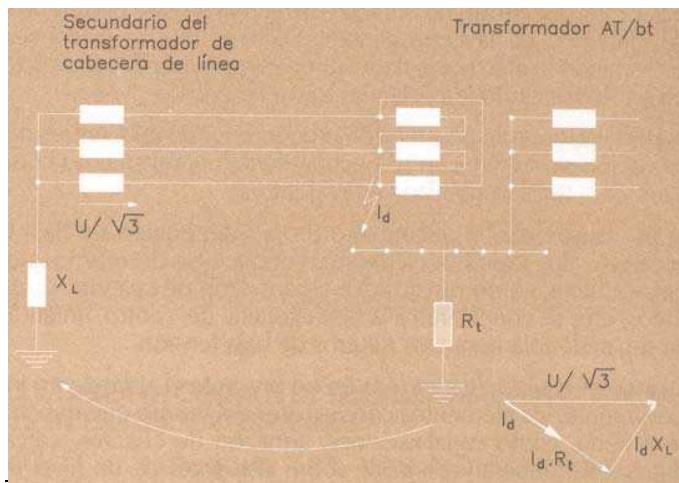


Figura 57. Representación esquemática de una red de A.T., puesta a tierra a través de una reactancia limitadora, con defecto a tierra en una de las fases, a la entrada de la instalación (ya se indicó, en relación con la figura 48, que aquella disposición, adoptada cuando no es accesible el punto neutro del transformador, es equivalente a la aquí mostrada).

Para garantizar que, en esas condiciones, el neutro de la baja tensión no alcance tensiones elevadas que puedan afectar a las instalaciones de los usuarios –con el consiguiente peligro para las personas y el material–, si está unido a la tierra general del centro de transformación, puede ser necesario conectarlo a una puesta a tierra particular, que guarde una separación conveniente con respecto a la tierra general y que será función de la resistividad del terreno y de la intensidad de defecto.

La máxima diferencia de potencial que puede aparecer entre el neutro de baja tensión y una tierra lejana, no afectada, debe situarse por debajo de 1000 V, valor que se establece al tener presente la corta duración de estas sobretensiones –lo que hace que deban ser contempladas, por tanto, como tensiones de ensayo, en vez de nominales– y lo indicado por el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión en su Instrucción MIBT017, que fija, como tensión de ensayo para las instalaciones interiores, $2U + 1000$ V, durante 1 minuto (siendo U la tensión máxima de servicio), con un mínimo de 1500 V, recogiéndose también esta misma cifra en la MI BT 031 como tensión de ensayo, a mantener durante 1 minuto, en los receptores. Al tratarse de instalaciones que puede que ya estén en servicio y, de acuerdo con el criterio que se suele aplicar en esos casos (tensión de ensayo no superior al 80% del valor máximo), resulta:

$$U = 0,8 \cdot 1500 = 1200 \text{ V}$$

de forma que el valor de 1000 V adoptado incluye un margen de garantía suficiente.

Para que la tensión inducida sobre el electrodo de puesta a tierra del neutro no supere el mencionado valor al producirse un defecto a tierra, deberá situarse el electrodo de este último a una determinada distancia tal que, en el punto de su instalación, la tensión inducida por la tierra general sea inferior.

Puede determinarse la tensión inducida sobre el electrodo de puesta a tierra del neutro asimilando, el sistema de tierra general, a una semiesfera que, como ya se ha visto, induce, a una distancia x , una tensión determinada por:

$$U_x = \frac{\rho \cdot I_d}{2 \cdot \pi \cdot x}$$

de donde, imponiendo que $U < 1000$ V, se obtiene, al despejar x :

$$x \geq \frac{\rho \cdot I_d}{2000 \cdot \pi}$$

AISLAMIENTO ENTRE LAS INSTALACIONES DE TIERRA

Al conectar el neutro de baja tensión a una puesta a tierra separada, la diferencia de potencial que resulta entre ella y la tierra general de la instalación (que puede alcanzar el valor $R_t \cdot I_d$ si el neutro se aleja suficientemente) se presentará:

- Para el transformador, entre las bornas de *b.t.* y su cuba.
- En el cuadro de baja tensión, entre los elementos activos y la carcasa o armazón del mismo (supuesto unido a la red de tierras general).
- En los cables de *b.t.*, entre sus almas conductoras y el terreno, a la salida del Centro de Transformación.

En consecuencia, es preciso limitar el valor de la resistencia total del sistema de puesta a tierra general de la instalación, para evitar contorneos en los aisladores y pasatapas de *b.t.* o perforaciones en los cables y equipos.

Al margen de ello, para mantener ambos sistemas de puesta a tierra separados, la puesta a tierra del neutro debe llevarse a cabo con cable aislado (de la serie 0,6/1 kV, por ejemplo), protegiéndolo con tubo PVC, de grado de protección 7, como mínimo, contra daños mecánicos, en la zona de influencia de la tierra general.

En relación con estas cuestiones, el apartado 7.7.2 de la RAT dice:

"Cuando,..., se conecten los neutros de baja tensión a una tierra separada de la tierra general del Centro, se cumplirán las siguientes prescripciones:

- a) Las instalaciones de tierra deberán aislarse entre sí para la diferencia de tensiones que puedan aparecer entre ambas.
- b) El conductor de conexión entre el neutro de baja tensión del transformador y su electrodo de tierra ha de quedar aislado dentro de la zona de influencia de la tierra general. Dicha conexión podrá realizarse conectando al electrodo, directamente, un punto del conductor neutro y estableciendo los aislamientos necesarios.
- c) Las instalaciones de baja tensión en el interior de los Centros de Transformación poseerán, con respecto a tierra, un aislamiento correspondiente a la tensión señalada en el punto a).

En el caso de que el aislamiento propio del equipo de baja tensión alcance ese valor, todos los elementos conductores del mismo que deban ponerse a tierra, como canalizaciones, armazón de cuadros, carcasa de aparatos, etc., se conectarán a la tierra general del centro, uniéndose a la tierra separada solamente los neutros de baja tensión.

Cuando el equipo de baja tensión no presente el aislamiento indicado anteriormente, los elementos conductores del mismo que deban conectarse a tierra, como canalizaciones, armazón de cuadros, carcasa de aparatos, etc., deberán montarse sobre aisladores de un nivel de aislamiento correspondiente a la tensión señalada en el punto a). En este caso, dichos elementos conductores se conectarán a la tierra del neutro de baja tensión, teniendo entonces especial cuidado con las tensiones de contacto que puedan aparecer.

- d) Las líneas de salida de baja tensión deberán aislarse dentro de la zona de influencia de la tierra general, teniendo en cuenta las tensiones señaladas en el punto a).

Cuando las líneas de salida sean en cable aislado con envolventes conductoras, deberá tenerse en cuenta la posible transferencia al exterior de tensiones a través de dichas envolventes.

RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA DEL NEUTRO

Su valor no conviene que supere los 37Ω , que se indican en la MI BT 023, consiguiéndose, con este criterio, que un defecto a tierra en una instalación interior de baja tensión, protegida contra contactos indirectos por un interruptor diferencial, de sensibilidad 650 mA, no ocasione, en el electrodo de puesta a tierra, una tensión superior a:

$$37 \cdot 0,650 = 24 \text{ V}$$

SISTEMA ÚNICO DE TIERRAS

Cuando $V_d = R_t \cdot I_d < 1000 \text{ V}$, se podrá reunir, en una puesta a tierra única, la general del centro de transformación y la del neutro de baja tensión.

