

PUESTA A TIERRA Y CONDUCTORES DE PROTECCIÓN

1. DEFINICIONES

Puesta a tierra: Conjunto constituido por una o más tomas de tierra interconectadas y sus conductores de tierra correspondientes, conectados al borne principal de tierra.

Toma de tierra: Electrodo de tierra individual o un conjunto de electrodos de tierra.

Electrodo de tierra: Parte conductora que puede estar embutida en el suelo o en un medio conductor particular, por ejemplo cemento, en contacto eléctrico con la Tierra.

Conductor de tierra: Conductor de protección que une el borne principal de tierra con la toma de tierra.

Borne principal de tierra: Borne o barra que forma parte de la puesta a tierra de protección de una instalación, previsto para la conexión a tierra de los conductores de protección, incluidos los conductores de conexión equipotencial.

Masa: Parte conductora de un equipamiento eléctrico que puede ser tocada y que normalmente no está bajo tensión pero que puede ser puesta bajo tensión en caso de falla del aislamiento principal. No se considera masa una parte conductora de un equipamiento eléctrico que solo puede ser puesta bajo tensión a través de otra masa.

Tierra local: Parte de la Tierra en contacto eléctrico con una toma de tierra, y cuyo potencial eléctrico no es necesariamente igual a cero

Tierra de referencia (Tierra): Parte de la tierra considerada como conductora cuyo potencial eléctrico es considerado, por convención, igual a cero, estando fuera de la zona de influencia de toda instalación de puesta a tierra. La tierra de referencia también es denominada “tierra lejana”.

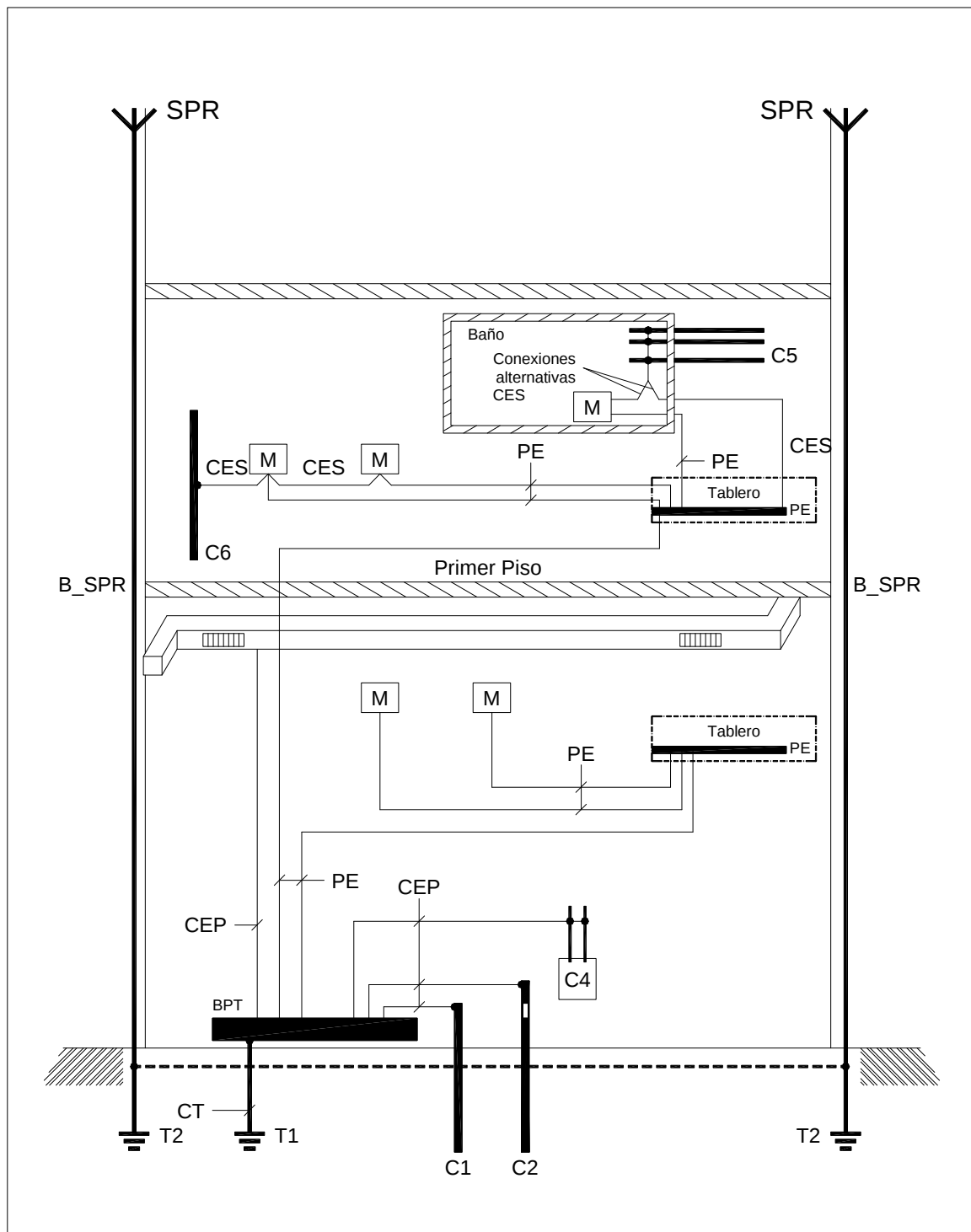
Resistencia de puesta a tierra: Resistencia entre el borne principal de tierra y la tierra de referencia.

ESQUEMA DE LA PUESTA A TIERRA Y CONDUCTORES DE PROTECCIÓN Y CONDUCTORES DE CONEXIÓN EQUIPOTENCIAL.

Se indica a continuación la simbología utilizada en la ilustración:

M	Masa
C1	Cañerías metálicas de agua, entrantes.
C2	Cañerías metálicas de gas, entrantes
C3	Ductos de aire acondicionado.
C4	Sistemas de calefacción.
C5	P.ej. cañerías de agua metálicas en el baño.
C6	Elementos conductores extraños que pueden tocarse simultáneamente con las manos.
BPT	Borne Principal de puesta a Tierra. (El reglamento de UTE le llama Punto de Puesta a Tierra)
T1	Toma de tierra de protección.
T2	Toma de tierra del sistema de protección contra rayos.
PE	Conductor de protección. (El reglamento de UTE distingue entre Líneas principales de tierra, Derivaciones de las líneas principales de tierra y conductores de protección)
CEP	Conductor de conexión equipotencial para la conexión al borne principal de puesta a tierra (Conexión Equipotencial Principal).
CES	Conductor de conexión equipotencial para conexiones suplementarias (Conexión Equipotencial Suplementaria).
B-SPR	Conductores de Bajada del Sistema de Protección contra Rayos.
CT	Conductor de Tierra. (El reglamento de UTE le llama conductor de enlace con tierra)

Ilustración de la puesta a tierra, conductores de protección y conductores de conexión equipotencial



2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA PUESTA A TIERRA

2.1 Electrodo de tierra

Los materiales y dimensiones de los electrodos de tierra que integran una toma de tierra, son aquellos que soportan la corrosión y tienen una adecuada resistencia mecánica.

Los materiales y tipos de electrodos de tierra de uso común, son:

Tipos de electrodos de tierra:

- Cintas (pletinas) o conductor desnudo multifilar,
- caños o barras (picas o jabalinas),
- placas.

Materiales:

- cobre,
- acero galvanizado en caliente,
- acero inoxidable,
- acero con recubrimiento de cobre

Como se desprende de la definición de toma de tierra, estos electrodos de tierra pueden ser utilizados como electrodos individuales o utilizarse distintos electrodos eléctricamente conectados entre sí para la ejecución de una toma de tierra.

Se recomienda la utilización de electrodos del mismo material, para evitar problemas de corrosión por par galvánico.

Las dimensiones mínimas de los electrodos están establecidas en el Reglamento de UTE, y se indican algunas a continuación:

Electrodo	Diámetro/Sección	Largo	Superficie 0.5 m ²	Espesor 2 mm
Placa de cobre				
Barra de cobre	14 mm	2 m		
Conductor desnudo multifilar	35 mm ²			
Cinta o pletina de cobre	35 mm ²			2 mm
Cable de acero galvanizado	95 mm ² - cada alambre 2.5 mm ²			

Las canalizaciones metálicas de otros servicios (agua, gas, calefacción central), etc. no deben ser utilizadas como electrodos de tierra, pero si debe realizarse su conexión equipotencial a la barra principal de tierra.

2.2 Conductores de tierra

El Reglamento de Baja Tensión de UTE le llama Conductor de enlace con tierra y establece como sección mínima para el mismo 35 mm² en cobre, a menos que la línea repartidora sea de menor sección, en cuyo caso será de la misma sección que los conductores de fase.

2.3 Borne principal de tierra

En toda instalación debe preverse un borne o barra principal de tierra, para la conexión de los siguientes conductores:

- Conductores de tierra.
- Conductores de protección que no estén conectados a este terminal a través de otros conductores de protección.
- Conductores de conexión equipotencial principal.

La conexión al borne principal de tierra, debe realizarse de forma de poder desconectarse individualmente cada conductor conectado al mismo. Esta conexión además se realiza de forma que su remoción solo debe ser posible por medio de una herramienta.

En algún caso puede ser necesario instalar mas de un borne o barra principal de tierra para realizar las conexiones indicadas. En este caso los conductores de tierra se conectan todos a la misma toma de tierra.

3. CONDUCTORES DE PROTECCIÓN (PE)

§ Todo circuito debe incluir el conductor de protección, ya que el mismo provee la conexión a tierra de todas las masas de la instalación.

§ Los mismos conducen las corrientes de falla de aislación, entre un conductor de fase y una masa, a través del neutro de la fuente.

§ El conductor PE es conectado a otro conductor PE o al borne principal de tierra de la instalación, y este a los electrodos de tierra a través del conductor de tierra.

§ Los conductores de protección deben ser aislados e identificados con los colores verde/amarillo y deben estar protegidos contra daños mecánicos y químicos.

Como conductores de protección pueden utilizarse:

- Conductores aislados formando parte de cables multipolares;
- Conductores aislados agrupados con otros cables;
- Conductores aislados separados.

No se permite usar como conductores de protección, elementos conductores extraños, como por ejemplo:

- cañerías de agua;
- cañerías que contengan gases o líquidos inflamables;
- Soportes de canalizaciones.

§ El conductor PE no debe incluir ningún medio de desconexión, asegurando la continuidad del circuito de protección.

§ Las partes conductoras que se conectan al conductor PE, no deben quedar conectadas en serie con dicho conductor.

En resumen cuando hablamos de conexión a tierra nos referimos a una ligazón metálica directa, sin dispositivo de protección, de sección suficiente, entre determinados elementos de la instalación (masas), y uno o un grupo de electrodos enterrados en el suelo.

3.1 Secciones mínimas del conductor PE

La sección de los conductores de protección se selecciona en función de la sección del conductor de fase de acuerdo a la Tabla indicada en a) o se calcula según la expresión indicada en b)
En ambos casos, deben tenerse en cuenta las secciones mínimas establecidas en el RBT:

Para conductores de protección con protección mecánica: 2 mm²

Para conductores sin protección mecánica: 4 mm²

a) Relación entre las secciones de los conductores de protección y los conductores de fase

Sección de los conductores de fase de la instalación S (mm ²)	Sección mínima de los conductores de protección S _{PE} (mm ²)
	Si el conductor de protección es del mismo material que el conductor de fase
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$\frac{S}{2}$

Si la aplicación de la Tabla conduce a valores no normalizados, se utilizan los conductores que tengan la sección normalizada mayor más próxima.

b) La sección de los conductores de protección no debe ser menor que el valor determinado por la siguiente expresión:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k}$$

donde,

S es la sección del conductor en mm²,

I es el valor eficaz en Amperios de la corriente de defecto a tierra, que puede circular por el conductor de protección,

t es el tiempo de funcionamiento del dispositivo de corte, en segundos,

k es un factor que depende del tipo de material del conductor de protección, del tipo de aislamiento y de las temperaturas inicial y final.

Esta expresión es aplicable para tiempos de desconexión que no excedan los 5s.

En las Tablas siguientes se dan los valores de k para las situaciones de instalación y materiales usuales.

