

CAPITULO 9

PUESTAS A TIERRA Y
CONDUCTORES DE
PROTECCION

OBJETIVO DE UNA
PUESTA A TIERRA

- 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 manera de mantener la seguridad de las personas y el equipamiento.
- Mantener un potencial de referencia en algún punto del sistema eléctrico o electrónico
- En general: la o las puestas a tierra de una instalación eléctrica deberá diseñarse y ejecutarse para satisfacer las prescripciones de seguridad, y los requerimientos funcionales de las instalaciones.

CONCEPTOS BASICOS

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

- **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.
- **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. También se denomina “tierra lejana”.
- **Tierra local:** Parte de la tierra en contacto eléctrico con una toma de tierra, y cuyo potencial eléctrico no es necesariamente igual a cero.
- **Resistencia de puesta a tierra:** Resistencia entre el borne principal de tierra y la tierra de referencia.

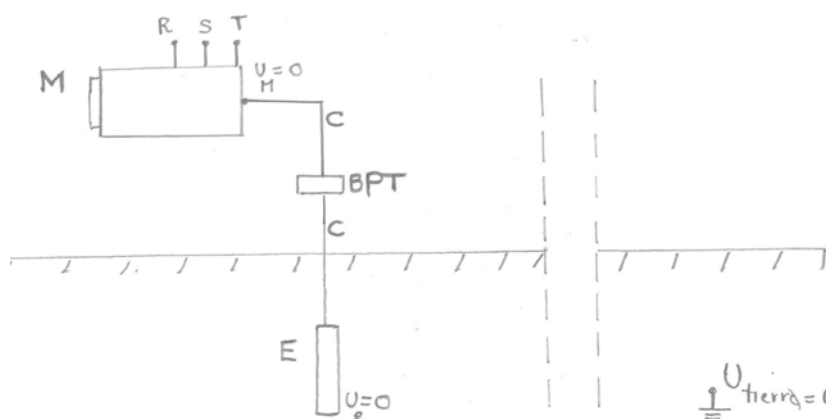
Gentileza CIME



Gentileza CIME



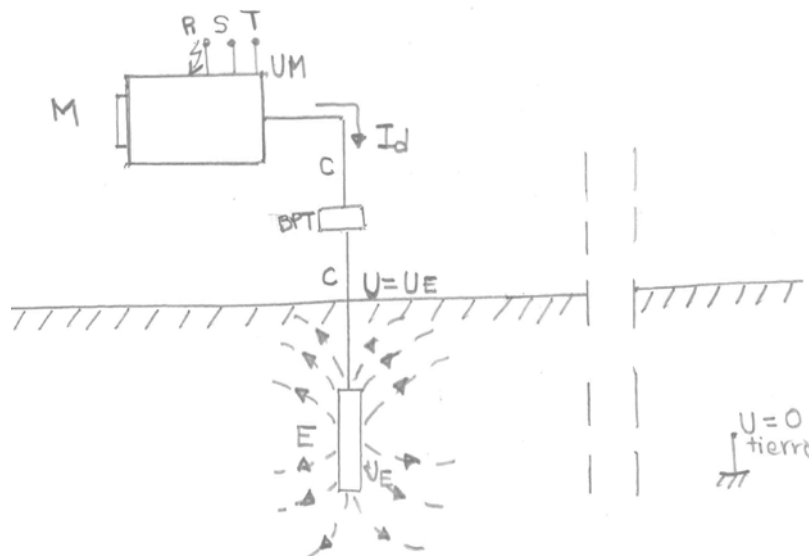
Ejemplo:

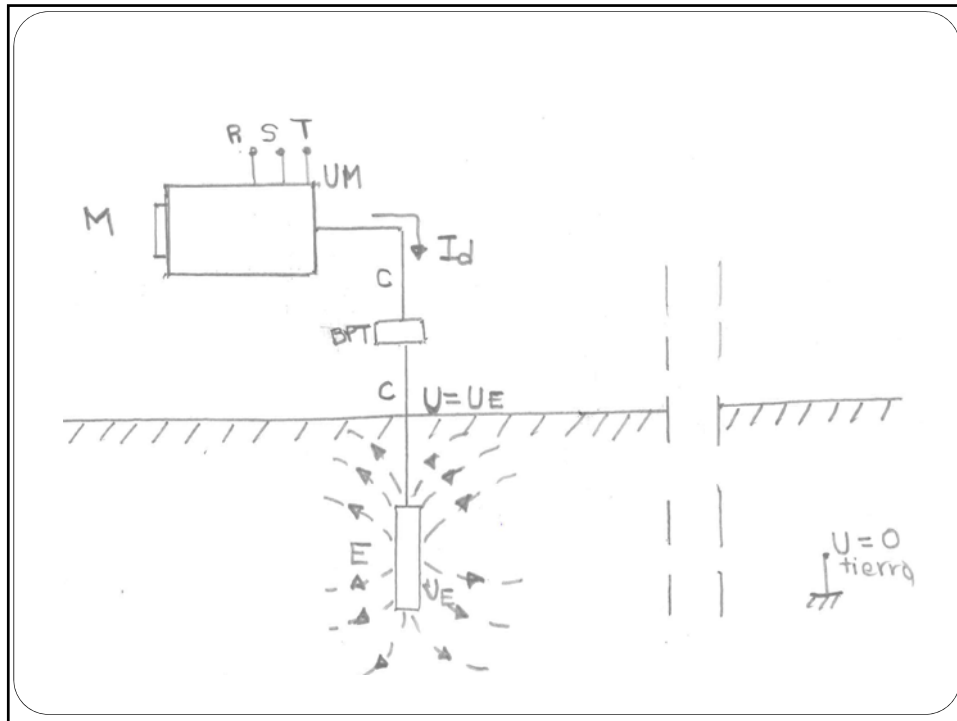


- **M**: Elemento de la instalación cuyo potencial inicialmente no está definido, y se quiere fijar al potencial de tierra.
- **E**: Electrodo metálico enterrado en el terreno.
- **BPT**: Borne principal de tierra.
- **C**: Conductor que conecta eléctricamente el elemento M con el electrodo E.

En condiciones normales, el potencial del terreno es uniforme. $U_E = U_M = U_{\text{tierra}} = 0$.

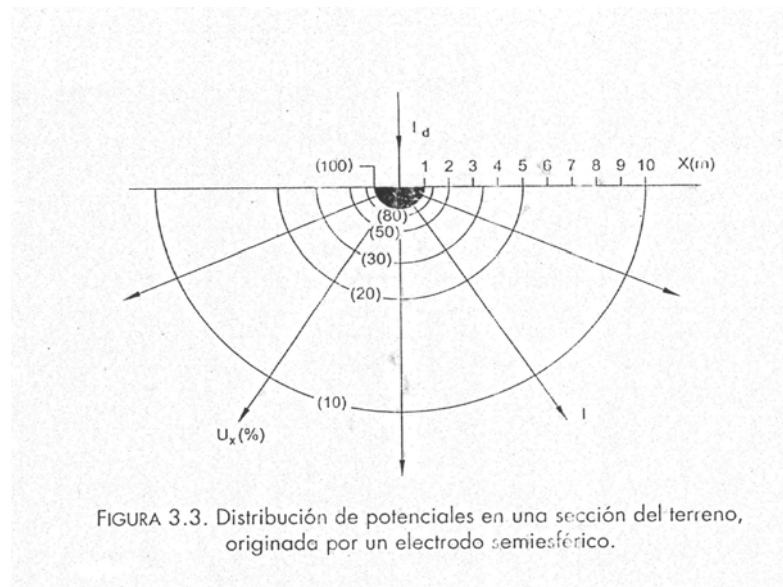
Debido a condiciones anormales de funcionamiento (fallo de aislación, descarga atmosférica), la instalación eléctrica impone a M un potencial U_M distinto de cero. Entonces circula una corriente de defecto I_d desde el electrodo hacia tierra. Entonces I_d se difunde por el terreno, alterando la distribución de potenciales, que deja de ser uniforme.





- El terreno en contacto con el electrodo adquiere un potencial U_E igual al del electrodo.
- El terreno suficientemente alejado del electrodo no es afectado por las corrientes de difusión, manteniéndose su potencial igual a cero.
- Veamos un modelo simplificado de la dispersión de la corriente y calculemos la distribución de potenciales en el terreno:

Electrodo semiesférico de radio r enterrado en un suelo homogéneo de resistividad $\rho(\Omega m)$ por el cual ingresa una corriente de defecto I .



- La simetría esférica que presenta este caso hace que la corriente I se propague radialmente por tierra en todo sentido, que las líneas de fuerza del campo eléctrico también sean radiales y que las superficies equipotenciales sean semiesféricas. A una distancia x del centro del electrodo en cualquier sentido, existe una densidad de corriente

$J(x) = I / (2\pi x^2) = I / S_x$, siendo $S(x)$ el área de una superficie semiesférica

El campo eléctrico en el exterior del electrodo vale:

$$E(x) = \rho J(x) = \rho I / (2\pi x^2)$$

E varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia

- Sea U_x la diferencia de potencial entre un punto a una distancia x del electrodo y la tierra de referencia.

$$\text{Si } E = \rho I / (2\pi x^2)$$

Entonces

- La diferencia de potencial entre dos puntos x_1 y x_2 :

$$U_{x1} - U_{x2} = - \int_{x_2}^{x_1} [\rho I / (2\pi x^2)] dx = \left[\frac{\rho I}{2\pi} \right] \cdot \left[\left(\frac{1}{x_2} \right) - \left(\frac{1}{x_1} \right) \right]$$

$$U_{x1} - U_{x2} = \left[\frac{\rho I}{2\pi} \right] \cdot \left[\left(\frac{1}{x_2} \right) - \left(\frac{1}{x_1} \right) \right]$$

Si x_2 es la tierra de referencia, y x_1 es la distancia respecto al eje del electrodo, valiendo para $x_1 \geq r$,

$$U_x = \rho I / (2\pi x)$$

- La resistencia de propagación de la puesta a tierra se define como la relación entre el valor constante de U_r y la intensidad de la corriente I , $R = U_r / I$

$$R = \rho / (2\pi r)$$

- Existen determinados parámetros que se utilizan para caracterizar una instalación de puesta a tierra. A partir de estos parámetros se pueden dimensionar los elementos de la instalación de puesta a tierra y decidir si su funcionamiento es correcto.