En la tabla se muestran, en función de las intensidades de defecto, los valores máximos de la resistencia de puesta a tierra que permiten la interconexión citada.

<i>I</i> (A)	<i>R</i> (Ω)
50	20
100	10
150	6,5
200	5
300	3
400	2,5
500	2
600	1,6
1000	1

Tabla 12. Valor máximo de la resistencia de puesta a tierra, para un único sistema de puesta a tierra.

PUESTA A TIERRA EN CENTROS DE TRANSFORMACIÓN CONECTADOS A REDES DE CABLES SUBTERRÁNEOS

La RAT 13, en su apartado 7.7.4, contempla esta casuística con la siguiente redacción:

"En los Centros de Transformación alimentados en alta tensión por cables subterráneos, provistos de envolventes conductoras unidas eléctricamente entre sí, se conectarán todas las tierras en una tierra general en los dos casos siguientes:

- a) Cuando la alimentación en alta tensión forma parte de una red de cables subterráneos con envolventes conductoras, de suficiente conductibilidad.
- b) Cuando la alimentación forma parte de una red mixta de líneas aéreas y cables subterráneos con envolventes conductoras, y en ella existen dos o más tramos de cable subterráneo con una longitud total mínima de 3 km, con trazados diferentes y con una longitud, cada uno de ellos, de más de 1 km.

En las instalaciones conectadas a redes constituidas por cables subterráneos con envolventes conductoras de suficiente sección, se pueden utilizar como electrodos dichas envolventes, incluso sin la adición de otros electrodos de tierra."

En base a ello y salvo que el proyectista establezca otra justificación, podrá considerarse que la red tiene suficiente conductibilidad cuando se cumpla que:

$$R'_m \cdot I_d < 1000 \text{ V}$$

siendo R'_m la resistencia, en ohmios, de la malla de puesta a tierra formada por los cables subterráneos de alta tensión con cubierta conductora y las picas que, normalmente, se conectan a dicha malla, correspondientes a los cables de cubierta aislante.

El valor de R'_m puede establecerse por:

$$R'_m = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L + L'}$$

con

- r = Radio, en metros, de un círculo de la misma superficie que el área cubierta por la malla.
- L = Longitud total, en metros, de los cables existentes en la malla con cubierta conductora.
- L' = Longitud total, en metros, de las picas verticales incluidas en la malla.

Mediciones [4], [4] y [12]

Se ha alcanzado, finalmente, la etapa que ha de constituir la verdadera validación de la instalación de puesta a tierra, esto es, el capítulo de mediciones.

En efecto, para que el sistema pueda recibir la correspondiente autorización legal, es preciso que se superen dos cuestiones que, aunque aparentemente diferentes, están relacionadas entre sí:

- La medida de la resistencia de puesta a tierra de la instalación y
- La comprobación de que las tensiones de paso y contacto aplicadas están dentro de los límites de seguridad.

La primera, proporcionará una buena referencia para juzgar sobre la aproximación alcanzada, respecto a la realidad, como resultado de las consideraciones teóricas que se hayan utilizado en el cálculo del sistema de puesta a tierra y que, condiciona, en definitiva, los valores de las tensiones de paso y contacto que puedan surgir cuando circule una corriente de defecto.

En este sentido, para instalaciones de 3.a categoría, repetitivas, se recoge la posibilidad, contemplada en la RAT 13, de omitir la medición de las tensiones de paso y contacto, sustituyéndola por la medición de la resistencia de puesta a tierra si se dan unos condicionantes determinados, que se explicitan.

La segunda –supuesta la primera dentro del campo esperado–, informará de la bondad de las expresiones teóricas utilizadas en la determinación de esas tensiones, a la vez que pondrá de manifiesto la presencia de los posibles puntos singulares que requieran un posterior retoque o de medidas adicionales de seguridad.

Sólo así se tendrá una garantía razonable de que la instalación pueda ser considerada como segura, desde el punto de vista de su sistema de puesta a tierra.

MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE TIERRA

Introducción

De una forma bastante general, la impedancia de una toma de tierra se reduce, prácticamente, a su resistencia, al no intervenir efectos inductivos y capacitivos más que para los frentes de ondas de corriente muy escarpados, de forma que, en la práctica, solamente se presentan efectos inductivos en el caso de conductores enterrados de importantes longitudes y capacitivos cuando se trata de terrenos rocosos, de resistividad extremadamente elevada.

Las mediciones de la resistencia de puesta a tierra requieren de electrodos auxiliares, que permitan la inyección de corriente en la toma de tierra que se está analizando y la medida de la elevación de potencial que experimenta la misma.

Como que, en la realidad, esos electrodos auxiliares no se pueden distanciar infinitamente, es posible que interaccionen entre sí y con el electrodo cuya resistencia se mide, falseando el resultado, cuestiones que tendrán que tener muy en cuenta los métodos de medida utilizados.

Es por esta razón que no se considerará aquí el basado en la utilización de una puesta a tierra de valor conocido –debido a la imposibilidad de controlar el resultado de la medida– y, tampoco, el denominado método de los 3 puntos, que requiere de dos resistencias de puesta a tierra auxiliares, de un orden de magnitud muy superior al de la resistencia de tierra a determinar y que, además, sean independientes entre ellas.

Método de la caída de potencial

Para medir la resistencia de tierra M , se disponen (figura 58) dos tomas auxiliares A y B , una para el retorno de la corriente conocida, I , que se inyecta entre M y A y la otra para proporcionar un potencial de referencia, V , que se mide entre M y B , siendo suficiente que sus resistencias propias estén en relación con la sensibilidad de los aparatos de medida, para lo cual, salvo casos excepcionales, bastan dos picas de pequeña dimensión.

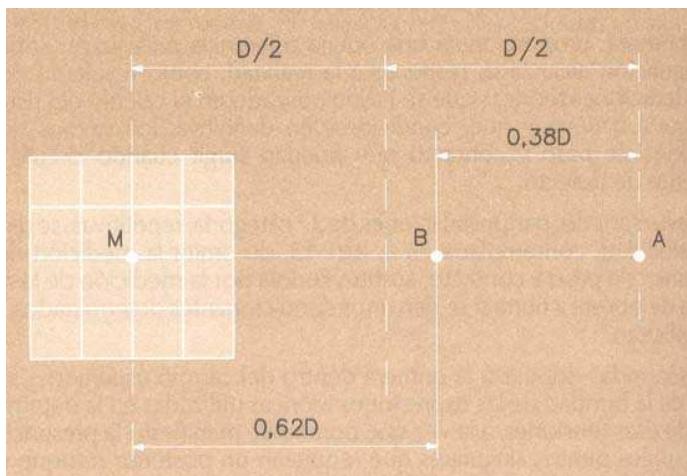


Figura 58. Para realizarla medida de la resistencia de una toma de tierra (M) por el método de la caída de potencial, deben situarse dos electrodos auxiliares alineados con su centro, uno (A) para el retorno de corriente y otro (B), para la medición del potencial, teniendo que situar este último en la línea equipotencial que corta la unión entre A y M a una fracción (0,618) de su distancia, contada a partir del centro de M.