Valores de k para los conductores de protección aislados que no forman parte de cables multipolares o no agrupados con otros cables

Aislamiento del conductor	Temperatura (°C)		Material del conductor
			Cobre
	Inicial	Final	Valores de k
PVC 70 °C ($S \leq 300 \text{ mm}^2$)	30	160	143
PVC 70 °C ($S > 300 \text{ mm}^2$)	30	140	133
EPR o XLPE 90 °C	30	250	176

Valores de k para los conductores de protección que forman parte de un cable multipolar o agrupados con otros cables o conductores aislados.

Aislamiento del conductor	Temperatura (°C)		Material del conductor
			Cobre
	Inicial	Final	Valores de k
PVC 70 °C ($S \leq 300 \text{ mm}^2$)	70	160	115
PVC 70 °C ($S > 300 \text{ mm}^2$)	70	140	103
EPR o XLPE 90 °C	90	250	143

Si la aplicación de la fórmula conduce a valores no normalizados, se utilizan los conductores que tengan la sección normalizada mayor más próxima.

4. OBJETIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA

Los objetivos generales de una puesta a tierra son:

- Permitir la descarga a tierra de una corriente de falla a tierra
- Mantener los potenciales producidos por las corrientes de falla dentro de los límites de seguridad y/o asegurar la actuación de los sistemas de protección en el tiempo adecuado, de vista de la seguridad de las personas y del equipamiento.
- Mantener un potencial de referencia en algún punto del sistema eléctrico o electrónico.

En términos generales, podemos decir que la o las puestas a tierra de una instalación eléctrica deberán diseñarse y ejecutarse para satisfacer las prescripciones de seguridad, y los requerimientos funcionales de las instalaciones.

En vista de lo anterior se definen dos tipos de puestas a tierra, las puestas a tierra funcionales y las puestas a tierra de protección.

4.1 Puesta a tierra de Protección y Puesta a tierra funcional

Puesta a tierra de protección

Es la puesta a tierra cuyo objetivo es proteger a las personas y animales contra los riesgos derivados de contactos con partes conductoras que, estando no sometidas normalmente a tensión, puedan estar sometidas a tensiones peligrosas como consecuencia de un defecto de aislamiento de la instalación (MASAS).

Para lograr este objetivo de protección debe realizarse una puesta a tierra adecuada, y conectar a la misma todas las masas de la instalación.

Puesta a tierra funcional

Es la puesta a tierra cuyo objetivo es asegurar el correcto funcionamiento del equipamiento eléctrico y permitir un correcto y confiable funcionamiento de la instalación.

Dependiendo de las características de la instalación, la puesta a tierra de protección y la funcional pueden ser independientes o en una misma puesta a tierra combinarse ambas funciones. En este último caso, en el diseño de la puesta a tierra debe darse prioridad a las prescripciones establecidas para la puesta a tierra de protección.

Ejemplo:

Consideramos una instalación alimentada en 400V de la red de distribución de baja tensión, en la que se produce una falla de aislamiento en un motor trifásico entre una fase y masa. Distinguimos dos casos:

Caso A: NO ESTA REALIZADA LA CONEXIÓN A TIERRA DE LA MASA DEL MOTOR

En este caso la tensión de choque que queda establecida en la masa del motor será:

$$V_{ch} = V_N = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230V$$

Siendo V_{ch} : Tensión de choque

Por lo que queda establecida una tensión de choque peligrosa para las personas.

Caso B: ESTA REALIZADA LA CONEXIÓN DE LA MASA DEL MOTOR A LA PUESTA A TIERRA DE PROTECCIÓN

En este caso la tensión de choque que aparece en la masa del motor será:

$$V_{ch} = R_T \times I_f = R_T \times \frac{V_N}{R_{TN} + R_T}$$

$$I_{ch} = \frac{V_{ch}}{R_h}$$

Siendo

R_T Resistencia a de la puesta a tierra de protección

R_{TN} Resistencia de la puesta a tierra del neutro

R_h Resistencia del cuerpo humano

I_{ch} Corriente de choque

Considerando $R_{TN} = 5\Omega$:

$R_T (\Omega)$	$V_{ch} (V)$	$I_{ch} (mA)$
50	200	133
5	110	73
1,47	50	

De donde vemos que para que la tensión de choque llegue a un valor no peligroso, para ambientes secos (50V), se requeriría un valor de resistencia de la puesta a tierra de protección, de 1.47 V

4.2 Tensión de toque y Tensión de paso

La tensión de toque y la tensión de paso son dos parámetros que se definen para el diseño de las puestas a tierra y están relacionados con la seguridad de las personas.

Tensión de toque: es la diferencia de potencial entre un punto del elemento conductor, situado al alcance de la mano de una persona y un punto en el suelo situado a 1m de la base de dicho elemento.

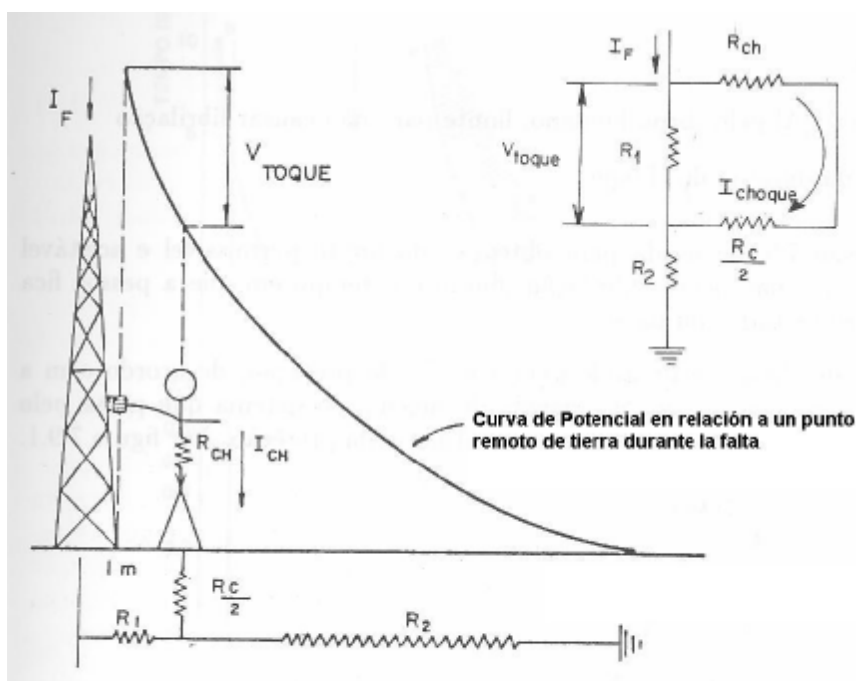


Fig. 1.

Considerando el circuito equivalente de la Figura1, se puede calcular:

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \times I_{choque}$$

Donde:

R_{ch} es la resistencia del cuerpo humano $\approx 1000 \Omega$,

R_c es la resistencia de contacto $\approx 3r_s$

r_s es la resistividad superficial del suelo

Luego considerando como corriente de choque máxima que no causa fibrilación ventricular, la definida por la ecuación de Dalziel:

$I_{choque} = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$, donde t es el tiempo de permanencia del defecto en segundos, e I_{choque} se expresa en A.

La tensión de toque máxima generada por el defecto no debe producir una corriente de choque mayor a la limitada por dicha ecuación, y por tanto la tensión de toque máxima permitida será:

$$V_{toque} = (1000 + 1,5 \times r_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Luego la tensión máxima de un sistema de puesta a tierra puede calcularse como:

$$V_{maximo \text{ del sistema de puesta a tierra}} = (R_1 + R_2) \times I_F = R_T \times I_F$$

Y por lo tanto es razonable imponer que:

$$V_{maximo \text{ del sistema de puesta a tierra}} < V_{toque \text{ máxima}}$$

Tensión de paso: es la diferencia de potencial existente entre los pies de una persona, separados 1m, cuando se encuentran sobre líneas de potencial diferentes.

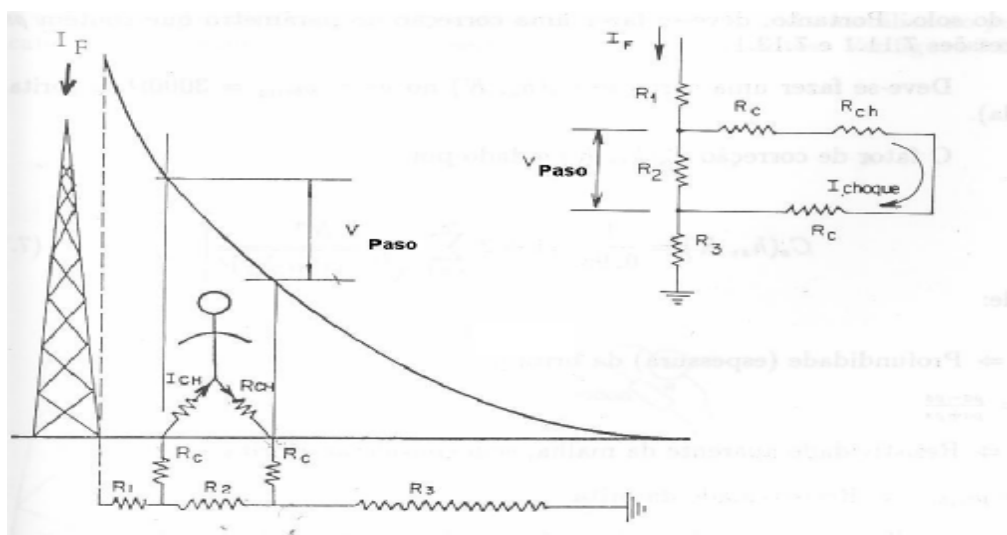


Fig. 2.

Considerando el circuito equivalente de la Figura2, se puede calcular:

$$V_{\text{paso}} = (R_{ch} + 2 \times R_c) \times I_{\text{choque}}$$

Luego la tensión de paso máxima generada por el defecto no debe producir una corriente de choque mayor a la limitada por la ecuación de Dalziel, y por tanto la tensión de toque máxima permitida será:

$$V_{\text{toque}} = (1000 + 6 \times r_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Luego el voltaje máximo de un sistema de puesta a tierra puede calcularse como:

$$V_{\text{máximo del sistema de puesta a tierra}} = (R_1 + R_2 + R_3) \times I_F = R_T \times I_F$$

Y por lo tanto es razonable imponer que:

$$V_{\text{máximo del sistema de puesta a tierra}} < V_{\text{toque máximo}}$$

5. RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA

5.1 Diferentes configuraciones

Pueden realizarse distintas combinaciones y disposiciones de electrodos para la ejecución de una toma de tierra, las mas comunes son:

- Jabalinas verticales alineadas o dispuestas en triángulo o cuadrado.
- Conductores horizontales dispuestos linealmente, en circunferencia o en estrella

5.2 Cálculo de la resistencia de una puesta a tierra

La resistencia eléctrica de una toma de tierra depende de:

- La resistividad del suelo, que supondremos homogéneo.
- La disposición y tipo de electrodos que conforman la toma de tierra

Para todas las configuraciones puede expresarse como: $R_T = r \times f(g)$

Donde:

r : es la resistividad del suelo

$f(g)$: es una expresión que tiene en cuenta la geometría y dimensión de la puesta a tierra

La tabla siguiente ilustra la variación de la resistividad del suelo para distintos tipos de suelo:

Naturaleza del suelo	Resistividad (Ωm)
Suelos pantanosos, humus, lodo	5 a 100
Tierra de jardín húmedo (50% de humedad)	140
Tierra de jardín poco húmedo (20% de humedad)	480
Arcilla seca	1.500 a 5.000
Arcilla con 40% de humedad	80
Arcilla con 20% de humedad	330
Arena mojada	1.300
Arena seca	3.00 a 8.000
Calcáceo compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Nota: Son considerados “buenos conductores” los suelos con resistividad entre 50 y $100\Omega\cdot\text{m}$.

A continuación se dan las fórmulas de cálculo de la resistencia de puesta a tierra para las configuraciones las comunes.

