

UNIDAD III

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

Índice

Unidad III: "CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA TIERRA"

1.	Introducción.....	1
2.	Objetivos.....	2
3.	Contenido de curso	2
3.1.	Generalidades.....	2
3.2.	Geometría de los electrodos.....	4
3.2.1	Electrodos verticales (jabalinas)	4
3.2.1.1	Jabalina enterrada sobre superficie.....	4
3.2.1.2	Jabalina enterrada a partir de una profundidad "T".....	6
3.2.1.3	Resistencia a tierra de dos o más jabalinas en paralelo	7
3.2.1.4	Influencia de la configuración y el espaciamiento de electrodos (jabalinas)	10
3.2.2	Electrodos horizontales	11
3.2.2.1	Dos conductores en ángulo recto	12
3.2.2.2	Configuración en estrella con tres puntos.....	12
3.2.3	Resistencia de malla	13
3.2.3.1	Cálculo de la resistencia de malla	13
3.2.3.2	Tensiones presentes en mallas de tierra	14
3.3	Electrodos de puesta a tierra óptimos.....	17
3.3.1	Electrodos verticales.....	17
3.3.2	Electrodos horizontales	18
3.4	Resistencias de dispersión	19
3.4.1	Resistencia de dispersión (R_j) de un electrodo vertical	19
3.4.2	Resistencia de dispersión (R_p) de un electrodo horizontal	20
3.4.3	Resistencias de dispersión.....	21
4.	Resumen.....	23
5.	Preguntas de autocomprobación.....	24
6.	Respuestas a las preguntas de autocomprobación	25

UNIDAD III

“CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA”

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los parámetros más importantes que caracteriza una puesta a tierra es el valor de su resistencia. Se define este como el cociente entre el potencial adquirido por ella y la corriente conducida a tierra.

$$R = \frac{U}{I_f}$$

Debido a que existen diferentes espesores de los estratos y con resistividades diferentes cada uno, a fin de obtener un valor bajo de resistencia, es necesario conocer el tamaño y la forma del electrodo a enterrar, ya que de ello dependerá su resistencia.

Para una comparación económica entre las diferentes configuraciones de puesta a tierra, se requieren expresiones analíticas que relacionen todos los parámetros de la puesta a tierra.

Tales expresiones deben ser utilizadas adecuadamente para cada configuración, teniendo en cuenta sus limitaciones porque son el resultado de las aplicaciones de los conceptos de la teoría de campo o del método de potenciales promedios, que asume una densidad de carga uniformemente distribuido en todo el sistema de puesta a tierra de la misma manera que la resistividad del suelo.

Una forma de determinar teóricamente la resistencia de puesta a tierra es por analogía con la capacitancia a tierra del sistema de electrodos, la cual está basada en el hecho que el flujo de corriente a tierra de un sistema de electrodos, tienen la misma trayectoria como la emisión de flujo eléctrico de una configuración similar de conductores teniendo cargas aisladas, entonces:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{C} \right)$$

Donde “C” es la capacitancia del sistema de electrodos considerando su imagen con respecto a la superficie de la tierra.

Por lo tanto, el problema de calcular resistencia de puesta a tierra queda reducido a determinar la capacitancia de cualquier configuración de puesta a tierra y su imagen.

La resistencia de puesta a tierra se calculará para configuraciones de electrodos verticales, horizontales, mallas y sistemas conjuntos. Se presenta finalmente el cálculo optimizado de electrodos tanto verticales, horizontales y sus resistencias de dispersión.

2. OBJETIVOS

- Calcular la resistencia de puesta a tierra para las diferentes configuraciones de electrodos.
- Determinar la resistencia de puesta a tierra optimizada de los electrodos.
- Diferenciar la tensión de paso y la tensión de toque en un sistema de puesta a tierra.
- Identificar las resistencias de dispersión en los electrodos verticales y horizontales.

3. CONTENIDO DE CURSO

3.1. GENERALIDADES

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra involucra el cálculo de la misma resistencia a tierra, ya sea de un electrodo elemental, una combinación simple de electrodos, una combinación compleja de electrodos (malla de tierra) o de mallas de tierra interconectadas.

En general, los electrodos elementales que conforman la mayor parte de las puestas a tierra, son: la barra enterrada verticalmente en el terreno y el conductor horizontal embebido en el terreno.

Los electrodos, tales como el anillo y la plancha metálica dispuesta sobre la superficie del terreno, se utilizan casi exclusivamente como complementos de una puesta a tierra para controlar gradientes de potencial sobre el terreno y despreciándose, la mayoría de las veces su influencia sobre la resistividad total.

La esfera y semiesfera, salvo algún caso particular, no se usan en absoluto y la plancha metálica embebida implican suposiciones y aproximaciones que deben ser aceptadas a falta de métodos más exactos.

Las prácticas y comprobaciones en modelos dan como resultado que estas aproximaciones pueden considerarse aceptables.

En términos generales, un error del $\pm 20\%$ entre lo calculado y lo obtenido es satisfactorio.

La resistencia de puesta a tierra total tiene tres componentes (Fig. 3.1):

- La resistencia del conductor conectado al sistema de puesta a tierra, que está en función de su resistividad, longitud y sección.
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el suelo, este valor es usualmente pequeño si el electrodo está libre de pintura o grasa, esto se elimina efectuando un buen contacto entre el electrodo y tierra.
- La resistencia de la tierra alrededor del electrodo que es la resistencia principal que influirá en la resistencia total de la puesta a tierra.

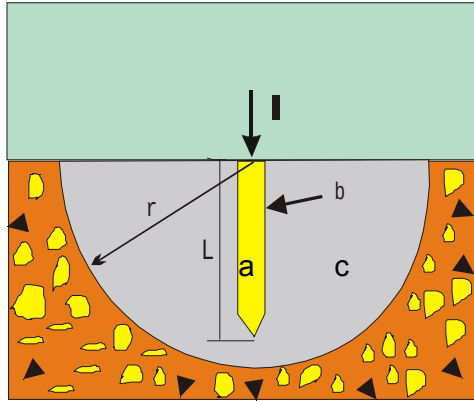


Fig. 3.1 Componentes de la resistencia de puesta a tierra.

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde:

- ρ : resistividad del terreno.
- L : longitud del electrodo.
- A : área de la semiesfera equivalente.

Si una esfera de radio x , tiene el espesor dx , entonces la resistencia dR del elemento es:

$$dR = \frac{\rho dx}{2\pi x^2}$$

Siendo la resistencia hasta una distancia x de:

$$R = \int_r^{r_1} \frac{\rho dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$$

si $r_1 = \infty$ la resistencia total será:

$$R_{00} = \frac{\rho}{2\pi r}$$

3.2. GEOMETRÍA DE LOS ELECTRODOS

A continuación se deducirá la resistencia de puesta a tierra de las configuraciones más típicas y más utilizadas.