Al objeto de alcanzar una precisión satisfactoria, los dos electrodos M y A deben estar suficientemente alejados, para que su interacción tenga un efecto despreciable (elevación de potencial de M prácticamente igual a Rl) y B se ha de encontrar en un punto en que la elevación de potencial sea despreciable (constituyendo, entonces, una buena aproximación de la "tierra lejana").

Estas condiciones se cumplen si la distancia entre M y A es, al menos, 20 veces mayor que el radio r_e del electrodo hemiesférico equivalente a M (radio que será, como mínimo, igual a la mitad de la mayor de sus dimensiones) y si B está alejado de M y A , como mínimo, 10 veces ese radio. El resultado de la medida es, entonces, prácticamente independiente de la posición de los electrodos, lo que puede verificarse desplazándolos.

Los tres electrodos han de estar alineados y B situado entre M y A , a una distancia del centro de M igual al 61,8% ($=\sqrt{1,25}-0,50$) de la existente entre M y A . Esta regla, establecida por Tagg, –al imponer que, en la diferencia de tensión entre el electrodo a medir, M , y el de potencial, B ,

$$U_M - U_B = R \cdot I - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x_B} + \frac{1}{x_A} - \frac{1}{x_A - x_B} \right)$$

sea nulo el término que se sustraе de R_{l-} , supone el terreno homogéneo, pero si el suelo fuera fuertemente heterogéneo o existieran canalizaciones metálicas enterradas, próximas a los electrodos auxiliares, la posición ideal de B puede diferir, sensiblemente, de la indicada.

A título orientativo, cabe indicar que para medir la resistencia de una pica, puede ser suficiente que la toma A, de retorno de corriente, se separe una decena de metros. Si la toma de tierra cubre un terreno más o menos cuadrado, es deseable apartarse, al menos, tres o cuatro veces la longitud de un lado. Para conductores en zanja, es preferible situar la toma A en la prolongación del conductor, alejándose de su extremidad al menos un tercio o la mitad de su longitud.

No obstante, estas longitudes indicadas pueden ser escasas en el caso de terrenos superficiales mucho más conductores que el subsuelo, debiéndolas aumentar si así fuera aunque, en alguna ocasión, buscando el equilibrio entre la precisión y la comodidad de las medidas, queden limitadas a causa de las dificultades.

Bajo las condiciones que se han detallado, el valor del cociente VAI proporciona la resistencia de tierra del electrodo M.

Lo mejor para asegurar, en la práctica, que la interacción entre M y A no es excesiva es desplazar el electrodo B sobre la línea de unión M y A. Pueden presentarse dos casos (figura 59):

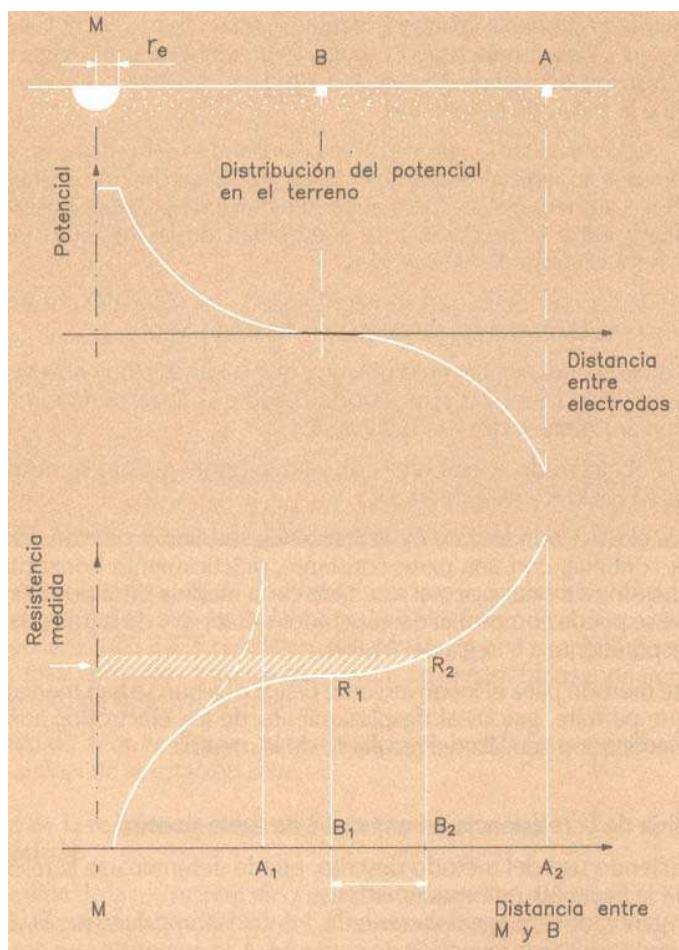


Figura 59. El procedimiento para determinar la situación correcta del electrodo A consiste en realizar la representación gráfica de los valores de resistencia que se van obteniendo al desplazar la posición del electrodo de potencial, B.

- Si el electrodo A está en A_1 , hay interacción cuando se desplaza B desde M hacia A (curva de trazos).

Si el electrodo está en A_2 , la resistencia medida evoluciona como la curva continua, con una parte constante, prácticamente horizontal, dependiendo entonces poco el resultado de la medida de la posición de B, lo que se puede comprobar desplazándolo alrededor de la posición ideal, correspondiente a la regla del 61,8%.

Este método palia el inconveniente de los dos que se han mencionado porque permite, gracias al desplazamiento de los electrodos auxiliares, una verificación sencilla del resultado de la medida.

Medida de la resistencia de una toma de tierra puntual

Haciendo uso del método descrito, puede determinarse la resistencia según la figura 60, que esquematiza su principio.

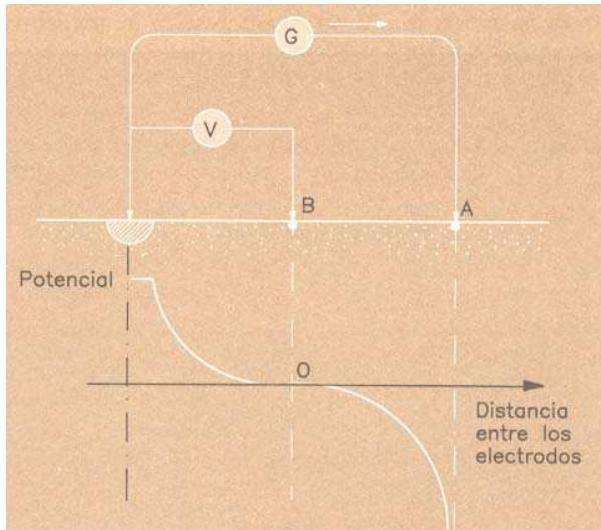
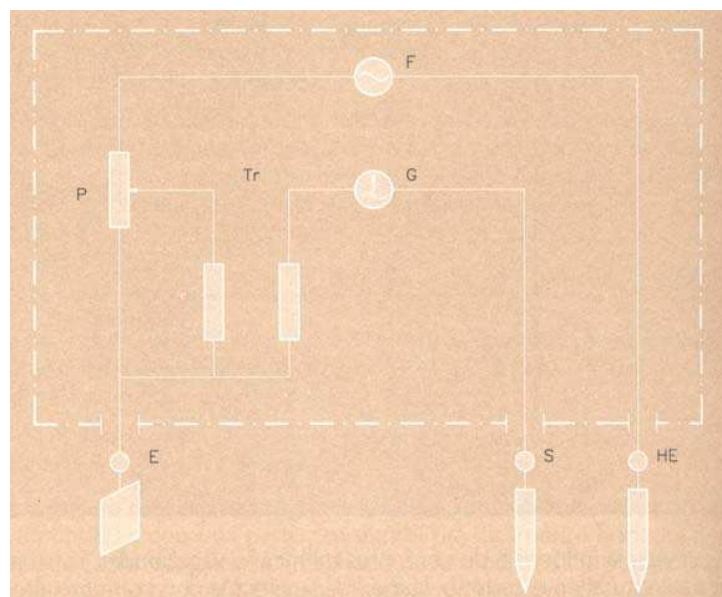


Figura 60. La medida de la resistencia de una toma de tierra de pequeñas dimensiones, utilizando el método de la caída de potencial, requiere de un generador que se aplica entre la tierra a medir y el electrodo auxiliar A, haciendo circular la corriente I entre ellos.