PARAMETROS QUE CARACTERIZAN A UNA INSTALACION DE PUESTA A TIERRA

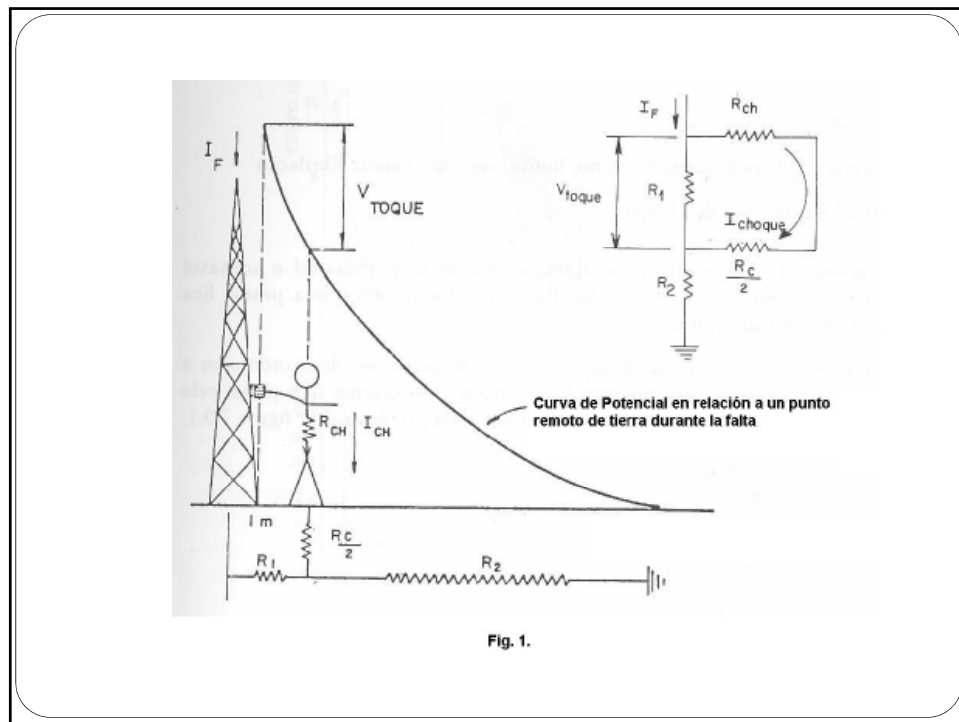
- Tensión a tierra (V_t): Es la diferencia de potencial que se establece entre un electrodo de puesta a tierra y un punto a potencial cero, cuando a través del electrodo se difunde una corriente de defecto I_d .
- Resistencia de puesta a tierra (R_t): Para un electrodo o sistema de electrodos dado, con una configuración y dimensiones concretas, enterrado en un terreno dado, la corriente de defecto a tierra es proporcional a la tensión V_t aplicada al electrodo. Esa constante es R_t .

$$R_t = V_t / I_d$$

- 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.