3.2.1. ELECTRODOS VERTICALES (Jabalina)

3.2.1.1 JABALINA ENTERRADA SOBRE LA SUPERFICIE

Considerando una jabalina de longitud "L", diámetro "2a" junto con su imagen sobre la superficie de la tierra. (Fig. 3.2)

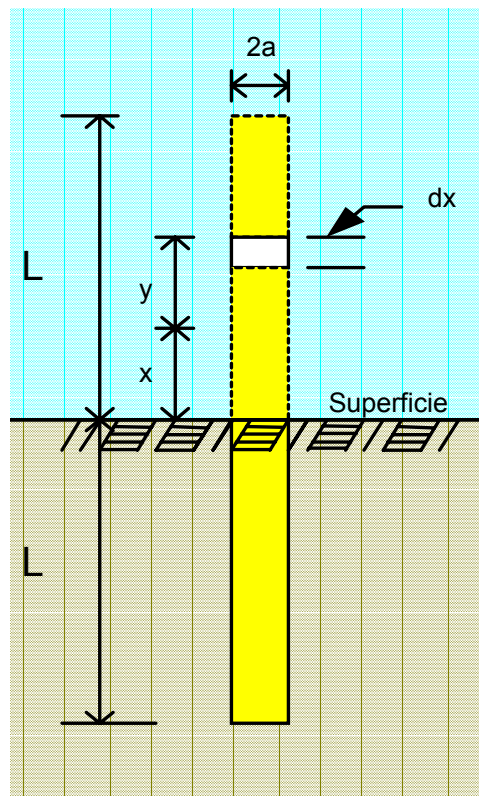


Fig. 3.2 Modelo de jabalina enterrada, en la superficie y en imagen.

El problema electrostático consiste en calcular la capacitancia, asumiendo una carga uniforme sobre la superficie, esto significa calcular el potencial promedio sobre el electrodo.

Suponiendo que la carga asumida es en centímetros de longitud, entonces la carga en el segmento dy es $q dy$. El potencial en cualquier punto P debido a esta carga es:

$$\text{Potencial} = \frac{q dy}{\sqrt{a^2 + y^2}}$$

Para obtener el potencial total, se integra entre $y=0$ a $y=(1-x)$ y también de $y=0$ a $y=(1+x)$

y multiplicado por $\frac{dx}{L}$ e integrando de $x = 0$ a $x = 1$, el potencial

$$\text{promedio será : } \frac{V}{2q} = \text{Ln} \left(\frac{4L}{a} - 1 \right)$$

La capacitancia de:

$$\frac{1}{C} = \frac{V}{2qL} = \frac{1}{L} \left(\text{Ln} \frac{4L}{a} - 1 \right) \text{ y la resistencia por analogía será :}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\text{Ln} \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

También se pueden utilizar otras expresiones como:

$$R = \frac{\rho}{2L} \text{arc} \sinh \left(\frac{2L}{d} \right)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Ln} \frac{2L}{a}$$

Donde:

- ρ : resistividad del terreno (Ω - m).
- L : longitud de la barra en (m).
- A : radio de la barra en (m).
- L_n : logaritmo natural.
- R : resistencia en (Ω).
- d : $2a$.

La diferencia entre una y otra para las longitudes y radios normales no es mayor del 6%.

Aplicación 1

Una barra de cobre de 2,4 m de longitud, 8 mm de radio, en un terreno de resistividad equivalente 100 (Ω - m) tiene una resistencia de puesta a tierra de:

$$R = \frac{100}{2\pi \times 2,4} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \times 2,4}{8 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right] = 40,38 \Omega$$

$$R = \frac{100}{2\pi \times 2,4} \left[\text{Ln} \left(\frac{2 \times 2,4}{8,10^{-3}} \right) \right] = 42,42 \Omega$$

Como se puede observar la diferencia es 2,42 Ω que representa 5% de error.

Aplicación 2

Determinar la resistencia de puesta a tierra de una barra en las siguientes condiciones, longitud = 2 m; $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ el radio de la barra 8 mm.

$$R = \frac{100}{2 \pi \times 2} \left[\text{Ln} \left(\frac{4 \times 2}{8 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right] = 47,01 \Omega$$

3.2.1.2 JABALINA ENTERRADA A PARTIR DE UNA PROFUNDIDAD "t".

En la mayoría de los casos no se encuentran enterradas a partir de la superficie del terreno, sino a partir de una profundidad t, como se muestra en la Fig. 3.3.

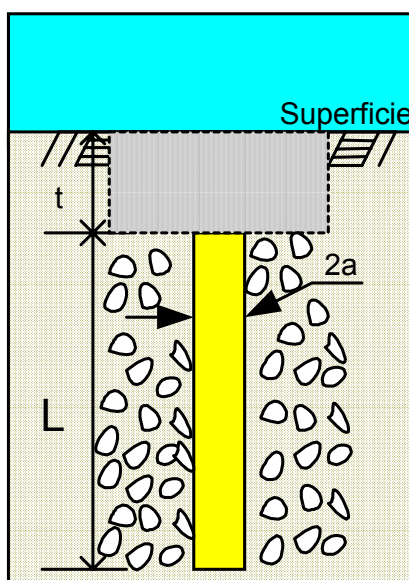


Fig. 3.3 Electrodo vertical enterrado a una profundidad t.

La resistencia será:

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \text{Ln} \left(\frac{L}{a} \sqrt{\frac{3L + 4t}{L + 4t}} \right)$$

Nota: el objetivo de enterrar una distancia "t" al electrodo debajo de la superficie es para disminuir los posibles gradientes de potencial sobre la superficie del terreno en los contornos de la barra.

Aplicación 3

Para la aplicación 2, calcular la resistencia sabiendo que la jabalina está a 30 cm debajo de la superficie.

$$R = \frac{100}{2 \pi \times 2} \ln \left(\frac{2}{8 \times 10^{-3}} \sqrt{\frac{3 \times 2 + 4 \times 0,3}{2 + 4 \times 0,3}} \right) = 47,1 \, \Omega$$

Como se puede observar se obtiene el mismo valor de resistencia, pero el gradiente de potencial en la superficie del terreno será menor.

3.2.1.3 RESISTENCIA A TIERRA DE DOS O MÁS JABALINAS EN PARALELO

Si bien el objetivo es disminuir la resistencia equivalente, esto se logra teniendo un espaciamiento mínimo entre jabalinas igual al doble de su longitud con el fin de evitar zonas de interferencia como se observa en la Fig. 3.4

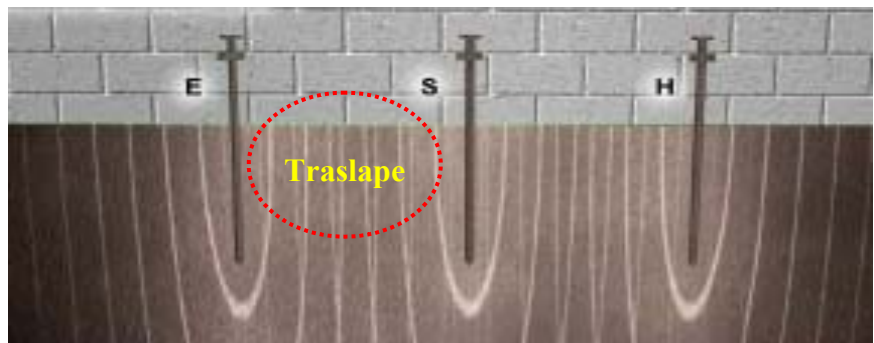


Fig. 3.4 Zonas de interferencia (traslape), cuando los electrodos no están espaciados suficientemente.