Un generador entrega una corriente, I , entre la toma de tierra, M, a medir y la sonda auxiliar de inyección de corriente, A, lo que origina un potencial, V , entre M y B. Puede utilizarse para las medidas una fuente de alimentación, con voltímetro y amperímetro o un telurómetro.

Este aparato, que mide el cociente V/I , permite la lectura directa del valor de la resistencia de la toma de tierra, mediante un montaje en puente que indica el valor cuando se anula la corriente que atraviesa un galvanómetro (figura 61).

Figura 61. En el caso de electrodos de puesta a tierra de dimensiones pequeñas, la utilización del telurómetro proporciona, directamente, el cociente V/I . E: Electrodo de tierra a medir. S: Sonda. HE: Electrodo de tierra auxiliar. F: Fuente de tensión alterna. P: Potenciómetro. Tr: Transformador de aislamiento (1/1). G: Galvanómetro indicador de cero.



La resistencia de la toma de tierra de potencial debe ser pequeña frente a la resistencia interna del circuito de medida de tensión y la de la toma de corriente, no debe reducir a un valor exageradamente pequeño la corriente del telurómetro.

Para evitar la influencia de corrientes telúricas y vagabundas, existentes de forma natural en el terreno, la medida se efectúa con corriente alterna cuya frecuencia (85 a 135 Hz) difiere de la de la red y de sus armónicos, no utilizándose corriente continua para evitar errores debidos a diferencias de potencial de origen electrolítico.

La medida debe realizarse, para este tipo de instalaciones, preferentemente al final de la estación seca.

Medida de la resistencia de una red de tierras extensas

Generalidades

La medida de la resistencia de una red extensa presenta, respecto a una toma de tierra puntual, dificultades mayores debidas a:

- El valor, generalmente más débil (para una misma corriente inyectada), de la elevación de potencial, V , lo que hace que la medida sea más sensible a las perturbaciones,
- La dificultad que puede existir, en la práctica, de alcanzar los alejamientos necesarios para evitar las interacciones entre los electrodos.
- El acrecentamiento de los acoplamientos entre los cables de inyección de corriente y de medida del potencial, debido a la longitud de los mismos.
- La eventual existencia de una componente reactiva de la impedancia de la red de tierras (en particular, si están conectados a ella los cables de guarda de las líneas).

Hay que aplicar métodos (variantes del de caída de potencial), que difieren entre sí por los medios que se utilizan.

Métodos por inyección de corriente

Su principio consiste en simular un defecto en la instalación, inyectando, por su puesta a tierra, una corriente de ensayo importante, I_m , con la ayuda de una línea aérea de factor de apantallamiento conocido, r_m , conectada a una tierra auxiliar en un punto alejado (por ejemplo, una subestación), según se esquematiza en la figura 62.

Los elementos que se han esquematizado siguiendo ese sistema, en esta representación en planta, son:

- 1) Red de tierra a medir.
- 2) Red de tierra auxiliar.
- 3) Línea de transporte para la inyección de corriente.
- 4) Cable de tierra.
- 5) Línea de transporte en servicio.
- 6) Conductor auxiliar, aislado, para la medida del potencial, conectado a la tierra de referencia o lejana, con un ángulo ≥ 90 grados con respecto a la línea de inyección de corriente.

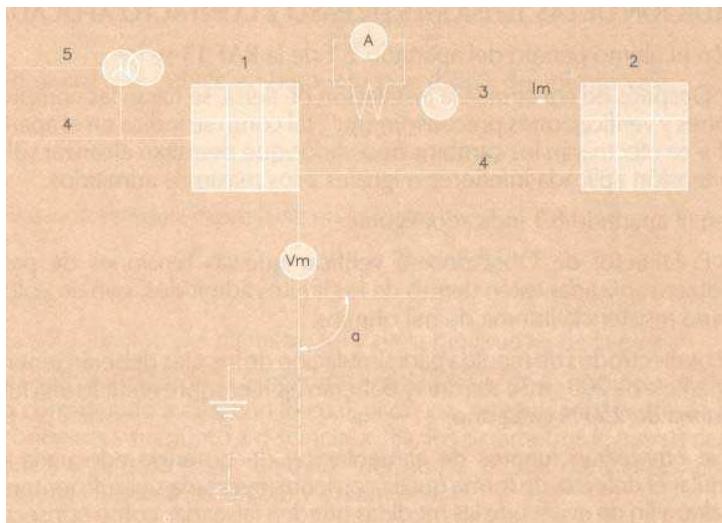


Figura 62. La medida de la resistencia de tierra de instalaciones importantes, debe efectuarse por métodos de inyección de corriente, que son derivados del de la caída de potencial.

El aumento de potencial de tierra de la instalación (V_m) causado por I_m , debe medirse con un aparato de elevada impedancia interna y un conductor aislado, auxiliar, (conductor de potencial), tendido a partir de la red de tierra de la instalación, idealmente con un ángulo de 90° a 180° con respecto a la línea de inyección de corriente.

Para encontrar el valor correcto de V_m , el potencial de tierra debe medirse con respecto a una toma de tierra situada a distancias crecientes de la instalación, hasta que la diferencia entre dos o tres lecturas sucesivas sea despreciable.

Si la medida no está influida por perturbaciones, la impedancia de la toma de tierra puede expresarse por la relación:

$$Z_e = \frac{V_m}{r_m I_m}$$

El conductor de potencial puede ser una línea telefónica, a condición de conocer con precisión su factor de apantallamiento. Cuando no es posible inyectar una corriente de medida lo suficientemente elevada para poder despreciar las perturbaciones, es preciso utilizar métodos que aseguren las correcciones necesarias, como es el que se basa en un batimiento de frecuencia-que requiere de una fuente asíncrona separada, cuya frecuencia difiera entre 0,1 a 0,5 Hz respecto a la de la red –o el que utiliza una frecuencia netamente distinta- entre 5 y 10 Hz por encima o por debajo con respecto a la del sector–, que no se describirán aquí.

Procedimiento de medida y precauciones a tomar

Independientemente del método utilizado, para evitar los errores de medida, deben adoptarse las siguientes precauciones:

- La corriente inyectada debe ser, si es posible, superior a 50 A para evitar imprecisiones debidas a las perturbaciones. No obstante, debe limitarse la elevación del potencial de tierra a unos 100 V, por razones de seguridad. Si la corriente es muy débil, hay que tener presente las resistencias de contacto, especialmente las existentes entre los apoyos de las líneas y los hilos de tierra.

