



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



# Instalaciones Eléctricas

Puesta a Tierra y Conductores de Protección

## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	4
1.1.	Definiciones .....	4
1.2.	Esquema de la puesta a tierra y conductores de protección y conductores de conexión equipotencial .....	5
2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA PUESTA A TIERRA .....	7
2.1.	Electrodos de tierra .....	7
2.2.	Conductores de tierra .....	8
2.3.	Borne principal de tierra .....	8
3.	CONDUCTORES DE PROTECCIÓN (PE) .....	8
3.1.	Generalidades .....	8
3.2.	Secciones mínimas del conductor PE .....	9
4.	OBJETIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA .....	11
	Ejemplo: .....	12
5.	TENSIÓN DE TOQUE Y TENSIÓN DE PASO .....	13
5.1.1.	Tensión de toque .....	13
5.1.2.	Tensión de paso .....	14
6.	RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA.....	15
6.1.	Diferentes configuraciones .....	15
6.2.	Cálculo de la resistencia de una puesta a tierra .....	15
6.2.1.	Jabalina vertical.....	16
6.2.2.	Conductor horizontal dispuesto en circunferencia .....	26
6.2.3.	Conductor horizontal dispuesto linealmente .....	26
6.2.4.	Conductores horizontales en otras disposiciones .....	27
6.3.	Medida de la resistencia de una puesta a tierra .....	29
7.	RESISTIVIDAD DEL SUELO .....	31
7.1.	Definición.....	31
7.2.	Factores que influyen en el valor de la resistividad del suelo.....	31
7.2.1.	Humedad .....	31
7.2.2.	Temperatura.....	32
7.3.	Medición de la resistividad del suelo .....	32
7.3.1.	Potencial generado por una fuente de corriente inmersa en un suelo infinito y homogéneo .....	33

7.3.2.	Potencial generado por una fuente de corriente situada bajo la superficie de un suelo homogéneo .....	34
7.3.3.	Configuración de Wenner .....	36
7.4.	Estratificación del suelo .....	38
7.5.	Cálculo de la resistencia de puesta a tierra para suelos no homogéneos.....	39
7.5.1.	Jabalina vertical.....	40
7.5.2.	Otras configuraciones.....	40

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Definiciones

- **Puesta a tierra (PaT):** 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.

## 1.2. 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)

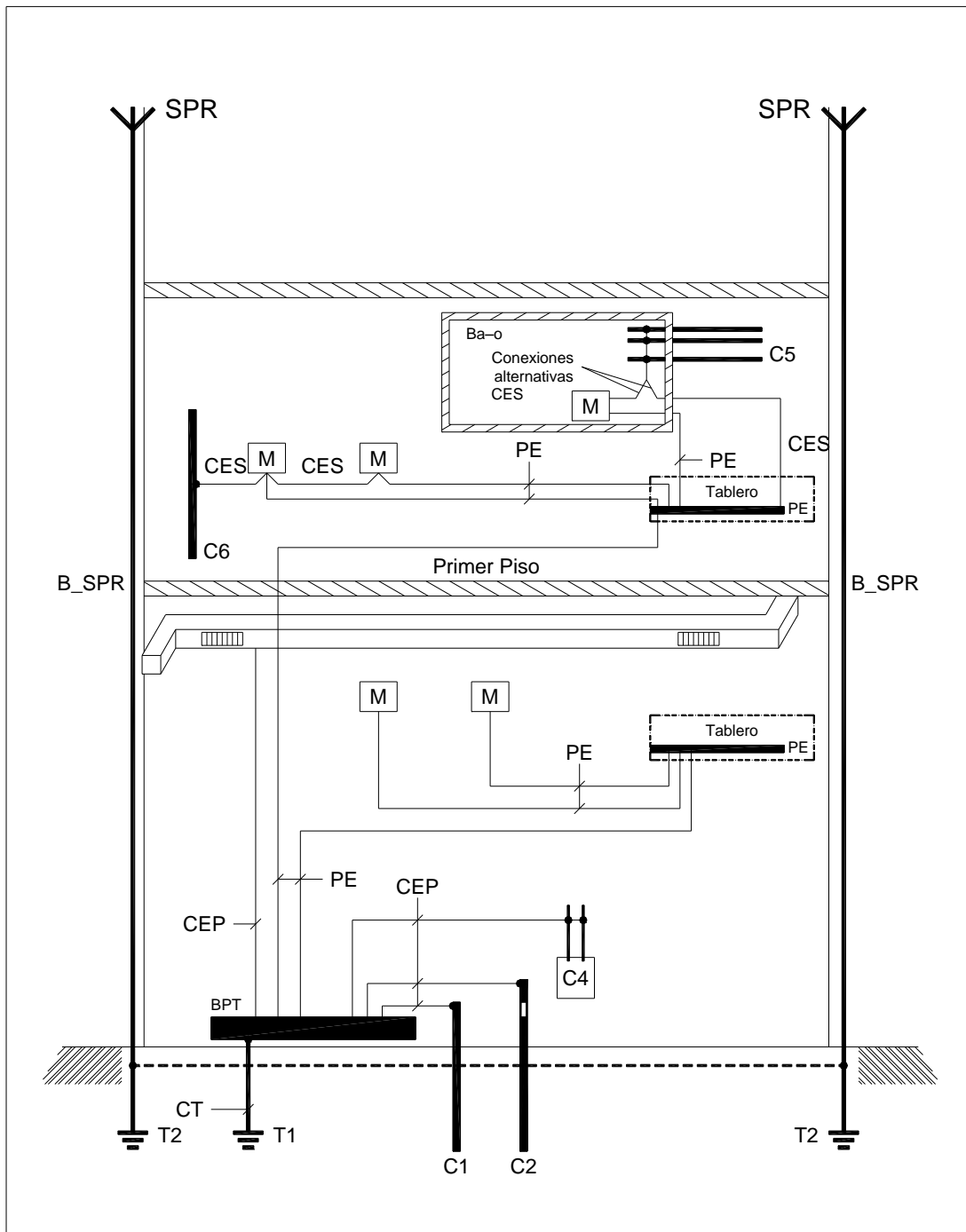


Figura 1: Ilustración de la puesta a tierra, conductores de protección y conductores de conexión equipotencial.

## 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	Espesor
Placa de cobre			0.5 m <sup>2</sup>	2mm
Barra de cobre	14mm	2m		
Conductor desnudo multifilar	35 mm <sup>2</sup>			
Cinta o pletina de cobre	35 mm <sup>2</sup>			2mm
Cable de acero galvanizado	95 mm <sup>2</sup> - cada alambre 2.5 mm <sup>2</sup>			

Tabla 1: Dimensiones mínimas de electrodos de tierra.

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 mm<sup>2</sup> 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 más 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)

## 3.1. Generalidades

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, la expresión conexión a tierra refiere 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.

### 3.2. 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 mm<sup>2</sup>.
- Para conductores sin protección mecánica: 4 mm<sup>2</sup>.

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 <sup>2</sup> )	Sección mínima de los conductores de protección S <sub>PE</sub> (mm <sup>2</sup> )
	Si el conductor de protección es del mismo material que el conductor de fase
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

Tabla 2: Relación entre las secciones de los conductores de protección y los conductores de fase.

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:**

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

Dónde:

- S es la sección del conductor en mm<sup>2</sup>.
- 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.

Aislamiento del conductor	Temperatura (°C)		Material del conductor
			Cobre
	Inicial	Final	Valores de k
PVC 70 °C (S ≤ 300 mm <sup>2</sup> )	30	160	143
PVC 70 °C (S > 300 mm <sup>2</sup> )	30	140	133
EPR o XLPE 90 °C	30	250	176

**Tabla 3: 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 ≤ 300 mm <sup>2</sup> )	70	160	115
PVC 70 °C (S > 300 mm <sup>2</sup> )	70	140	103
EPR o XLPE 90 °C	90	250	143

**Tabla 4: Valores de k para los conductores de protección que forman parte de un cable multipolar o agrupados con otros cables o conductores aislados.**

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, puede decirse 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:

- **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:

Sea una instalación alimentada en 400V de la red de distribución de BT, en la que se produce una falla de aislamiento en un motor trifásico entre una fase y masa. Se distinguen dos casos:

#### Caso A: NO ESTÁ 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: ESTÁ 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:

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

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

Dónde:

- $R_T$  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	

Tabla 5: Ejemplo: tensión y corriente de choque en función de  $R_T$ .