Resistencia de tierra de 2 jabalinas separadas a una distancia D, como se observa en la Fig. 3.5

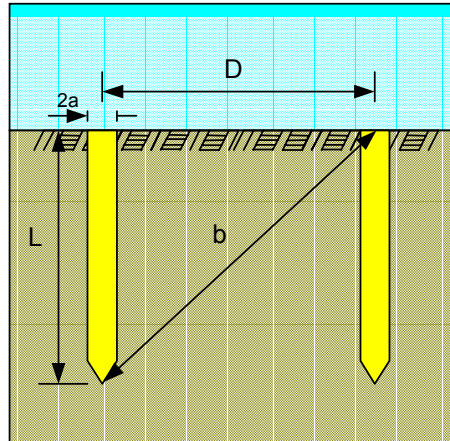


Fig. 3.5 Dos electrodos de puesta a tierra.

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \left(\frac{(b+L)^2 - D^2}{D^2 - (b+L)^2} \right)$$

Haciendo $D = 2L$

$$R_2 = \frac{\rho}{4\pi L} \ln \left(\frac{10,47 L - 2}{2 - 1,53 L} \right)$$

Se puede obtener un índice de reducción de resistencia igual a:

$$K = \frac{R_2 \text{ electrodo}}{R_1 \text{ electrodo}}$$

Considerando el mismo criterio se puede calcular la resistencia equivalente para varias jabalinas en paralelo de longitud y espaciamiento iguales, así como el índice de reducción como se observa en la tabla 1.

Tabla 1: Resistencia de puesta a tierra de electrodos paralelos, alineados e igualmente espaciados (L=2,4m, $\phi = 5/8$ pulg. $R_1 = 0,425\rho$ y $\phi = 3/4$ pulg. $R_2 = 0,413\rho$)

Tabla 1.a

L = 2,4 m			$d = \frac{5''}{8}$		$R_1 = 0,425 \text{ pa}$			
Separación	2,5 mm		3 m		4 m		5 m	
Número de Jabalinas	$R_{eq} \text{ } [\Omega]$	K	$R_{eq} \text{ } [\Omega]$	K	$R_{eq} \text{ } [\Omega]$	K	$R_{eq} \text{ } [\Omega]$	K
2	0,241 <i>pa</i>	0,566	0,237 <i>pa</i>	0,557	0,231 <i>pa</i>	0,511	0,228 <i>pa</i>	0,536
3	0,173 <i>pa</i>	0,408	0,169 <i>pa</i>	0,397	0,163 <i>pa</i>	0,383	0,159 <i>pa</i>	0,374
4	0,137 <i>pa</i>	0,324	0,133 <i>pa</i>	0,313	0,127 <i>pa</i>	0,298	0,123 <i>pa</i>	0,289
5	0,115 <i>pa</i>	0,270	0,110 <i>pa</i>	0,260	0,105 <i>pa</i>	0,246	0,101 <i>pa</i>	0,237
6	0,099 <i>pa</i>	0,233	0,095 <i>pa</i>	0,223	0,089 <i>pa</i>	0,210	0,086 <i>pa</i>	0,202
7	0,087 <i>pa</i>	0,206	0,083 <i>pa</i>	0,196	0,078 <i>pa</i>	0,184	0,075 <i>pa</i>	0,176
8	0,078 <i>pa</i>	0,185	0,075 <i>pa</i>	0,176	0,070 <i>pa</i>	0,164	0,066 <i>pa</i>	0,156
9	0,071 <i>pa</i>	0,168	0,068 <i>pa</i>	0,159	0,063 <i>pa</i>	0,148	0,060 <i>pa</i>	0,141
10	0,065 <i>pa</i>	0,154	0,062 <i>pa</i>	0,140	0,057 <i>pa</i>	0,135	0,054 <i>pa</i>	0,128
11	0,060 <i>pa</i>	0,142	0,057 <i>pa</i>	0,134	0,053 <i>pa</i>	0,124	0,050 <i>pa</i>	0,118
12	0,056 <i>pa</i>	0,132	0,053 <i>pa</i>	0,125	0,049 <i>pa</i>	0,115	0,046 <i>pa</i>	0,109
13	0,053 <i>pa</i>	0,124	0,050 <i>pa</i>	0,117	0,046 <i>pa</i>	0,107	0,043 <i>pa</i>	0,101
14	0,049 <i>pa</i>	0,117	0,047 <i>pa</i>	0,110	0,043 <i>pa</i>	0,101	0,040 <i>pa</i>	0,095
15	0,047 <i>pa</i>	0,110	0,044 <i>pa</i>	0,103	0,040 <i>pa</i>	0,095	0,038 <i>pa</i>	0,089

Tabla 1.b

L = 2,4 m			$d = \frac{3''}{4}$		$R_1 = 0,413 \text{ pa}$			
Separación	2,5 mm		3 m		4 m		5 m	
Número de Jabalinas	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,235 <i>pa</i>	0,568	0,231 <i>pa</i>	0,559	0,225 <i>pa</i>	0,546	0,222 <i>pa</i>	0,537
3	0,169 <i>pa</i>	0,410	0,165 <i>pa</i>	0,399	0,159 <i>pa</i>	0,384	0,155 <i>pa</i>	0,375
4	0,134 <i>pa</i>	0,326	0,130 <i>pa</i>	0,315	0,124 <i>pa</i>	0,300	0,120 <i>pa</i>	0,290
5	0,112 <i>pa</i>	0,272	0,108 <i>pa</i>	0,262	0,102 <i>pa</i>	0,217	0,098 <i>pa</i>	0,238
6	0,097 <i>pa</i>	0,235	0,093 <i>pa</i>	0,225	0,087 <i>pa</i>	0,211	0,084 <i>pa</i>	0,203
7	0,086 <i>pa</i>	0,208	0,082 <i>pa</i>	0,198	0,076 <i>pa</i>	0,185	0,073 <i>pa</i>	0,177
8	0,077 <i>pa</i>	0,186	0,073 <i>pa</i>	0,177	0,068 <i>pa</i>	0,165	0,065 <i>pa</i>	0,157
9	0,070 <i>pa</i>	0,169	0,066 <i>pa</i>	0,160	0,061 <i>pa</i>	0,149	0,058 <i>pa</i>	0,142
10	0,064 <i>pa</i>	0,155	0,061 <i>pa</i>	0,147	0,056 <i>pa</i>	0,136	0,053 <i>pa</i>	0,129
11	0,059 <i>pa</i>	0,144	0,056 <i>pa</i>	0,136	0,052 <i>pa</i>	0,125	0,049 <i>pa</i>	0,119
12	0,055 <i>pa</i>	0,134	0,052 <i>pa</i>	0,126	0,048 <i>pa</i>	0,116	0,045 <i>pa</i>	0,110
13	0,052 <i>pa</i>	0,125	0,049 <i>pa</i>	0,118	0,045 <i>pa</i>	0,108	0,042 <i>pa</i>	0,102
14	0,049 <i>pa</i>	0,118	0,046 <i>pa</i>	0,111	0,042 <i>pa</i>	0,101	0,039 <i>pa</i>	0,096
15	0,046 <i>pa</i>	0,111	0,043 <i>pa</i>	0,104	0,039 <i>pa</i>	0,096	0,037 <i>pa</i>	0,090

Del cuadro se puede apreciar que el índice de reducción para 4 electrodos es de 32% y se obtiene una notable reducción hasta 6 electrodos y a partir de ello se satura la disminución de la resistencia equivalente con el aumento del número de electrodos en paralelo, como se puede apreciar en la siguiente gráfica.