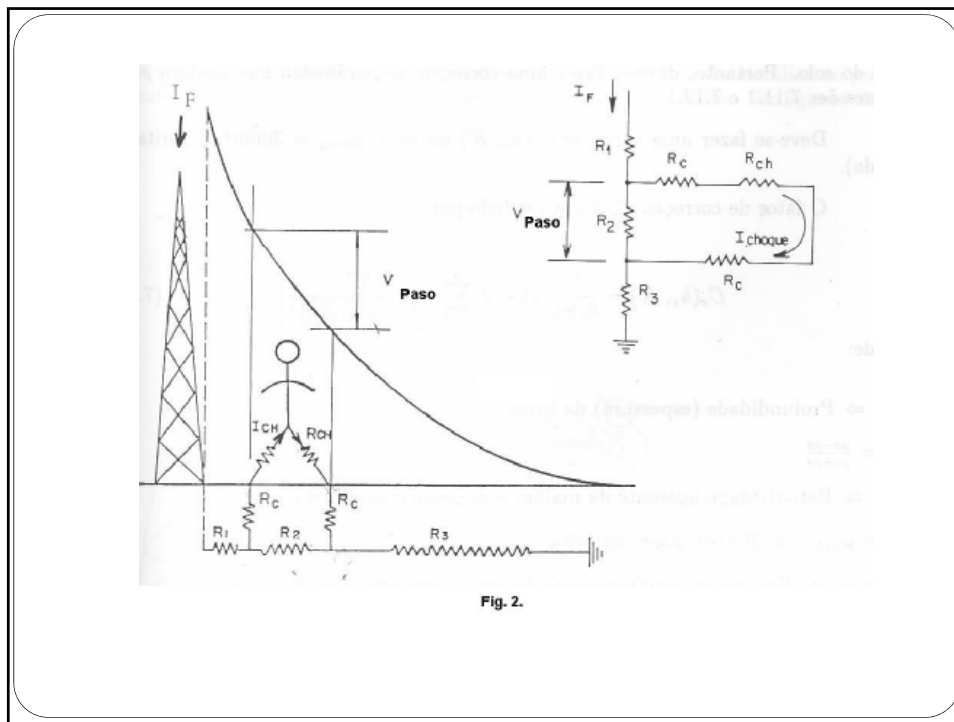
- **Tensión de toque:**

- 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

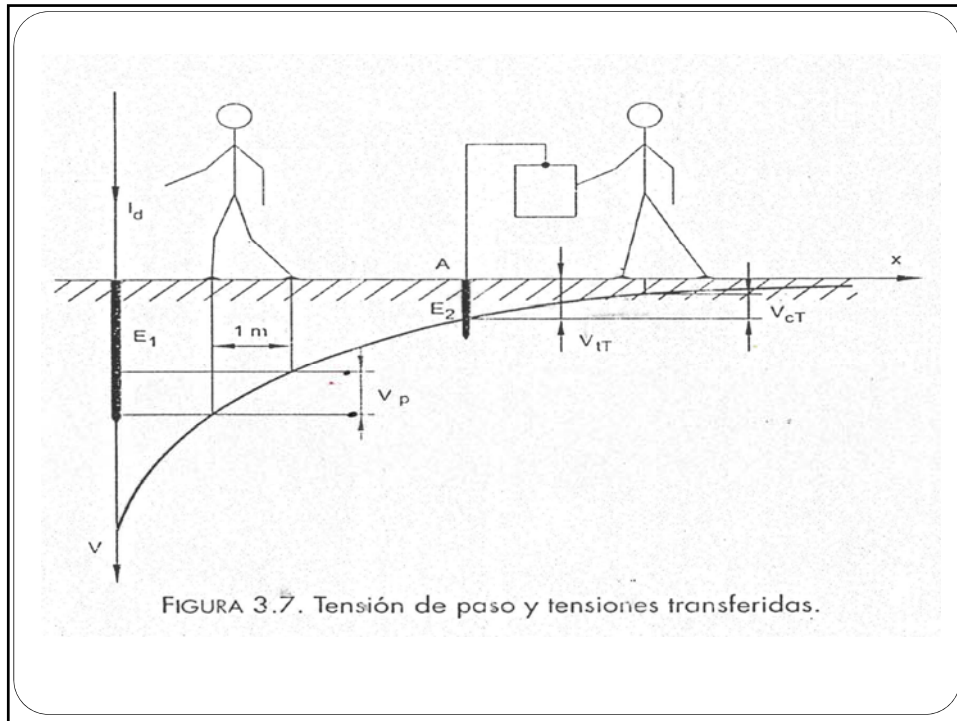


- Tensión de paso (V_p):

- Es la diferencia de potencial entre dos puntos del suelo, separados un metro, cuando se encuentran sobre líneas de potencial diferentes.



- Tensión transferida: Sean dos instalaciones de tierra distintas, con electrodos respectivos E1 y E2, situados a una distancia d. Si ésta no es muy grande, al disiparse un defecto por E1, en el punto A ocupado por E2 aparece un potencial V_a que se transmite a todas las masas y elementos metálicos conectados a E2. La tensión a tierra transferida, es la tensión a tierra que aparece en las masas y elementos metálicos de una instalación de puesta a tierra como consecuencia de otra toma de tierra próxima



- **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: $V_{ch} = V_n = 400 / 1.73 = 230V$

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:

$$V_{ch} = R_t * I_f = R_t * V_n / (R_{tn} + R_t)$$

- 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 $R_{TN} = 5 \text{ Ohmios}$:

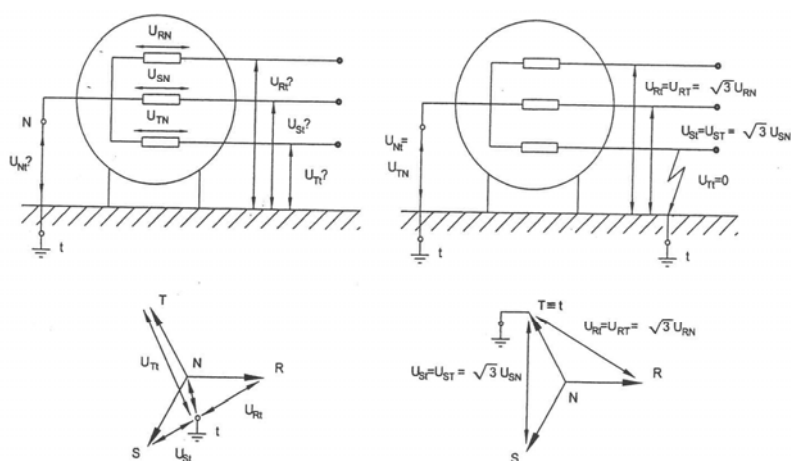
R_t (Ohmios)	V_{ch} (V)	I_{ch} (mA)
50	200	133
5	110	73
1.47	50	

- 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 Ohmios.

¿Qué elementos de una instalación se conectan a tierra?

