

5 Instalaciones de puesta a tierra

5.1 La circulación de la corriente eléctrica por el suelo

Los terrenos tienen diferente resistividad eléctrica ρ según su naturaleza y contenido de humedad. Esta resistividad varía entre amplios márgenes y es mucho más elevada que la de los metales y el carbono. En este sentido puede decirse que la tierra es, en general, un mal conductor eléctrico.

Ahora bien, cuando una corriente circula por el terreno, la sección de paso S puede ser tan grande, que a pesar de que su resistividad (resistencia específica) ρ sea elevada, la resistencia $R = \rho \ell/S$ puede llegar a ser despreciable.

La resistividad ρ de los terrenos, se expresa en Ohms por m^2 de sección y metro de longitud, por tanto en $\Omega \cdot m^2/m = \Omega \cdot m$ («Ohms metro»). En efecto la sección de paso de la corriente puede ser del orden de m^2 .

La resistividad así expresada corresponde a la resistencia entre dos caras opuestas de un cubo de un metro de arista (figura 58).

Si bien, cuando la corriente ha penetrado en el terreno éste presenta una resistencia R despreciable debido a la gran sección de paso, no sucede lo mismo en el punto de paso de la corriente del electrodo al terreno, pues aquí la superficie de contacto entre ambos está limitada según la forma configuración y dimensiones del electrodo.

En la tabla figura 59 se indican las resistencias R de los varios tipos de electrodos más usuales, en función de sus dimensiones y de la resistividad ρ_t del terreno.

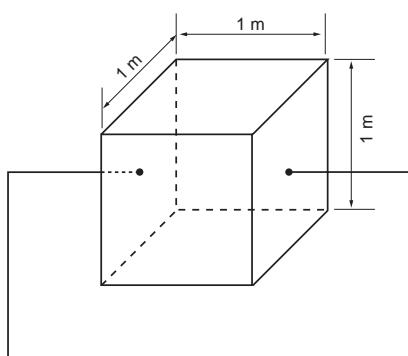


Fig. 58: Resistividad en $\Omega \cdot m$.

Asimismo en la tabla figura 60 están indicados los valores medios de la resistividad de diversos tipos de terreno.

Tipo de electrodo	Resistencia(Ω)
Placa enterrada profunda	$R = 0,8 \frac{\rho_t}{P}$
Placa enterrada vertical	$R = 1,6 \frac{\rho_t}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\rho_t}{L}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = \frac{2 \rho_t}{L}$
Malla de tierra	$R = \frac{\rho_t}{4r} + \frac{\rho_t}{L}$

en donde:

- R: resistencia de tierra del electrodo (Ω),
- ρ_t : resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$),
- P: perímetro de la placa (m),
- L: longitud de la pica o del conductor y, en la malla, la longitud total de los conductores enterrados (m),
- r: radio de un círculo de la misma superficie que el área cubierta por la malla (m).

Fig. 59: Cálculo de la resistencia de los electrodos.

Naturaleza del terreno	Valor medio resistividad en $\Omega \cdot m$
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terraplenes cultivables poco fértiles; terraplenes.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.	3000

Fig. 60: Valor medio de la resistividad.

En los reglamentos de AT (MIE-RAT) y de BT (MIE-RBT) figura una tabla de resistividades de terrenos más pormenorizada que la anterior.

En la realidad práctica estas tablas son poco útiles para el cálculo de los sistemas de toma de tierra de los CT puesto que:

- para cada tipo de terreno de los especificados, el margen de valores es muy amplio (1 a 2, 1 a 5, 1 a 10), de tal manera que aún tomando un valor medio el margen posible de incertidumbre en más o en menos es excesivo,

- en estas tablas no figuran los terrenos formados por materiales procedentes de derribos, tierras mezcladas y/o sobrepuestas, tierras de relleno, antiguos vertederos recubiertos, tierras procedentes de obras de excavación, etc. Estos casos son cada vez más frecuentes.

Cuando se trata de CT MT/BT de hasta 30 kV y corriente de cortocircuito hasta 16 kA, el MIE-RAT 13 no exige determinación previa de la resistividad del terreno y admite que se haga solamente por examen visual del mismo y aplicación de las citadas tablas.

No obstante siguiendo la razonable recomendación de UNESA, cuando ha de proyectarse un CT es aconsejable efectuar una medición previa de la resistividad del terreno. Es una medición relativamente fácil; (existen en el mercado aparatos para ello); y de coste pequeño en relación con el coste total del CT.

Con esta determinación previa de la resistividad del terreno, se reduce mucho la eventualidad de tener que introducir a posteriori modificaciones siempre incómodas y de coste imprevisible.

Para esta medición de ρ el procedimiento más utilizado y recomendado es el método de

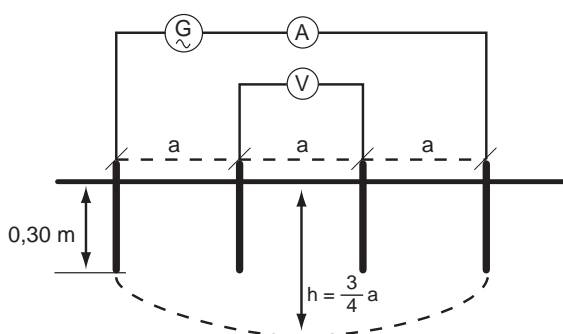


Fig. 61: Disposición de las sondas para la medida de ρ .

Wenner. Se dispondrán cuatro sondas alineadas a intervalos iguales, simétricas respecto al punto en donde se desea medir la resistividad del terreno. La profundidad de estas sondas no es preciso que sobrepase los 30 cm. La separación entre las sondas (a) permite conocer la resistividad media del terreno entre su superficie y una profundidad h , aproximadamente igual a la profundidad máxima a la que se instalará el electrodo (**figura 61**).

Siendo:

$$a = \frac{4}{3} h,$$

$$\rho_h = \frac{2\pi a V}{I}, \quad r = \frac{V}{I};$$

$$\rho_h = 2\pi a r \quad (\Omega.m).$$

En la tabla de la **figura 62** se recogen los valores del coeficiente $K = 2\pi a$, que junto con la lectura del aparato (r) determina la resistividad media ρ_h del terreno en la franja comprendida entre la superficie y la

profundidad $h = \frac{3}{4} a$.

Distancia entre sondas (m)	Profundidad h (m)	Coficiente $K = 2\pi a$ (A)	Lectura del aparato (r) (B)	Resistividad del terreno ($\Omega.m$) (A x B)
(a)	(3/4 a)	(A)	(B)	(A x B)
2	1,5	12,57		
4	3,0	25,13		
6	4,5	37,70		
8	6,0	50,27		
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	276,46		
46	34,5	289,03		
48	36,0	301,59		
50	37,5	314,16		

Fig. 62: Cálculo de la resistividad media del terreno.

5.2 Paso de la corriente por el terreno

La corriente pasa al terreno repartiéndose por todos los puntos de la superficie del electrodo en contacto con la tierra, por tanto, en todas las direcciones a partir del mismo.

En la **figura 63** se representa este paso, en el caso de una pica vertical. Una vez ya en el terreno, la corriente se va difundiendo por el mismo. Con terrenos de resistividad ρ_t homogénea puede idealizarse este paso suponiendo el terreno formado por capas concéntricas alrededor del electrodo, todas del mismo espesor L .

La corriente va pasando sucesivamente de una capa a la siguiente. Véase que cada vez

la superficie de paso es mayor, y por tanto la resistencia R de cada capa va siendo cada vez menor, hasta llegar a ser despreciable.

La resistencia de cada capa es $R = \rho / S$. Estas resistencias se suman, pues están en serie:

$$\rho_t (L/S_1 + L/S_2 + L/S_3 + \dots + L/S_n).$$

Si se multiplican estas resistencia por el valor I de la corriente se tendrá la caída de tensión $U = IR$ en cada una de las sucesivas capas concéntricas. Al ser la resistencia R cada vez menor, también lo será la caída de tensión hasta hacerse despreciable.