- Para la línea de inyección de corriente, se requiere una longitud no inferior a 10 km si se desea una precisión correcta pero, en zonas en que la resistividad del terreno sea elevada, puede ser necesario utilizar longitudes netamente mayores.

Cabe la posibilidad de que se presenten dificultades por la existencia de:

- Inducciones sobre los cables utilizados para la medida del potencial.
- Acoplamientos de los cables de tierra de la línea de inyección con los conductores de fase.

MEDICIÓN DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO APLICADAS

En el último párrafo del apartado 2.1 de la RAT 13 se lee:

"Después de construida la instalación de tierra, se harán las comprobaciones y verificaciones precisas "in situ", tal como se indica en el apartado 8.1 y se efectuarán los cambios necesarios que permitan alcanzar valores de tensión aplicada inferiores o iguales a los máximos admitidos."

y en el apartado 8.1 indicado, figura:

"El Director de Obra deberá verificar que las tensiones de paso y contacto aplicadas estén dentro de los límites admitidos, con un voltímetro de resistencia interna de mil ohmios.

Los electrodos de medida para simulación de los pies deberán tener una superficie de 200 cm² cada uno y deberán ejercer sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N cada uno.

Se emplearán fuentes de alimentación de potencia adecuada para simular el defecto, de forma que la corriente inyectada sea suficientemente alta, a fin de evitar que las medidas queden falseadas como consecuencia de corrientes vagabundas o parásitas, circulantes por el terreno.

Consecuentemente, y a menos que se emplee un método de ensayo que elimine el efecto de dichas corrientes parásitas, por ejemplo, método de inversión de polaridad, se procurará que la intensidad inyectada sea del orden del 1 % de la corriente para la cual ha sido dimensionada la instalación y, en cualquier caso, no inferior a 50 A para Centrales y Subestaciones y 5 A para Centros de Transformación.

Los cálculos se harán suponiendo que existe proporcionalidad para determinar las tensiones posibles máximas."

El párrafo final de la modificación de este mismo apartado por la Orden 27 de Noviembre de 1987 tiene especial interés para las Compañías eléctricas –se apoya en la autorización de proyectos tipo para instalaciones, o parte de las mismas, de carácter repetitivo, que se contempla en el Artículo 9 del Reglamento –y dice así:

"Para instalaciones de tercera categoría que respondan a configuraciones tipo, como es el caso de la mayoría de los Centros de Transformación, el órgano territorial competente podrá admitir que se omita la realización de las anteriores mediciones, sustituyéndolas por la correspondiente a la resistencia de puesta a tierra, si se ha establecido la correlación, sancionada por la práctica, en situaciones análogas, entre tensiones de paso y contacto y resistencia de puesta a tierra."

RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Y LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Para hallar la relación que existe entre la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto, va a razonarse sobre un electrodo sencillo, como es el caso de una pica.

La resistencia de puesta a tierra de ese electrodo viene dada por:

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{3L}{d}$$

y el potencial que induce en un punto que diste x del mismo vale:

$$U_x = \frac{\rho I_d}{2\rho L} \ln \frac{L + \sqrt{x^2 + L^2}}{x}$$

fórmulas que pueden expresarse en la forma:

$$R_t = \rho K_r \quad \text{y} \quad U_x = \rho I_d K_x$$

en donde:

K_r es sólo función del diámetro (d) y de la longitud (L) de la pica y
 K_x es sólo función de la longitud (L) de la pica y de la distancia (x) del punto considerado a ella, con lo cual, para una longitud y diámetro de la pica concretos y un punto a distancia, x , fija, los parámetros K_r (resistencia "unitaria") y K_x (potencial "unitario" del punto x), son constantes, con dimensiones respectivas $\Omega/\Omega \cdot m$ y $V/\Omega \cdot m \cdot A$.

Análogamente, para las tensiones de paso y contacto, se tendrán:

$$\begin{aligned} V'_p &= U_{x1} - U_{x2} = \rho I_d K_{x1} - \rho I_d K_{x2} = \\ &= \rho I_d (K_{x1} - K_{x2}) = \rho I_d K_p \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V'_c &= R_t I_d - U_{x1} = \rho K_r I_d - \rho I_d K_{x1} = \\ &= \rho I_d (K_r - K_{x1}) = \rho I_d K_c \end{aligned}$$

siendo K_p la tensión "unitaria" de paso ($V/\Omega \cdot mA$) y K_c la tensión "unitaria" de contacto ($V/\Omega \cdot mA$).

Puede, por tanto escribirse que:

$$\begin{aligned} V'_p &= \frac{R_t}{K_r} I_d K_p = R_t I_d \frac{K_p}{K_c} \quad y \\ V'_c &= \frac{R_t}{K_r} I_d K_c = R_t I_d \frac{K_c}{K_r} \end{aligned}$$

que demuestran, para una resistividad del terreno determinada, la proporcionalidad existente entre las tensiones de paso y contacto y el valor de la resistencia de puesta a tierra del electrodo considerado.

De tratarse de electrodos más complejos, también es posible –si bien más complejo– obtener expresiones de K_r , K_p y K_c , en función de las diferentes distancias que intervengan en sus particulares geometrías y un valor específico para esos parámetros cuando aquélla esté definida, de forma que

puede concluirse en que, para unas características concretas de la red de alimentación de alta tensión, existe correlación entre las tensiones de paso y contacto con una geometría *determinada del electrodo de puesta a tierra*.

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INVERSIÓN DE POLARIDAD EN LA OBTENCIÓN DE LOS VALORES APLICADOS DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Este método permite eliminar la influencia de las tensiones vagabundas –que circulan por el terreno, de forma errante– sobre las lecturas de las tensiones de paso y contacto aplicadas, autorizando, así, a poder inyectar valores inferiores al 1 % de la corriente de defecto, que prescribe la reglamentación caso de no adoptar ninguna precaución en ese sentido. Encuentra, por tanto, su mayor aplicación allí donde las magnitudes de la corriente de defecto sean importantes, al permitir reducir la potencia nominal de las fuentes de alimentación utilizadas en simular la falta.

Supóngase que se haga circular, de la forma que se describe en Metodología, la intensidad alterna de medida, I_m , primero en el sentido representado hacia arriba, en la figura 63; de no existir ninguna corriente vagabunda, la lectura del voltímetro destinado a medir las tensiones de paso, por ejemplo, proporcionará el módulo del vector V_p representado en el diagrama en fase con la corriente, dada la preponderante componente resistiva del terreno.

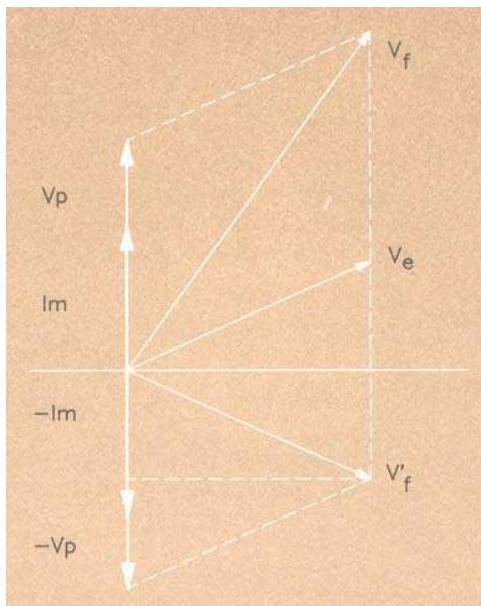


Figura 63. De no existir *ninguna corriente vagabunda*, V , por el terreno, la medición de la tensión de paso aplicada, V será *indiferente del sentido de circulación de la corriente* que se *inyecta para el ensayo*, I o $-I_m$ y estará en *fase con ella*.