Donde se observa 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 $\Omega$ .

## 5. 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.

### 5.1.1. Tensión de toque

La 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.

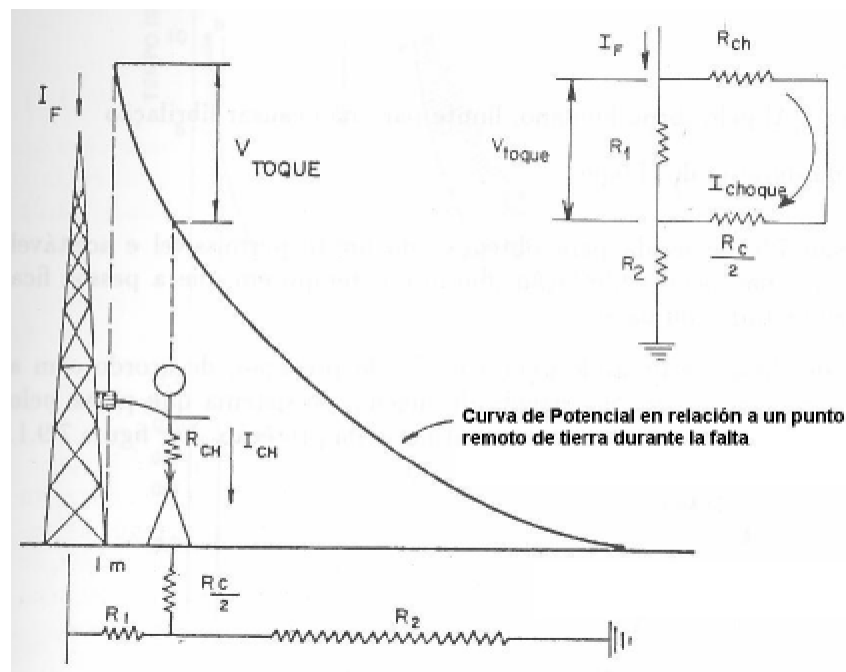


Figura 2: Tensión de toque.

Considerando el circuito equivalente de la Figura 2, se puede calcular:

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

Dónde:

- $R_{ch}$  es la resistencia del cuerpo humano = 1000  $\Omega$
- $R_c$  es la resistencia de contacto  $\cong 3 \rho_s$
- $\rho_s$  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:

$$I_{choque} = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Dónde  $t$  es el tiempo de permanencia del defecto (s) e  $I_{ch}$  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:

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

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

$$V_{m\acute{a}ximo\ del\ sistema\ de\ PaT} = (R_1 + R_2) \times I_F = R_T \times I_F$$

Y por lo tanto es razonable imponer que:

$$V_{m\acute{a}ximo\ del\ sistema\ de\ PaT} < V_{toque\ m\acute{a}xima}$$

### 5.1.2. 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.

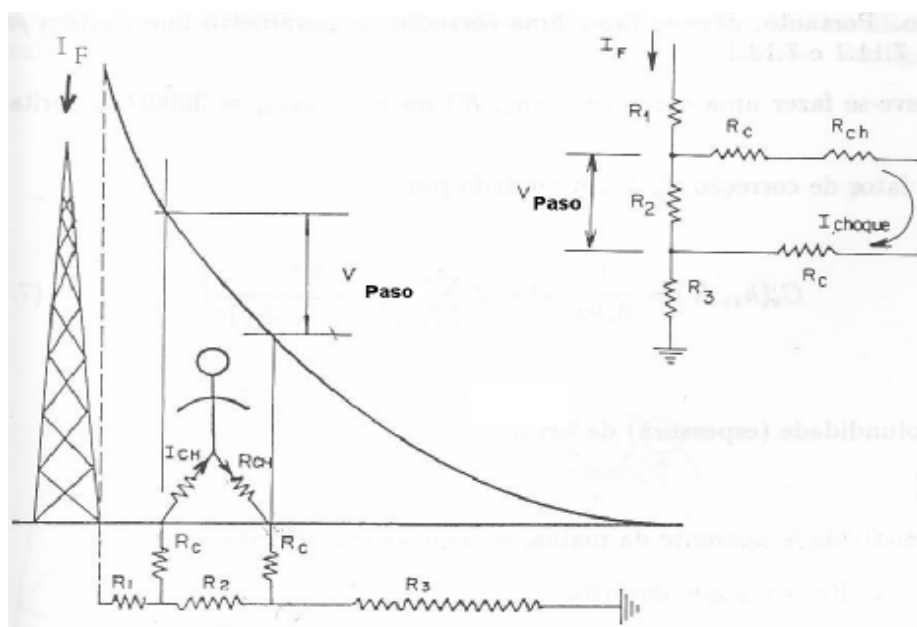


Figura 3: Tensión de paso.

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

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 paso máxima permitida será:

$$V_{paso} = (1000 + 6 \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

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

$$V_{m\acute{a}ximo\ del\ sistema\ de\ PaT} = (R_1 + R_2 + R_3) \times I_F = R_T \times I_F$$

Y por lo tanto es razonable imponer que:

$$V_{m\acute{a}ximo\ del\ sistema\ de\ PaT} < V_{paso\ m\acute{a}ximo}$$

## 6. RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA

### 6.1. Diferentes configuraciones

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

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

### 6.2. 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:

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

Donde:

- $\rho$ : es la resistividad del suelo
- $f(g)$ : es una expresión que tiene en cuenta la geometría y dimensión de la PaT.

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

Naturaleza del suelo	Resistividad ( $\Omega\text{m}$ ) <sup>1</sup>
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

Tabla 6: Resistividad de suelos típicos.

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

### 6.2.1. Jabalina vertical

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \times L_n \left( \frac{4L}{d} \right)$$

Dónde:

- $\rho$  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 se puede observar que dicha resistencia disminuye si:

- Aumenta el largo de la jabalina y/o
- Aumenta el diámetro de la jabalina y/o
- Baja la resistividad del suelo y/o
- Se instalan jabalinas en paralelo

Se analizará a continuación la influencia de cada uno de estos elementos.

<sup>1</sup> Son considerados “buenos conductores” los suelos con resistividad entre 50 y 100  $\Omega\cdot\text{m}$ .



### Longitud de la jabalina

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  $\Omega \cdot m$ :

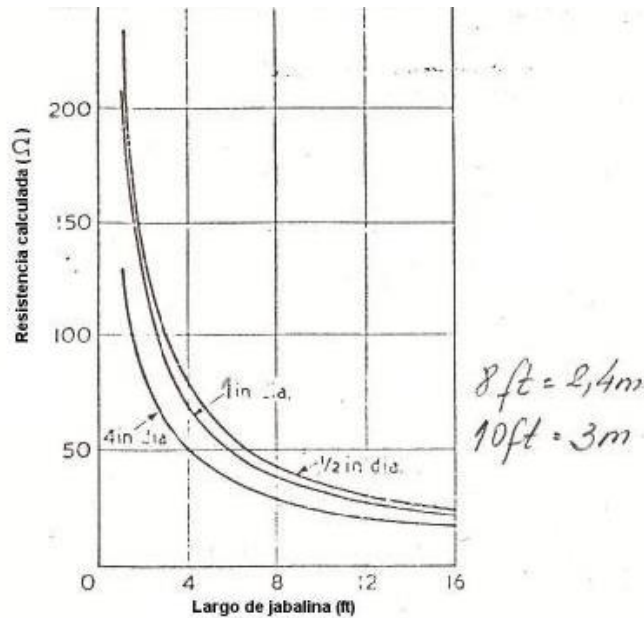


Figura 4: Resistencia de PaT en función de la longitud de la jabalina.

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.

### Diámetro de la jabalina

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.