Jabalina vertical

$$R_T = \frac{r}{2pL} \times \ln\left(\frac{4L}{d}\right)$$

Donde:

- r es la resistividad del suelo ($\Omega\cdot\text{m}$),
- L es la longitud de la jabalina (m),
- d es el diámetro equivalente de la jabalina (m)

De la expresión de la resistencia de puesta a tierra podemos observar que dicha resistencia disminuye si:

1. Aumenta el largo de la jabalina y/o
2. Aumenta el diámetro de la jabalina y/o
3. Baja la resistividad del suelo y/o
4. Se instalan jabalinas en paralelo

1. En la figura siguiente se muestra el efecto del largo de la jabalina en la resistencia de la puesta a tierra, para jabalinas de distintos diámetros, y un suelo homogéneo de 100 V.m

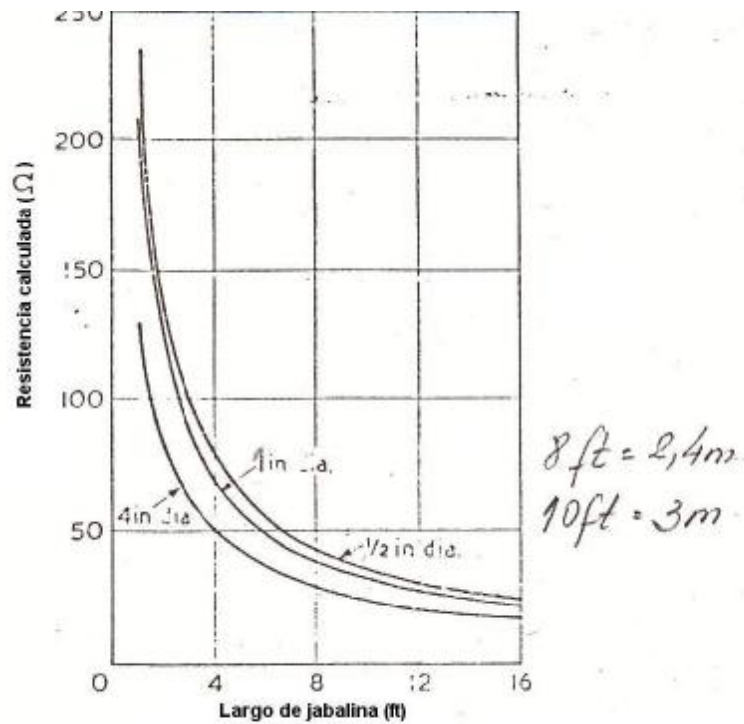
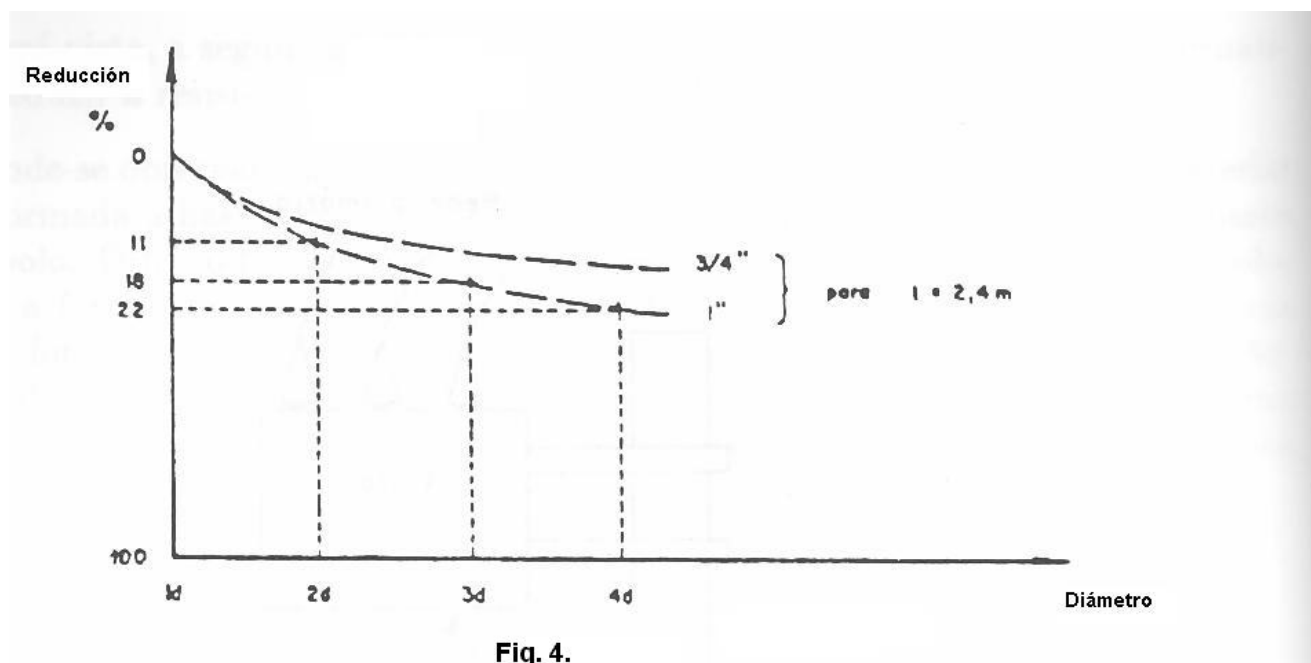


Fig. 3. Efecto del largo de la jabalina en el cálculo de la resistencia para suelo uniforme con resistividad 10000 ohm.cm

Se observa que a partir de determinado valor (aprox. 2,4m), el aumento de longitud de la jabalina no produce efectos importantes sobre el valor de la resistencia de la puesta a tierra.

2. En la figura siguiente se muestra la reducción de la resistencia de puesta a tierra de una jabalina en función del diámetro de la misma, para jabalinas de distintos diámetros y longitudes.



Se observa que el aumento del diámetro de la jabalina produce una pequeña reducción, y a partir de determinado valor prácticamente no tiene influencia. En la práctica se utilizan los diámetros mínimos por razones de corrosión y resistencia mecánica.

3. La resistividad del suelo puede bajarse con el uso de geles conductores o bentonitas. Las geles que se utilicen deben tener las siguientes propiedades:

- Buena hidroscofia
- No ser corrosivo
- Baja resistividad eléctrica
- Químicamente estable
- No ser tóxico
- No causa daño a la naturaleza

En las gráficas siguientes se muestra el comportamiento de la resistencia de una puesta a tierra en un suelo con y sin tratamiento, en función del tiempo.

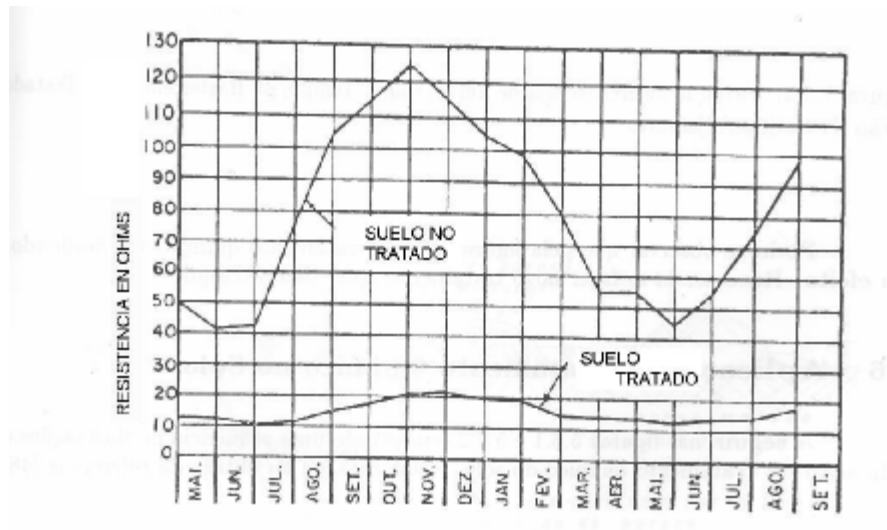


Fig. 5. Tratamiento Químico del suelo

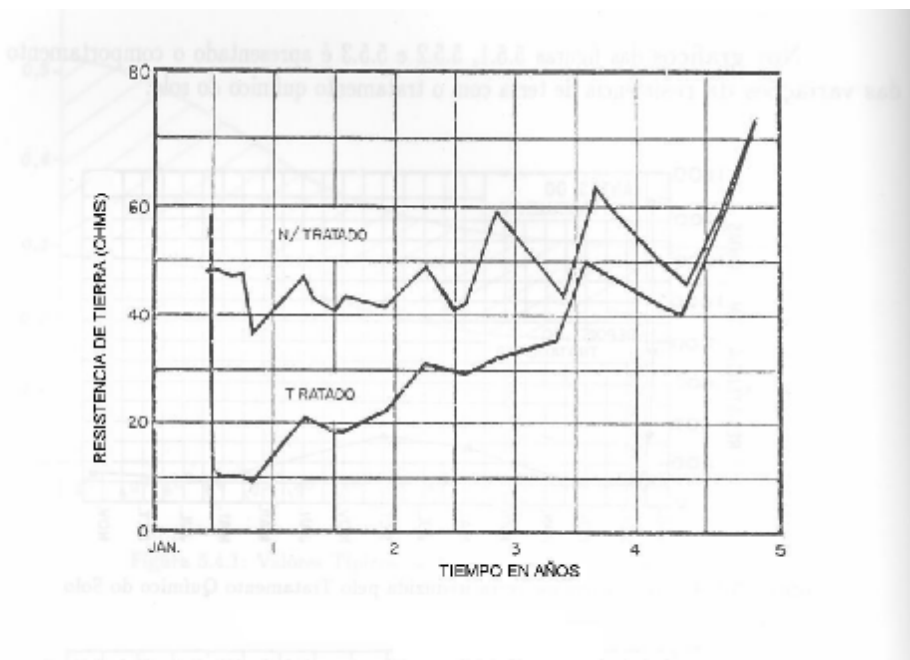


Fig. 6. Variación de Resistencia de tierra, con el tiempo, de jabalinas en suelos tratados y no tratados Adyacentes.

4. La instalación de jabalinas en paralelo disminuye sensiblemente el valor de la resistencia de la puesta a tierra pues aumenta la superficie de dispersión, baja la densidad de corriente y en consecuencia disminuye la resistencia de la puesta a tierra.

El cálculo de la resistencia de jabalinas en paralelo no sigue la ley simple del paralelo de resistencias eléctricas, cumpliéndose que:

$$\frac{R_{1j}}{2} < R_{2j} < R_{1j}$$

Esto se debe a que en la zona de interferencia de las jabalinas, se produce un área del bloqueo del flujo de corriente correspondiente a cada jabalina, dando como resultado una mayor resistencia de puesta a tierra individual.

El aumento de la distancia de separación entre jabalinas disminuye el efecto de dicha interferencia, y mejora el rendimiento de la configuración. Se establece como separación mínima el largo de la jabalina .

En las figuras siguientes se muestran las superficies de dispersión de corriente (superficies equipotenciales) para una jabalina, la zona de interferencia y las superficies equipotenciales para dos jabalinas en paralelo.