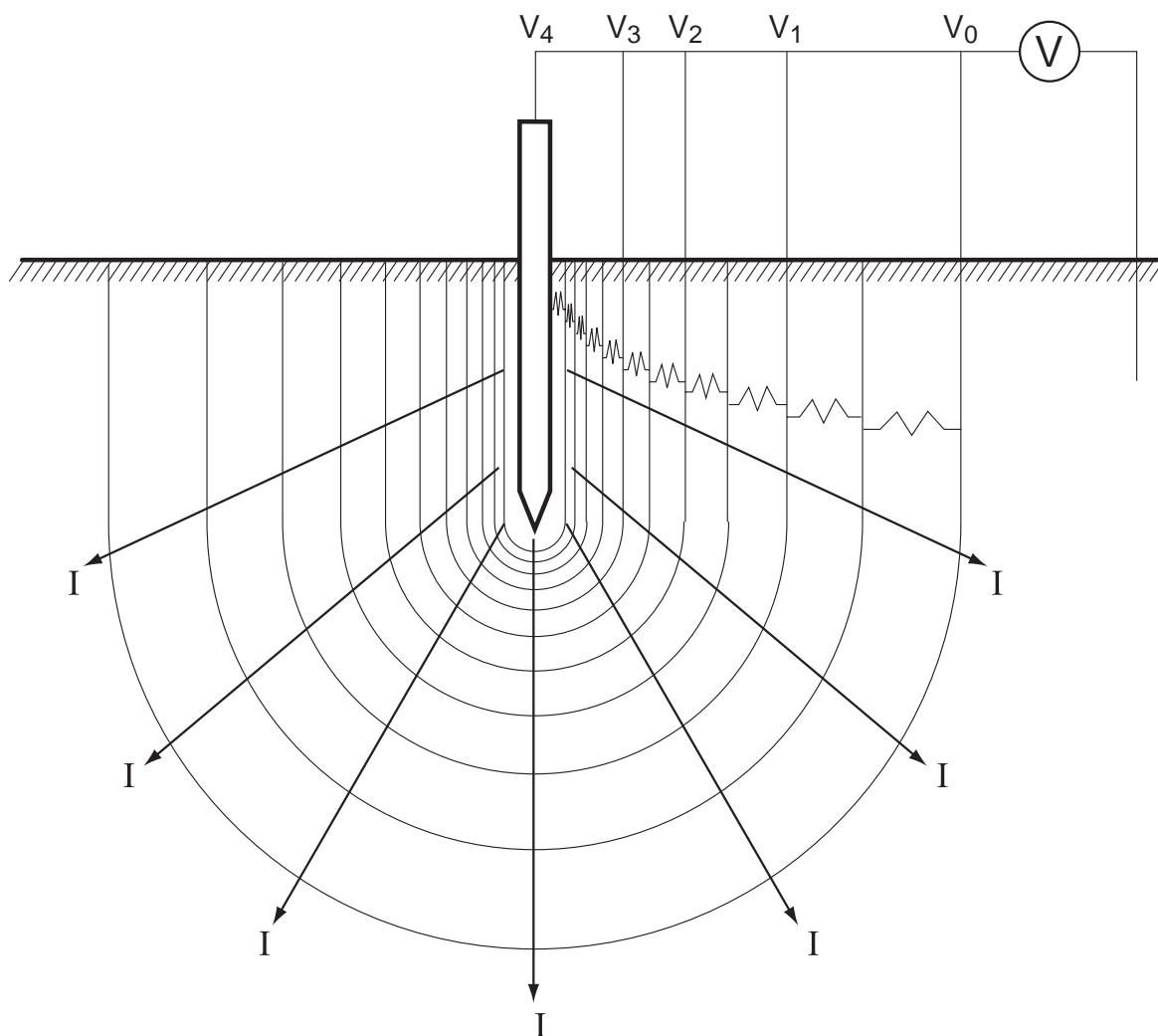


Fig. 63: Paso de la corriente al terreno.

En consecuencia, el valor de la tensión U en cada punto del terreno, en función de su distancia del electrodo, será según la curva representada en la **figura 64**.

Esta curva es válida para todas las direcciones con origen en el electrodo. Geométricamente se trata del corte de una figura de revolución cuyo eje es el electrodo.

En los sistemas de MT esta tensión U suele hacerse prácticamente cero a una distancia del electrodo de unos 20 a 30 m.

Entre dos puntos de la superficie del terreno, habrá pues una diferencia de tensión función de la distancia entre ellos y al electrodo. Véase que para una misma distancia entre estos dos puntos la diferencia de tensión será máxima cuando ambos puntos estén en un mismo «radio» o sea semirrecta con origen en el electrodo. A efectos de seguridad, se considera siempre este caso que da el valor máximo.

Esta diferencia de tensión entre dos puntos de la superficie del terreno, se denomina

«tensión de paso» pues es la que puede quedar aplicada entre los dos pies separados de una persona que en aquel momento se encuentre pisando el terreno. La tensión de paso se expresa para una separación de 1 m entre los dos pies, y puede llegar a ser peligrosa, por lo cual, en el MIE-RAT 13, se indica el valor máximo admisible, en función del tiempo de aplicación.

Este tiempo es el que transcurre entre la aparición de la corriente a tierra, y su interrupción por un elemento de corte (interruptor, fusible, etc.). En las redes públicas españolas de MT este tiempo es habitualmente indicado por la compañía suministradora. Éstas acostumbran a dar valores del orden de 1 segundo, incluyendo un cierto margen de seguridad.

Cuando hay una circulación de corriente del electrodo al terreno circundante, además de la «tensión de paso» explicada, aparece también una denominada «tensión de contacto», U_c , que es la diferencia de tensión que puede resultar aplicada entre los dos

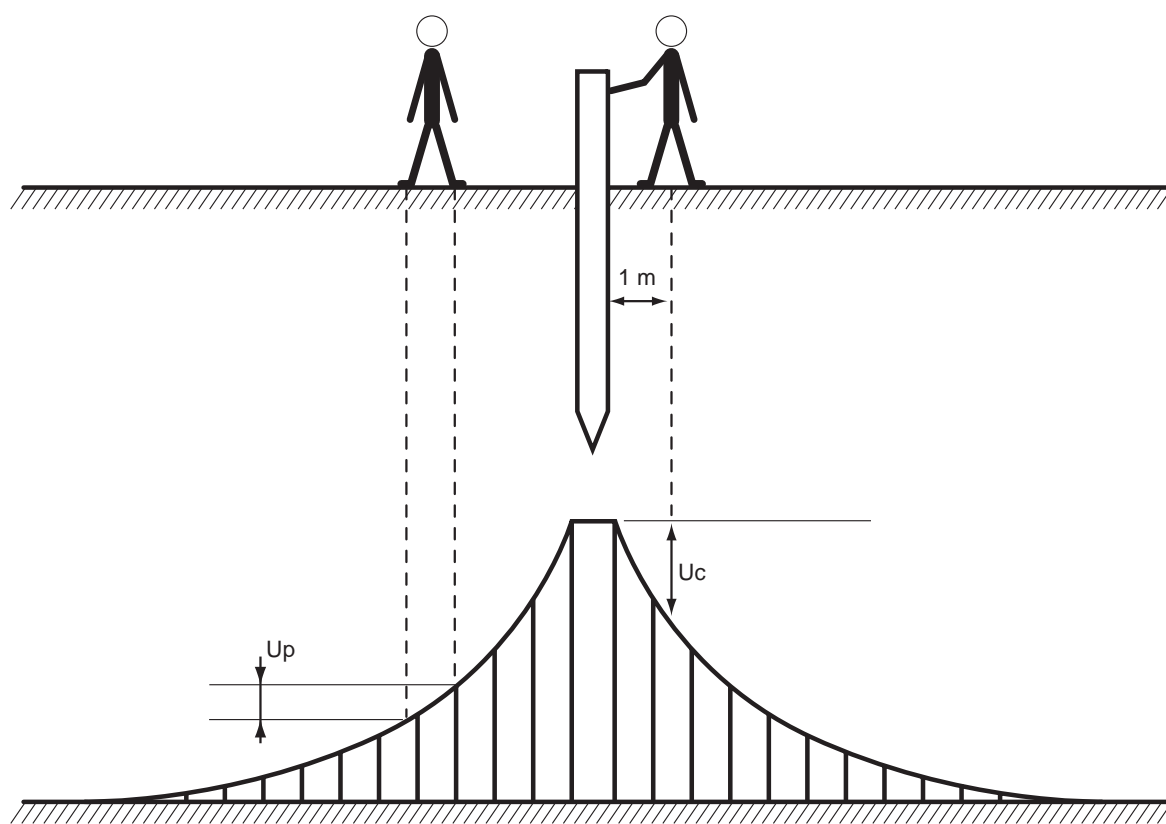


Fig. 64: Tensión de contacto (U_c) y tensión de paso (U_p).

pies juntos sobre el terreno, y otro punto del cuerpo humano (en la práctica lo más probable es que sea una mano). En la **figura 65** se representa esta posibilidad.

La peligrosidad de la tensión de contacto es superior a la de la tensión de paso, pues si bien ambas pueden producir un paso de corriente por la persona, el debido a la tensión de contacto tiene un recorrido por el organismo que puede afectar órganos más vitales. Por ejemplo, un recorrido mano-pies puede afectar al corazón, pulmones, extensa parte del tejido nervioso, etc.

Por este motivo las tensiones de contacto máximas admisibles en función del tiempo, son según el MIE-RAT 13, diez veces inferiores que las de paso (**figura 66**).

Tensiones máximas aplicables al cuerpo humano según MIE-RAT 13:

– Tensión de contacto: $V_{ca} = \frac{K}{t^n}$,

– Tensión de paso: $V_{pa} = 10 \frac{K}{t^n}$.

Siendo:

V_{ca} y V_{pa} : tensión en V,

t: tiempo en s,

K y n: constantes función del tiempo:

$$\begin{aligned} 0,9 \geq t > 0,1s &\Rightarrow K = 72 & n = 1 \\ 3 \geq t > 0,9s &\Rightarrow K = 78,5 & n = 0,18 \\ 5 \geq t > 3s &\Rightarrow V_{ca} = 64 \text{ V} & V_{pa} = 640 \text{ V} \\ t > 5s &\Rightarrow V_{ca} = 50 \text{ V} & V_{pa} = 500 \text{ V} \end{aligned}$$

Hay que distinguir entre estos valores máximos aplicables al cuerpo humano V_{ca} y V_{pa} y las tensiones de contacto V_c de paso V_p que puede aparecer en el terreno.

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

Estas tensiones V_c y V_p se calculan con las fórmulas siguientes:

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

$$\text{Tensión de contacto: } V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1000} \right) \quad (2)$$

Siendo ρ_s la resistividad superficial del terreno expresada en $\Omega.m$, y V_p y V_c en voltios.

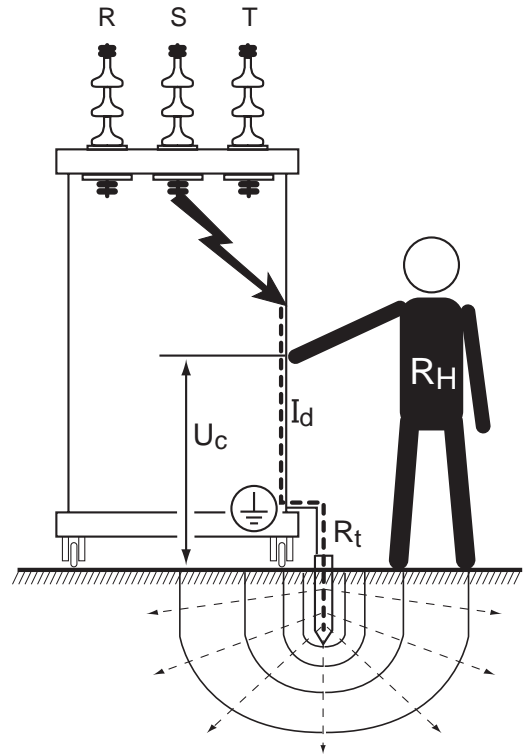


Fig. 65: Tensión de contacto, debido al paso de la corriente.