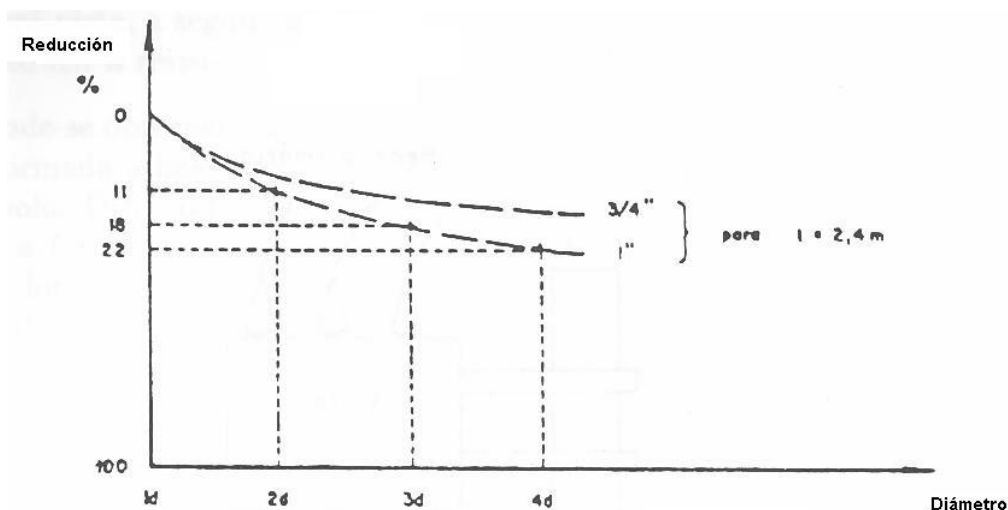


Figura 5: Resistencia de PaT en función del diámetro de la jabalina.

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.

### *Reducción de resistividad del suelo*

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

- Buena hidroscofia
- No ser corrosivo
- Baja resistividad eléctrica
- Químicamente estable
- No ser tóxico
- No causar 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.

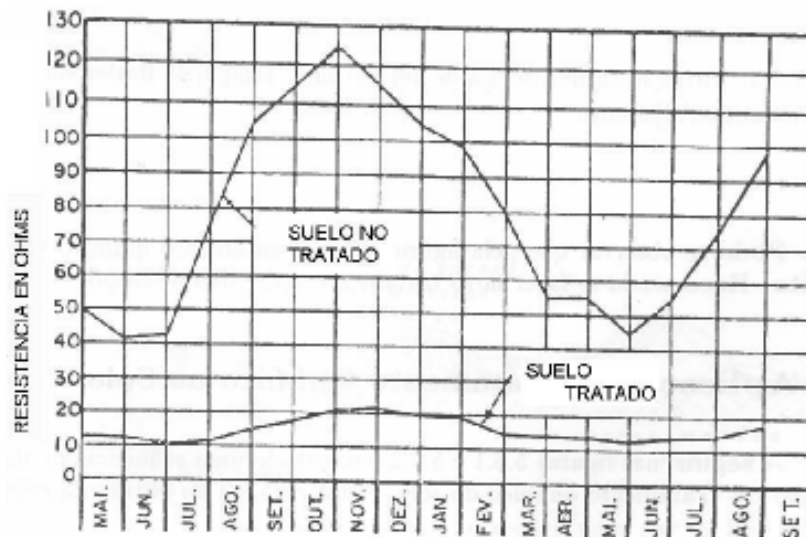


Figura 7: Resistencia de PaT en suelo tratado, variación estacional.

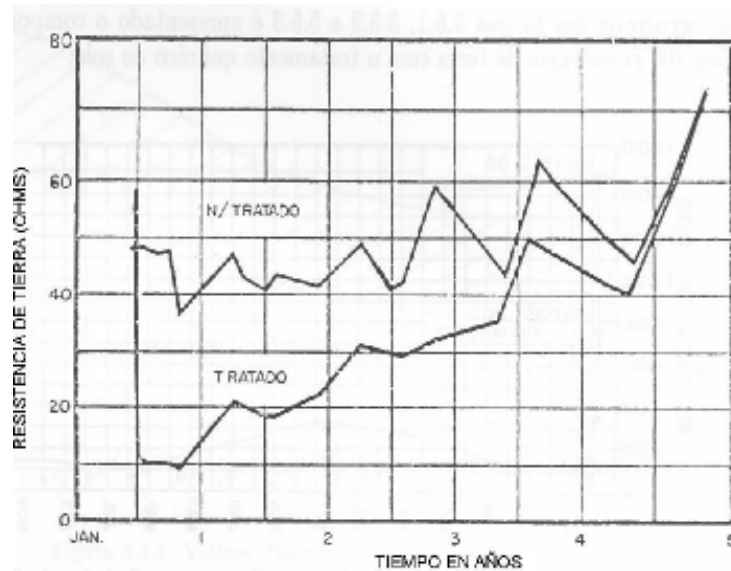


Figura 8: Resistencia de PaT, variación a lo largo de los años en suelos tratados y no tratados adyacentes.

### *Instalación de jabalinas en paralelo*

Esta práctica 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.

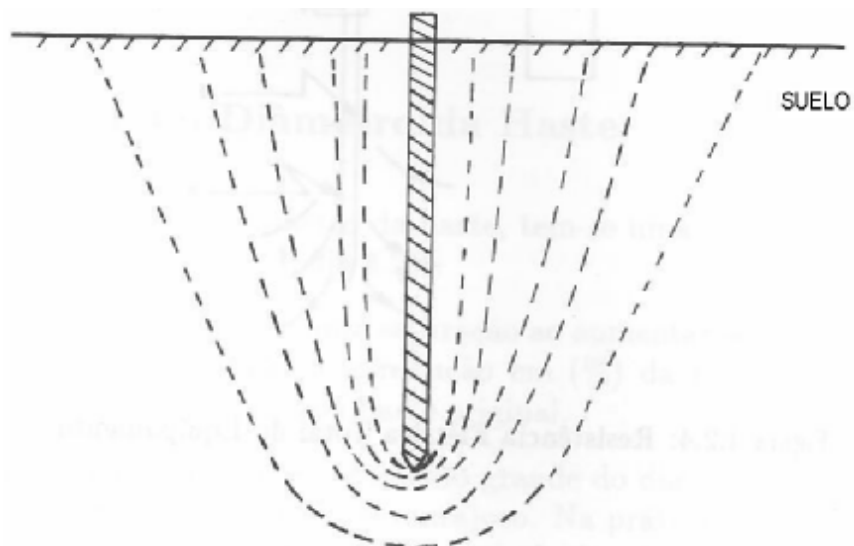


Figura 9: Superficies equipotenciales de una jabalina.

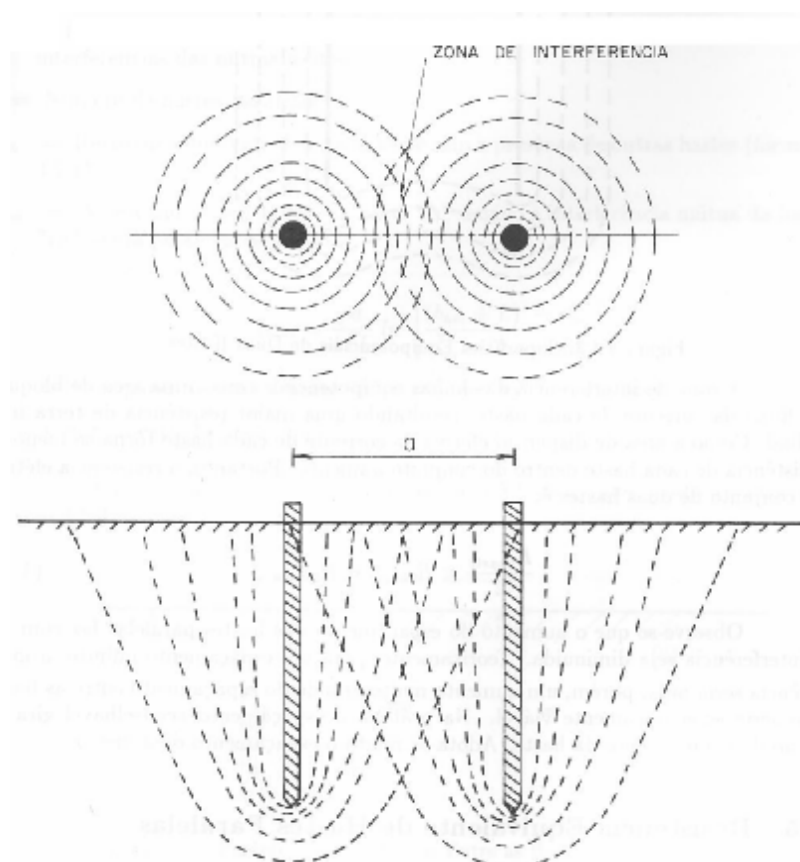


Figura 10: Zona de interferencia.