- Neutro de transformadores y generadores
- Masas
- Pararrayos y estructuras metálicas

Neutro de transformadores y generadores



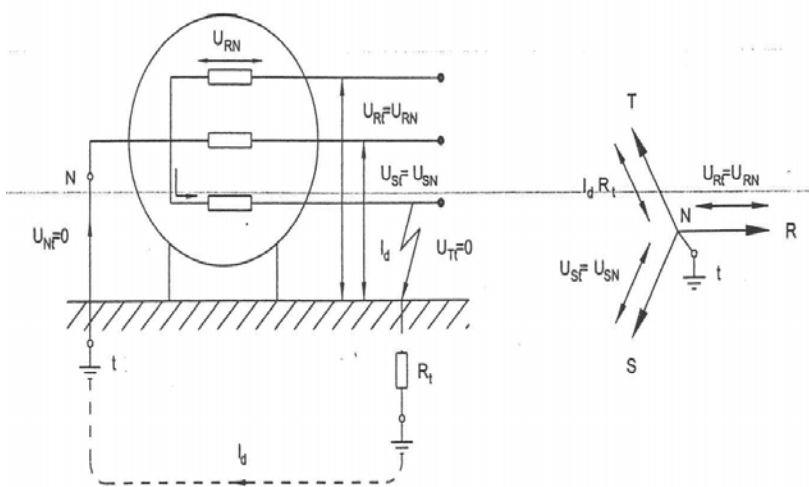
Neutro de transformadores y generadores

- Caso: Neutro aislado.

Las tensiones entre partes activas y masa no están definidas. Si se produce una falla de aislación entre una fase y tierra, la fase averiada pasa a tener potencial cero respecto de tierra, mientras que la tensión entre las fases sanas y tierra pasa a ser igual a la tensión compuesta.

$$U_{ft} = U_c = \sqrt{3} \cdot U_{fn}.$$

Entonces: En los sistemas con neutro aislado, todos los aislamientos fases-masa deben estar dimensionados para soportar la tensión compuesta.



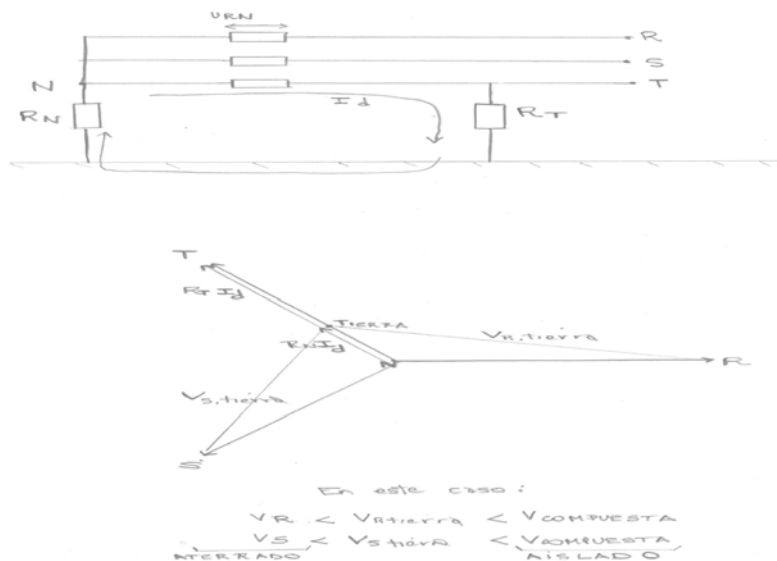
- Caso: Neutro aterrado.

La tensión fase-masa queda fijada al valor de la tensión fase-neutro. $U_{ft} = U_{fn}$.

La conexión a tierra del neutro permite reducir el espesor de los aislantes. Pero en estos casos, la aparición de un fallo de aislación a tierra origina corrientes de defecto, las cuales son fáciles de detectar, y por tanto se facilita la actuación de los sistemas de protección.

Caso intermedio: Neutro a tierra a través de una impedancia.

Se originan corrientes de defecto menores que en un sistema con neutro conectado a tierra rígidamente, y sobretensiones más bajas que en un sistema con neutro aislado.



Puesta a tierra de las masas.

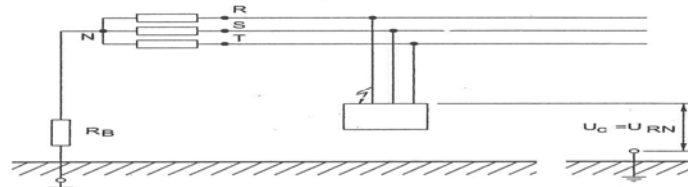
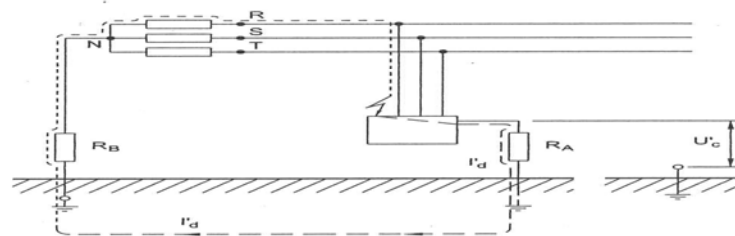


FIGURA 3.10. Defecto de aislamiento en una masa no conectada a tierra.