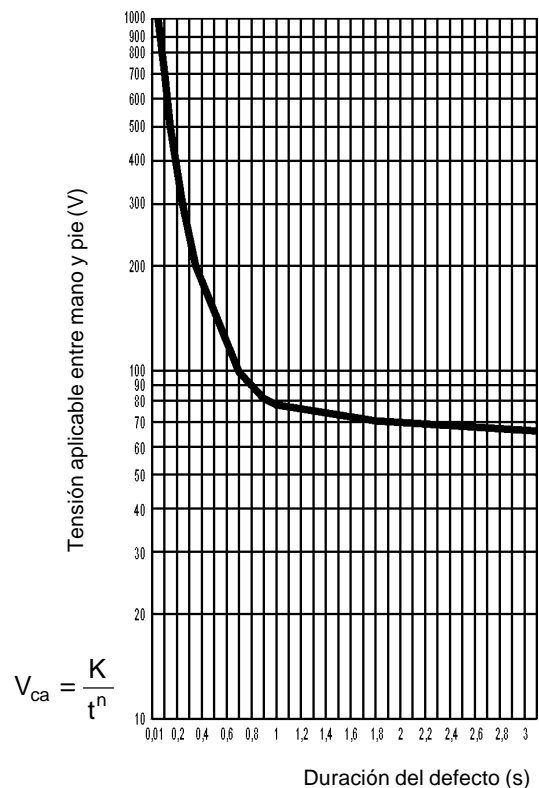


Fig. 66: Tensión aplicable entre mano y pies, V_{ca} , en función de la duración del defecto.

En la **figura 67** están representados los circuitos equivalentes, y la deducción de las fórmulas anteriores a partir de los mismos. Ambos responden a las siguientes simplificaciones:

Resistencia del cuerpo humano
 $R_H = 1000 \Omega$, se desprecia la resistencia del calzado.

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

Para la resistividad superficial ρ_s puede tomarse el valor ρ_H , obtenido en la medición efectuada por el método de Wenner antes explicado.

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

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

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

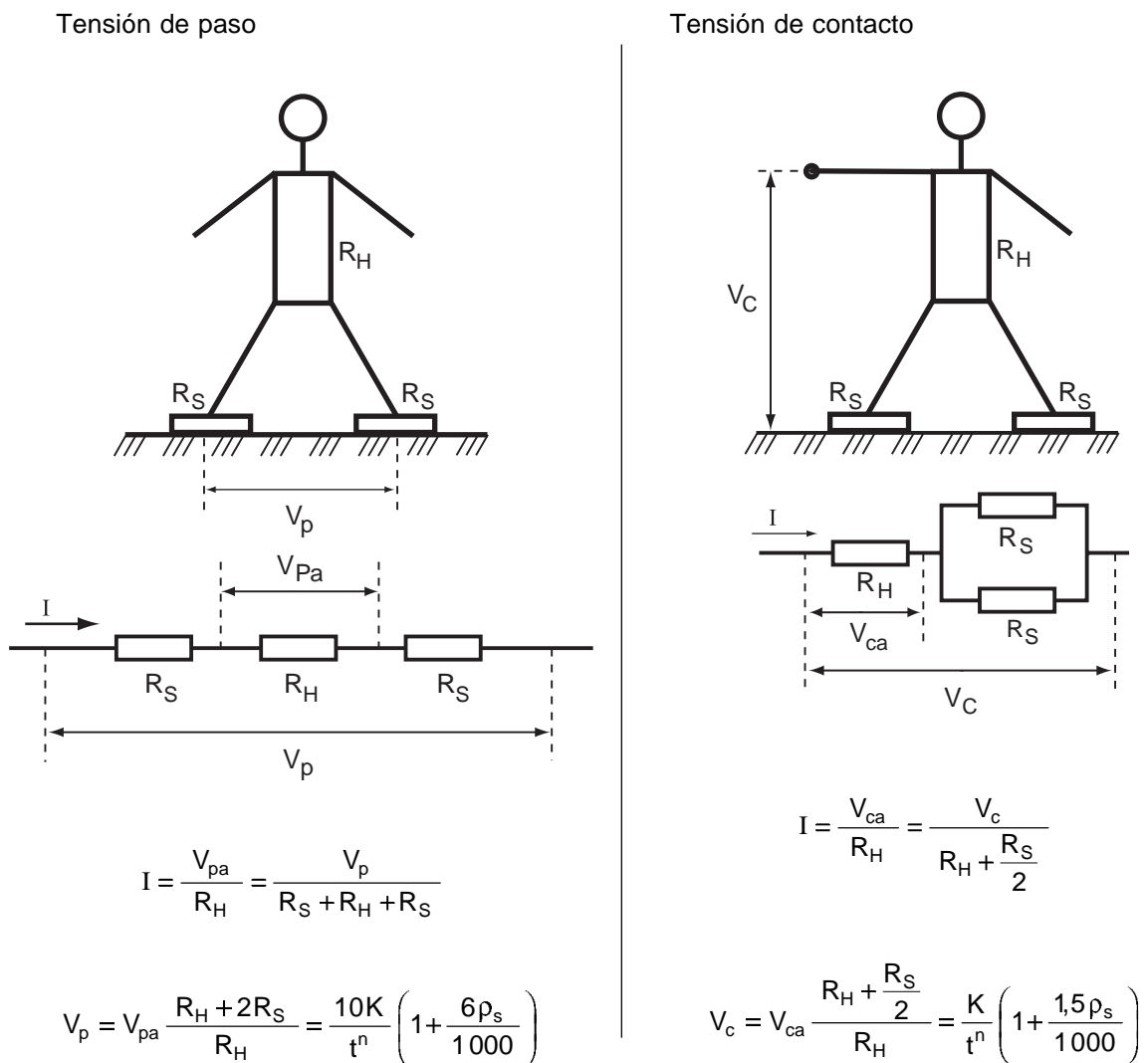


Fig. 67: Tensión de paso y de contacto.

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

Para el pavimento de cemento, hormigón o similar puede tomarse una resistividad $\rho_s = 3000 \Omega.m$.

A esta tensión se la denomina «tensión de paso de acceso».

Se denomina «tensión de defecto» U_d a la tensión que parece entre el electrodo de puesta a tierra y un punto del terreno a potencial cero, cuando hay un paso de corriente de defecto I_d por el electrodo a tierra.

Cuando en la parte de Media Tensión del CT se produce un cortocircuito unipolar fase-

tierra el circuito de la corriente de defecto I_d , es el representado en la **figura 68**. Por tanto la tensión de defecto es $U_d = I_d.R_t$ que se mantiene en tanto circule la corriente I_d .

Nota: Según se explica en el anexo «La puesta a tierra del neutro de MT», el secundario MT de los transformadores AT/MT de las estaciones receptoras que alimentan los CT MT/BT, acostumbra a estar conectado en triángulo, por lo cual, hay instalada una bobina para la formación del punto neutro. Ahora bien, para simplificar la representación del circuito de esta corriente de defecto y facilitar al lector su entendimiento, en esta **figura 68** se ha representado el secundario MT conectado en estrella.

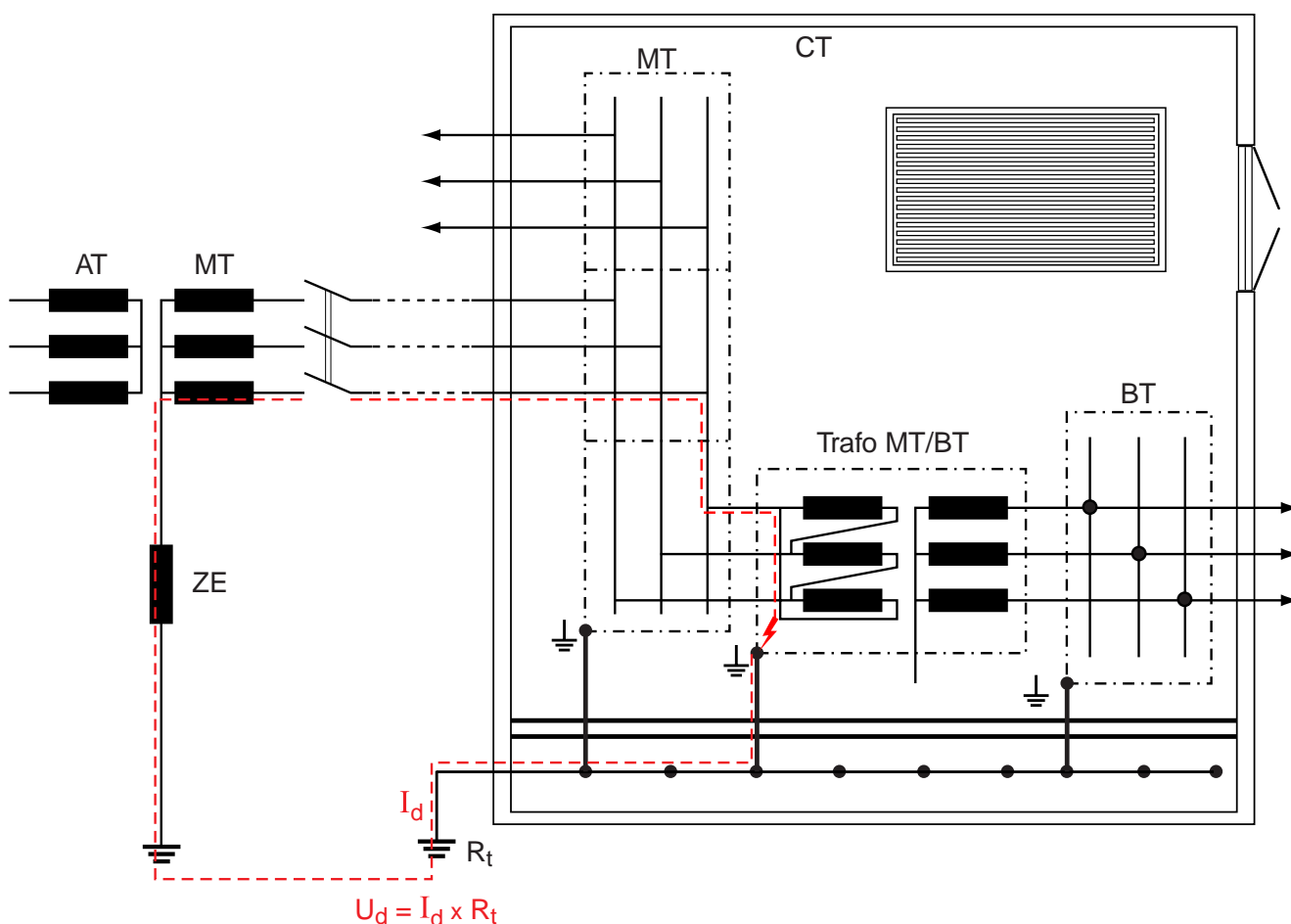


Fig. 68: Corriente de defecto en un cortocircuito fase-tierra.