Si se invierte el sentido de la intensidad de medida, $-I_m$, el voltímetro continuará indicando el mismo valor pero, ahora, el vector representativo de la tensión también habrá girado de 180° para continuar en fase con la corriente que lo engendra.

No obstante, de existir una corriente errante por el terreno, V_e , la lectura correspondería al módulo de V_f , en el primer caso, y al de V'_f , en el segundo, resultantes respectivas de la composición vectorial de V_p y $-V_p$ con la tensión vagabunda.

Por simples razonamientos trigonométricos, se demuestra que la tensión de paso buscada, V_p , puede calcularse por la expresión:

$$V_p = \sqrt{\frac{(V_f)^2 + (V'_f)^2 - 2(V_e)^2}{2}}$$

Si no se desea realizar esta operación cada vez y la frecuencia de empleo del aparato lo justifica, puede recurirse a procedimientos electrónicos para obtener las proyecciones de las tensiones V_f y V'_f sobre el eje de ordenadas, en cuyo caso, la determinación de la tensión buscada se simplifica, al pasar a ser la semisuma de dichos valores que, incluso, en aparatos sofisticados, puede proporcionar el microprocesador que incorporan.

ACERCA DE LOS ELECTRODOS DE MEDIDA

Nada se dice en la reglamentación sobre la forma que deben presentar los dos electrodos auxiliares de medida (que simulan los pies humanos) y, en consecuencia, ésta puede ser cualquiera si bien, generalmente, suele adoptarse la circular (con un diámetro de 16 cm) o la rectangular (20 × 10 cm, por ejemplo). Tampoco se especifica la naturaleza del metal que debe utilizarse ni el grado de asentamiento –del que dependerá la resistencia de contacto– que hay que buscar al depositarlos sobre el terreno; a pesar de ello, parece adecuado en lo que respecta al metal empleado, hacer uso de aceros cromados, niquelados o inoxidables, u otros metales que, como el latón, bronce o cobre, presenten superficies pulidas difícilmente alterables, si bien estos requisitos sólo son indispensables para la «suela» del electrodo, pudiendo confiar a cualquier material pesado (plomo, hierro, hormigón, etc.) el cometido de ejercer la fuerza de 250 N (= 250 N/9,81N/kp = 25,484 kp) que fija la RAT 13.

Aunque los resultados de las mediciones variarán notablemente con el tipo de contacto que establezcan los electrodos con el terreno, no parece necesario dotar la base de éstos con un sistema de acolchado para conseguir una mayor acomodación de los mismos con el terreno y, en definitiva, un contacto más íntimo, pero puede ser una postura conservadora eliminar protuberancias e irregularidades, siquiera superficialmente.

A título tan sólo orientativo, se ilustran soluciones, más o menos artesanales, que se están empleando en la actualidad.

En la figura 64, cada electrodo está constituido por un único bloque, en acero inoxidable, provisto de un asa para su transporte y una borna roscada para recibir el cable de conexión al voltímetro, mientras que la figura 65 muestra una solución desmontable, formada por cilindros, de escasa altura (de plomo, hierro, etc.), con un orificio central que permite su inserción en el vástagos utilizado para el transporte y conexión eléctrica, electrosoldado a la gruesa lámina de acero inoxidable que constituye la base.

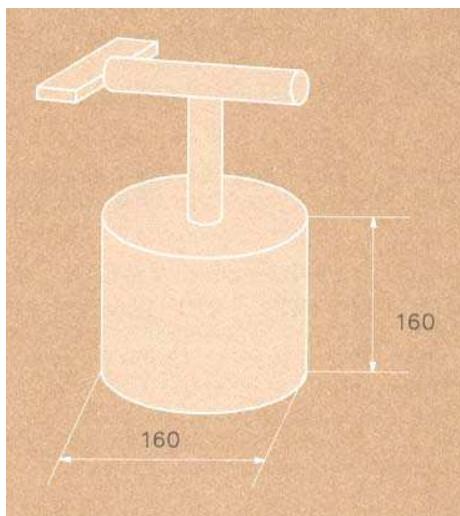


Figura 64. Electrodo formado por un bloque cilíndrico, de acero inoxidable, destinado a la medición de las tensiones de paso y contacto. Su sección axial es un cuadrado de 16 cm de lado y pesa 25 kp.

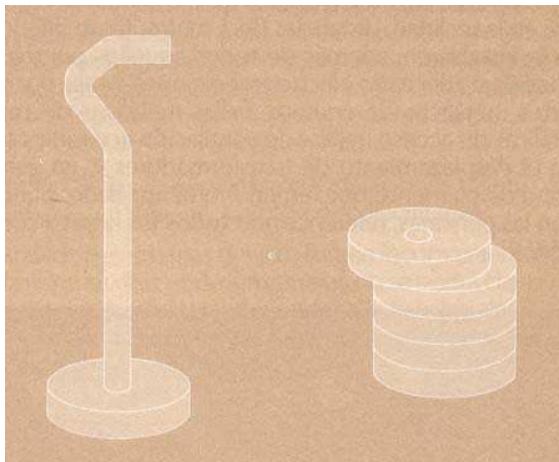


Figura 65. Variante desmontable, constituida por la base y el eje acodado (para asirlo en el transporte), soldados entre sí, ambos de acero inoxidable y un número adecuado de discos con un orificio central para permitir su apilado sobre la base y lograr que el conjunto totalice 250 N sobre el terreno.

Por último, la figura 66 corresponde a la solución de fijar los electrodos sobre una tabla aislante, juntos –para las medidas de la tensión de contacto– o separados 1 m –para las tensiones de paso–, sobre la que se sube una persona para producir la fuerza que tienen que ejercer sobre el terreno.

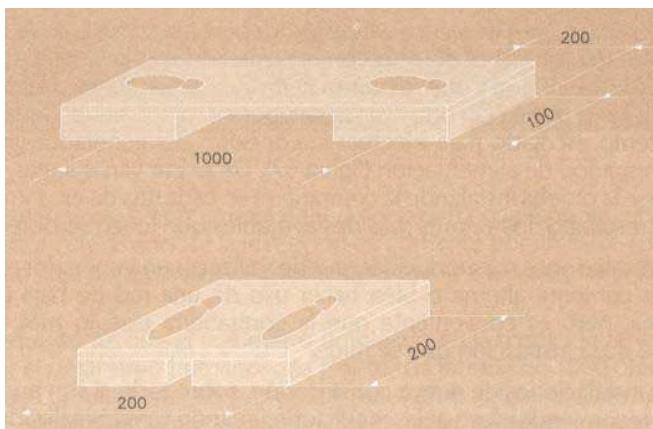


Figura 66. En este caso, los electrodos (de 20 x 10 cm) están fijados sobre una tabla de madera, obteniéndose el peso reglamentario al situarse una persona encima de las huellas marcadas al efecto.

METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO APLICADAS

Sobre un plano topográfico o una planta de la instalación, según su envergadura, se trazarán una serie de radios –partiendo del centro de la instalación y cuantos más, mejor– en los que se acotarán segmentos que representen, en la realidad, distancias de 1 metro, tanto interiores como exteriores a la instalación, además de todos aquellos puntos singulares donde se considere adecuado efectuar mediciones, ya sea por corresponder a soportes metálicos de equipos, vallas metálicas de cerramiento, puertas metálicas de acceso, rejillas de ventilación accesibles a personas, carriles para el desplazamiento de transformadores y, en general, cualquier otro tipo de elemento que, en un momento dado, pueda estar en contacto con las personas, referenciando todos los lugares con una clara identificación.

Para instalaciones de alguna extensión, deberá realizarse la inyección de corriente que simula el defecto con el auxilio de una línea eléctrica que salga de la instalación y que se pone a tierra (contratierra) varios kilómetros más allá de la misma (en otra instalación, por ejemplo), siendo indiferente el extremo escogido para efectuar la conexión del generador (grupo o transformador) de alimentación (figura 67). De existir varias líneas, puede repetirse la prueba instalando la contratierra en cada una de ellas y retener, como resultado, los valores más desfavorables que luego se obtengan.

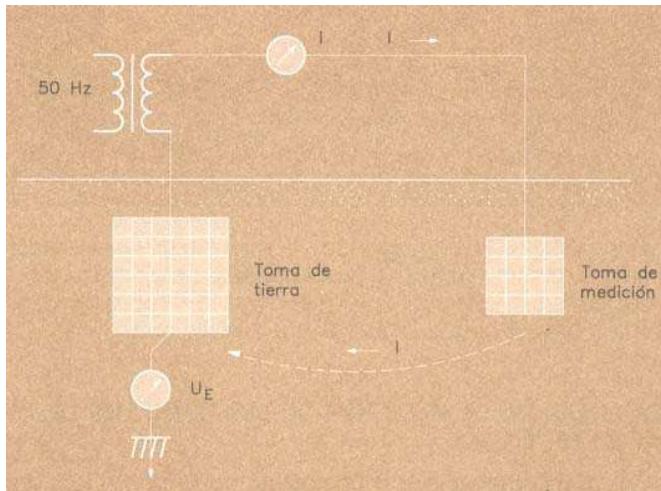


Figura.67. En instalaciones importantes, la medición de las tensiones de paso y contacto aplicadas puede obligar a efectuar la inyección de corriente desde algunos kilómetros de distancia auxiliándose con una línea de alta tensión, alimentada, desde la baja tensión, por un transformador AT/bt

En instalaciones más reducidas, puede utilizarse un generador autónomo de corriente alterna o bien hacer uso de una red de baja tensión próxima, pero es conveniente que la contratierra esté lo más alejada posible de la instalación que se mide.

Para instalaciones de nueva construcción, sobre todo si son importantes, se recomienda efectuar las mediciones cuando ya esté realizada la red de tierras y antes de proceder a la etapa de acabados asfálticos, de grava o de cualquier otro tipo de pavimentación, con el fin de poder adoptar las medidas correctoras necesarias sin excesivas dificultades, pudiendo utilizarse en estas premediciones sondas metálicas, clavadas en el suelo, que proporcionarán, sin duda, lecturas de las tensiones de paso y contacto superiores a las realizadas, posteriormente, con todos los acabados y los electrodos normalizados, pero útiles al proyectista, como orientación para decidir la adopción o no de mejoras en la red de tierras y asegurar, de este modo, el éxito de las mediciones últimas.

La realización de las mediciones en instalaciones que no estén dentro del casco urbano, en general, no presenta dificultades.

En las instalaciones urbanas densas, surgen inconvenientes para la colocación de la tierra auxiliar –que, en general no se podrá clavar en las aceras o calzadas– para garantizar la independencia de la instalación de puesta a tierra respecto a otras u a otros servicios, como pueden ser tuberías metálicas de agua, gas, alcantarillado, etc..

En estos casos, la contratierra deberá ser la tierra correspondiente a otra instalación, efectuándose la inyección de corriente por un cable subterráneo que esté conectado a la instalación a medir y a la que haga de tierra auxiliar.

El requisito de que el voltímetro empleado en la medición tenga, para simular el organismo humano, una resistencia interna de 1000 ohmios es difícil de cumplimentar en la práctica, pues, en la actualidad, los aparatos que se encuentran normalmente en el mercado, presentan valores comprendidos entre 100 k Ω y 12 o 20 M Ω , pero se soluciona esta cuestión disponiendo una resistencia de 1000 Ω entre sus bornas que proporcionará, al estar en paralelo con la interna, mucho más elevada, una resistencia equivalente sensiblemente igual a 1 k Ω .

Una vez instalados los componentes del esquema de medida, tal como se ilustran en las figuras 68 y 69, se irán efectuando sistemáticamente las mediciones en todos los puntos marcados, anotándose el valor de la intensidad que circula (que deberá controlarse para que permanezca, lo más constantemente posible, en el valor prescripto) y la tensión medida, así como la situación del punto de medición. En la figura se tiene:

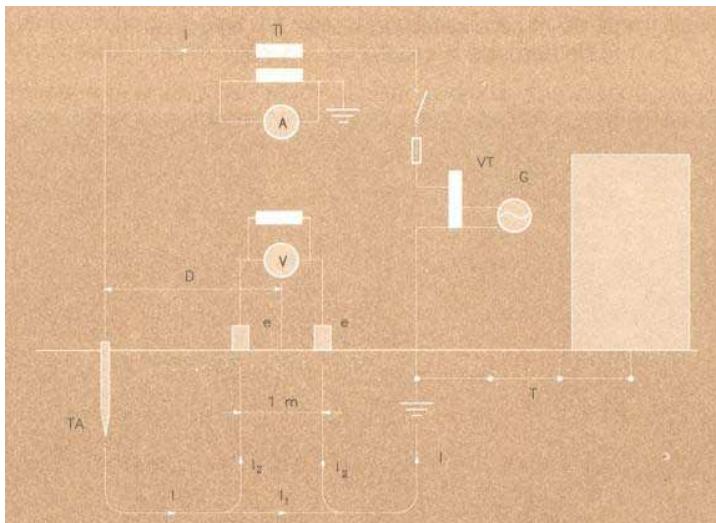


Figura 68. Disposición esquemática de la instalación requerida para la medición de la tensión de paso aplicada, simulando un defecto de aislamiento a tierra.

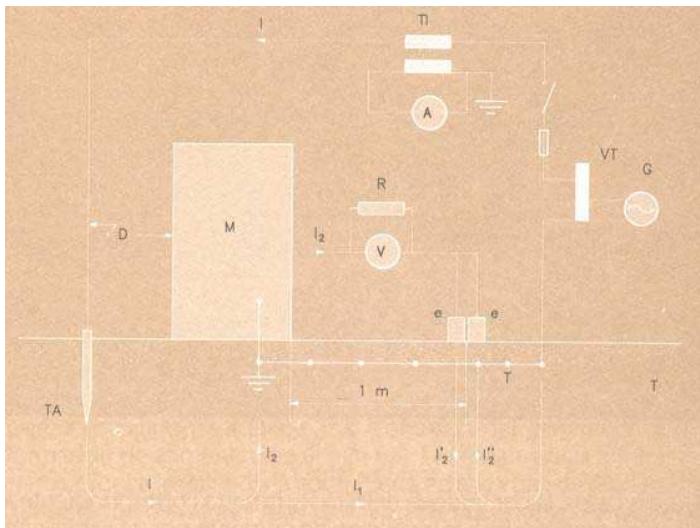


Figura 69. Esquema de la disposición del montaje a efectuar para llevara cabo la medición de la tensión de contacto aplicada, simulando una falta monofásica a tierra M: masa metálica de la instalación.