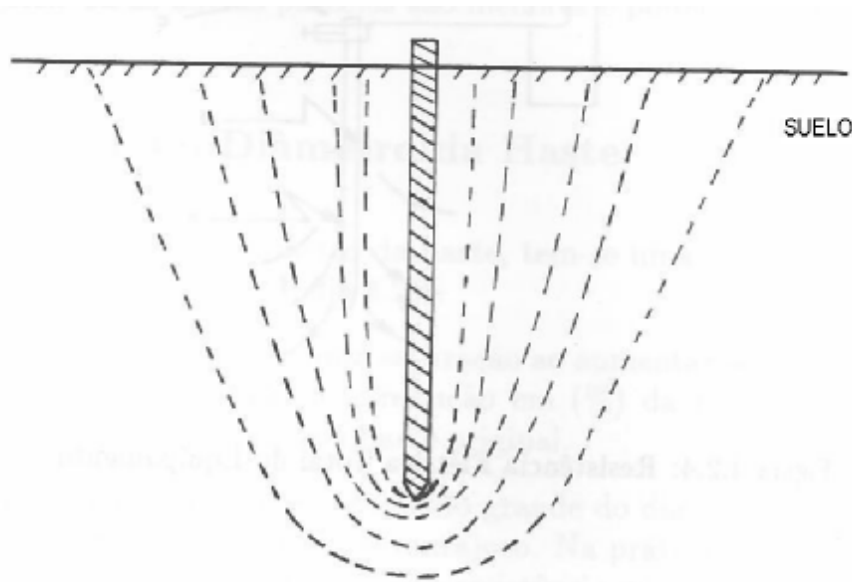
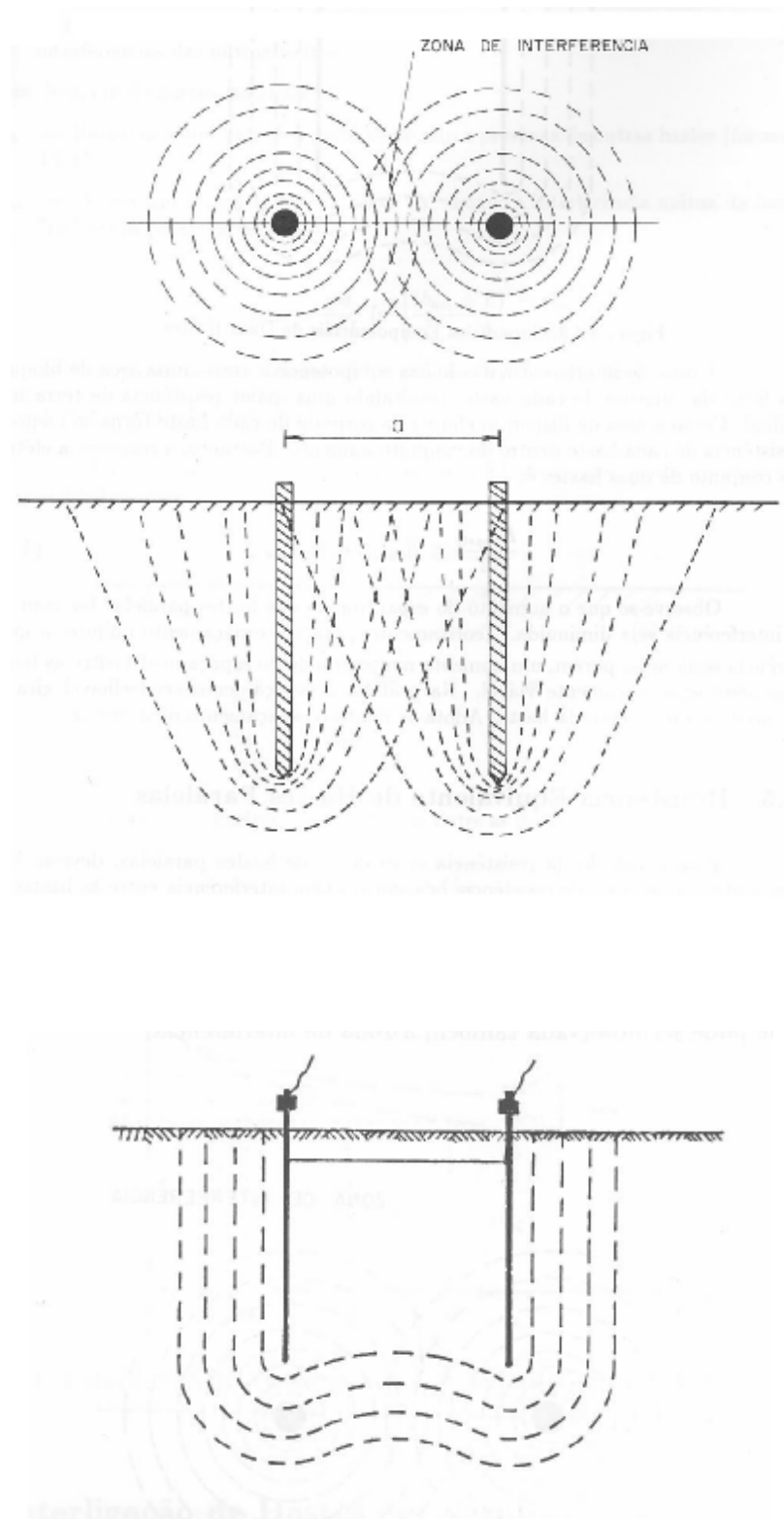


Fig. 7. Superficies equipotenciales de una jabalina



Para el cálculo de la resistencia equivalente de jabalinas en paralelo, se define el índice de reducción K como:

$$R_{nj} = K \times R_{1j}$$

Donde

R_{1j} es la resistencia de puesta a tierra de una jabalina

R_{nj} es la resistencia de puesta a tierra de n jabalinas

El valor de K es dado por medio de tablas o curvas para las distintas configuraciones, como ser jabalina alineadas, jabalinas dispuestas en circunferencia, jabalinas dispuestas en triángulo, etc.

Jabalinas alineadas

Las siguientes tablas dan valores del factor de reducción para jabalinas alineadas de distintas dimensiones, y para distintas separaciones entre jabalinas.

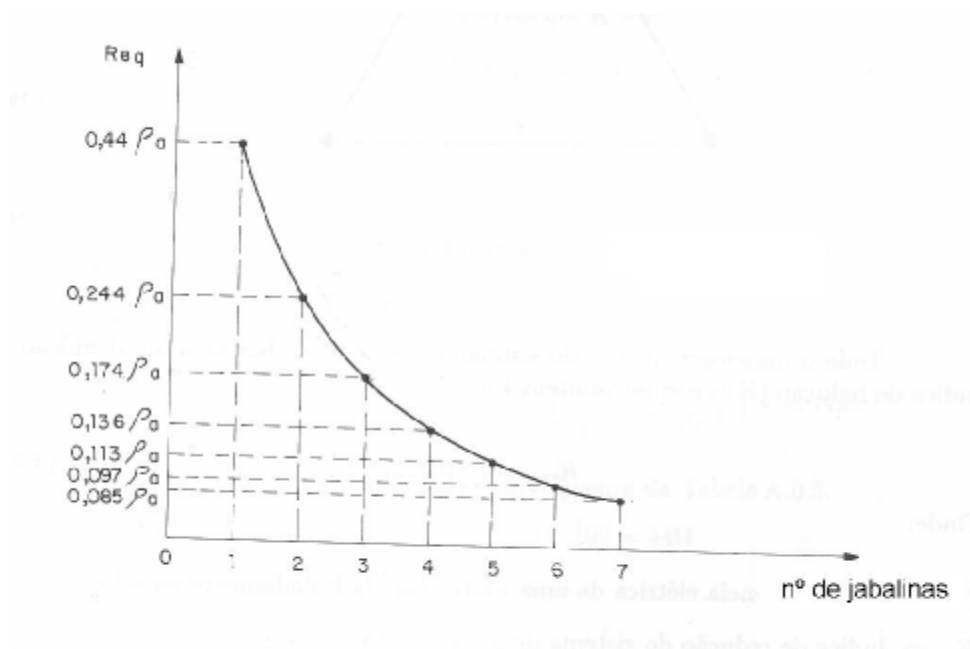
ESPACIAMIENTOS Número de JABALINAS	$L = 2,4m$		$d = \frac{1}{2}''$		$R_{1 \text{ haste}} = 0,440 \rho a$			
	2,5m		3m		4m		5m	
	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,248 ρa	0,564	0,244 ρa	0,555	0,239 ρa	0,543	0,235 ρa	0,535
3	0,178 ρa	0,406	0,174 ρa	0,395	0,168 ρa	0,381	0,164 ρa	0,372
4	0,141 ρa	0,321	0,136 ρa	0,310	0,130 ρa	0,297	0,127 ρa	0,288
5	0,118 ρa	0,268	0,113 ρa	0,258	0,107 ρa	0,245	0,104 ρa	0,236
6	0,102 ρa	0,231	0,097 ρa	0,221	0,092 ρa	0,209	0,088 ρa	0,201
7	0,090 ρa	0,204	0,085 ρa	0,195	0,080 ρa	0,182	0,077 ρa	0,175
8	0,080 ρa	0,183	0,076 ρa	0,174	0,071 ρa	0,162	0,068 ρa	0,155
9	0,073 ρa	0,166	0,069 ρa	0,157	0,064 ρa	0,147	0,061 ρa	0,140
10	0,067 ρa	0,152	0,063 ρa	0,144	0,059 ρa	0,134	0,056 ρa	0,127
11	0,062 ρa	0,140	0,058 ρa	0,133	0,054 ρa	0,123	0,051 ρa	0,117
12	0,057 ρa	0,131	0,054 ρa	0,123	0,050 ρa	0,114	0,048 ρa	0,108
13	0,054 ρa	0,122	0,051 ρa	0,115	0,047 ρa	0,106	0,044 ρa	0,101
14	0,051 ρa	0,115	0,048 ρa	0,108	0,044 ρa	0,100	0,041 ρa	0,094
15	0,048 ρa	0,109	0,045 ρa	0,102	0,041 ρa	0,094	0,039 ρa	0,089

Puesta a Tierra y Conductores de Protección

$L = 2m \quad d = 1'' \quad R_{i \text{ haste}} = 0,458\rho a$								
ESPACIAMIENTOS	2m		3m		4m		5m	
Número de JABALINAS	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,264 ρa	0,577	0,254 ρa	0,554	0,248 ρa	0,542	0,244 ρa	0,534
3	0,192 ρa	0,420	0,180 ρa	0,394	0,174 ρa	0,380	0,170 ρa	0,371
4	0,153 ρa	0,335	0,142 ρa	0,309	0,135 ρa	0,296	0,131 ρa	0,287
5	0,129 ρa	0,281	0,117 ρa	0,257	0,111 ρa	0,243	0,108 ρa	0,235
6	0,111 ρa	0,243	0,101 ρa	0,220	0,095 ρa	0,207	0,091 ρa	0,200
7	0,099 ρa	0,215	0,088 ρa	0,193	0,083 ρa	0,181	0,080 ρa	0,174
8	0,089 ρa	0,194	0,079 ρa	0,173	0,074 ρa	0,161	0,071 ρa	0,154
9	0,081 ρa	0,176	0,071 ρa	0,156	0,067 ρa	0,145	0,064 ρa	0,139
10	0,074 ρa	0,162	0,065 ρa	0,143	0,061 ρa	0,133	0,058 ρa	0,126
11	0,069 ρa	0,150	0,060 ρa	0,132	0,056 ρa	0,122	0,053 ρa	0,116
12	0,064 ρa	0,140	0,056 ρa	0,122	0,052 ρa	0,113	0,049 ρa	0,107
13	0,060 ρa	0,131	0,052 ρa	0,114	0,048 ρa	0,105	0,046 ρa	0,100
14	0,057 ρa	0,124	0,049 ρa	0,107	0,045 ρa	0,099	0,043 ρa	0,093
15	0,053 ρa	0,117	0,046 ρa	0,101	0,043 ρa	0,093	0,040 ρa	0,088

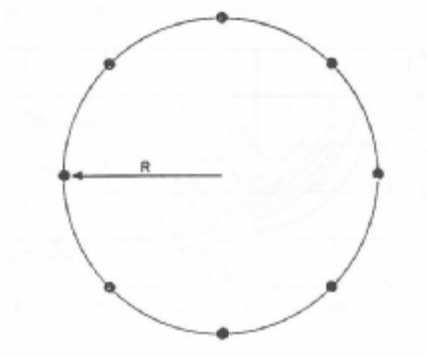
$L = 3m \quad d = 1'' \quad R_{i \text{ JABALINA}} = 0,327\rho a$						
ESPACIAMIENTOS	3m		4m		5m	
Número de JABALINAS	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,187 ρa	0,571	0,182 ρa	0,556	0,178 ρa	0,546
3	0,135 ρa	0,414	0,129 ρa	0,396	0,126 ρa	0,385
4	0,108 ρa	0,329	0,102 ρa	0,312	0,098 ρa	0,300
5	0,090 ρa	0,276	0,085 ρa	0,259	0,081 ρa	0,248
6	0,078 ρa	0,238	0,073 ρa	0,222	0,069 ρa	0,212
7	0,069 ρa	0,211	0,064 ρa	0,195	0,061 ρa	0,185
8	0,062 ρa	0,189	0,057 ρa	0,175	0,054 ρa	0,165
9	0,056 ρa	0,172	0,052 ρa	0,158	0,049 ρa	0,149
10	0,052 ρa	0,158	0,047 ρa	0,145	0,045 ρa	0,136
11	0,048 ρa	0,146	0,044 ρa	0,133	0,041 ρa	0,125
12	0,044 ρa	0,136	0,041 ρa	0,124	0,038 ρa	0,116
13	0,042 ρa	0,128	0,038 ρa	0,116	0,035 ρa	0,109
14	0,039 ρa	0,120	0,036 ρa	0,109	0,033 ρa	0,102
15	0,037 ρa	0,113	0,034 ρa	0,103	0,031 ρa	0,096

Si se grafica la disminución de la resistencia equivalente de n jabalinas alineadas en función del número de jabalinas, se obtiene una curva como la que se muestra en la figura siguiente, en la que puede verse que dicha disminución tiende a quedar constante a partir de $n = 7$.