5.3

Diseño de la instalación de puesta a tierra de un CT MT/BT

5.3.1.- Procedimiento UNESA

El procedimiento recomendado, es el propuesto por UNESA en su publicación:

«Método de cálculo y proyecto de instalaciones de puesta a tierra para centro de transformación de tercera categoría».

Este procedimiento, refrendado por el Ministerio de Industria y Energía, se basa en el método de Howe.

Consiste en elegir para el, o los, electrodos de puesta a tierra una de las «configuraciones tipo» que figuran en la mencionada publicación.

Para cada una de estas configuraciones tipo, se indican unos factores llamados «valores unitarios», en base a los cuales, a la resistividad ρ del terreno y a la corriente de defecto fase-tierra I_d , se puede calcular la resistencia R_t del electrodo de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto.

Para el proyecto de un CT de MT/BT, es aconsejable disponer de esta publicación. Por otra parte, existen programas de cálculo por ordenador basados en este procedimiento, del cual, se hace a continuación una exposición resumida.

5.3.2.- Sistemas de puesta a tierra

Según MIE-RAT 13, en principio, hay que considerar dos sistemas de puesta a tierra diferentes:

5.3.2.1.- Puesta a tierra de protección

Se conectan a esta toma de tierra las partes metálicas interiores del CT que normalmente están sin tensión, pero que pueden estarlo a consecuencia de averías, accidentes, descargas atmosféricas o sobretensiones. Por tanto:

- las carcasas de los transformadores,
- los chasis y bastidores de los aparatos de maniobra,
- las envolventes y armazones de los conjuntos de aparatación MT (cabinas, celdas),
- los armarios y cofrets con aparatos y elementos de BT,
- las pantallas y/o blindajes de los cables MT.

En general pues, todos aquellos elementos metálicos que contengan y/o soporten partes en tensión, las cuales, por un fallo o contorno de su aislamiento, a masa, puedan transmitirles tensión.

En este método UNESA, se exceptúan de conectar a esta toma de tierra de protección, los elementos metálicos del CT accesibles desde el exterior, y que no contienen ni soportan partes en tensión. Por tanto, las puertas y sus marcos, las persianas con sus rejillas, para la entrada y la salida del aire de ventilación, etc.

5.3.2.2.- Puesta a tierra de servicio

Se conectan a esta puesta a tierra, puntos o elementos que forman parte de los circuitos eléctricos de MT y de BT. Concretamente:

- en los transformadores, el punto neutro del secundario BT, cuando esto proceda, o sea, directamente cuando se trata de distribuciones con régimen de neutro TN o TT, o a través de una impedancia cuando son con régimen IT. (Ver anexo A6 «Regímenes de neutro»),
- en los transformadores de intensidad y de tensión, uno de los bornes de cada uno de los secundarios,
- en los seccionadores de puesta a tierra, el punto de cierre en cortocircuito de las tres fases y desconexión a tierra.

Más adelante, se expondrán los criterios y/o las condiciones para disponer dos redes de puesta a tierra separadas; cada una con su electrodo; una para las tomas de tierra de protección, y otra para las de servicio, o bien para reunir las en un solo sistema y electrodo comunes, constituyendo una instalación de tierra general.

5.3.3.- Configuración de los electrodos de conexión a tierra

En este procedimiento UNESA las configuraciones consideradas son:

- cuadrados y rectángulos de cable enterrado horizontalmente, sin picas,
- cuadrados y rectángulos de cable enterrado como las anteriores pero con 4 u 8 picas verticales,

– configuraciones longitudinales, o sea, línea recta de cable enterrado horizontalmente, con 2, 3, 4, 6 u 8 picas verticales alineadas.

Para cada una de estas configuraciones, se consideran dos profundidades de enterramiento, de 0,5 y de 0,8 m, y, para las picas, longitudes de las mismas de 2, 4, 6 u 8 m.

En la **figura 69** se relaciona el índice general de estas configuraciones tipo.

Nota: Se entiende por electrodo de puesta a tierra, el conjunto formado por los conductores horizontales y las picas verticales (si las hay), todo ello enterrado.

Los valores que se indican en las tablas corresponden a electrodos con picas de 14 mm de diámetro y conductor de cobre desnudo de 50 mm² de sección. Para otros diámetros de pica y otras secciones de conductor, de los empleados en la práctica, pueden utilizarse igualmente estas tablas, ya que estas magnitudes no afectan prácticamente al comportamiento del electrodo.

Las dimensiones seleccionadas corresponden a los tipos más usuales de locales para CT, considerando la posibilidad de aprovechar la excavación necesaria para la cimentación del local, para instalar un conductor en el fondo de la zanja de cimentación, siguiendo por tanto el perímetro del CT. Este conductor al que, en caso necesario, se conectarán picas, constituye el electrodo. En casos en que sea problemático realizar este tipo de electrodo (subsuelo ocupado) puede recurrirse a la colocación de un electrodo longitudinal con picas exteriores en hilera.

No resulta problemático el caso de que se quiera construir un electrodo cuya geometría no coincida exactamente con la de ninguno de los electrodos tipo de las tablas. Basta con seleccionar el electrodo tipo de medidas inmediatamente inferiores, con la seguridad de que si la resistencia de puesta a tierra y las tensiones de paso y contacto de este último cumplen las condiciones establecidas en la MIE-RAT 13, con mayor razón las cumplirá el electrodo real a construir, pues al ser de mayores dimensiones, presentará una menor resistencia de puesta a tierra y una mejor disipación de las corrientes de defecto.

Cuando se trata de CT exteriores, o sea en edificio (caseta) exclusivo para el CT, las configuraciones cuadradas o rectangulares es decir perimetrales, son muy adecuadas.

Figura	Lados en mm		
Cuadrado	de	2,0	x 2,0
Rectángulo	de	2,0	x 2,5
Rectángulo	de	2,0	x 3,0
Cuadrado	de	2,5	x 2,5
Rectángulo	de	3,0	x 2,5
Cuadrado	de	3,0	x 3,0
Rectángulo	de	3,0	x 3,5
Rectángulo	de	4,0	x 2,5
Rectángulo	de	4,0	x 3,0
Rectángulo	de	4,0	x 3,5
Cuadrado	de	4,0	x 4,0
Rectángulo	de	5,0	x 2,5
Rectángulo	de	5,0	x 3,0
Rectángulo	de	5,0	x 3,5
Rectángulo	de	5,0	x 4,0
Cuadrado	de	5,0	x 5,0
Rectángulo	de	6,0	x 2,5
Rectángulo	de	6,0	x 3,0
Rectángulo	de	6,0	x 3,5
Rectángulo	de	6,0	x 4,0
Cuadrado	de	6,0	x 6,0
Rectángulo	de	7,0	x 2,5
Rectángulo	de	7,0	x 3,0
Rectángulo	de	7,0	x 3,5
Rectángulo	de	7,0	x 4,0
Rectángulo	de	8,0	x 2,5
Rectángulo	de	8,0	x 3,0
Rectángulo	de	8,0	x 3,5
Rectángulo	de	8,0	x 4,0
Electrodo longitudinal con picas de		2 m	
Electrodo longitudinal con picas de		4 m	
Electrodo longitudinal con picas de		6 m	
Electrodo longitudinal con picas de		8 m	

Fig. 69: Configuraciones tipo.

Cuando se trata de un CT interior o sea formando parte de una edificación mayor alimentada por dicho CT, en muchas ocasiones hay que recurrir a las configuraciones longitudinales paralelas al frente de acceso al CT.

5.3.4.- Mallado interior

En el suelo del CT, se instalará un mallado electrosoldado, con redondos de diámetro no inferior a 4 mm formando una retícula no superior a 0,3 x 0,3 m, embebido en el suelo de hormigón del Centro de Transformación a una profundidad de 0,10 m. Este mallado se conectará como mínimo en dos puntos, preferentemente opuestos, al electrodo de puesta a tierra de protección del Centro de Transformación (**figura 70**).

Todas las partes metálicas interiores del CT que deben conectarse a la puesta a tierra de protección (cajas de los transformadores, cabinas, armarios, soportes, bastidores, carcasas, pantallas de los cables, etc.), se conectarán a este mallado.

Las puertas y rejillas metálicas que den al exterior del centro no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión debido a defectos o averías. Por tanto, no se conectarán a este mallado interior.

Con esta disposición de mallado interior, se obtiene una equipotencialidad entre todas las partes metálicas susceptibles de adquirir

tensión, por avería o defecto de aislamiento, entre sí y con el suelo.

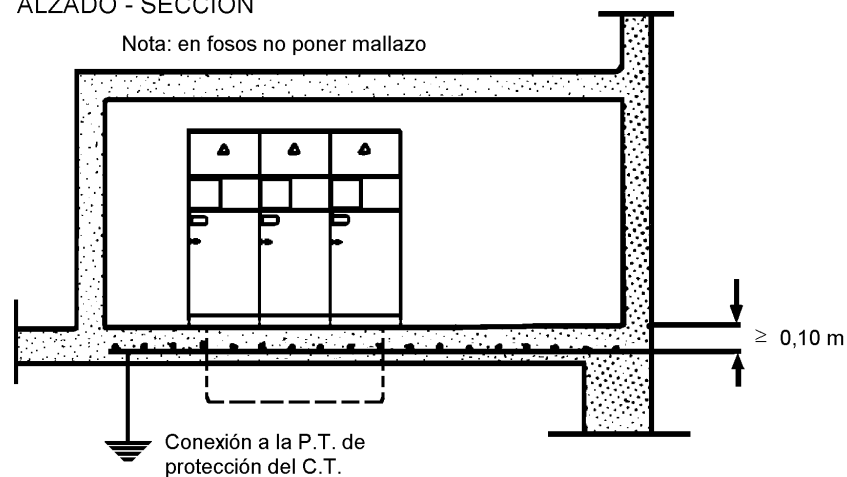
Por tanto, no pueden aparecer tensiones de paso ni de contacto en el interior del CT.