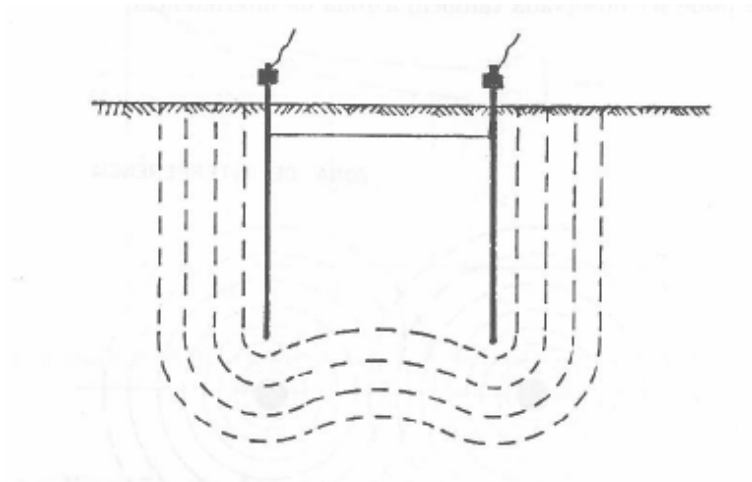


Figura 11: Superficies equipotenciales, dos jabalinas en paralelo.

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

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

Dónde:

- $R_{1j}$  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 jabalinas 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.

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

Tabla 7: Factor  $K$  para jabalinas de 2,4m, 1/2", alineadas.

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

Tabla 8: Factor  $K$  para jabalinas de 2m, 1", alineadas.

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

Tabla 9: Factor K para jabalinas de 3m, 1", alineadas.

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.

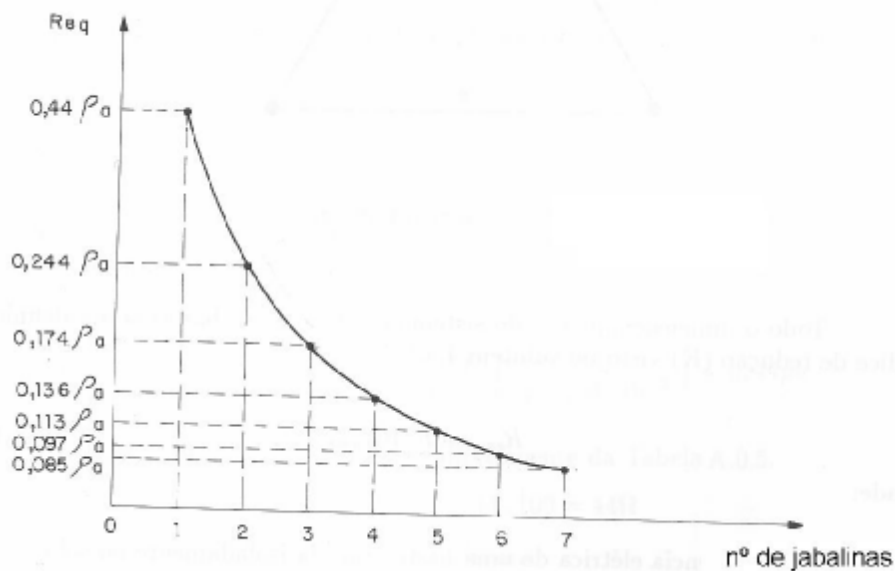


Figura 12: Reducción de resistencia para jabalinas alineadas en función del número de jabalinas.

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**

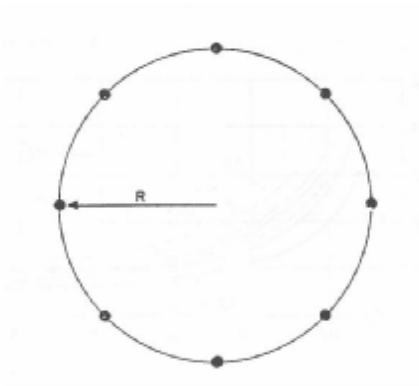


Figura 13: Disposición de jabalinas en circunferencia.

Las curvas que se muestran a continuación corresponden a la distribución de las jabalinas en una circunferencia de 9m de radio, para jabalinas de distintos diámetros (1" y ½ ") y longitudes (1,2m; 1,8; 2,4m y 3m).

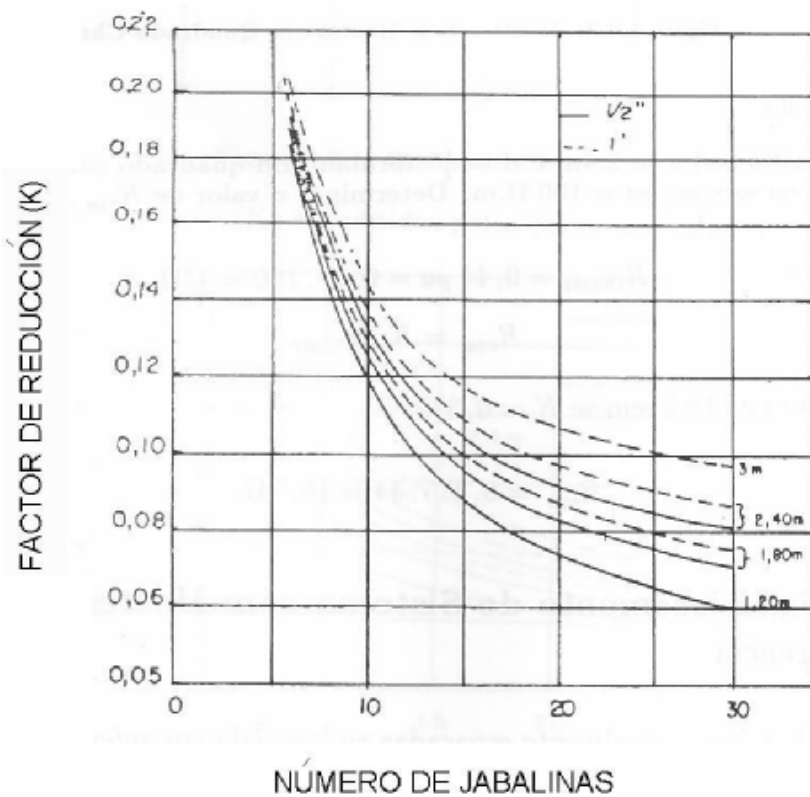


Figura 14: Factor K para jabalinas en circunferencia.



- **Jabalinas dispuestas en triángulo**

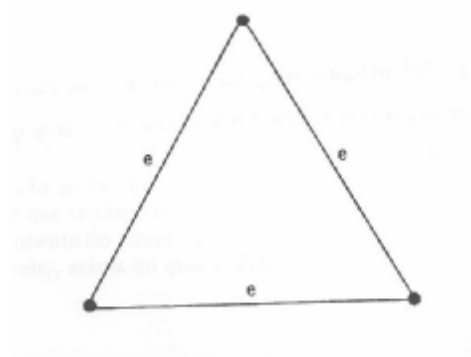


Figura 15: Disposición triangular de jabalinas.

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

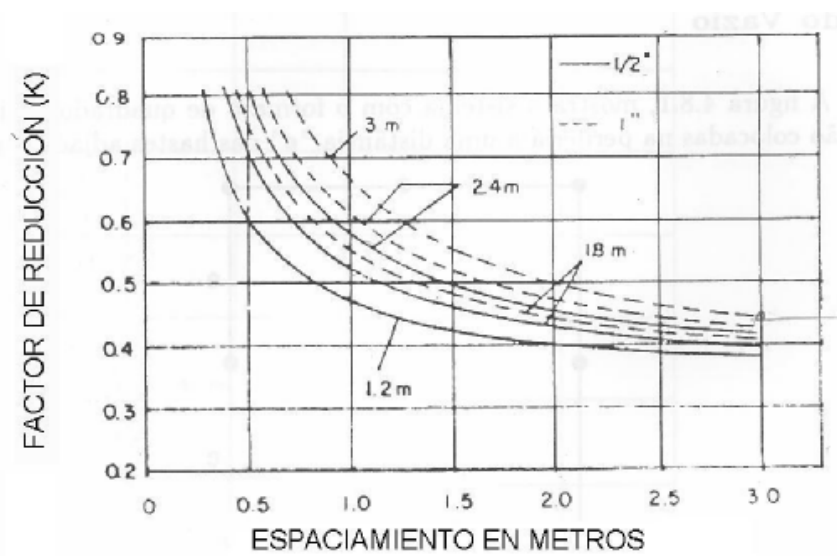


Figura 16: Factor  $K$  para jabalinas en triángulo.