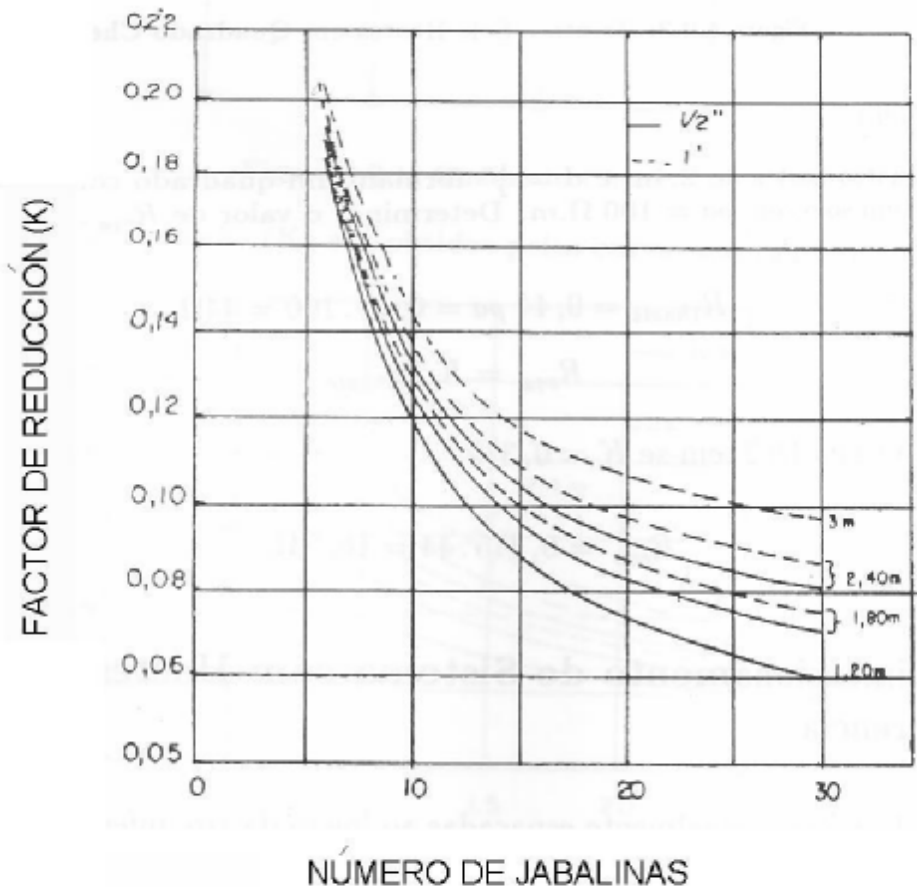


A continuación se muestran las curvas correspondientes al índice de reducción para jabalinas dispuestas en circunferencia y jabalinas dispuestas en triángulo.

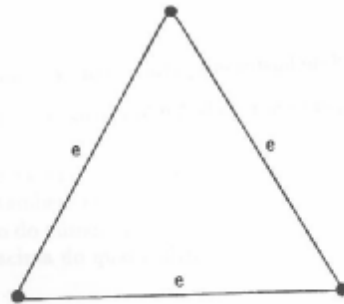
Jabalinas dispuestas en circunferencia



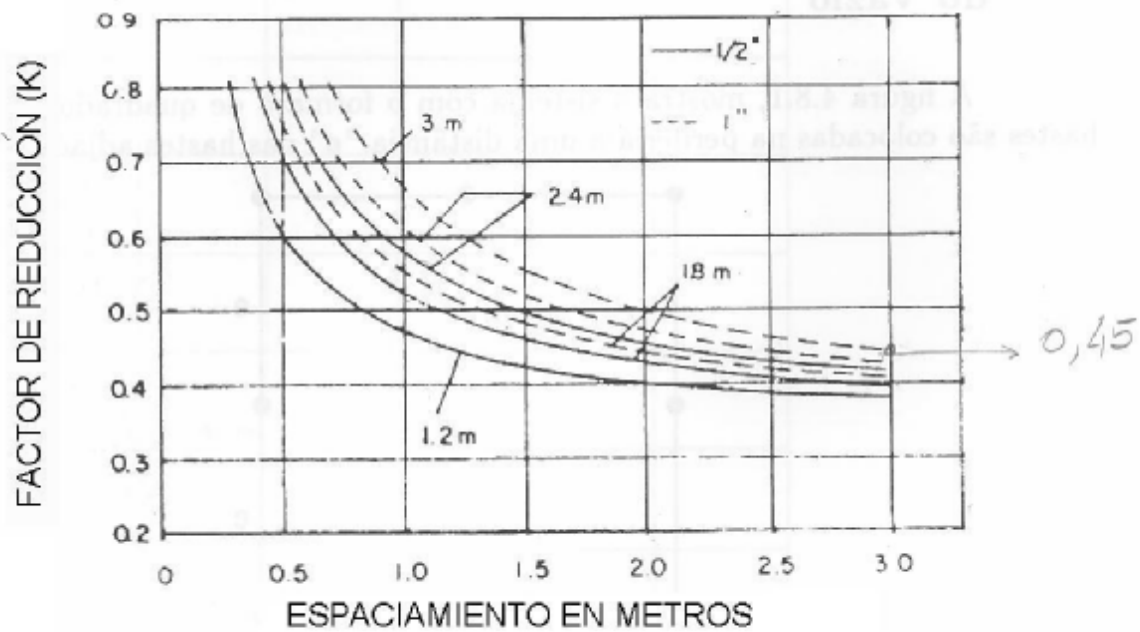
Las curvas que se muestran a continuación corresponden a la distribución de n las jabalinas en una circunferencia de 9m de radio, para jabalinas de distintos diámetros ($1''$ y $\frac{1}{2}''$) y longitudes (1.2m, 1.8, 2.4m y 3m).



Jabalinas dispuestas en triángulo



Las curvas que se muestran a continuación corresponden a la distribución de 3 jabalinas en triángulo, en función del espaciamiento, para jabalinas de distintos diámetros (1" y ½ ") y longitudes (1.2m, 1.8m, 2.4m y 3m).

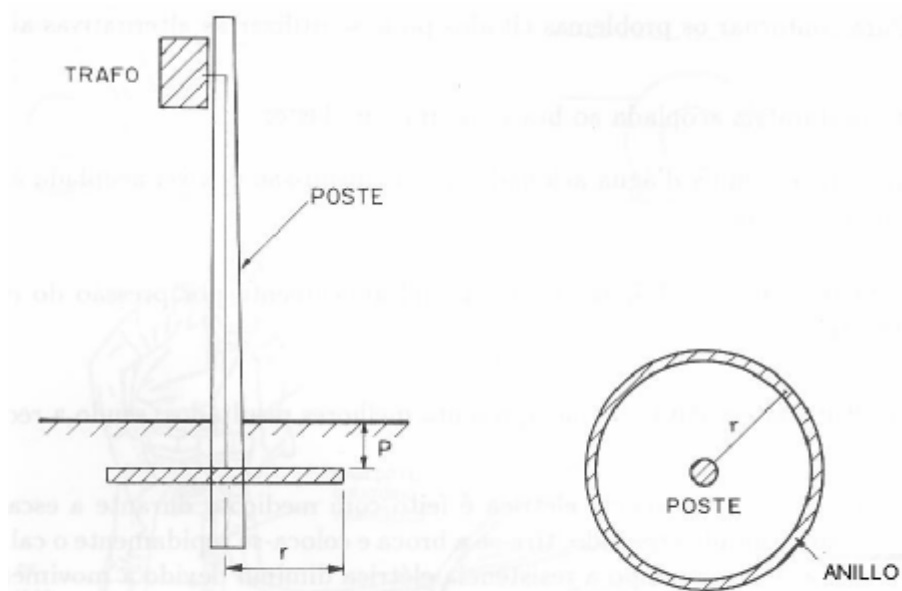


Jabalinas profundas

Los factores que pueden influir en la disminución de la resistencia de puesta a tierra cuando se utilizan jabalinas de gran longitud, son los siguientes:

- El aumento de la longitud de la jabalina
- La existencia de capas de suelo mas profundas de menor resistividad
- La presencia estable de agua a lo largo del año en las capas mas profundas.

Conductor horizontal dispuesto en circunferencia



$$R_T = \frac{r}{p^2 r} \times L n \left(\frac{4r^2}{d \times p} \right)$$

Donde:

p es la profundidad a la que esta enterrado el conductor (m),

r es el radio de la circunferencia (m),

d es el diámetro del circulo equivalente a la sección transversal del conductor (m).

Conductor horizontal dispuesto linealmente

$$R_r = \frac{r}{2pL} \left[L \ln \left(\frac{2L^2}{r \times p} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

Donde:

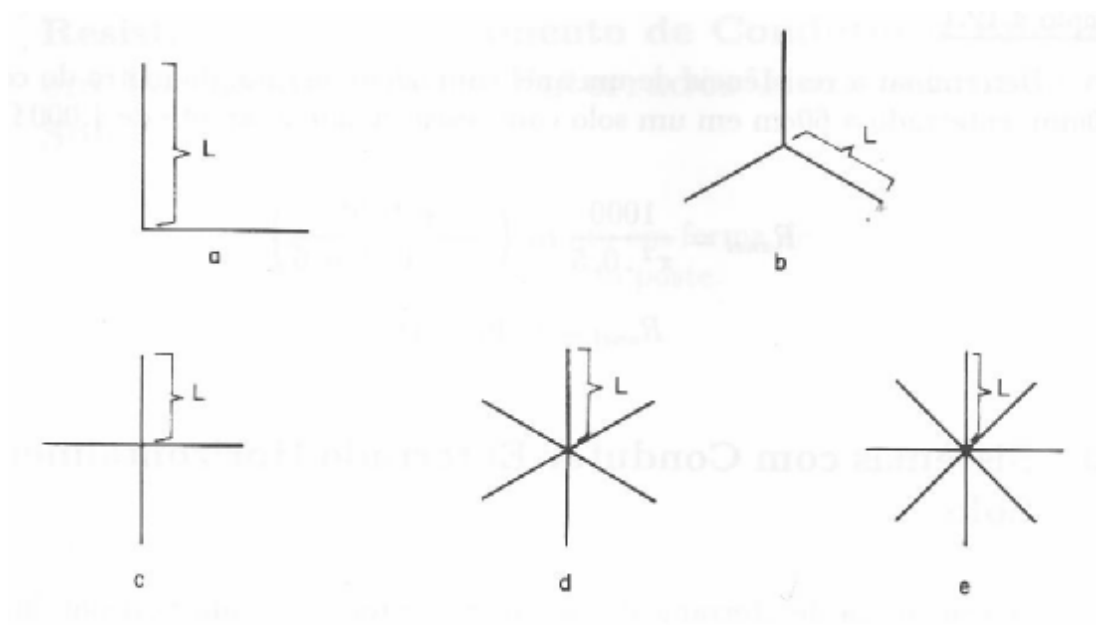
p es la profundidad a la que esta enterrado el conductor (m),

L es la longitud del conductor (m),

r es el radio equivalente del conductor (m),

En general $p \ll L$, y los términos correspondientes a las potencias de $\frac{p}{L}$ pueden despreciarse.