Para los centros de transformación sobre poste, se aplica una solución análoga.

Para controlar la tensión de contacto se colocará 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 cimentación de los apoyos. Dentro de la losa y hasta 1 m de las aristas exteriores de la cimentación del apoyo, se dispondrá un mallazo electrosoldado de construcción con

ALZADO - SECCIÓN

Nota: en fosos no poner mallazo



PLANTA

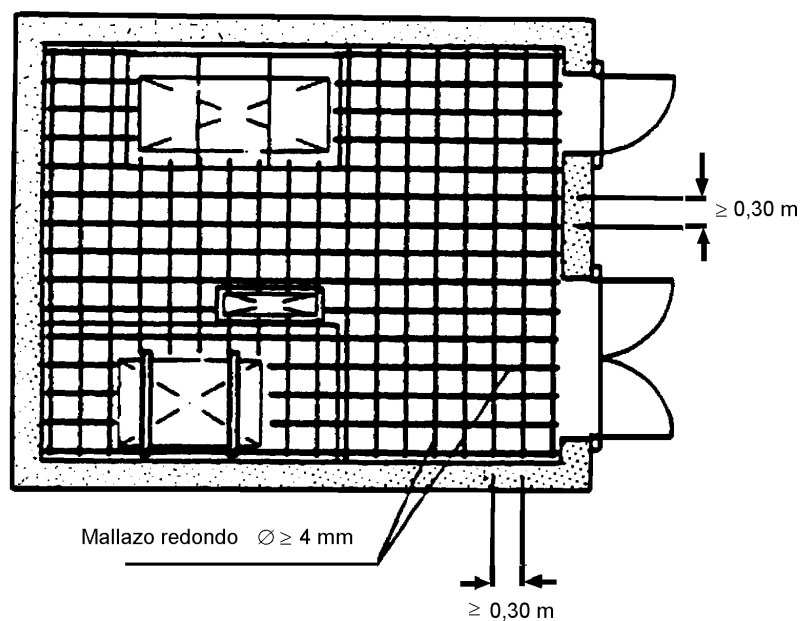


Fig. 70: Mallado de un centro de transformación en edificio.

redondos de diámetro no inferior a 4 mm formando una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m. Este mallazo se conectará a la puesta a tierra de protección del centro al menos en 2 puntos preferentemente opuestos, y quedará recubierto por un espesor de hormigón no inferior a 10 cm (figura 71). El poste, la caja del transformador, los soportes, etc., se conectarán a este mallazo.

Con esta medida se consigue que la persona que deba acceder a una parte que, de forma eventual, pueda ponerse en tensión, esté situada sobre una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo inherente a la tensión de contacto y de paso interior.

El proyectista podrá justificar otras medidas equivalentes.

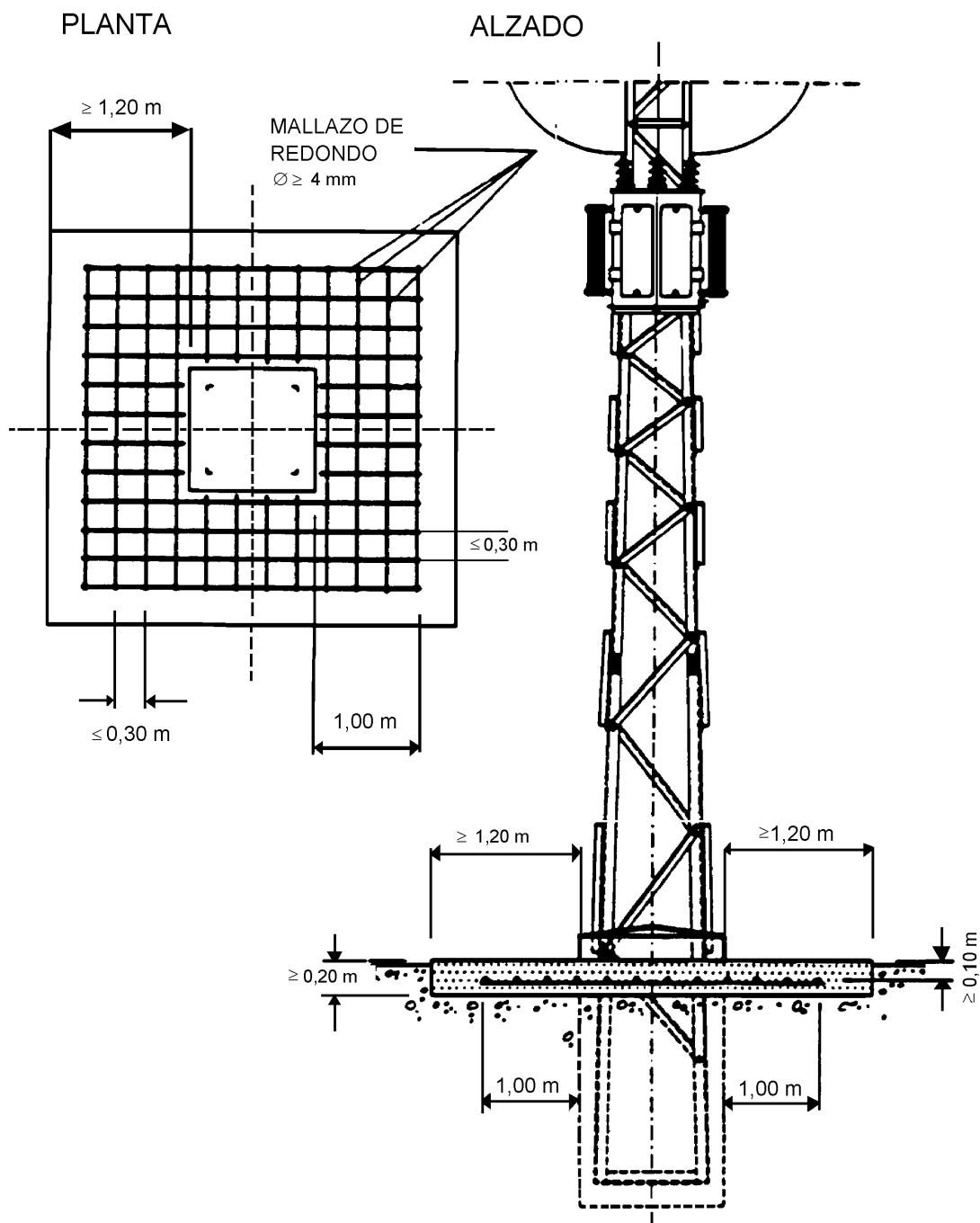


Fig. 71: Mallado de un centro de transformación en poste.

5.4

Corriente máxima de cortocircuito unipolar fase-tierra, en la parte de MT del CT

En redes de MT con el neutro aislado, la intensidad de defecto a tierra es la corriente capacitiva de la red respecto a tierra, directamente proporcional a la longitud de la red.

Para el cálculo de la corriente máxima a tierra, en una red con neutro aislado, se aplicará la fórmula:

$$I_d = \frac{\sqrt{3}U(\omega C_a L_a + \omega C_c L_c)}{\sqrt{1 + (\omega C_c L_a + \omega C_c L_c)^2 (3R_t)^2}} \quad (4)$$

siendo:

I_d : corriente de defecto máxima (A),

U: tensión compuesta de la red (V),

C_a : capacidad homopolar de la línea aérea (F/km),

L_a : longitud total de las líneas aéreas de MT subsidiarias de la misma transformación AT/MT (km),

C_c : capacidad homopolar de los cables MT subterráneos (F/km),

L_c : longitud total de los cables subterráneos de MT subsidiarios de la misma transformación AT/MT (km),

R_t : resistencia de la puesta a tierra de protección del centro de transformación (Ω),

ω : pulsación de la corriente ($2\pi f$).

Salvo que el proyectista justifique otros valores, se considerará para las capacidades de la red aérea y subterránea, respectivamente, los siguientes valores:

C_a : 0,006 $\mu\text{F/km}$,

C_c : 0,25 $\mu\text{F/km}$,

los cuales corresponden a los conductores de las secciones más utilizadas normalmente, con tensiones nominales de 20 kV.

En redes de MT con el neutro conectado a tierra a través de una impedancia, la intensidad de defecto a tierra, es

inversamente proporcional a la impedancia del circuito que debe recorrer. Como caso más desfavorable, y para simplificar los cálculos (salvo que el proyectista justifique otros aspectos) sólo se considerará la impedancia de la puesta a tierra Z_E (figura 68) del neutro MT, y la resistencia R_t del electrodo de puesta a tierra en el CT.

Esto supone estimar nula la impedancia homopolar de las líneas aéreas y los cables subterráneos. Con ello, los valores de I_d calculados resultan algo superiores a los reales, lo cual es admisible por cuanto representa un cierto margen de seguridad.

Para el cálculo, se utilizará, salvo justificación, la siguiente expresión:

$$I_d = \frac{U}{\sqrt{3} \sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}} \quad (5)$$

Siendo:

I_d : Intensidad máxima de defecto a tierra, en el centro considerado, en A,

U: Tensión compuesta de servicio de la red, en V,

R_n : Resistencia de la puesta a tierra del neutro de la red MT, en Ω ,

R_t : Resistencia de la puesta a tierra de protección del CT, en Ω ,

X_n : Reactancia de la puesta a tierra del neutro de red MT, en Ω .

Los valores de R_n y X_n son característicos de cada red y son valores que debe dar la empresa suministradora de energía.