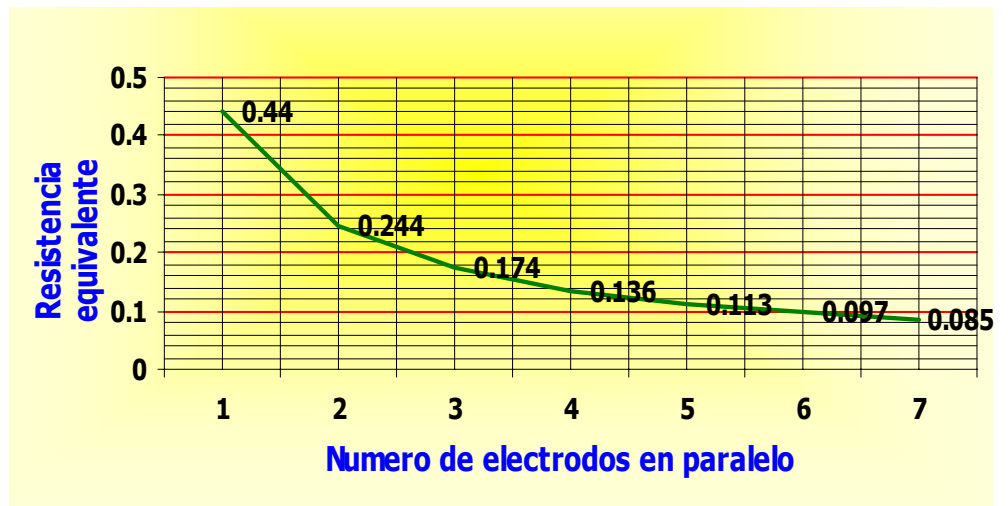


Fig. 3.6 Curva resistencia equivalente en función del número de electrodos en paralelo.

En consecuencia: para evitar la saturación en la disminución de la resistencia con el aumento de electrodos en paralelo, debe evaluarse si se justifica económicamente. Una recomendación práctica es no poner mas de 6 electrodos en paralelo.

3.2.1.4 INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN Y EL ESPACIAMIENTO DE ELECTRODOS (JABALINAS)

- Diámetro del electrodo: la resistencia a tierra no disminuye considerablemente con el aumento del diámetro de la jabalina un incremento el doble el diámetro, la resistencia disminuye sólo al 11%.
- Efecto de espaciamiento y de longitud: si dos electrodos están ubicados muy próximos uno de otro, hay interferencia de campos eléctricos entre ellos y aumenta el valor de la resistencia, una separación menor que el doble de su longitud no es aconsejable.
- El aumento del número de electrodos, como se observó cuando se incrementa mucho el número de electrodos, debido al efecto "mutuo", la resistencia a tierra aumenta, es decir, hay una cierta saturación, lo mismo sucede con la separación entre ellos. Habrá siempre un valor bajo el cual la resistencia aumenta y encima del cual la influencia de disminución es mínima.

3.2.2. ELECTRODOS HORIZONTALES

La resistencia de aterramiento de un conductor o electrodo enterrado horizontalmente en el suelo a una profundidad "h" metros será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\text{Ln} \left(\frac{2L^2}{a h} - 2 + \frac{2h}{L} - \left(\frac{h}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right) \right] \Omega$$

Donde:

- R : resistencia en (Ω).
L : longitud en (m).
a : radio del electrodo en (m).
n : profundidad de enterramiento en (m).

También se puede utilizar:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Ln} \frac{2L^2}{a \bullet h} \text{ en } \Omega$$

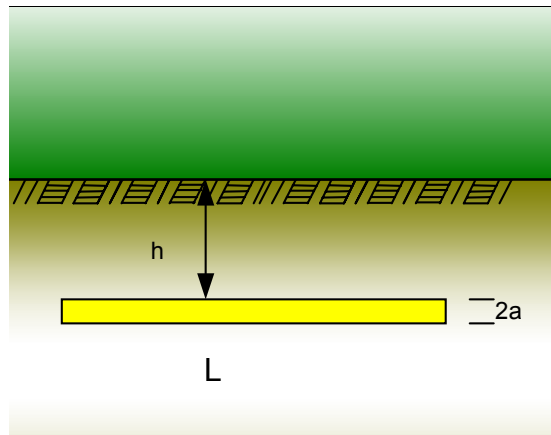


Fig. 3.7 Electrodo horizontal enterrado a una profundidad "h".

Se pueden enterrar electrodos con diferentes configuraciones como se observa en la Fig. 3.8

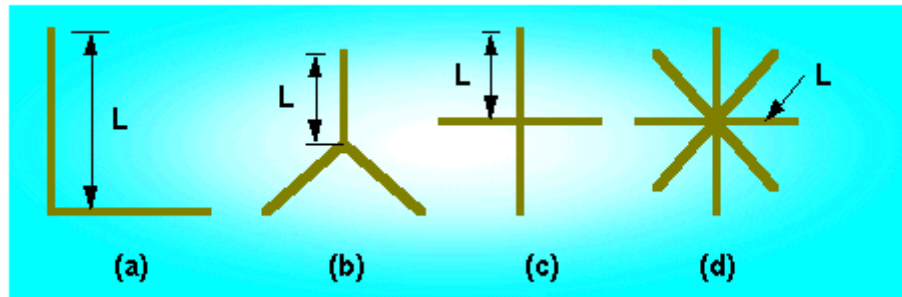


Fig. 3.8 Configuraciones horizontales de conductores.

3.2.2.1 DOS CONDUCTORES EN ÁNGULO RECTO (FIG. 3.8.a)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2ah} \right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{h}{L} + 1,656 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right]$$

3.2.2.2 CONFIGURACIÓN EN ESTRELLA CON TRES PUNTOS (FIG. 3.8.b)

$$R = \frac{\rho}{3\pi L} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2ah} \right) - 1,077 - 0,836 \frac{h}{L} + 3,808 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 13,824 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right]$$

Aplicación 4

Hallar la resistencia de puesta a tierra para configuraciones expuestas si se dispone de 60 m de conductor de diámetro 6 mm, enterrado a 60 cm debajo de la superficie, en un suelo cuya resistividad aparente es igual a $1000\Omega \cdot m$; aplicando la fórmula se tiene:

Configuración	Resistencia (Ω)
1 electrodo	35,00
2 electrodos en ángulo recto	64,77
Estrella	67,23

3.2.3. RESISTENCIA DE MALLA

Otra forma de configurar una puesta a tierra es mediante una malla entrelazada por conductores de cobre, la unión de los puntos de la malla debe ser tal que no exista calentamiento en dicha unión, con ello se pueden lograr resistencias más bajas que en las configuraciones anteriores.