Conductores horizontales en otras disposiciones



a - Dos conductores horizontales dispuestos en ángulo recto

$$R_T = \frac{r}{2pL} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2 \times r \times p} \right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{p}{L} + 1,656 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right],$$

Donde:

p es la profundidad a la que esta enterrado el conductor (m),

L es la longitud de cada rama (m),

r es el radio equivalente del conductor (m),

b - Tres conductores horizontales dispuestos en estrella

$$R_T = \frac{r}{3pL} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2 \times r \times p} \right) + 1,077 - 0,836 \frac{p}{L} + 3,808 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 13,824 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

c - Cuatro conductores horizontales dispuestos en estrella

$$R_T = \frac{r}{4pL} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2 \times r \times p} \right) + 2,912 - 4,284 \frac{p}{L} + 10,32 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 37,12 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

d - Seis conductores horizontales dispuestos en estrella

$$R_T = \frac{r}{6pL} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2 \times r \times p} \right) + 6,851 - 12,512 \frac{p}{L} + 28,128 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 125,4 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

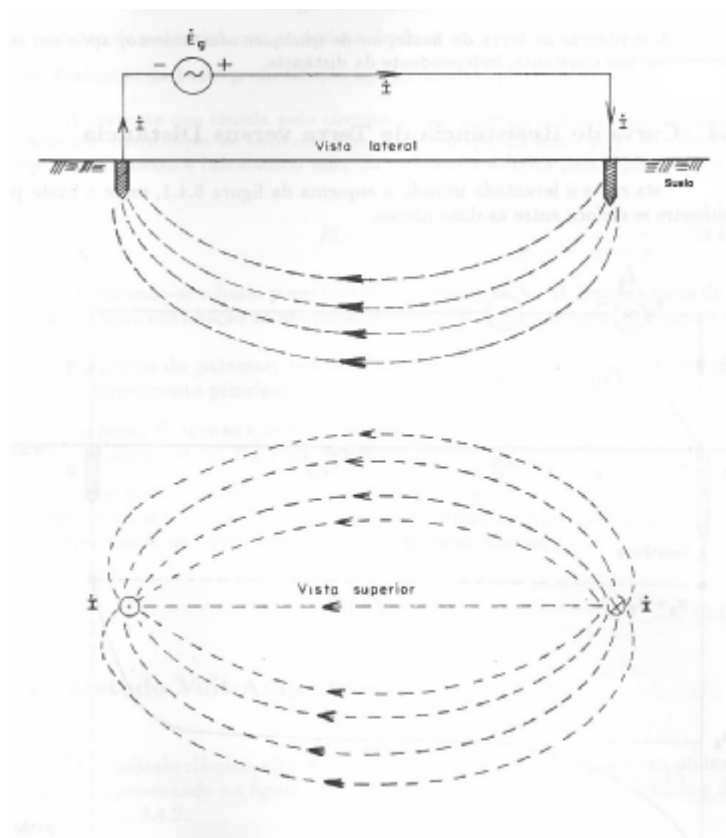
e - Ocho conductores horizontales dispuestos en estrella

$$R_T = \frac{r}{8pL} \left[\ln \left(\frac{L^2}{2 \times r \times p} \right) + 10,98 - 22,04 \frac{p}{L} + 52,16 \left(\frac{p}{L} \right)^2 - 299,52 \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

5.3 Medida de la resistencia de una puesta a tierra

La medición de la resistencia de una puesta a tierra se realiza por el método volt-amperimétrico, haciendo circular una corriente entre la puesta a tierra cuya resistencia se desea medir y una pica de referencia, y midiendo la tensión entre el borne principal de tierra y una segunda pica de referencia ubicada fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra.

Si consideramos dos jabalinas enterradas en el suelo y una fuente de corriente conectada a las mismas, la distribución de corriente es la mostrada en las siguientes figuras.



Como se ve en la figura, la densidad de corriente es máxima junto a la jabalina, y disminuye a medida que nos alejamos de la misma, y podemos expresar la resistencia de la puesta a tierra

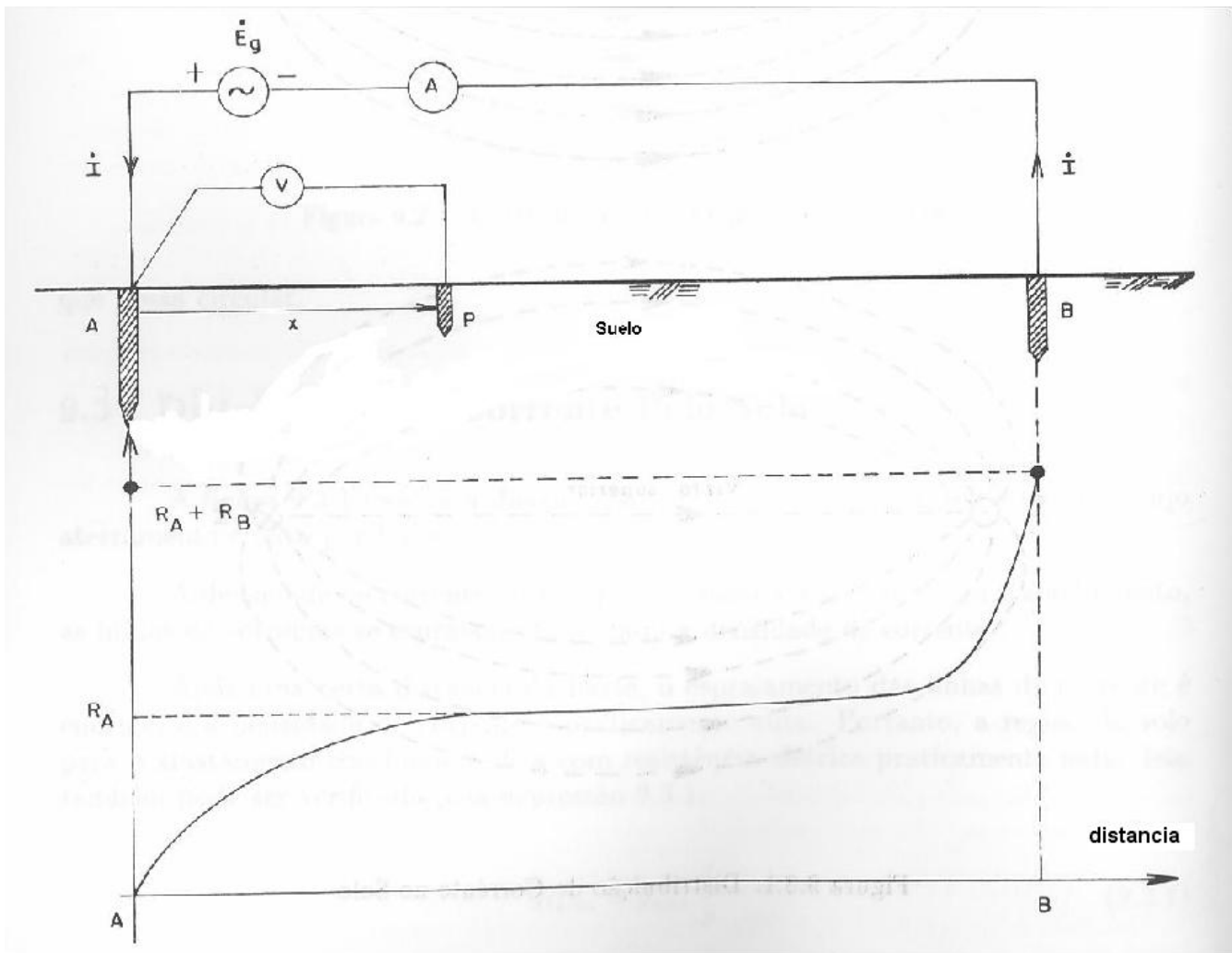
como
$$R_T = r \sum_i \frac{\Delta x_i}{S_i}$$

Donde S_i es la superficie de una superficie equipotencial y Δx_i la distancia entre dos superficies equipotenciales que puede considerarse que tienen la misma superficie ($S_i = S_{i+1}$).

Al aumentar la distancia a la jabalina las líneas de corriente divergen, S_i crece y la resistencia tiende a alcanzar un valor constante.

Por lo que la resistencia de la puesta a tierra corresponde a la región del suelo donde las líneas de corriente convergen y luego se mantiene constante hasta que influye la segunda jabalina.

Si se considera ahora el esquema de medición completo:



Donde:

- A es la puesta a tierra cuya resistencia se quiere medir,
- B es la pica auxiliar de corriente, y
- P es la pica auxiliar de tensión,

Se puede obtener la curva que se muestra en la figura, desplazando la pica auxiliar de tensión desde la puesta a tierra hacia la pica auxiliar de corriente, y considerando que la pica de tensión no altera la distribución de corriente. Donde R_A es el verdadero valor de la puesta a tierra y se encuentra aproximadamente en el 62% de la distancia entre A y B.

6. RESISTIVIDAD DEL SUELO

6.1 Definición

Es la resistencia entre las caras opuestas de un cubo de 1m de lado del material que desee testear. En laboratorio la determinación es realizada utilizando una caja de madera con dos caras opuestas revestidas con chapas metálicas, y el valor de la resistencia medida es la resistividad del terreno en Ωm .

6.2 Factores que influyen en el valor de la resistividad del suelo

- Tipo de suelo – Ver punto 5.2.
- Estratificación del suelo – suelos constituidos por capas de distintos materiales y de distintos espesores.
- Humedad
- Temperatura
- Composición y concentración de las sales disueltas en agua

Humedad

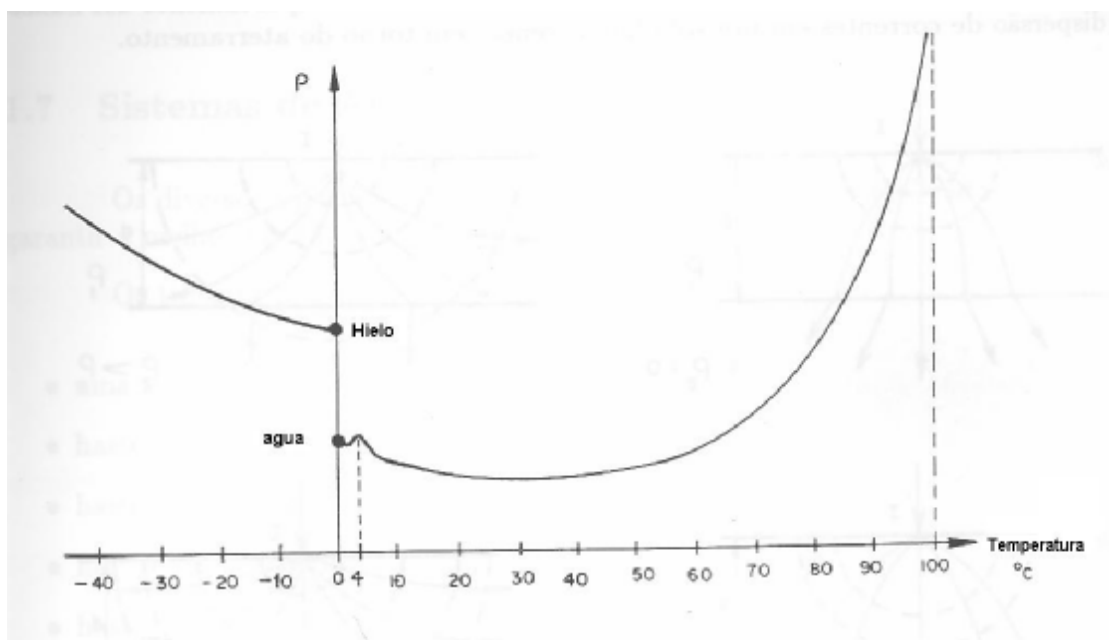
La variación de la resistividad del suelo con la humedad se debe a que la conducción de cargas eléctricas en el suelo es predominantemente iónica. Un porcentaje mayor de humedad hace que las sales presentes en el suelo se disuelvan, formando un medio favorable al pasaje de la corriente iónica.

Ejemplo: Variación de la resistividad de un suelo arenoso.