- Con el neutro puesto a tierra, si se produce una falla de aislación en una masa no conectada a tierra, la masa queda respecto de tierra a una tensión igual a la tensión fase-neutro (**U_{f-n}**), ya que no circula ninguna corriente de defecto.
Si la masa está conectada a tierra, la corriente de defecto es:
 $I_d = U_{f-n} / (R_a + R_b + Z_{cond} + R_d)$. Como Z_{cond} es despreciable frente al resto:
 $I_d = U_{f-n} / (R_a + R_b + R_d)$.
La máxima corriente se da cuando $R_d = 0$.
Entonces: $I_{d,m\acute{a}x} = U_{fn} / (R_a + R_b)$.

- La máxima tensión de contacto que puede aparecer es:

$$V_{cm\acute{a}x} = I_{d,m\acute{a}x} \cdot R_a = U_{f-n} \cdot R_a / (R_a + R_b) < U_{fn}.$$

Vemos que la tensión que se produce cuando la masa está conectada a tierra, es menor que en el caso de estar la masa aislada de tierra.

La corriente de defecto es fácilmente detectable y se utiliza para activar elementos de protección.

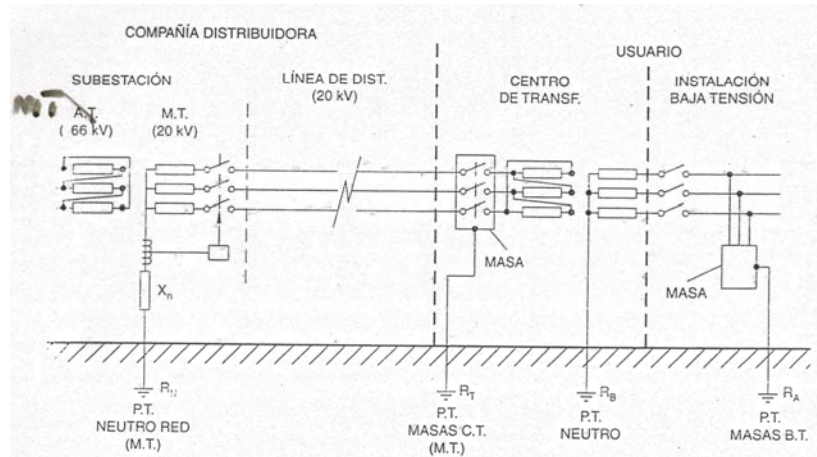
Por ello es casi generalizado el hecho de conectar las masas a tierra en las instalaciones.

Pararrayos y estructuras metálicas

- Su conexión a tierra es indispensable para que puedan cumplir sus funciones de protección.

Los pararrayos facilitan a las posibles descargas atmosféricas un camino de baja impedancia entre las partes activas y tierra.

Instalaciones de puesta a tierra en una planta industrial



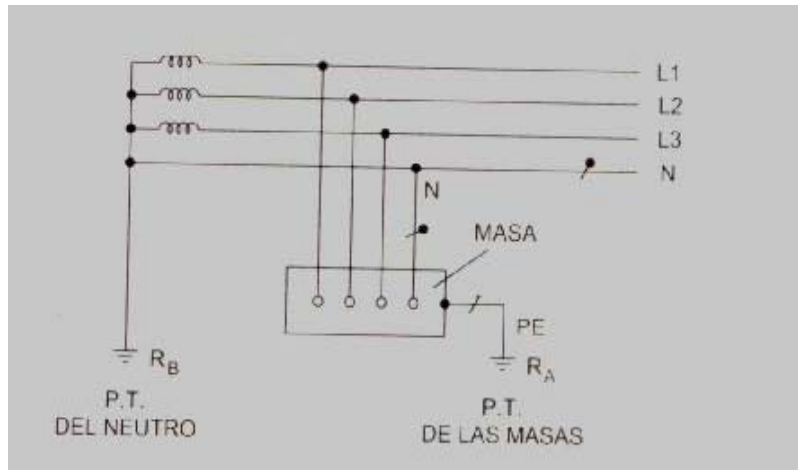
- Posibles instalaciones de puesta a tierra distintas e independientes:
 - a) Puesta a tierra de las masas de baja tensión
 - b) Puesta a tierra del neutro del transformador
 - c) Puesta a tierra de las masas del centro de transformación.
- a) La finalidad es proteger a los usuarios de la instalación de BT frente a la aparición de tensiones de contacto en las masas por fallas de aislación. La idea es minimizar la tensión entre masas y entre masas y tierra en caso de defecto. Se conectan a tierra:
- envolventes y carcasas metálicas de aparatos eléctricos, estructuras metálicas de edificios, canalizaciones metálicas, elementos metálicos próximos a masas o partes activas, armaduras metálicas de cables de BT.

- b) El neutro del transformador puede ponerse a tierra utilizando un sistema de puesta a tierra propio (esquema TT) o utilizando el sistema de puesta a tierra de las masas de BT (esquema TN).

Esquemas de distribución en BT

- Se designan utilizando dos letras mayúsculas:
 - la primera indica la situación del neutro del transformador respecto de tierra (**T**: neutro conectado a tierra, **I**: neutro aislado de tierra).
 - la segunda se refiere a la forma de conectar a tierra las masas de baja tensión (**T**: masas conectadas a tierra directamente, **N**: masas conectadas a tierra a través del neutro del transformador).