Nota: En algunas compañías distribuidoras, se sigue el criterio de hacer la resistencia R_n de valor despreciable frente a la reactancia X_n , o sea $Z_E \approx X_n$.

Puede suceder que la compañía suministradora, en lugar de X_n y R_n indique solamente el valor máximo de la corriente de cortocircuito unipolar fase-tierra en el origen de la línea MT que alimenta el CT.

En este caso, cabe considerar que la impedancia Z_E es prácticamente sólo reactiva ($Z_E \approx X_n$ y $R_n \approx 0$) y calcular su valor mediante la fórmula:

$$X_n = \frac{U_n / \sqrt{3}}{I_{dm}} \quad (6)$$

Siendo:

U_n : la tensión de alimentación MT, valor eficaz entre fases, en V,

I_{dm} : la intensidad de defecto máxima en el origen de la línea MT, en A.

Una vez obtenido, el valor de X_n se incorpora en la fórmula (5) para el cálculo de I_d , considerando $R_n \approx 0$.

5.5 Sobretensiones admisibles en la parte de BT de los CT

Al producirse un defecto de aislamiento en la parte de MT del CT, la tensión de defecto $U_d = I_d R_t$ que aparece, resulta aplicada también a las envolventes y soportes de los elementos de BT, puesto que también están conectados a la puesta a tierra de protección.

Por tanto, durante el paso de la corriente de defecto I_d , aparece una sobretensión U_d entre dichas envolventes y soportes y los elementos de BT que contienen o soportan.

Básicamente son:

- entre caja del transformador y el secundario BT del mismo,
- entre armario de BT y los aparatos y conexiones que haya en su interior.

Por tanto los elementos de BT del CT deben poder soportar esta tensión de defecto

$U_d = I_d R_t$ sin deteriorarse. Debe de cumplirse pues la condición:

$$U_{BT} > U_d$$

siendo:

U_{BT} : la tensión en V entre fases y masa soportada (tensión de ensayo) por los elementos de BT del CT. Se trata de un tensión de frecuencia industrial (50 Hz) aplicada durante 1 minuto,

U_d : tensión de defecto, en V,

R_t : resistencia del electrodo, de puesta a tierra, en Ω ,

I_d : intensidad de defecto, en A.

Para las partes de BT de los CT, las tensiones de ensayo U_{BT} entre fases y masa, a 50 Hz, 1 minuto, normalizadas, son de 4 000, 6 000, 8 000 y 10 000 V.

La recomendada por UNESA, es de 10 000 V.

Ver ejemplo numérico al final.

5.6 Aspectos a tener en cuenta en el diseño de los electrodos de puesta a tierra

A.- Seguridad de las personas en lo concerniente a las tensiones de paso y contacto

Según antes explicado, con la instalación del mallado equipotencial en el suelo del CT, no pueden aparecer tensiones de paso y contacto en el interior del mismo.

Queda pues a considerar solamente las tensiones de paso y contacto exteriores. Para ellas, en este método UNESA se indica lo siguiente:

- con el mencionado mallado equipotencial conectado al electrodo de tierra, la tensión de

paso de acceso es equivalente al valor de la tensión de contacto exterior máxima,

- para el caso de electrodos longitudinales con picas exteriores, colocados frente a los accesos al CT paralelos a su fachada, no debe considerarse la tensión de paso de acceso y contacto exterior.

Por el contrario si el electrodo se ubica lejos de los accesos al CT, deberá considerarse como tensión de paso de acceso y contacto exterior, la tensión de defecto $U_d = I_d R_t$.

La condición es que las tensiones máximas calculadas para el electrodo elegido, deben

ser iguales o inferiores a las máximas admisibles en la instalación, tal como se detalla en la tabla de la **figura 72**.

B.- Protección del material

La condición es que el nivel de aislamiento del equipo de BT del CT, sea igual o superior a la tensión de defecto, o sea:

$$U_{BT} \geq I_d R_t$$

C.- Valor de la intensidad de defecto I_d suficiente para hacer actuar los relés de protección y asegurar la eliminación de la falta

En la práctica, este aspecto es a definir por la Compañía Suministradora, pues concierne al ajuste y sensibilidad de los relés de protección instalados en la cabecera de las líneas de distribución en MT que salen de sus estaciones receptoras AT/MT.

En configuración cuadradas o rectangulares:

$$\text{Tensión calculada de paso exterior} \leq \text{Tensión de paso, según fórmula (1)}$$

$$\text{Tensión calculada de paso de acceso y contacto exterior} \leq \text{Tensión de paso de acceso, según fórmula (3)}$$

En configuración longitudinales colocadas frente a los accesos a CT:

$$\text{Tensión calculada de paso exterior} \leq \text{Tensión de paso, según fórmula (1)}$$

En electrodos alejados del CT:

$$\text{Tensión calculada de paso exterior} \leq \text{Tensión de paso, según fórmula (1)}$$

$$\text{Tensión calculada de paso de acceso y contacto exterior} \leq \text{Tensión de defecto } U_d = I_d R_t$$

Fig. 72: Condiciones de la tensión de paso.

5.7

Parámetros característicos de las configuraciones tipo

Son los denominados «valores unitarios».

■ En las configuraciones cuadradas o rectangulares son:

- Para el cálculo de la resistencia R_t del electrodo de tierra K_r
- Para el cálculo de la tensión de paso exterior máxima K_p
- Para el cálculo de tensión de acceso y contacto exterior máximas $K_c = K_{p(acc)}$

■ En las configuraciones longitudinales son:

- Para el cálculo de la resistencia R_t del electrodo de tierra K_r
- Para el cálculo de la tensión de paso exterior máxima K_p

5.8 Procedimiento de cálculo

- Datos de partida, a facilitar por la compañía suministradora:
 - Tensión de alimentación,
 - Neutro de MT aislado o bien conectado a tierra a través de impedancia Z_E .
- En el caso de neutro aislado:
 - Longitud total de las líneas de MT subsidiarias de la misma transformación AT/MT, en km. Es el valor L_a de la fórmula (4).
 - Longitud total de los cables subterráneos MT subsidiarios de la misma transformación AT/MT, en km. Es el valor L_c de la fórmula (4).
- En el caso de neutro conectado a tierra a través de impedancia Z_E :
 - Valor de la impedancia Z_E desglosada en reactancia X_n y resistencia R_n ,
 - o bien, como dato alternativo, menos preciso pero hasta cierto punto suficiente, la intensidad máxima de cortocircuito unipolar fase-tierra, en el origen de la línea de MT que alimenta el CT.
 - Duración de la corriente de falta, hasta su eliminación por la acción de las protecciones. En la práctica, es frecuente que indiquen valores del orden de 1 segundo.
- Dato obtenido por medición:
 - Resistividad ρ del terreno, en $\Omega \cdot m$.

5.9 Orden de los cálculos

- 1 Elección de una configuración tipo por parte del proyectista.
 - 2 Cálculo de la resistencia del electrodo elegido $R_t = K_r \cdot \rho$ (Ω).
 - 3 Cálculo de la intensidad de defecto I_d , mediante la fórmula (4) para caso de neutro aislado y mediante la (5) o bien (6) y (5) para neutro puesto a tierra a través de impedancia.
 - 4 Cálculo de la tensión de defecto en el CT: $U_d = I_d \cdot R_t$.
 - 5 En todas las configuraciones:
 - cálculo de la tensión admisible de paso exterior mediante la fórmula (1),
 - además, en las configuraciones cuadradas o rectangulares, cálculo de la tensión admisible de paso de acceso y contacto exterior, mediante la fórmula (3).
 - 6 A partir de los «valores unitarios» correspondientes a la configuración elegida:
 - cálculo de la tensión de paso exterior $U_p = K_p \cdot \rho \cdot I_d$ (V),
 - cálculo de la tensión de paso de acceso y contacto exterior (caso de configuraciones cuadradas y rectangulares) $U_{p(acc)} = K_{p(acc)} \cdot \rho \cdot I_d$ (V),
 - para el caso de electrodos alejados del CT, la tensión de paso de acceso y contacto exterior es $U_{p(acc)} = U_d = R_t \cdot I_d$ (V).
 - 7 Comprobación de que estos valores obtenidos de U_p y U_{acc} son iguales o inferiores a los calculados mediante las fórmulas (1) y (3), y en el caso de electrodo alejado del CT, que U_{acc} sea igual o inferior a la tensión de defecto U_d , o sea $U_{acc} \leq I_d \cdot R_t$.
 - 8 Comprobación de que el valor de la tensión de defecto U_d es igual o inferior al nivel de aislamiento (tensión de ensayo) U_{BT} del equipo de BT del CT.
 - 9 Si alguna de estas condiciones 7 u 8 no se cumple, hay que elegir una nueva configuración más dimensionada (más picas, picas más largas, mayor profundidad de enterramiento), que dé valores de K_r , K_p y K_{acc} más bajos.
- A continuación se especifican 3 ejemplos numéricos.
- En los tres:
- Para la fórmula (3), tensión de paso de acceso, la resistividad del hormigón es $\rho = 3000 \Omega \cdot m$.
 - El nivel de aislamiento (tensión de ensayo) de los elementos de BT en el CT, es de 10 000 V, según recomienda UNESA.

5.10 Ejemplos

5.10.1.- Ejemplo nº 1

■ Datos:

Tensión de alimentación: 26 400 V.

Neutro puesto a tierra a través de impedancia Z_n de $X_n = 22,4 \Omega$ y $R_n = 12 \Omega$.

Duración del paso de corriente: 1 segundo.

Resistividad del terreno: $\rho = 200 \Omega \cdot m$.

CT en edificio propio.

■ Cálculos:

1 Se elige un electrodo de configuración en rectángulo de 7 x 4 m (**figura 74**).

Concretamente: profundidad de enterramiento: 0,5 m; 4 picas de 2 m.

Valores unitarios: $K_r = 0,076$; $K_p = 0,0165$; $K_{p(acc)} = 0,0362$.