### *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 más profundas de menor resistividad
- La presencia estable de agua a lo largo del año en las capas más profundas.

### 6.2.2. Conductor horizontal dispuesto en circunferencia

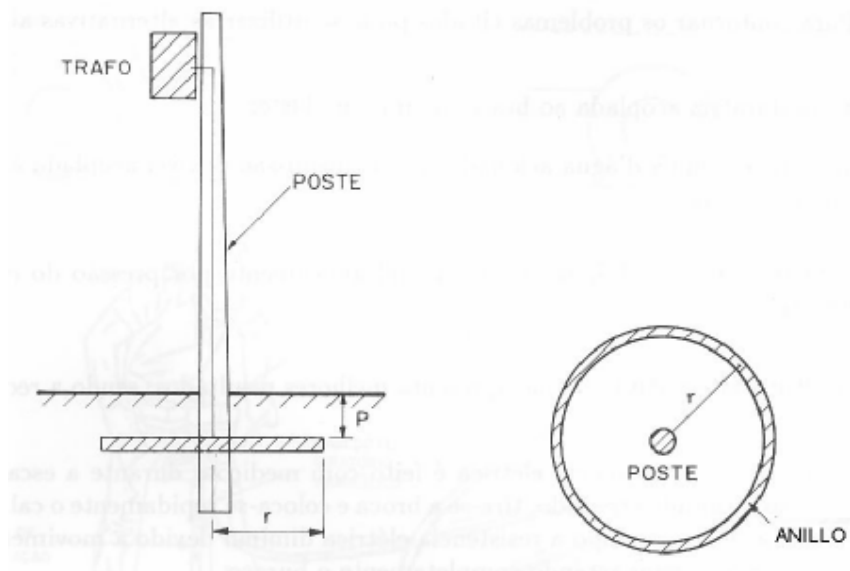


Figura 17: Conductor horizontal de PaT en circunferencia.

$$R_T = \frac{\rho}{\pi^2 r} \times L_n \left( \frac{4r^2}{d \times p} \right)$$

Donde:

- $p$  es la profundidad a la que está enterrado el conductor (m)
- $r$  es el radio de la circunferencia (m)
- $d$  es el diámetro del círculo equivalente a la sección transversal del conductor (m).

### 6.2.3. Conductor horizontal dispuesto linealmente

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ L_n \left( \frac{2L^2}{r \times p} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left( \frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

Donde:

- $p$  es la profundidad a la que está 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  $p/L$  pueden despreciarse.

### 6.2.4. Conductores horizontales en otras disposiciones

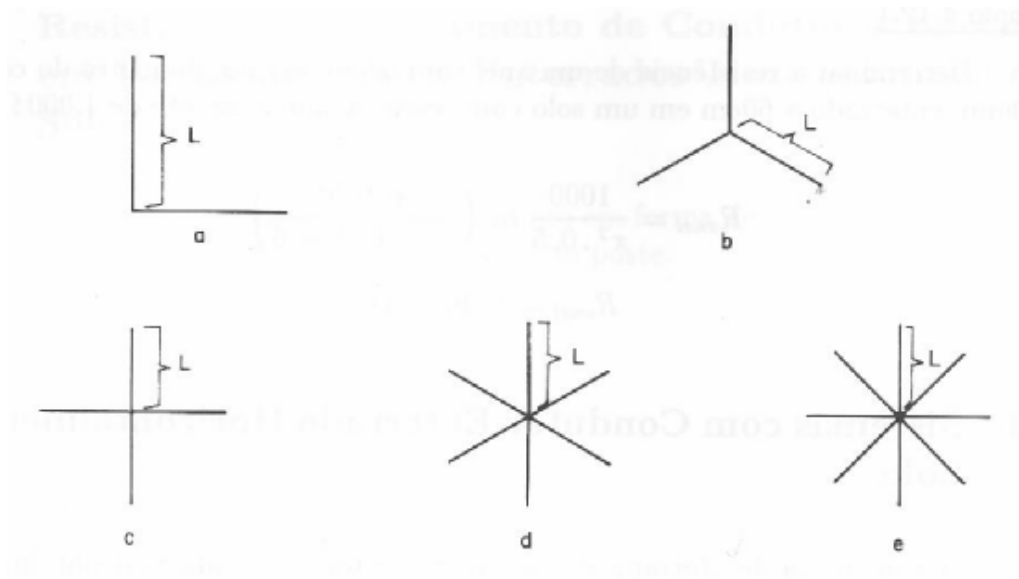


Figura 18: Conductores de PaT en disposiciones horizontales varias.

#### a- Dos conductores horizontales dispuestos en ángulo recto

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

Donde:

- $p$  es la profundidad a la que está 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

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

#### c- Cuatro conductores horizontales dispuestos en estrella

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

**d- Seis conductores horizontales dispuestos en estrella**

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

**e- Ocho conductores horizontales dispuestos en estrella**

$$R_T = 8 \frac{\rho}{6\pi L} \left[ L_n \left( \frac{L^2}{2 \times r \times p} \right) + 10,98 - 22,04 \frac{p}{L} + 52,16 \left( \frac{p}{L} \right)^2 - 299,52 \left( \frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

### 6.3. 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.

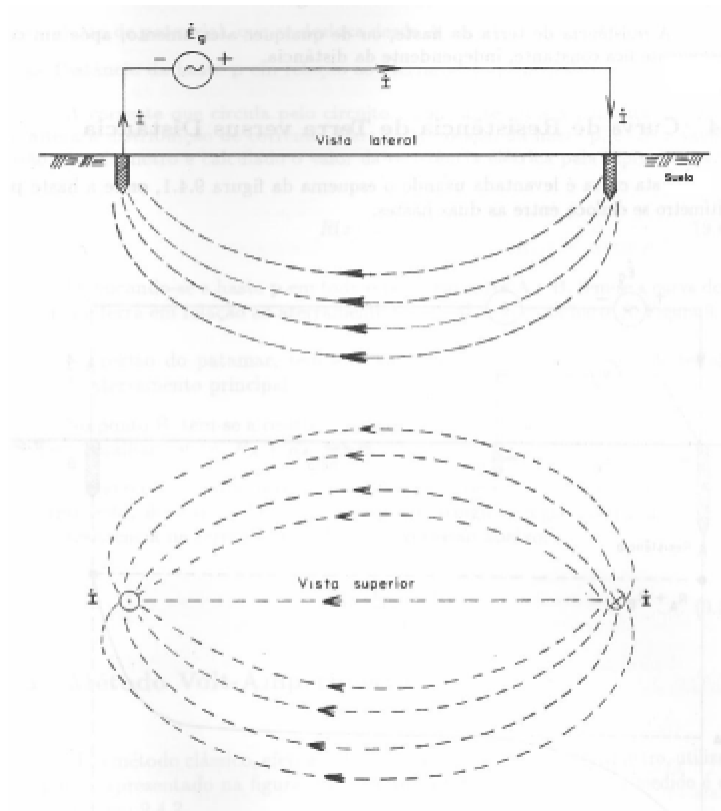


Figura 19: Distribución de corriente por tierra entre dos picas.

Como se observa en la figura, la densidad de corriente es máxima junto a la jabalina, y disminuye a medida que aumenta la distancia a la misma, y se puede expresar la

resistencia de la puesta a tierra como  $R_T = \rho \sum_i \frac{\Delta x_i}{S_i}$ .