3.2.3.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE MALLA

Según la fórmula experimental de "Laurent", se tiene la siguiente fórmula para el cálculo de puesta a tierra de una malla:

$$R = \frac{\rho}{4\sqrt{\frac{s}{\pi}}} + \frac{\rho}{L} \quad (\Omega)$$

Donde:

ρ : resistividad ($\Omega \cdot m$).
 s : superficie que cubre la malla (m^2).
 L : longitud total de conductor de la malla (m).

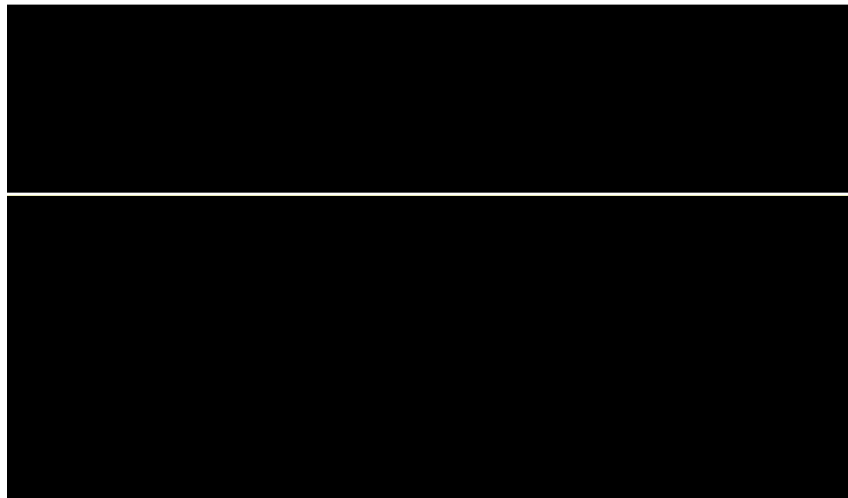


Fig. 3.9 Puesta a tierra tipo malla.

Aplicación 5

En un terreno de $100 \Omega \cdot m$ de resistividad equivalente, una malla de $10 \times 10 m^2$, como se muestra en la Fig. 3.10

$$R = \frac{100}{4\left(\sqrt{\frac{10 \times 10}{\pi}}\right)} + \frac{100}{60} \equiv 6,1\Omega$$

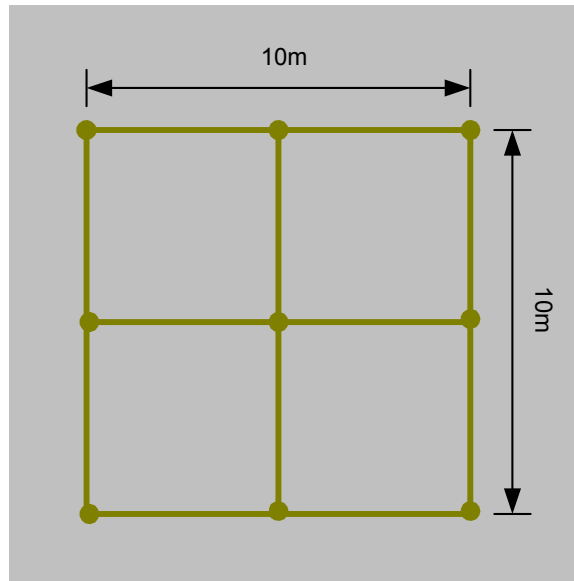


Fig. 3.10 Malla de puesta a tierra de 10 x 10 m².

3.2.3.2 TENSIONES PRESENTES EN LAS MALLAS DE TIERRA

Consideramos una malla formada por “n” conductores dispuestos en cada dirección con separación uniforme “D” entre ellos, enterrada a una profundidad fija “h” metros, siendo “L” la longitud total de conductor enterrado. En el momento en que la falla difunde una corriente de I Amperes al terreno, una persona puede quedar expuesta a los siguientes voltajes de riesgos (Fig. 3.11 a)

- **Tensión de paso (Vp).**

Corresponde a la diferencia de potencial entre dos puntos ubicados sobre la superficie del suelo, separados a una distancia de un metro:

$$V_p = K_s K_i \rho_e \frac{I}{L} (\text{Volts})$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 n$$

Donde:

$$K_s = \pi \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D+h} + \frac{1}{3D+h} + \dots + \frac{1}{(n-1)D+h} \right]$$

- **Tensión de contacto o toque.**

La tensión de contacto mano – pie corresponde a la diferencia existente entre el potencial de un punto sobre la superficie del terreno y el potencial que adquiere un conductor metálico unido a la malla. Para su estimación, se utiliza la expresión correspondiente al máximo posible o tensión de contacto.

$$V_m = K_m K_i \rho_e \frac{I}{L} \text{ (volts)}$$

Donde:

$$K_m = \pi \left[\frac{1}{2} \text{Ln} \left(\frac{D^3}{16hd} \right) + \text{Ln} \left(\frac{3}{4} \bullet \frac{5}{4} \dots \frac{2n-3}{2n-2} \right) \right]$$

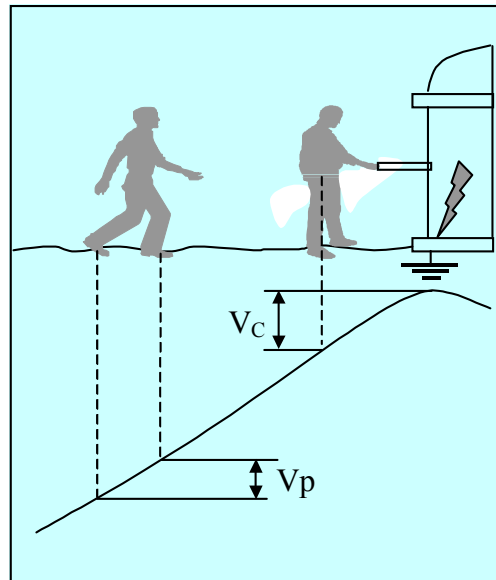


Fig. 3.11(a) Tensión de paso y contacto(toque).

Estas tensiones presentes en la superficie del terreno sobre una malla de tierra que difunde una corriente de falla, no deben superar en ningún caso las tensiones tolerables por el cuerpo humano. La máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto se calcula mediante las expresiones:

a. Máxima tensión de paso tolerable:

$$V_p = \frac{116 + 0,696 c \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ (volts)}$$

b. Máxima tensión de contacto tolerable:

$$V_c = \frac{116 + 0,174 c \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ (volts)}$$

En donde:

ρ [Ω -mt]: resistividad de la capa superficial.
 t [seg] : tiempo global de exposición.
 c : factor de corrección debido a la presencia de la capa superficial resistiva. En la práctica se estima $c = 1$.