- C : generador (grupo electrógeno, transformador, etc.).
- VT: variador de tensión.
- TI : transformador de intensidad. A : amperímetro.
- V : voltímetro de alta impedancia de entrada.
- R : resistencia de 1000 Ω.
- e : electrodos de 200 cm² de superficie, con un peso de 25 kp cada uno y separados 1 m entre sí.
- TA: tierra auxiliar, instalada a la mayor distancia, D, posible (mínimo, 40 m para instalaciones de 3.^a categoría).
- T: red de tierra de la instalación a medir.

Hay que tener presente que pueden presentarse singularidades en el reparto de potenciales y, por tanto, en las tensiones de paso, debido a la heterogeneidad del terreno.

Debe asegurarse que, durante la realización de las mediciones, no existan corrientes vagabundas que falseen los resultados.

Por lo que respecta a la posibilidad de tensiones transferidas, se habrán localizado, previamente, los elementos metálicos enterrados, ajenos a la instalación eléctrica, como tuberías de agua, conducciones de gasóleo, gas, etc., eligiendo bien el número y dirección de las medidas a efectuar, de forma que al proceder a realizarlas, se obtenga la seguridad de que son inferiores a las reglamentarias admitidas, para, caso de no resultar así, poder adoptar las soluciones correctoras pertinentes.

La verificación de que las tensiones aplicadas estén dentro de los límites admitidos se lleva a cabo por simple comparación con los valores que establece la fórmula (1) de la RAT 13:

$$V_{ca} = \frac{K}{t^n} \quad \text{para la tensión de contacto aplicada y}$$
$$V_{pa} = \frac{10K}{t^n} \quad \text{para la tensión de paso aplicada,}$$

previa multiplicación de las lecturas obtenidas por la relación entre la corriente máxima de defecto –para la cual ha sido calculada la instalación– y la utilizada en el ensayo.

A posteriori, podrán trasladarse al plano todas las medidas de potencial, ya corregidas, que permitirán establecer las líneas equipotenciales resultantes así como la necesidad o no de introducir alguna mejora de la instalación.

Bibliografía

- [1] IEEE Standard 80 - 1986 Guide for safety in substation grounding.
- [2] Puesta a tierra de las instalaciones eléctricas de Alta Tensión. Normativa, Proyecto y Comprobación. ^{2.a} Ponencia - XXI Asamblea AMYS Granada, Junio 1984.
- [3] Earth resistances G.F. TAGG George Newnes (London) - 1964.
- [4] NI H115 Principes de conception et de réalisation des mises a la terre -1984 Electricité de France (E.d.F.). Direction des Études et Recherches.
- [5] Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terre P.C. LAURENT Revue General de l'Electricité Tomo 81, núm. 7, 8 y 9 -1972.
- [6] Les bases générales de la technique des mises a la terre dans les installations électriques P.G. LAURENT Revue General de l'Electricité Tomo 1, núm. 7 -1951. [71 IEEE Standard 81 - 1983 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- [8] Nature des effects physiologiques du courant électrique Dr. J. CABANES Revue General de l'Electricité, núm. 10 Octubre 1981.
- [9] L'impédance électrique du corps humain G. BIEGELMEIER Revue General de l'Electricité, núm. 11 Noviembre 1985.
- [10] CEI 479 - 74 y CEI 479 - 84 Effects of current passing through the human body.
- [11] Las corrientes de cortocircuito en las redes trifásicas SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT Editorial Dossat Madrid - 1970.
- [12] Método de cálculo y proyecto de instalaciones depuesta a tierra para Centros de Transformación de 3.^a categoría 1988 Comisión Reglamentos Comité de Distribución UNESA.
- [13] Protección catódica de tuberías enterradas M.A. GUILLEN. Wilson Walton International, S.A.E. Revista Corrosión y Protección vol. I, núm. 6 - 1970.
- [14] Oxidation Potentials W.M. LATIMER 2 edic. Prentice - Hall Englewood Cliffs, N.J., 1952.
- [15] RECOMENDACION UNESA 6501 F 87 Electrodos de puesta a tierra. Picas cilíndricas de acero-cobre.
- [16] Instalaciones de Puesta a Tierra de Centros de Transformación MT/BT E. GALLANGO GAS ELECTRICIDAD, S.A. Palma de Mallorca - 1986.
- [17] Guía Técnica sobre Cálculo, Diseño y Medida de Instalaciones de Puesta a Tierra en Redes de Distribución, Diciembre 1985. Grupo Trabajo de Reglamentos Subgrupo de Tierras. Comité de Distribución UNESA.
- [18] Multistep analysis of interconnected grounding electrodes F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95 núm. 1 1976.
- [19] Resistance calculations of interconnected grounding stems F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-96, núm. ,1977.
- [20] Resistance measurements of large grounding systems F. DAWALIBI, D. MUKHEDKAR. Paper F 79 656-0 presented atthe IEEE PES Summer Meeting VancouverJulio 1979.
- [21] Touch and step calculations for substation grounding systems E.B. JOY, A.P. MELIOPOULOS, R.P. WEBB. PaperA 79 052-presented at the IEEE PES Winter Meeting New York Febrero 1979.
- [22] Numerical computation of the grounding resistance of substations and towers P. KOUTENIKOFF. IEEE Trans. on PAS. Vol. PAS-99 núm. 3 1980.
- [23] Mesures de l'impédance de terre des postes HT. M. KUSSAARI, A.]. PESO NEN. Rapport 36-02 presenté á la session CIGRE 1978 París.
- [24] Calculation and measurement of the earth impedance of an e.h.v. substation. J.R. ALDERTON, P.C. ANDERSON, R.J. CAKEBREAD. Proc. IEEE, Vol. 125, núm. 12,1978.
- [25] A practical ground potential rise prediction technique for power substations F.P. ZUPA, J.F. LAIDIG. IEEE Trans. on PAS Vol. PAS-99, núm. 1 1980.
- [26] Contributo al dimensionamento di dispersore de terra di forma semplice P.L. BUCCHERI, A. CAMPOCCIA V. CATALIOTTI. Revista L'Energia Elettrica núm. 7, 1970.

- [27] Grounding systems in no-uniform soil. Dis. B. THAPER, J.K. ARORA. IC (I) JOURNAL. Vol. 58, Agosto 1977.
- [29] Sviluppo delle tecniche di progetto automatico dei dispersori A. BRANDONINI. Revista L'Energia Elettrica núm. 1, 1976.
- [29] Reglamento Sobre Condiciones Técnicas y Garantías de Seguridad en Centrales-Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación. Noviembre 1982 y Octubre 1984.
- [30] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Septiembre y Octubre 1973.