Donde  $S_i$  es una superficie equipotencial y  $\Delta x_i$  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:

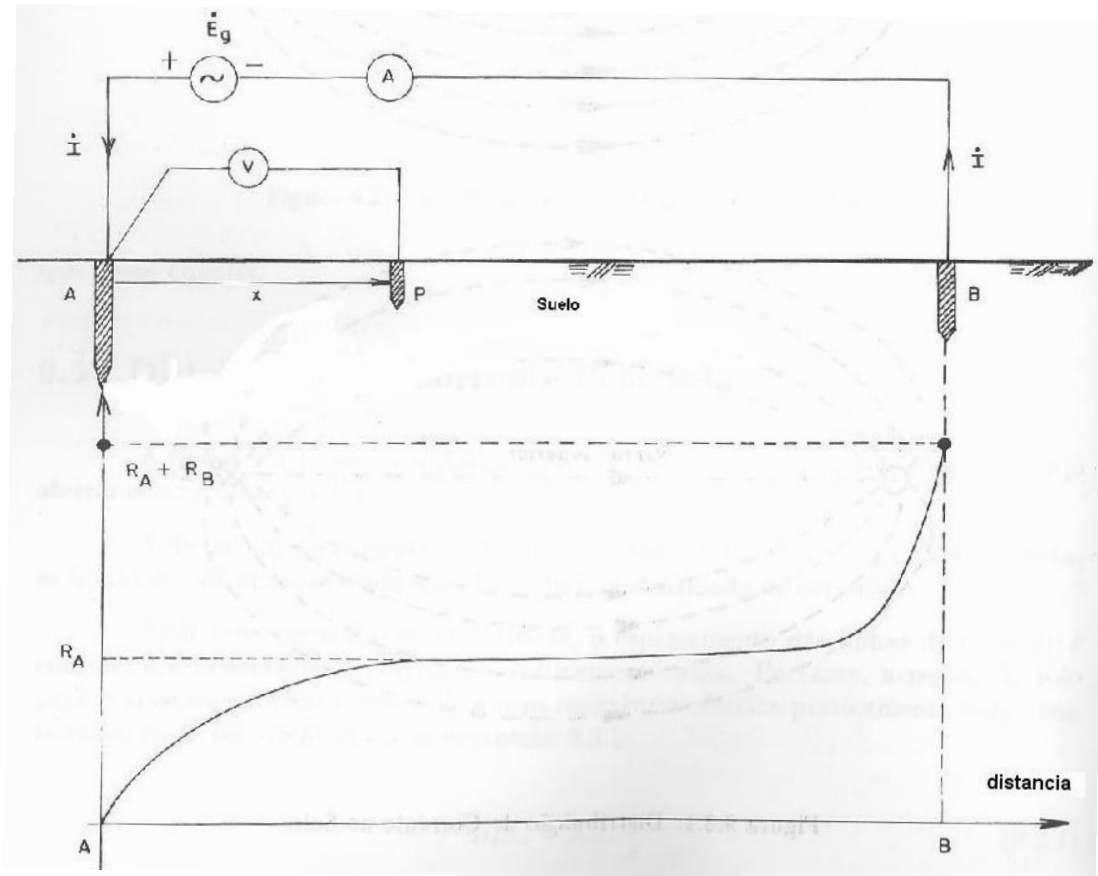


Figura 20: Sistema de medida de PaT.

Donde:

- A es la puesta a tierra cuya resistencia se quiere medir
- B es la pica auxiliar de corriente
- 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.

## 7. RESISTIVIDAD DEL SUELO

### 7.1. 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  $\Omega\text{m}$ .

### 7.2. Factores que influyen en el valor de la resistividad del suelo

- Tipo de suelo – Ver punto 6.2.1.
- 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

#### 7.2.1. 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.

INDICE DE HUMEDAD (% por peso)	RESISTIVIDAD ( $\Omega\text{.m}$ ) 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

Tabla 10: Variación de la resistividad de un suelo arenoso.

### 7.2.2. Temperatura

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

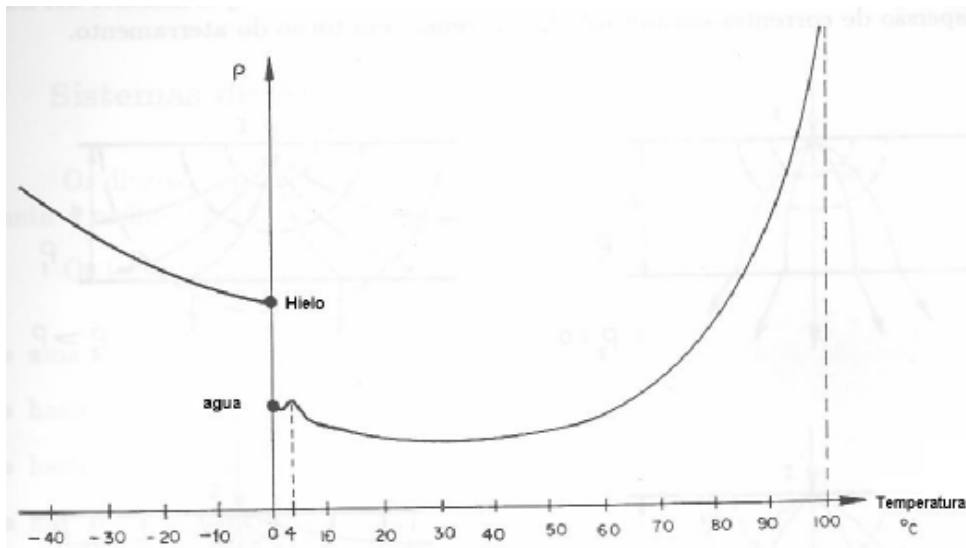


Figura 21: Variación de la resistividad con la temperatura del suelo.

### 7.3. 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  $\rho_i$  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 22, en función de la corriente que circula entre las picas de corriente (C1 y C2) y la tensión medida entre las picas de tensión (P1 y P2), y el cálculo de la resistividad del suelo a partir de la resistencia medida ( $R_M$ ):

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



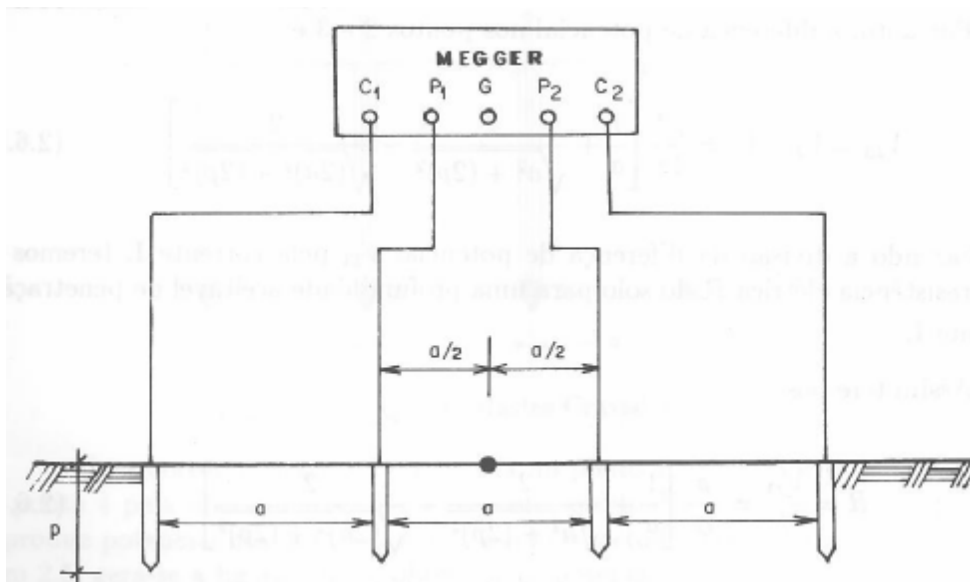


Figura 22: Método de Wenner.

Para llegar a la expresión que relaciona la resistencia medida  $R_M$ , con la resistividad del suelo, se considera 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.

### 7.3.1. 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. Puede entonces considerarse que la corriente diverge radialmente.

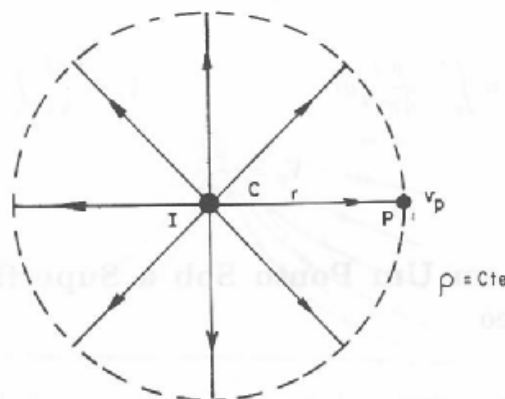


Figura 23: Distribución de corriente en suelo homogéneo infinito.