Los límites de diseño se han establecido como tensiones y para llegar a los límites apropiados, es necesario considerar la impedancia a través del cuerpo humano, la resistencia de contacto de la mano, la resistencia del calzado y la resistividad del material superficial bajo el calzado. Suponiendo:

100 Ohm – metro la resistividad del suelo.
1000 Ohm para la impedancia del ser humano.
4000 Ohm de impedancia para el calzado.
300 Ohm resistencia de contacto de la mano.

Se tienen los límites mostrados en la Fig. 3.11 (b)

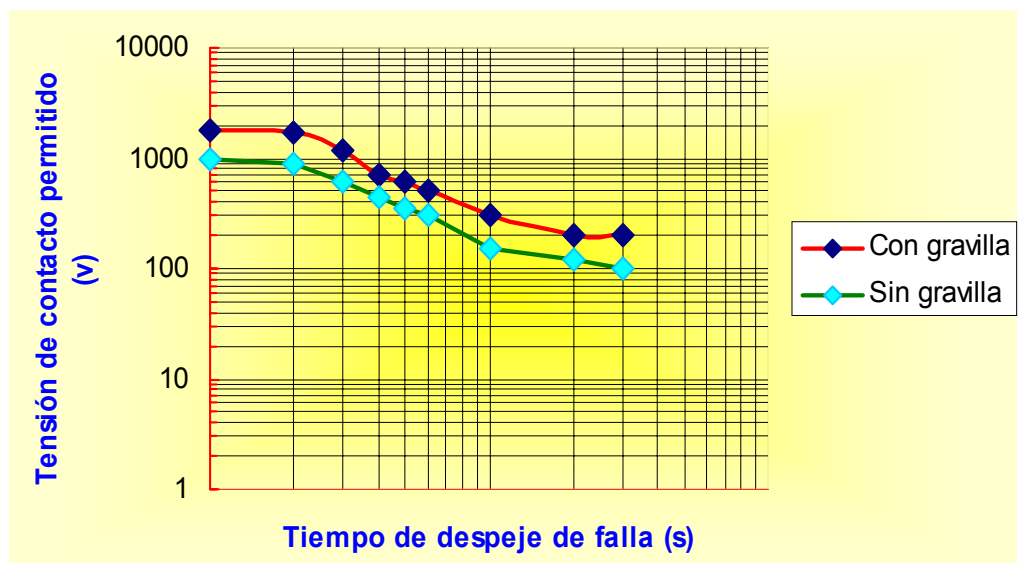


Fig. 3.11(b) Potenciales de contacto permitidos.

3.3. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA ÓPTIMOS

A partir de la disponibilidad de espacio y la resistividad de diseño, se define el tipo y la forma de la instalación del electrodo de puesta a tierra, que deberá ser preferentemente de cobre electrolítico macizo por su alta resistencia al ataque corrosivo del suelo que otros materiales, aún con protección de superficie, no pueden asegurar su tiempo promedio de vida.

3.3.1. ELECTRODOS VERTICALES

Existe en el mercado, varillas de cobre temple duro ya cortadas en longitudes estandarizadas de 2,0; 2,5; 3,0 y 3,5 m con diámetros a escoger de 0,013 y 0,019 m; se elige el tamaño más comercial que tiene 2,5 m de longitud (2,44 real) con 0,013 ó 0,019 m de diámetro; el cual puede optimizarse con el relleno en el pozo según el modelo analítico (Fig. 3.12), con ($r_0 \rightarrow R$)

$$dR_{ij} = \rho_r \frac{d_r}{dS} = \frac{\rho_r}{2\pi L} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r}$$

$$R_{ij} = \frac{\rho_r}{2\pi L} \ln \frac{R}{r_0}$$

r_0 : radio del electrodo, (m).
 R : radio optimizado – pozo, (m).
 L : longitud del electrodo, (m).

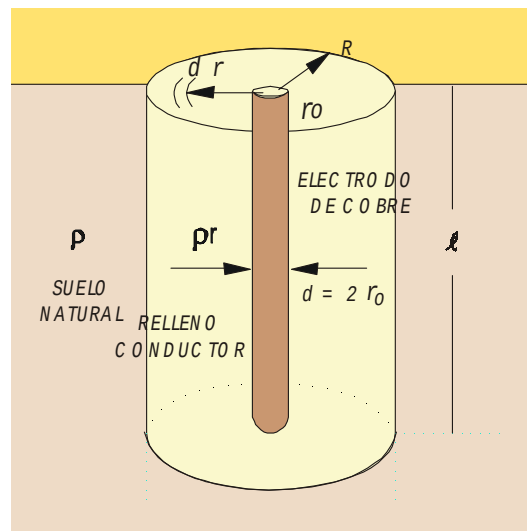


Fig. 3.12 Optimización del electrodo vertical con relleno en pozo.

3.3.2. ELECTRODOS HORIZONTALES

Las pletinas de cobre, existen en el mercado a partir de 3,0 m de longitud, con secciones diferentes; la más adecuada será (0,003 m x 0,04 m); deberá hacerse un hueco con un taladro de 0,013 m de diámetro en uno de los extremos.

En caso de escasez se podrá utilizar un conductor de cobre desnudo de 100 mm² temple semiduro o blando. El modelo también puede ser optimizado con el relleno en una zanja (Fig. 3.13) considerando ($r_o \rightarrow R$)

$$dR_{tp} = \rho_r \frac{dr}{dS} = \frac{\rho_r}{2\pi L} \int_{r_o}^R \frac{dr}{r}$$

$$R_{tp} = \frac{\rho_r}{2\pi L} \ln \frac{R}{r_o}$$

Donde:

- r_o : radio del electrodo, (m).
- R : radio optimizado – zanja, (m).
- L : longitud del electrodo, (m).

El suelo subyacente en las zonas habitadas del país es pedregoso por su filiación aluvial o diluvial, por tanto el clavado de electrodos verticales para puesta a tierra no es viable, para su instalación nos obliga a excavar un pozo y para electrodos horizontales, una zanja que se aprovechan para reponer las sales naturales ausentes conformando el relleno con la misma tierra fina del sitio y tierra adicional, mezclándolas con un aglutinante también natural, de granulometría fina, conductivo, no corrosivo e higroscópico.

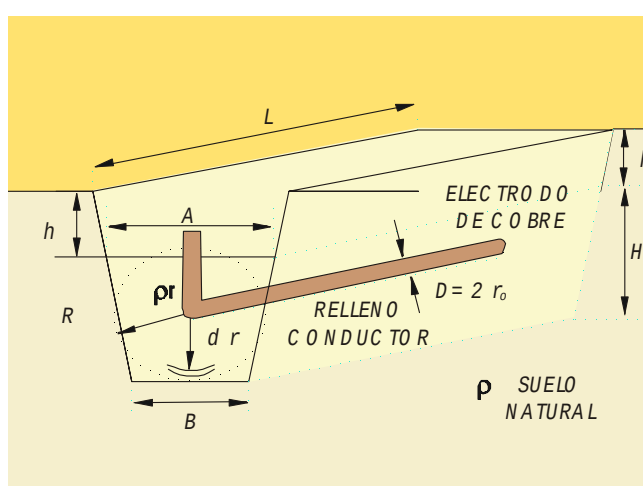


Fig. 3.13 Optimización del electrodo horizontal con relleno en zanja.