2 Resistencia del electrodo: $R_t = 0,076 \times 200 = 15,2 \Omega$.

3 Intensidad máxima de defecto en el CT:

$$I_d = \frac{\frac{26400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{22,4^2 + (12 + 15,2)^2}} = 432,65 \text{ A}$$

4 Tensión de defecto: $U_d = 15,2 \times 432,65 = 6 576 \text{ V}$.

5 Tensión de paso exterior admisible (fórmula 1):

$$U_p = 10 \frac{78,5}{1} \times \left(1 + \frac{6 \times 200}{1000} \right) = 1727 \text{ V}$$

Tensión de paso de acceso y contacto exterior admisible (fórmula 3):

$$U_p = 10 \frac{78,5}{1} \left(1 + \frac{3 \times 200 + 3 \times 3000}{1000} \right) = 8 321 \text{ V}$$

6 Tensión de paso calculada: $U_p = 0,0165 \times 200 \times 432,65 = 1 427,77 \text{ V}$.

Tensión de paso de acceso y contacto exterior calculada:

$$U_{acc} = 0,0362 \times 200 \times 432,65 = 3 132,38 \text{ V}$$

■ Comprobación:

Tensión de paso calculada: $1 427,77 < 1 727 \text{ V}$.

Tensión de paso de acceso y contacto exterior calculada: $3 132,38 < 8 321 \text{ V}$.

Tensión de defecto: $6 576 < 10 000 \text{ V}$.

5.10.2.- Ejemplo nº 2

■ Datos:

Tensión de alimentación: 20 000 V.

Neutro conectado a tierra a través de reactancia.

Intensidad máxima de defecto en el origen de la línea: 500 A.

Duración del paso de la corriente de defecto: 1 segundo.

Resistividad del terreno $\rho = 300 \Omega \cdot \text{m}$.

CT de interior, formando parte de un edificio mayor.

■ Cálculos:

- 1 Se elige un electrodo longitudinal, que deberá ubicarse alejado del frente de acceso del CT (figura 75).

Concretamente, 3 picas de 4 m; separadas entre sí 6 m y enterradas a 0,8 m; longitud total del electrodo: 12 m.

Valores unitarios: $K_r = 0,073$; $K_p = 0,0087$.

- 2 Resistencia del electrodo: $R_t = 0,073 \times 300 = 21,9 \Omega$.

- 3 Intensidad máxima de defecto en el CT:

$$\text{Mediante la fórmula (6): } X_n = \frac{2000}{\frac{\sqrt{3}}{500}} = 23,1 \Omega$$

$$\text{Aplicado a la fórmula (5): } I_d = \frac{2000}{\frac{\sqrt{3}}{500}} = 23,1 \Omega$$

- 4 Tensión de defecto: $U_d = 21,9 \times 362,8 = 7 945 \text{ V}$.

- 5 Tensión de paso exterior admisible (fórmula 1):

$$U_p = 10 \frac{78,5}{1} \left(1 + \frac{6 \times 300}{1000} \right) = 2198 \text{ V}$$

Tensión de paso de acceso y contacto exterior admisible:

$$U_{acc} = 10 \frac{78,5}{1} \left(1 + \frac{3 \times 300 + 3 \times 3000}{1000} \right) = 8 556,5 \text{ V}$$

- 6 Tensión de paso calculada: $U_p = 0,0087 \times 300 \times 362,8 = 947 \text{ V}$.

■ Comprobación:

Tensión de paso calculada: $947 \text{ V} < 2 198 \text{ V}$.

Tensión de paso de acceso y contacto exterior. En este caso: $U_{acc} = U_d: 7 945 < 8 556,5 \text{ V}$.

Tensión de defecto: $7 945 < 10 000 \text{ V}$.

5.10.3.- Ejemplo 3

■ Datos:

Tensión de alimentación: 20 000 V.

Neutro conectado a tierra a través de una impedancia de $X_n = 20 \Omega$ y $R_n = 11,5 \Omega$.

Duración del paso de corriente: 0,9 segundos.

Resistividad del terreno $\rho = 400 \Omega.m$.

CT en edificio propio.

■ Cálculos:

1 Se elige una configuración cuadrada, de 4 x 4 m (**figura 73**).

Concretamente: 8 picas de 2 m; profundidad 0,8 m.

Valores unitarios: $K_t = 0,079$; $K_p = 0,0130$; $K_{p(acc)} = 0,0447$.

2 Resistencia del electrodo: $R_t = 0,079 \times 400 = 31,6 \Omega$.

3 Intensidad de defecto:

$$I_d = \frac{\frac{20000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{20^2 + (11,5 + 31,6)^2}} = 243 \text{ A}$$

4 Tensión de defecto: $U_d = 31,6 \times 243 = 7680 \text{ V}$.

5 Tensión de paso exterior admisible (fórmula 1):

$$U_p = 10 \frac{72}{0,9} \left(1 + \frac{6 \times 400}{1000} \right) = 2720 \text{ V}$$

Tensión de paso de acceso y contacto exterior admisible (fórmula 3):

$$U_p = 10 \frac{72}{0,9} \left(1 + \frac{3 \times 400 + 3 \times 3000}{1000} \right) = 8960 \text{ V}$$

6 Tensión de paso calculada: $U_p = 0,0130 \times 400 \times 243 = 1263,6 \text{ V}$.

Tensión calculada de paso de acceso y contacto exterior: $U_{acc} = 0,0447 \times 400 \times 243 = 4344,8 \text{ V}$.

■ Comprobación:

Tensión de paso calculada: $1263,6 \text{ V} < 2720 \text{ V}$.

Tensión de paso de acceso y contacto exterior: $4344,8 \text{ V} < 8960 \text{ V}$.

Tensión de defecto: $7680 \text{ V} < 10000 \text{ V}$.

Cuadrado de 4,0 x 4,0 m

Sección conductor = 50 mm²; diámetro picas = 14 mm; L_P = longitud de la pica en m;
K_r: en Ω/Ω.m; K_p, K_c = K_{p(acc)}: en V/(Ω.m)(A)

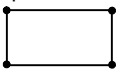
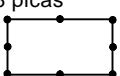
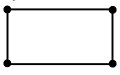

Configuración	LP	Resistencia	Tensión de paso	Tensión de contacto ext.	Código de la configuración	
	(m)	Kr	Kp	Kc = Kp(acc)		
Profundidad = 0,5 m	Sin picas	-	0,123	0,0252	0,0753	40-40/5/00
	4 picas 	2	0,092	0,0210	0,0461	40-40/5/42
		4	0,075	0,0164	0,0330	40-40/5/44
		6	0,064	0,0134	0,0254	40-40/5/46
		8	0,056	0,0113	0,0205	40-40/5/48
	8 picas 	2	0,082	0,0181	0,0371	40-40/5/82
		4	0,063	0,0132	0,0237	40-40/5/84
		6	0,053	0,0103	0,0170	40-40/5/86
		8	0,045	0,0084	0,0131	40-40/5/88
	Profundidad = 0,8 m	Sin picas	-	0,117	0,0176	0,0717
4 picas 		2	0,089	0,0144	0,0447	40-40/8/42
		4	0,073	0,0114	0,0323	40-40/8/44
		6	0,062	0,0094	0,0250	40-40/8/46
		8	0,054	0,0079	0,0203	40-40/8/48
8 picas 		2	0,079	0,0130	0,0359	40-40/8/82
		4	0,061	0,0096	0,0233	40-40/8/84
		6	0,051	0,0075	0,0169	40-40/8/86
		8	0,044	0,0062	0,0131	40-40/8/88

Fig. 73: Parámetros característicos de electrodos de puesta a tierra: cuadrado 4 x 4 m.

Rectángulo 7,0 x 4,0 m

Sección conductor = 50 mm²; diámetro picas = 14 mm; L_P = longitud de la pica en m;
K_r: en Ω/Ω.m; K_p, K_c = K_{p(acc)}: en V/(Ω.m)(A)

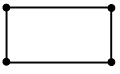
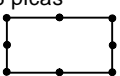
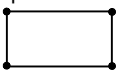

Configuración	LP	Resistencia	Tensión de paso	Tensión de contacto ext.	Código de la configuración	
	(m)	Kr	Kp	Kc = Kp(acc)		
Profundidad = 0,5 m	Sin picas	-	0,094	0,0184	0,0553	70-40/5/00
	4 picas 	2	0,076	0,0165	0,0362	70-40/5/42
		4	0,064	0,0134	0,0271	70-40/5/44
		6	0,056	0,0113	0,0215	70-40/5/46
		8	0,049	0,0097	0,0177	70-40/5/48
	8 picas 	2	0,068	0,0143	0,0302	70-40/5/82
		4	0,055	0,0108	0,0201	70-40/5/84
		6	0,046	0,0087	0,0148	70-40/5/86
		8	0,040	0,0072	0,0115	70-40/5/88
	Profundidad = 0,8 m	Sin picas	-	0,091	0,0129	0,0528
4 picas 		2	0,073	0,0113	0,0353	70-40/8/42
		4	0,062	0,0093	0,0266	70-40/8/44
		6	0,054	0,0079	0,0212	70-40/8/46
		8	0,048	0,0068	0,0175	70-40/8/48
8 picas 		2	0,066	0,0101	0,0294	70-40/8/82
		4	0,053	0,0078	0,0198	70-40/8/84
		6	0,045	0,0063	0,0147	70-40/8/86
		8	0,039	0,0053	0,0115	70-40/8/88

Fig. 74: Parámetros característicos de electrodos de puesta a tierra: rectángulo 7 x 4 m.

Placas en hilera, unidas por un conductor horizontal

Separación entre picas = 6 m; Longitud de la pica = 4 m; Sección conductor = 50 mm²; diámetro picas = 14 mm; K_r : en $\Omega/\Omega.m$; K_p : en $V/(\Omega.m)(A)$

	Número de picas	Resistencia K_r	Tensión K_p	Código de la configuración
Profundidad: 0,5 m	2	0.113	0.0208	5/24
	3	0.075	0.0128	5/34
	4	0.0572	0.00919	5/44
	6	0.0399	0.00588	5/64
	8	0.0311	0.00432	5/84
Profundidad: 0,8 m	2	0.110	0.0139	8/24
	3	0.073	0.0087	8/34
	4	0.0558	0.00633	8/44
	6	0.0390	0.00408	8/64
	8	0.0305	0.00301	8/84

Fig. 75: Parámetros característicos de electrodos de puesta a tierra: picas en hilera.