Esquema de distribución TT

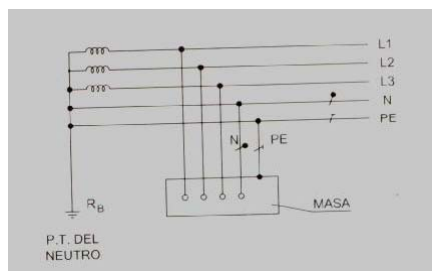


Esquema de distribución TN

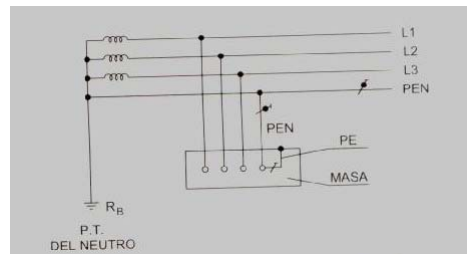
- Existe una única instalación de puesta a tierra a la que se conecta el neutro del transformador y las masas de baja tensión. Existen tres variantes:
 - **TN-C**: El neutro se utiliza indistintamente como neutro de servicio y como conductor de protección, conectado a las masas. Las funciones de neutro y protección están combinadas en un conductor.
 - **TN-S**: Del neutro del transformador parten dos conductores, uno se usa como neutro de servicio, y el otro como conductor de protección conectado a las masas. Las funciones de neutro y protección están separadas en toda la instalación.

- **TN-C-S:** Las funciones de neutro y protección están combinadas en un solo conductor en parte de la instalación, y separada en dos conductores en el último escalón de la distribución.

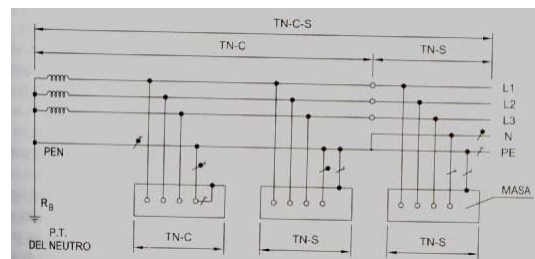
- **TN-S**



- TN-C

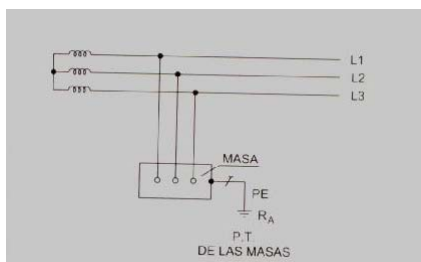


- TN-C-S



Esquema de distribución IT

- IT



El neutro del transformador se mantiene aislado de tierra (o conectado a ella a través de una impedancia elevada), mientras que las masas de baja tensión se conectan a tierra directamente.

● **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**

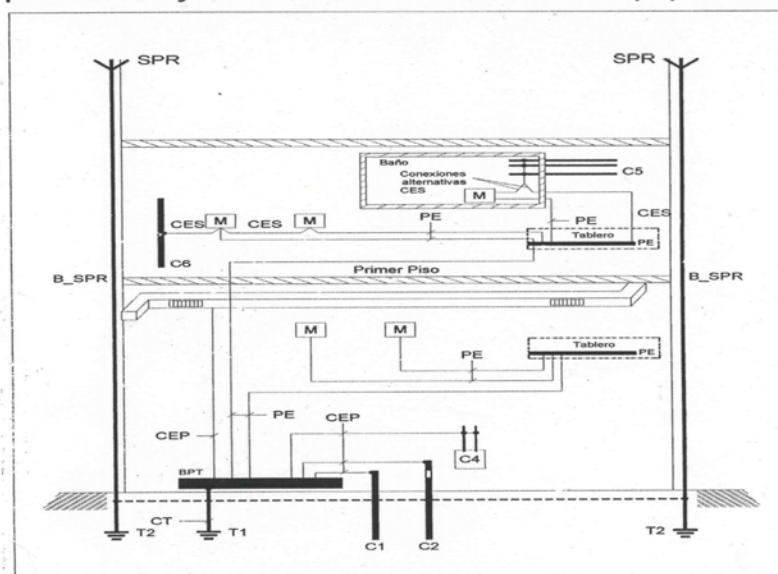
- Es la puesta a tierra cuyo objetivo es asegurar el correcto funcionamiento del equipamiento eléctrico y permitir un correcto y confiable funcionamiento de la instalación.

• **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



CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA PUESTA A TIERRA

- **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.

- Dimensiones mínimas de los electrodos (UTE)

Electrodo	Diámetro/ Sección	Largo	Superficie	Espesor
Placa de cobre			0.5m ²	2mm
Barra de cobre	14mm	2m		
Conductor desnudo multifilar	35mm ²			
Cinta o pletina de cobre	35mm ²			2mm
Cable de acero galvanizado	95mm ² -cada alambre 2,5mm 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.

- **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.

- **CONDUCTORES DE PROTECCION (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.