INDICE DE HUMEDAD (% por peso)	RESISTIVIDAD (Ωm) suelo arenoso
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Temperatura

De forma genérica, la performance de un suelo determinado, sometido a variaciones de temperatura puede representarse mediante la siguiente curva:



6.3 Medición de la resistividad del suelo

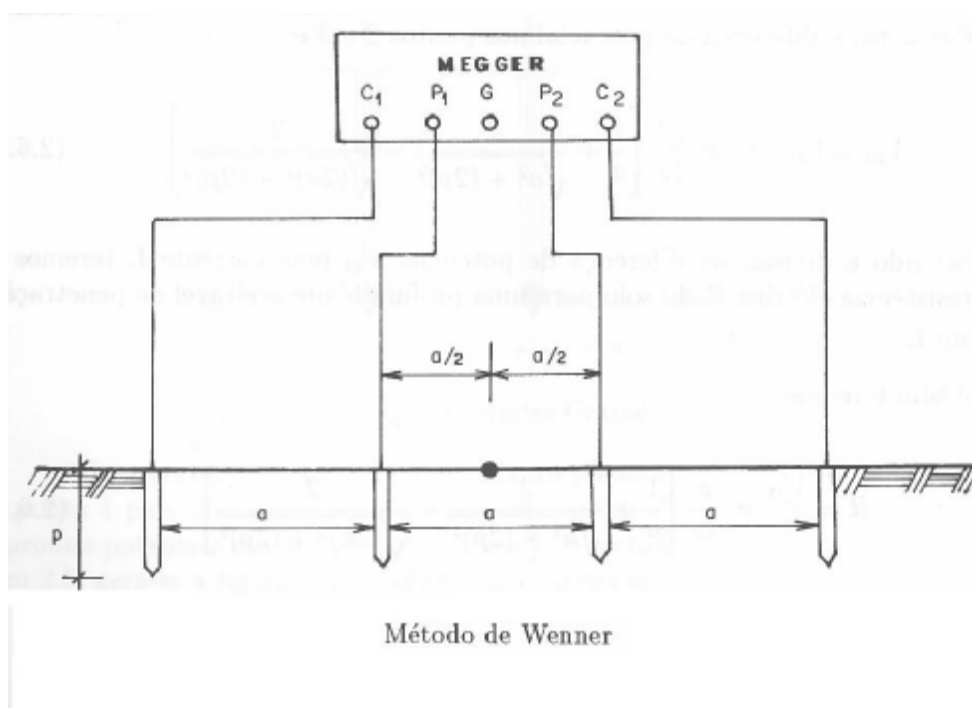
Los suelos en su mayoría no son homogéneos, sino formados por varias capas de resistividad y profundidad diferentes, estas capas en general son paralelas a la superficie del suelo, en algunos casos aparecen inclinadas y hasta verticales, debido a fallas geológicas.

La finalidad es relevar la curva de la resistividad del suelo en función de la profundidad $\rho(a)$, y a partir de dicha curva modelarlo como un suelo de varias capas horizontales, homogéneas de resistividad r_i , y profundidad p_i .

Todos los desarrollos teóricos corresponden a modelos del suelo en capas horizontales, ya que los otros casos son muy poco frecuentes, principalmente en los sitios de ubicación de una subestación o edificación.

El método más usado para calcular la resistividad del suelo es el Método de Wenner. Este método consiste en la medición de una resistencia con el instrumento y la configuración indicadas en la figura, en función de la corriente que circula entre las picas de corriente (C_1 y C_2) y la tensión medida entre las picas de tensión (P_1 y P_2), y el cálculo de la resistividad del suelo a partir de la resistencia medida (R_M).

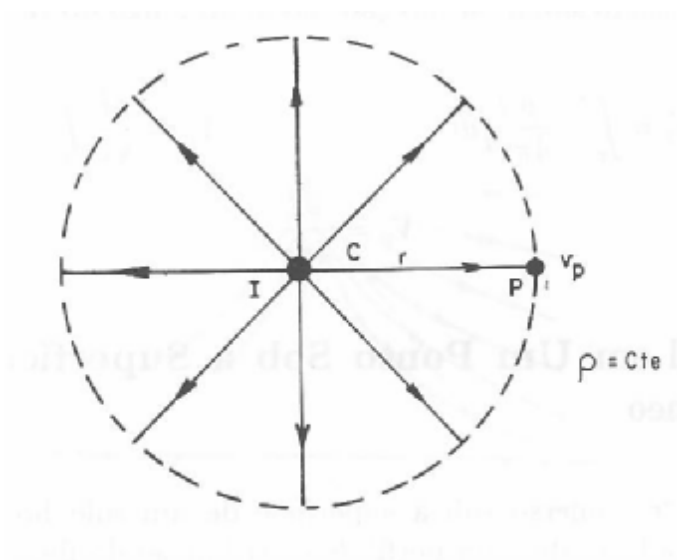
$$R_M = \frac{V_{P1} - V_{P2}}{I_{C1-C2}}$$



Para llegar a la expresión que relaciona la resistencia medida R_M , con la resistividad del suelo, consideramos primero la situación ideal de una fuente de corriente inmersa en un suelo infinito y homogéneo, luego consideramos la condición real de suelo no infinito y finalmente consideramos la configuración de las picas de corriente y tensión correspondientes a la configuración de Wenner,

Potencial generado por una fuente de corriente inmersa en un suelo infinito y homogéneo

Consideramos una fuente de corriente (C) inmersa en un suelo infinito y homogéneo que emana una corriente eléctrica I. En esta situación no hay ninguna condición de borde que deforme las líneas de corriente y la resistividad del suelo es constante. Podemos entonces considerar que la corriente diverge radialmente.



Para calcular el potencial en un punto P, partimos de la expresión del campo eléctrico.

$$E_p = r \times J_p$$

Donde

E_p es el campo eléctrico en el punto P,
 J_p es la densidad de corriente en el punto P, y
 r es la resistividad del suelo

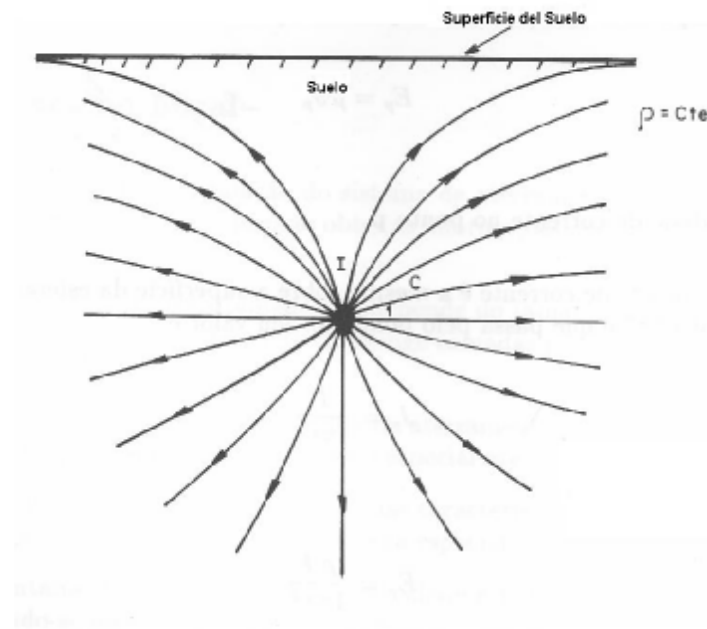
Siendo $J_p = \frac{I}{4\pi r^2}$

Luego considerando como referencia de potencial cero un punto en el infinito, puede calcularse el potencial en un punto P como la integral del campo eléctrico entre P y el punto de referencia.:

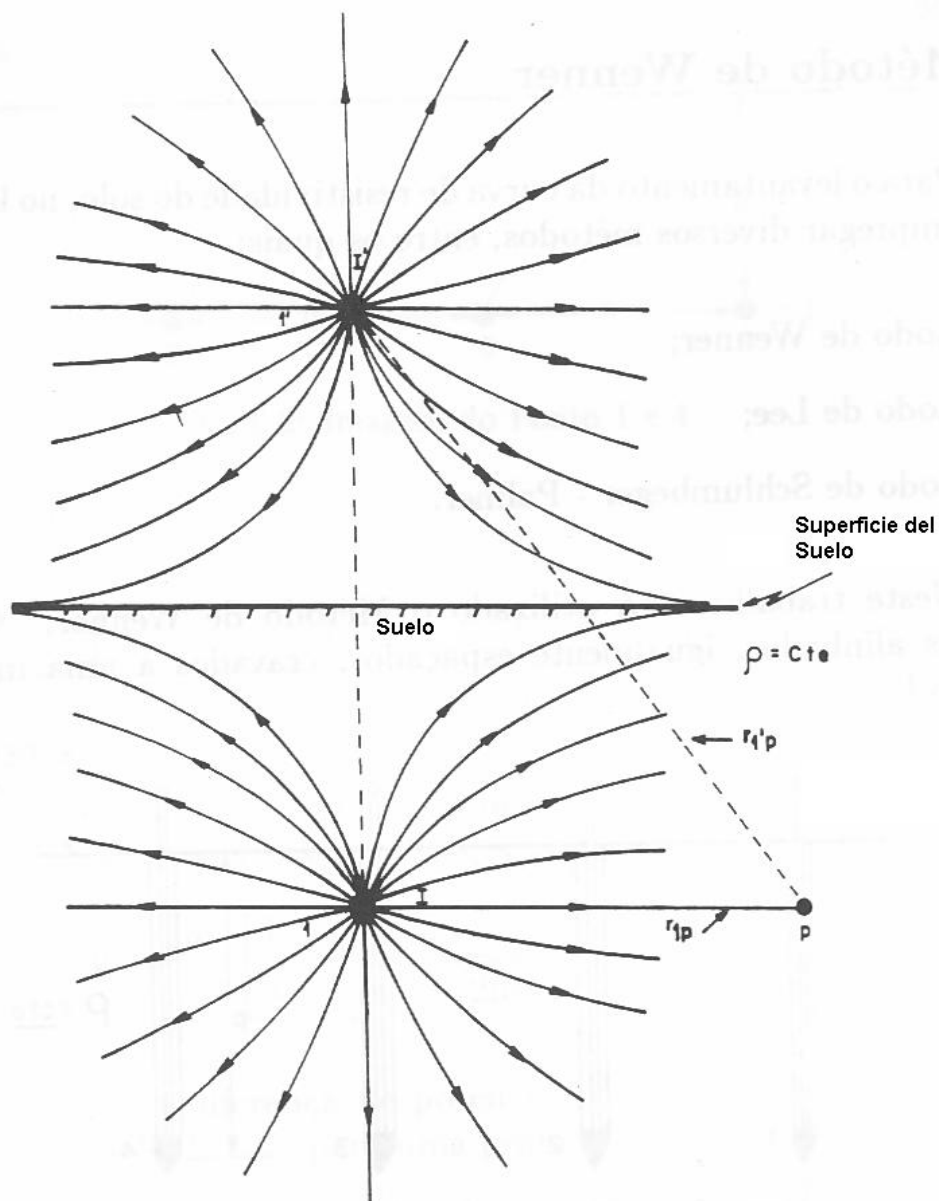
$$V_p = \int_r^\infty E_p dr = \int_r^\infty \frac{rI}{4\pi r^2} dr = \frac{rI}{4\pi} \frac{1}{r} \quad V_p = \frac{rI}{4\pi} \frac{1}{r}$$

Potencial generado por una fuente de corriente situada bajo la superficie de un suelo homogéneo

Con la condición de borde que impone el límite del suelo, las líneas de corriente se comportan como se muestra en la figura siguiente.



Esta situación es equivalente a considerar el suelo infinito y homogéneo y una fuente de corriente imagen, simétrica a C en relación a la superficie del suelo. Luego siendo válido el principio de superposición, puede hacerse el cálculo del potencial en un punto P superponiendo el efecto de cada fuente independientemente de su fuente imagen, como se muestra en la Figura y expresiones que siguen.