3.4. RESISTENCIAS DE DISPERSIÓN

La dispersión de las corrientes en el suelo, mediante electrodos de gran superficie (circulares, cuadrangulares, esféricos, ortogonales, etc.), puede lograrse también con electrodos simples y económicos, optimizando su geometría mediante una instalación que aproveche las excavaciones para incluir rellenos y tratamientos del suelo.

3.4.1. RESISTENCIA DE DISPERSIÓN (R_j) DE UN ELECTRODO VERTICAL

Se calcula con la siguiente expresión:

$$R_j = \frac{\rho_r}{2\pi L} \ln \frac{D}{d} + \frac{\rho}{12\pi} \ln \frac{4L}{D}$$

Donde:

- ρ_r : resistividad del relleno = 5 (Ω -m).
- ρ : resistividad del diseño, (Ω -m).
- L : longitud de electrodo, (m).
- D : diámetro del pozo = 2 R (m).
- d : diámetro del electrodo = 2 r_o (m).

Ejemplo:

Para los datos de la puesta a tierra de electrodo vertical propuesto Fig. 3.14, con la resistividad de diseño ya establecida ($\rho = 300 \Omega$ -m) se obtiene:

$$R_j = \frac{5}{15,7} \ln \frac{1,0}{0,013} + \frac{300}{94,2} \ln \frac{4 \times 2,5}{1,0}$$
$$R_j = 1,38 + 7,33 = 8,7 \Omega$$

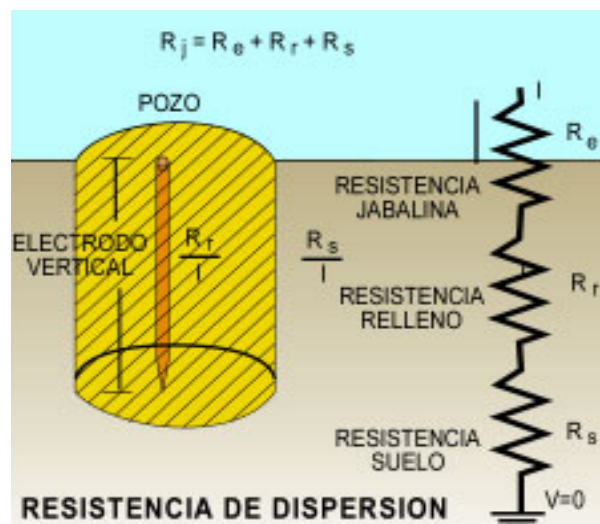


Fig. 3.14 Resistencia de dispersión del electrodo vertical.

En caso de requerir bajas resistencias de dispersión en edificios con áreas libres físicamente separadas; a partir del primer pozo ejecutado, se pueden adicionar, hasta tres pozos a (6 m) o más uno de otro, que serán unidos al tablero eléctrico mediante el conductor de conexión dentro de los ductos existentes, pudiendo obtener como mínimo de 3 a 4 Ohm. Fig. 3.15

- Para dos electrodos: $R_{2j} = 0,60 R_j \Omega$
- Para tres electrodos: $R_{3j} = 0,45 R_j \Omega$
- Para cuatro electrodos: $R_{4j} = 0,35 R_j \Omega$

Cualquiera que fuese la forma del electrodo instalado en la excavación, las características conductivas y geométricas del relleno higroscópico en contacto con el suelo natural permiten obtener una baja resistencia total de dispersión.

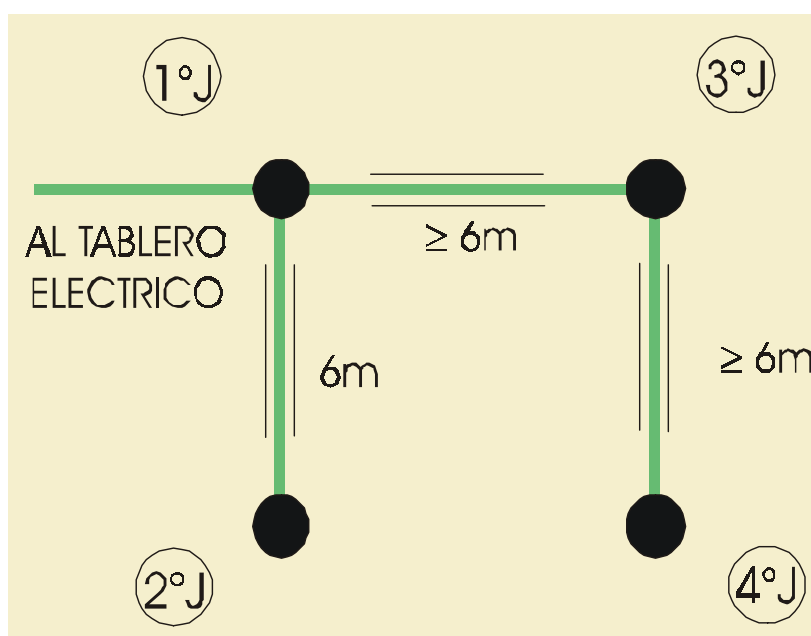


Fig. 3.15 Conexión de electrodos verticales en paralelo.

3.4.2. RESISTENCIA DE DISPERSIÓN (R_p) DE UN ELECTRODO HORIZONTAL

$$R_p = \frac{\rho_r}{2 \pi L} \ln \frac{R}{r_o} + \frac{\rho}{12 \pi L} \ln \frac{L^2}{3,7 \times h \times R}$$

Donde:

- ρ_r : resistividad del relleno = 5 (Ω -m).
- ρ : resistividad de diseño, (Ω -m).
- L : longitud electrodo horizontal, (m).
- R : radio equivalente del relleno, (m).
- r_o : radio equivalente del electrodo, (m).
- h : profundidad de enterramiento, (m).

Ejemplo

Para los datos de la puesta a tierra del electrodo horizontal propuesta Fig. 3.16, con la resistividad de diseño ya establecida ($\rho = 300 \Omega\text{-m}$), resulta:

$$R_p = \frac{5}{18,84} \ln \frac{0,28}{0,006} + \frac{300}{113,04} \ln \frac{9}{0,3626}$$

$$R_p = 1,02 + 8,52 = 9,54 \Omega$$

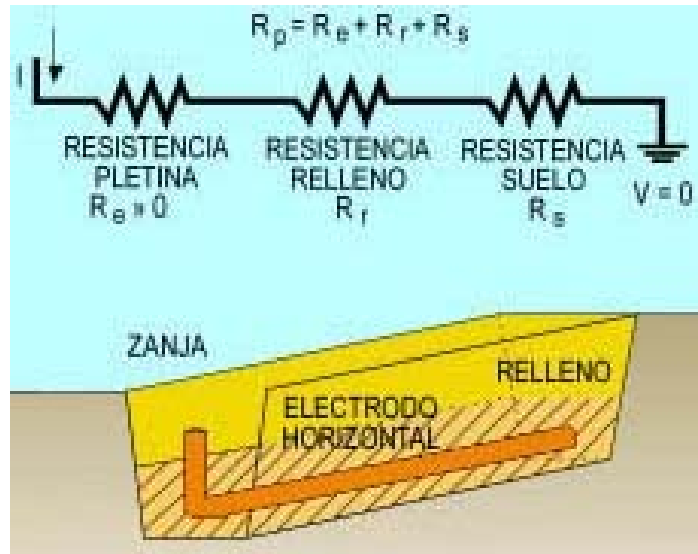


Fig. 3.16 Resistencia de dispersión de electrodos horizontales.