Para calcular el potencial en un punto P, se parte de la expresión del campo eléctrico:

$$E_p = \rho \times J_p$$

Donde:

- $E_p$  es el campo eléctrico en el punto P
- $J_p$  es la densidad de corriente en el punto P
- $\rho$  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:

$$V_p = \int_r^{\infty} E_p dr = \int_r^{\infty} \frac{\rho I}{4\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{4\pi r}$$

### 7.3.2. 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.

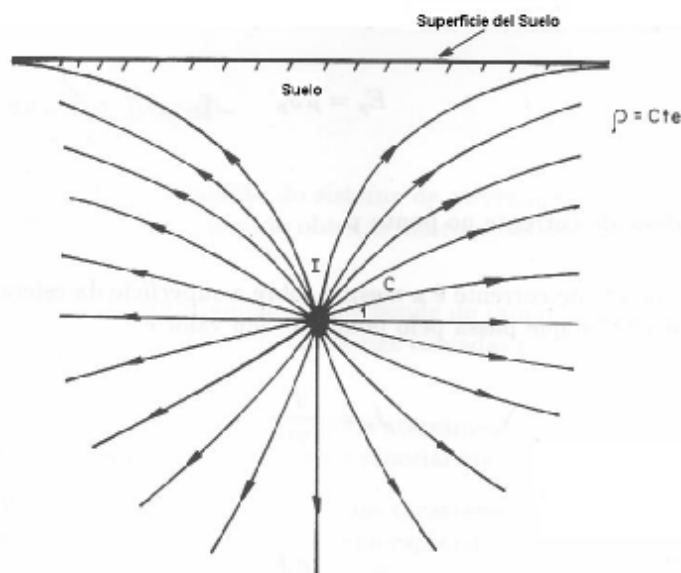


Figura 24: Distribución de corriente afectada por superficie del suelo.

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.

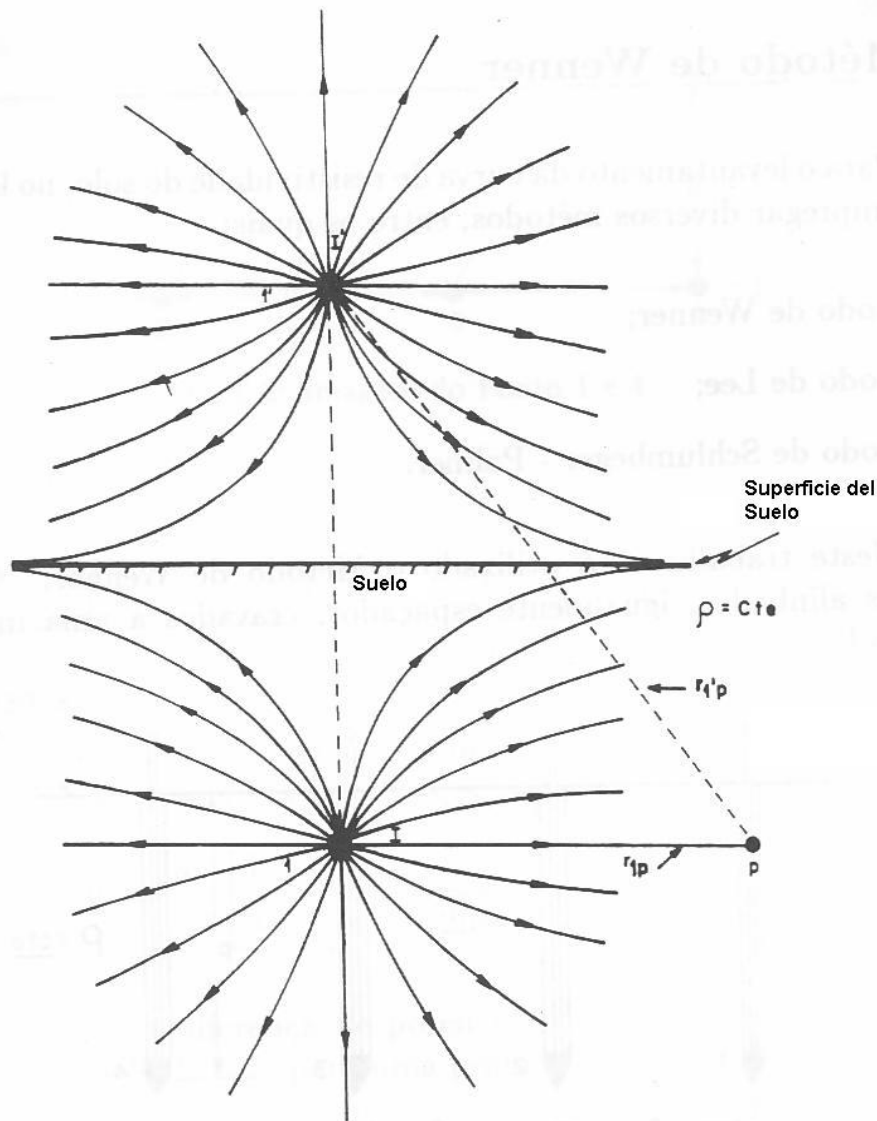


Figura 25: Análisis mediante método de las imágenes.

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

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

### 7.3.3. Configuración de Wenner

En la figura siguiente se muestra la configuración de Wenner:

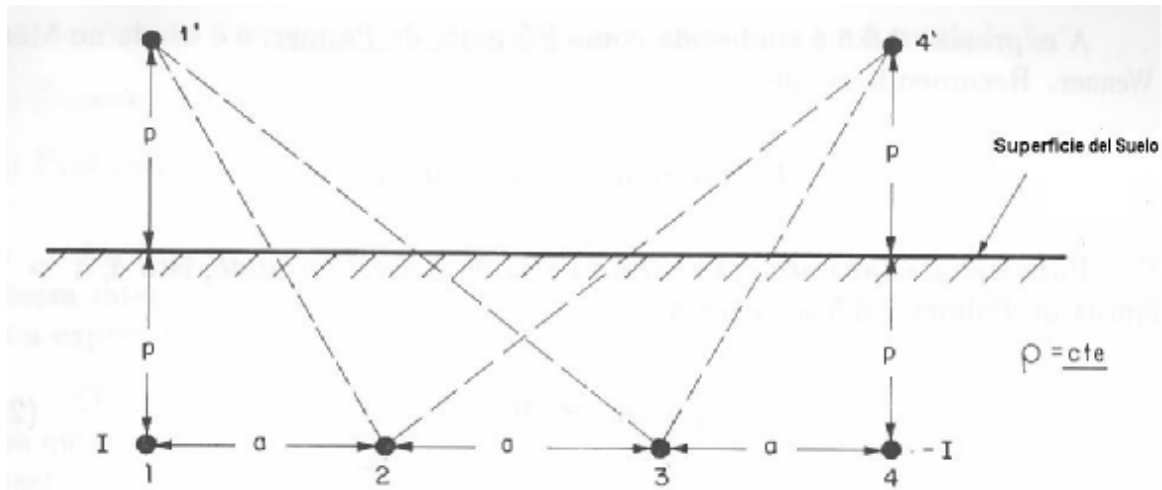


Figura 26: Configuración de Wenner.

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 se puede 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:

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

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

$$\rho = \frac{4\pi R_M a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}}$$

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

$$\rho = 2\pi a \times R_M$$

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:

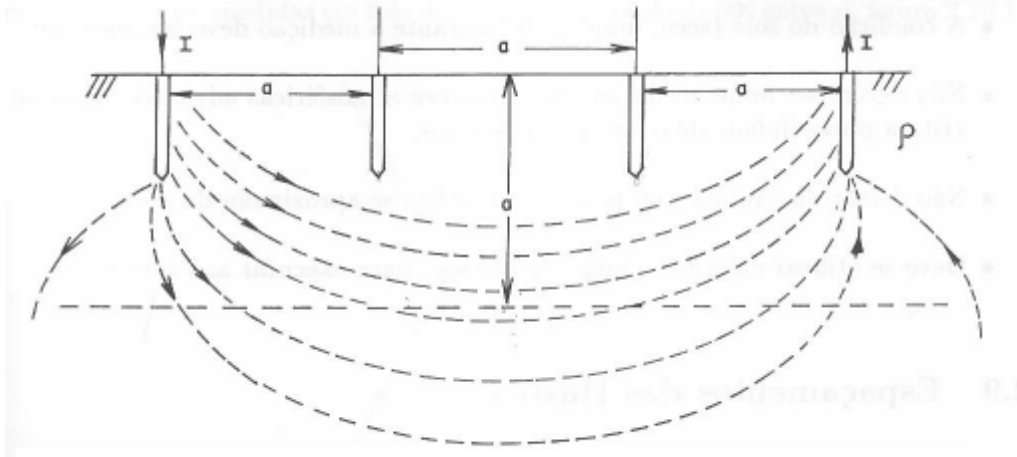


Figura 27: Distribución de corriente entre picas.