5.11 Separación de los sistemas de puesta a tierra de protección (masas) y de servicio (neutro)

En la **figura 76** se representan dos electrodos A y B de puesta a tierra, esquematizados en una sola pica cada uno.

Se representa la «zona de influencia» de cada uno, entendiéndose como tal, la zona alrededor del electrodo en la que, cuando hay una circulación de corriente a tierra aparecen unas diferencias de potencial (tensiones de paso) que se van reduciendo con la distancia hasta llegar prácticamente a cero, todo ello según antes explicado.

Si los dos electrodos están suficientemente separados, ambas zonas de influencia no se superponen. Se dice que son independientes (figura de la izquierda).

Ahora bien si los dos electrodos A y B están más cercanos, puede suceder que cuando en uno de ellos, por ejemplo el A hay una circulación de corriente a tierra, un cierto valor de las tensiones de paso que aparecen en el terreno se transfiere al otro electrodo B y por tanto a los elementos conectados al mismo.

En la parte de la derecha se representa esta situación.

5.11.1.- Sistema de tierras separadas

Si en el CT se opta por dos sistemas de puesta a tierra separados, uno de protección y otro de servicio, hay que tener presente lo siguiente:

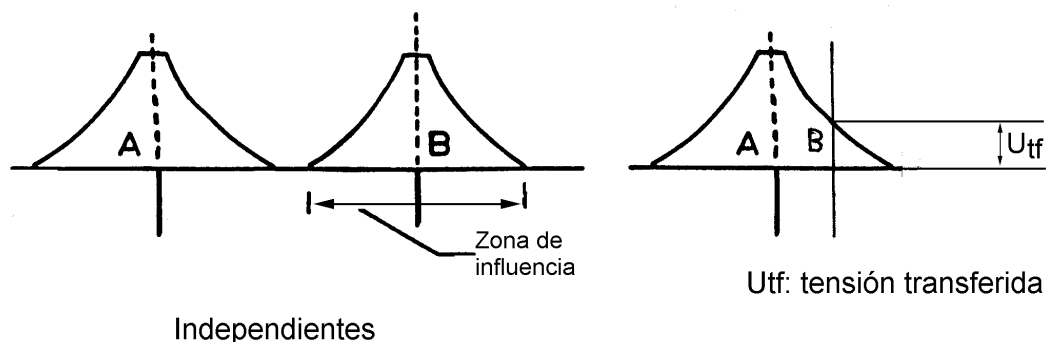


Fig. 76: Tierras independientes y con tensión transferida.

De los ejemplos numéricos anteriores, se desprende que las tensiones de defecto que aparecen en el electrodo de puesta a tierra de protección pueden alcanzar valores muy superiores a las tensiones de servicio de BT.

Por otra parte, en la puesta a tierra de servicio puede estar conectado (de hecho lo está en la mayoría de los casos) el neutro de BT de los transformadores.

Por tanto debe evitarse que la tensión de defecto en el electrodo de protección transmita al de puesta a tierra de servicio una tensión superior a 1 000 V.

Este valor se establece al tener presente lo indicado en la MI-BT 017 del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, que fija como tensión de ensayo para las instalaciones interiores, durante 1 minuto, $2U + 1000$ V, siendo U la tensión máxima de servicio, con un mínimo de 1500 V. Este mismo valor de 1500 V aparece en la MI BT 031 como tensión de ensayo a 50 Hz a mantener durante 1 minuto,

en los receptores. Al tratarse de una instalación de BT que está en servicio y de acuerdo con el criterio que se suele aplicar en estos casos (tensión de ensayo no superior al 80% del valor máximo).

$$U = 0,8 \times 1500 = 1200 \text{ V.}$$

El valor de 1 000 V adoptado incluye, pues, un margen de garantía suficiente.

Al producirse un defecto a tierra y disiparse una corriente por el sistema de tierras de protección, la tensión inducida sobre el electrodo de puesta a tierra del neutro de BT no deberá superar, pues, los 1 000 V.

La distancia D mínima de separación entre ambos electrodos de protección y de servicio, para no sobrepasar los 1 000 V de tensión transferida puede calcularse mediante la fórmula:

$$D \geq \frac{\rho I_d}{2000\pi}$$

		Intensidad de defecto (amperios)																						
		20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)	20	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
	40	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6
	60	0	0	1	1	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
	80	0	1	1	1	1	2	3	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11	11	12	13
	100	0	1	1	1	2	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10	10	11	12	13	14	14	15	16
	150	0	1	1	2	2	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	23	24
	200	1	1	2	3	3	5	6	8	10	11	13	14	16	18	19	21	22	24	25	27	29	30	32
	250	1	2	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
	300	1	2	3	4	5	7	10	12	14	17	19	21	24	26	29	31	33	36	38	41	43	45	48
	350	1	2	3	4	6	8	11	14	17	19	22	25	28	31	33	36	39	42	45	47	50	53	56
	400	1	3	4	5	6	10	13	16	19	22	25	29	32	35	38	41	45	48	51	54	57	60	64
	450	1	3	4	6	7	11	14	18	21	25	29	32	36	39	43	47	50	54	57	61	64	68	72
	500	2	3	5	6	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80
	550	2	4	5	7	9	13	18	22	26	31	35	39	44	48	53	57	61	66	70	74	79	83	88
	600	2	4	6	8	10	14	19	24	29	33	38	43	48	53	57	62	67	72	76	81	86	91	95
	650	2	4	6	2	10	16	21	26	31	36	41	47	52	57	62	67	72	78	83	88	93	98	103
700	2	4	7	9	11	17	22	28	33	39	45	50	56	61	67	72	78	84	89	95	100	106	111	
750	2	5	7	10	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	95	101	107	113	119	
800	3	5	8	10	13	19	25	32	38	45	51	57	64	70	76	83	89	95	102	108	115	121	127	
850	3	5	8	11	14	20	27	34	41	47	54	61	68	74	81	88	95	101	108	115	122	129	135	
900	3	6	9	11	14	21	29	36	43	50	57	64	72	79	86	93	100	107	115	122	129	136	143	
950	3	6	9	12	15	23	30	38	45	53	60	68	76	83	91	98	106	113	121	129	136	144	151	
1000	3	6	10	13	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	95	103	111	119	127	135	143	151	159	
1200	4	8	11	15	19	29	38	48	57	67	76	86	95	105	115	124	134	143	153	162	172	181	191	
1400	4	9	13	18	22	33	45	56	67	78	89	100	111	123	134	145	156	167	178	189	201	212	223	
1600	5	10	15	20	25	38	51	64	76	89	102	115	127	140	153	166	178	191	204	216	229	242	255	
1800	6	11	17	23	29	43	57	72	86	100	115	129	143	158	172	186	201	215	229	244	258	272	286	
2000	6	13	19	25	32	48	64	80	95	111	127	143	159	175	191	207	223	239	255	271	286	302	318	
2200	7	14	21	28	35	53	70	88	105	123	140	158	175	193	210	228	245	263	280	298	315	333	350	
2400	8	15	23	31	38	57	76	95	115	134	153	172	191	210	229	248	267	286	306	325	344	363	382	
2600	8	17	25	33	41	62	83	103	124	145	166	186	207	228	248	269	290	310	331	352	372	393	414	
2800	9	18	27	36	45	67	89	111	134	156	178	201	223	245	267	290	312	334	357	379	401	423	446	
3000	10	19	29	38	48	72	95	119	143	167	191	215	239	263	286	310	334	358	382	406	430	454	477	

Fig. 77: Separación de los sistemas de puesta a tierra (en metros).

Siendo:

ρ : la resistividad del terreno (en $\Omega \cdot m$)

I_d : la corriente de defecto por el electrodo de protección (en A)

D: distancia (en m)

π : 3,1415...

En la tabla de la **figura 77** figuran calculadas estas distancias.

Para mantener los sistemas de puesta a tierra de protección y de servicio independientes, la puesta a tierra del neutro se realizará con cable aislado de 0.6/1 kV, protegido con tubo de PVC, de grado de protección 7, como mínimo, contra daños mecánicos.

Una vez conectada la red de puesta a tierra de servicio al neutro de la red de BT, el valor de esta resistencia de puesta a tierra general deberá ser inferior a 37 Ω .

Con este criterio se consigue que un defecto a tierra en una instalación interior, protegida contra contactos indirectos por un interruptor diferencial de sensibilidad 650 mA, no ocasione en el electrodo de puesta a tierra de servicio una tensión superior a:
 $37 \times 0,650 = 24 \text{ V}$.

5.11.2.- Sistema de tierras reunidas

Si la opción es la de puestas a tierra reunidas en un sistema único de protección y de servicio, esto significa que el neutro de BT del transformador o transformadores queda conectado al electrodo de protección, lo cual exige que la tensión de defecto que pueda aparecer en el mismo no debe superar los 1 000 V antes explicados. O sea:

$$U_d = I_d R_t \leq 1000V$$

En la tabla de la **figura 78** se recogen, en función de las intensidades de defecto, los

valores de la resistencia que permiten la interconexión de los dos sistemas a una tierra única.

En principio, parece que los valores R_t tan bajos puedan ser difíciles de conseguir.

Ahora bien hay que tener en cuenta lo siguiente: los cables de MT que conectan al CT tienen sus pantallas conectadas al sistema de puesta a tierra del mismo, pero estos mismos cables en su otro extremo conectan a otro CT y allí tienen también sus pantallas conectadas a tierra.

Por tanto, a través de las pantallas de los cables, los electrodos de puesta a tierra de ambos CT quedan conectados en paralelo.

En consecuencia, si el CT está alimentado por cables subterráneos formando parte de una red general, a través de las pantallas de los cables quedan conectados en paralelo los electrodos de puesta a tierra de muchos CT, con lo cual no es difícil conseguir los valores de la tabla, aunque, individualmente la resistencia del electrodo en un CT sea mayor.

Id (A)	Rt (Ω)
50	20
100	10
150	6,5
200	5
300	3
500	2
1000	1

Fig. 78: Resistencia máxima del electrodo, para puesta a tierra única.