3.4.3. RESISTENCIAS DE DISPERSIÓN

Las resistencias de dispersión asignables, según las necesidades de seguridad y correcto funcionamiento de aparatos eléctricos y electrónicos son:

- Servicio doméstico : 9 – 15 Ω
- Servicio doméstico moderno: 6 – 9 Ω
- Servicio de oficina : 3 – 6 Ω
- Servicio red de procesamiento : 2 – 3 Ω
- Servicio de comunicaciones : < 2 Ω
- Servicio médico : < 2 Ω
- Descargas atmosféricas : < 2 Ω

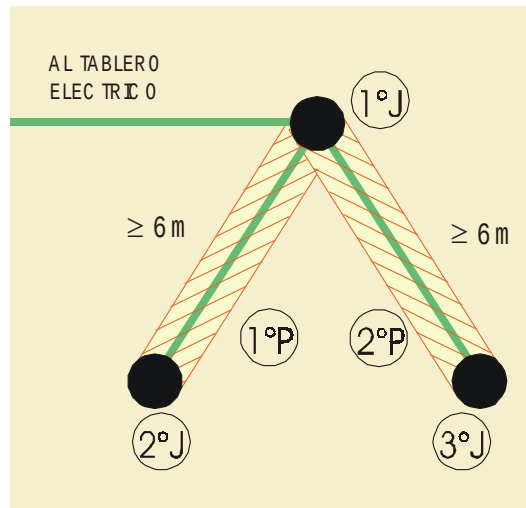


Fig. 3.17 Conexiones de electrodos combinados.

En caso de aplicar esquemas combinados (Fig. 3.17) de electrodos verticales unidos por electrodos horizontales de (6,0 m) o más de longitud, instalándolos según los métodos que propone este texto; la resistencia total bajará moderadamente; se la puede estimar en forma aproximada con:

$$R = \frac{R_{nj} \times R_{np}}{R_{nj} + R_{np}} [1,43] \text{ Ohm}$$

Para aterramientos con resistencias de dispersión inferiores a 3,0 Ohm, se aplican otros métodos basados en el perfil estratificado de resistividades del suelo y en los análisis físicos y químicos del suelo.

4. RESUMEN

Es necesario conocer el valor de la resistencia de puesta a tierra antes de su instalación, para ello conociendo el valor de la resistividad, se calcula la resistencia teórica según el tipo de electrodo.

Los electrodos más utilizados en instalaciones eléctricas son: electrodo elemental (jabalina), una combinación simple de electrodos, una combinación relativa (malla) o malla de tierra interconectada.

La configuración anillo y plancha metálica sólo se usan como complemento de las puesta a tierra y la esfera y semiesfera no se usan en absoluto en un sistema de aterramiento.

Un 20 % de error se puede considerar como aceptable entre el valor calculado y medido.

La resistencia de puesta a tierra tiene tres componentes: La resistencia del electrodo conectado a tierra, la resistencia de contacto entre el electrodo y tierra y la resistencia de la tierra alrededor del electrodo.

El cálculo de la resistencia de puesta a tierra depende de la geometría del electrodo y de la manera cómo está ubicado en la tierra y pueden ser: jabalina (electrodo) enterrada sobre la superficie, jabalina enterrada a partir de una profundidad "t", dos o más jabalinas en paralelo, electrodos horizontales y malla.

Los factores que influyen en la reducción de la resistencia de puesta a tierra son: el diámetro del electrodo, el espaciamiento entre electrodos, su longitud y el número de electrodos en paralelo, este último se justifica técnica y económicamente al tener como máximo seis electrodos en paralelo.

Los electrodos horizontales pueden adoptar diferentes configuraciones, tales como: conductores en ángulo recto, estrella con tres puntos, en forma de cruz y estrella de seis puntos.

La puesta a tierra del tipo malla se utiliza en casos que se desee un valor bajo de resistencia (menor a un ohmio) y además cuando se hace necesario controlar las tensiones de paso y tensión de toque en las cercanías del sistema de puesta a tierra.

Los valores máximos de la tensión de paso y de toque, depende de la resistividad de la superficie del terreno, del tiempo de exposición de la falla y de la presencia de la capa superficial resistiva.

Un calculo práctico nos permite determinar el valor de la resistencia de puesta a tierra tanto en electrodos tipo vertical como horizontal, obteniendo valores de resistencia de dispersión requeridos.

Los valores recomendados de resistencia de dispersión dependen del tipo de instalación es decir si es: doméstico, oficina, red de procesamiento, comunicaciones, hospitales o descargas atmosféricas.

5. PREGUNTAS DE AUTOCOMPROBACIÓN

1. ¿Por qué es necesario calcular la resistencia de puesta a tierra?
2. ¿Qué configuraciones de puesta a tierra son las más utilizadas?
3. ¿En qué caso se aplica una malla?
4. ¿Cuántos electrodos en paralelo como máximo es técnicamente aceptable para bajar la resistencia de una puesta a tierra?
5. ¿Cuánto es la resistencia de puesta a tierra de una malla de forma cuadrada, de lado 10 m y cuya longitud total es 60 m, si la resistividad del terreno es 200 ohmios metro?
6. ¿Qué es tensión de paso?
7. ¿Cómo es el comportamiento del potencial de contacto a través del tiempo?
8. ¿Por qué deben espaciarse adecuadamente los electrodos verticales, en una puesta a tierra?

6. RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS DE AUTOCOMPROBACIÓN

1. Para seleccionar el electrodo apropiado y obtener el valor esperado de la resistencia.
2. Electrodo verticales, electrodos horizontales y malla.
3. Cuando se desean valores bajos de resistencia y se requiere controlar la tensión de paso y la tensión de toque.
4. Hasta seis electrodos obteniendo un valor aceptable de reducción.
5. La resistencia es = 12,2 ohmios.
6. Es la diferencia de potencial entre dos puntos ubicados sobre la superficie del suelo (alrededor de la puesta a tierra), separados una distancia de un metro.
7. El potencial de contacto permitido es mayor cuanto menor sea el tiempo de exposición y el límite es de 100 V.
8. Para evitar interferencias de campos eléctricos entre ellos, ya que aumenta el valor de la resistencia y una distancia menor al doble de su longitud no es recomendable.