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

Y la expresión anterior queda:

$$\rho(a) = 2\pi a \times R_M$$

lo que permite relevar la curva  $\rho(a)$  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:  $p \approx 50\text{cm}$
- Diámetro de las picas:  $\phi = 10$  a  $15\text{mm}$

#### **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  $\rho(a)$  .

## 7.4. Estratificación del suelo

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

En base a la curva  $\rho(a)$  , 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  $\rho(a)$  el modelo del suelo en capas horizontales, como se representa en la figura siguiente.

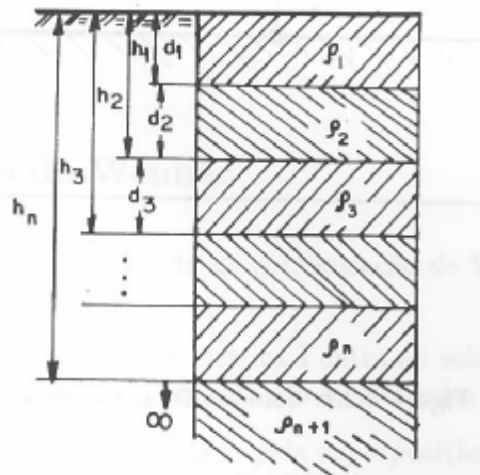


Figura 28: Modelado de suelo en varias capas de diferente resistividad.

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

$$d_1 = d_{eq} = \sum_1^n d_i, \quad d_2 = \infty$$

$$\rho_1 = \rho_{eq} = \frac{d_{eq}}{\sum_1^n \frac{d_i}{\rho_i}}, \quad \rho_2 = \rho_{n+1}$$

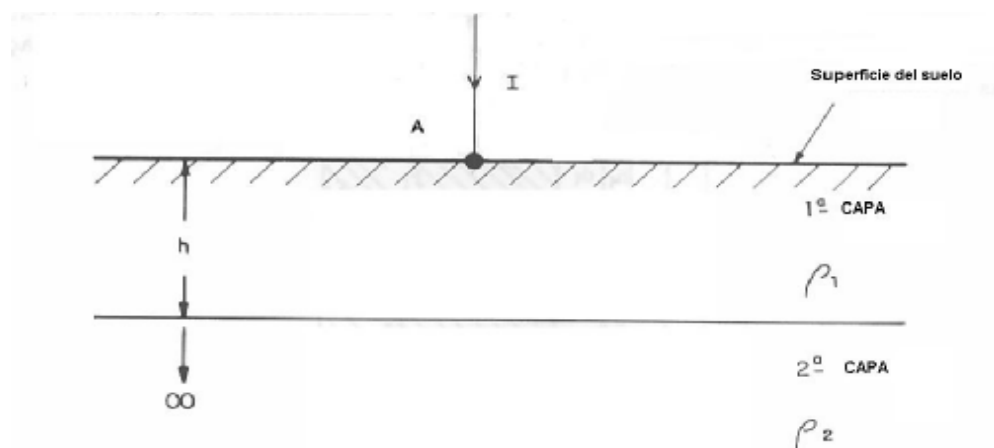


Figura 29: Modelo dos capas.

### 7.5. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra para suelos no homogéneos

Las fórmulas de cálculo dadas en el punto 6.2 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 ( $\rho_a$ ), 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.

Puede escribirse:

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

Donde:

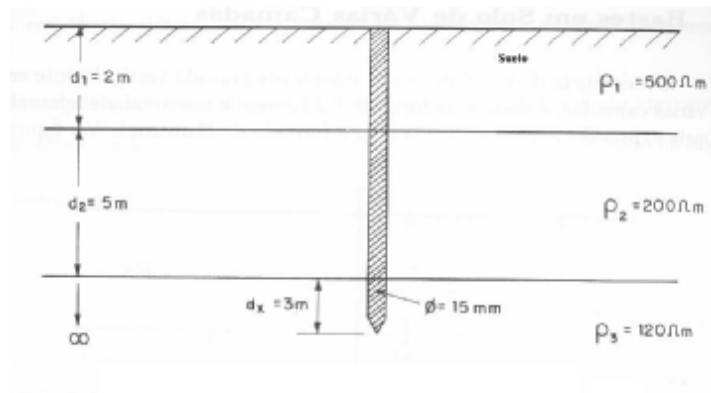
- $\rho_a$  es la resistividad aparente
- $f(g)$  una expresión que tiene en cuenta la geometría y dimensión de la puesta a tierra

Entonces la resistividad del suelo homogéneo equivalente debe cumplir:

$$R_T = \rho_h \times f(g) \text{ y en consecuencia } \rho_h = \rho_a$$

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

### 7.5.1. Jabalina vertical



$$\rho_a = \frac{d_1 + d_2 + d_x}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_x}{\rho_3}}$$

Si el modelo fuera solo en dos capas:

$$\rho_a = \frac{d_1 + d_x}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_x}{\rho_2}}$$

### 7.5.2. Otras configuraciones

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



- Coeficiente de penetración ( $\alpha$ ): Indica el grado de penetración de las corrientes por el aterramiento en el suelo. Se define como  $\alpha = \frac{r}{d_1}$ 
  - 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 divergencia ( $\beta$ ):  $\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1}$

En un suelo de dos capas se define como la relación entre la resistividad de la última capa y la resistividad de la primera capa equivalente.

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

$$\rho_a = N \times \rho_1$$

Donde  $N = f(\alpha, \beta)$  es el valor que se obtiene de las Curvas de Endrenyi:

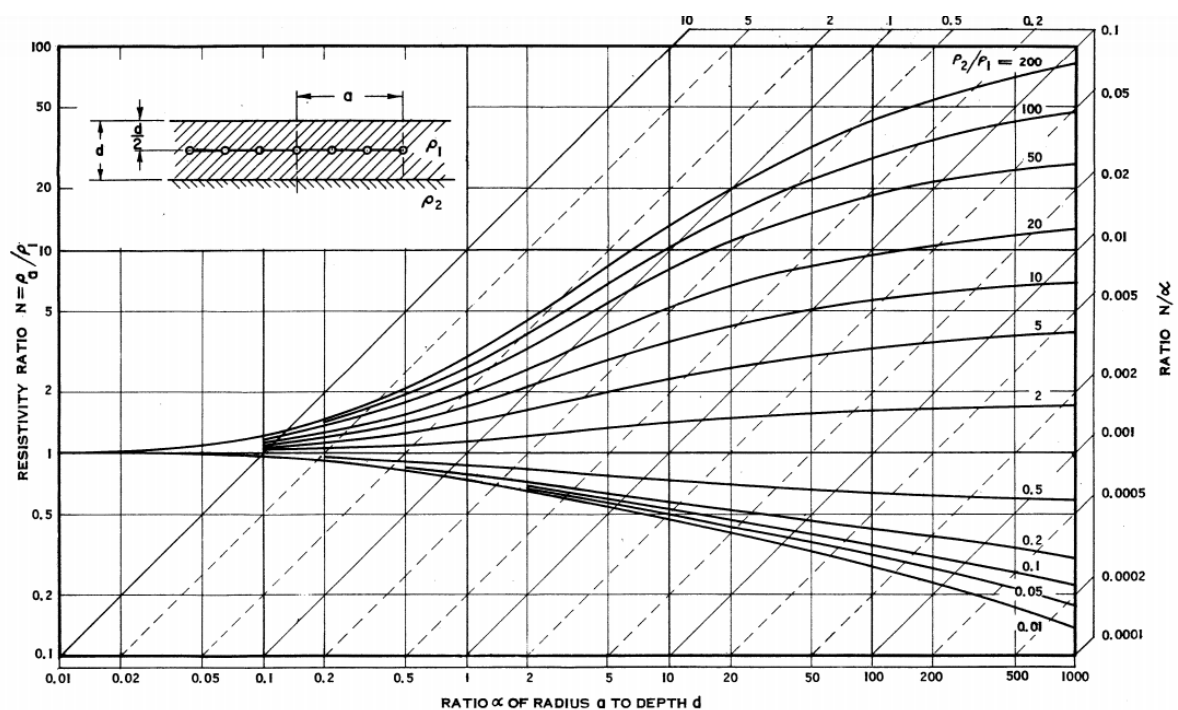


Figura 30: Curvas de Endrenyi.