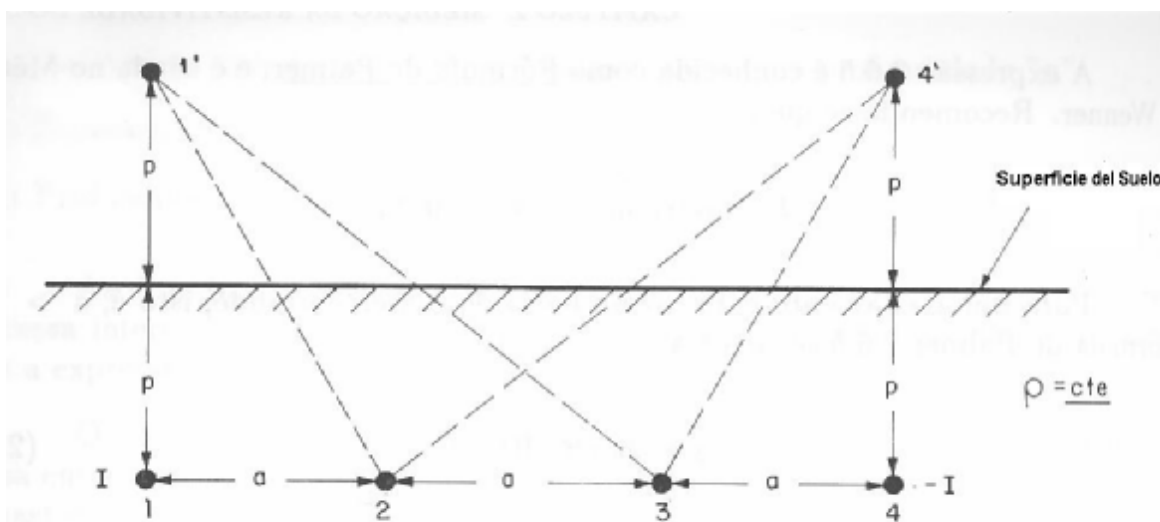


$$V_p = \frac{rI}{4\rho r'_{1p}} + \frac{rI'}{4\rho r_{1p}}, \text{ con } I = I'$$

$$V_p = \frac{rI}{4\rho} \left(\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r'_{1p}} \right)$$

Configuración de Wenner

En la figura siguiente se muestra la configuración de Wenner



En esta configuración es inyectada una corriente I en el punto 1 y colectada en el punto 4, y aparece por tanto entre los puntos 2 y 3 una diferencia de potencial que podemos calcular con las expresiones deducidas anteriormente.

Luego si consideramos el cociente entre $V_2 - V_3$ e I , obtenemos el valor de la resistencia R_M medida por el instrumento :

$$R_M = \frac{V_2 - V_3}{I} = \frac{r}{4p} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2r)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2r)^2}} \right]$$

De la expresión anterior puede despejarse el valor de la resistividad del suelo:

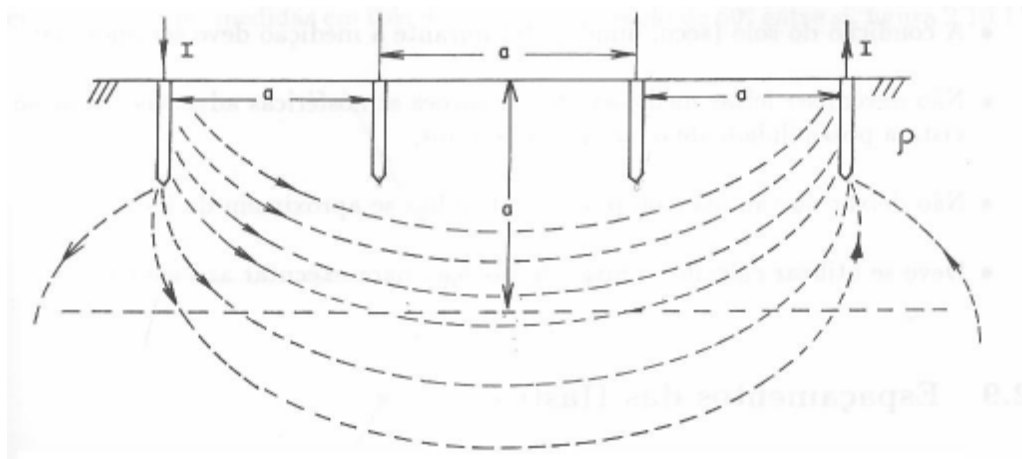
$$r = \frac{4pR_M \times a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}}$$

Luego considerando $a > 20p$, la expresión anterior queda:

$$r = 2pa \times R_M,$$

lo que permite calcular la resistividad del suelo considerado homogéneo en función de la resistencia medida con la configuración de Wenner.

No obstante, la situación real es que el suelo no es homogéneo y su resistividad varía con la profundidad. El método de Wenner considera que el 58% de la distribución de corriente que circula entre las picas de corriente lo hace a una profundidad igual al espaciamiento entre dichas picas (a), como se muestra en la figura siguiente



En consecuencia la resistencia eléctrica medida (R_M) es relativa a una profundidad a , y la resistividad calculada es la resistividad a la profundidad a ($r(a)$).

Y la expresión anterior queda:

$$r(a) = 2\pi a \times R_M,$$

lo que permite relevar la curva $r(a)$ realizando diferentes medidas de la resistencia R_M , para distintas separaciones entre picas.

A continuación se indican algunos puntos a tener en cuenta para la realización de esta medición.

Dimensiones de las picas

Se recomiendan los siguientes valores, a menos que el instrumento indique valores específicos:

- Longitud de las picas: $p \cong 50\text{cm}$
- Diámetro de las picas: $\phi = 10$ a 15mm

Cuidados en la medición

Las picas deben estar:

- Alineadas

- Igualmente espaciadas
- Clavadas a una misma profundidad
- Limpias y exentas de óxido

Recomendaciones generales

- Espaciamiento de las picas: 1, 2, 4, 6, 8, 16, 32 m.
- Dirección: deben realizarse medidas en tres direcciones (cada 60°)
- Puntos de medición
 - En caso de sistemas de puesta a tierra pequeños: ej. Puesta a tierra de transformadores alcanza con un (1) punto.
 - En caso de subestaciones, se recomienda medir en varios puntos, cubriendo el área de la malla.

Análisis de las medidas

Una vez realizadas todas las mediciones debe seguirse los siguientes pasos:

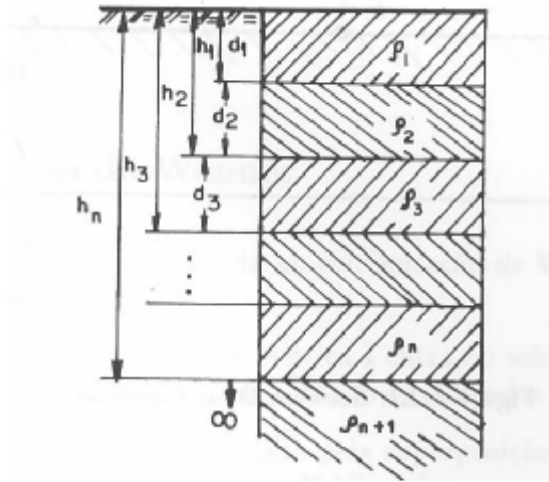
1. Calcular la media aritmética de los valores de resistividad, medidas para cada separación entre picas.
2. Calcular el desvío de cada valor respecto a su media.
3. Desestimar los valores que tienen un desvío mayor al 50%. Si hubieran muchas medidas en desvío mayores a 5% , se recomienda repetir las medidas
4. Recalcular la media y trazar la curva $\rho(a)$.

6.4 Estratificación del suelo

El modelo mas usado y que ha dado buenos resultados en la práctica es el modelado en capas horizontales.

En base a la curva $r(a)$, existen distintos métodos de estratificación del terreno mediante los que se determina la resistividad y profundidad de cada capa, quedando el análisis de estos métodos fuera del alcance de este curso.

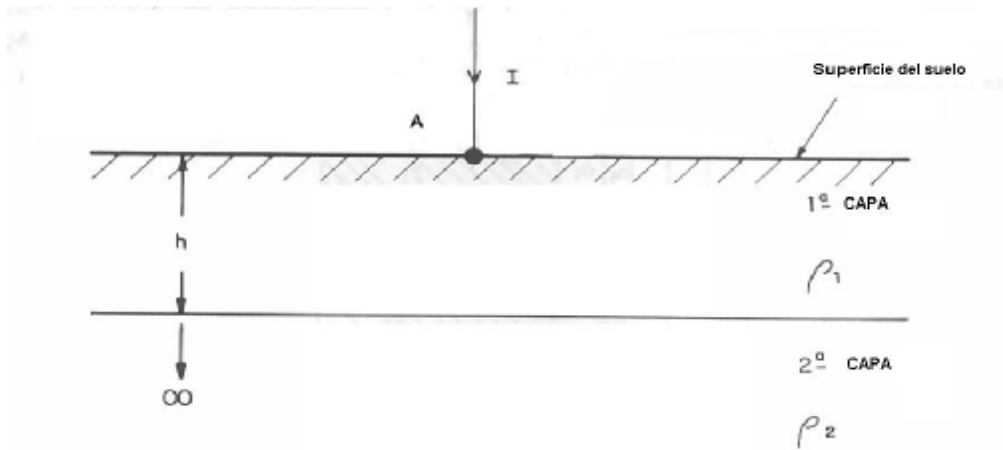
En lo que sigue se considera que a partir de la aplicación de algún programa de cálculo, se obtuvo a partir de la curva $r(a)$ el modelo del suelo en capas horizontales, como se representa en la figura siguiente.



Un modelo de varias capas puede siempre reducirse a un modelo en dos capas haciendo la reducción de las n primeras capas como sigue:

$$d_1 = deq = \sum_1^n di \text{ , } d_2 = \infty$$

$$r_1 = req = \frac{deg}{\sum_1^n \frac{di}{ri}}, \quad r_2 = r_{n+1}$$



6.5 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra para suelos no homogéneos

Las fórmulas de cálculo dadas en el punto 5.2 consideran el suelo homogéneo. Para un suelo no homogéneo se define el concepto de resistividad aparente del suelo en relación al sistema de puesta a tierra (r_a), y se aplican las mismas fórmulas de cálculo utilizando dicho valor de resistividad.

La resistividad aparente es la resistividad del suelo homogéneo equivalente, que da para una misma configuración de puesta a tierra, el mismo valor de resistencia de puesta a tierra.

Un mismo suelo, tiene para distintas configuraciones de puesta a tierra distintos valores de resistividad aparente, ya que depende de la profundidad de penetración de las corrientes en el suelo y por tanto de las capas del modelo involucradas en la conducción.

Podemos escribir:

$$R_T = r_a \times f(g)$$

Donde

r_a es la resistividad aparente, y

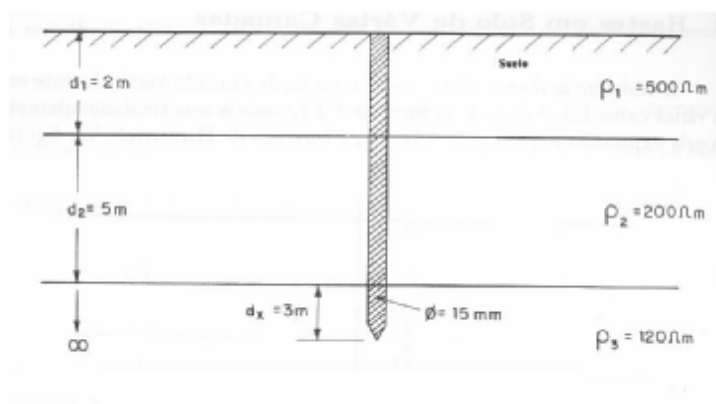
$f(g)$ es una expresión que tiene en cuenta la geometría y dimensión de la puesta a tierra

Entonces la resistividad del suelo homogéneo equivalente debe cumplir:

$$R_T = r_h \times f(g) \text{ y en consecuencia } r_h = r_a$$

A continuación se dan los métodos de cálculo para la determinación de la resistividad aparente para un suelo modelado en dos capas.

Jabalina vertical



$$r_a = \frac{d_1 + d_2 + d_x}{\frac{d_1}{r_1} + \frac{d_2}{r_2} + \frac{d_x}{r_3}}$$

Si el modelo fuera solo en dos capas:

$$r_a = \frac{d_1 + d_x}{\frac{d_1}{r_1} + \frac{d_x}{r_2}}$$

Otras configuraciones

Para puestas a tierra con otras geometrías se definen dos parámetros:

Coeficiente de profundidad (a) : $a = \frac{r}{d_1}$

- Para n jabalinas alineadas, separadas a una distancia e: $r = \frac{(n-1) \times e}{2}$
- Para otras configuraciones: $r = \frac{A}{D}$, donde A es el área de la puesta a tierra y D es la mayor dimensión de la puesta a tierra

Coeficiente de profundidad (b): $b = \frac{r_2}{r_1}$

La resistividad aparente se obtiene de las curvas de Endreyi que se presentan en la figura siguiente, a partir de los valores del coeficiente de profundidad y del coeficiente de reflexión, como sigue:

$$r_a = N \times r_1$$

Donde $N = f(a, b)$ es el valor que se obtiene de las Curvas de Endreyi