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

- **SECCIONES MINIMAS DEL CONDUCTOR PE**

Con protección mecánica : 2 mm²

Sin protección mecánica : 4 mm²

- **RELACION ENTRE LAS SECCIONES DE PE Y LOS CONDUCTORES DE FASE.**

SECCION CONDUCTORES DE FASE DE LA INSTALACION S(mm ²)	SECCION MINIMA DE LOS CONDUCTORES DE PROTECCION SPE(mm ²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	S/2

- **LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES DE PROTECCIÓN NO DEBE SER MENOR QUE EL VALOR DETERMINADO POR LA SIGUIENTE EXPRESIÓN:**

$$S = \sqrt{I^2 \cdot t} / K$$

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.

- **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 ≤ 300mm ²)	30	160	143
PVC 70°C (S > 300mm ²)	30	140	133
EPR o XLPE 90°C	30	250	176

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

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

RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA

- 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

- **CALCULO DE UNA RESISTENCIA DE 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 : $R_t = \rho * f(g)$

Donde:

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

- Veamos la variación de la resistividad del suelo para distintos tipos de suelos:

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	1500 a 5000
Arcilla con 40% de humedad	80
Arcilla con 20% de humedad	330
Arena mojada	1300
Arena seca	300 a 8000
Calcáreo compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

- CALCULO DE CONFIGURACIONES MAS COMUNES.

- Jabalina vertical

- $R_t = [\rho / (2 * \pi * L)] * \ln(4 * L / d)$

Donde:

ρ es la resistividad del suelo ($\Omega.m$),

L es la longitud de la jabalina (m),

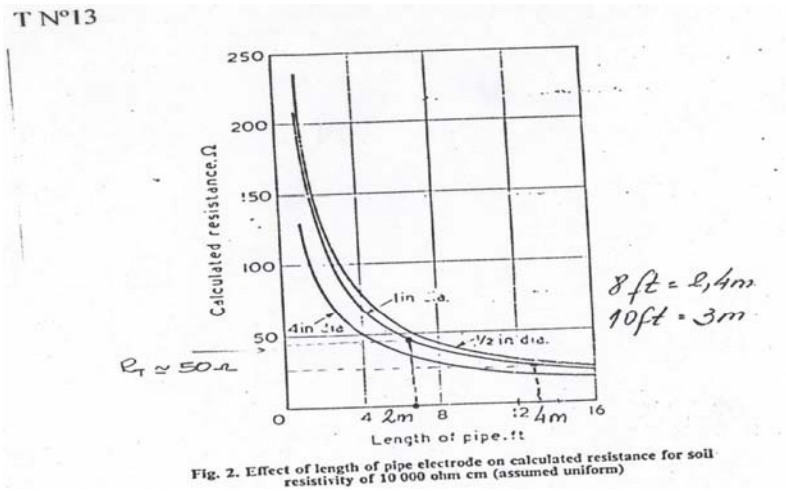
d es el diámetro equivalente de la jabalina (m)

- 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

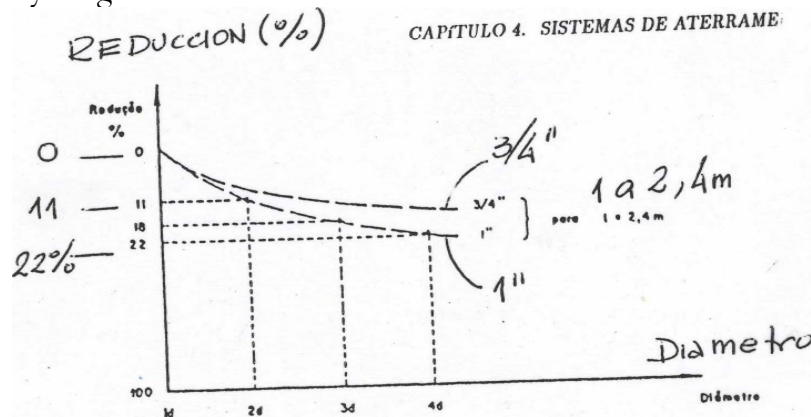
$$R_t = [\rho / (2 * \pi * L)] * \ln(4 * L / d)$$

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 $100 \Omega \cdot m$



- 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.

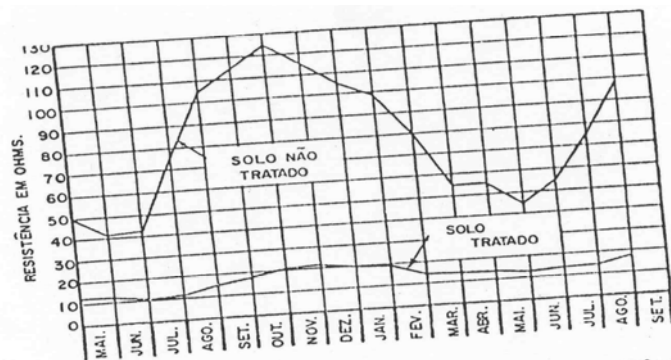
En la figura siguiente se muestra la reducción de la resistencia de puesta a tierra de una jabalina en función del diámetro de la misma, para jabalinas de distintos diámetros y longitudes.



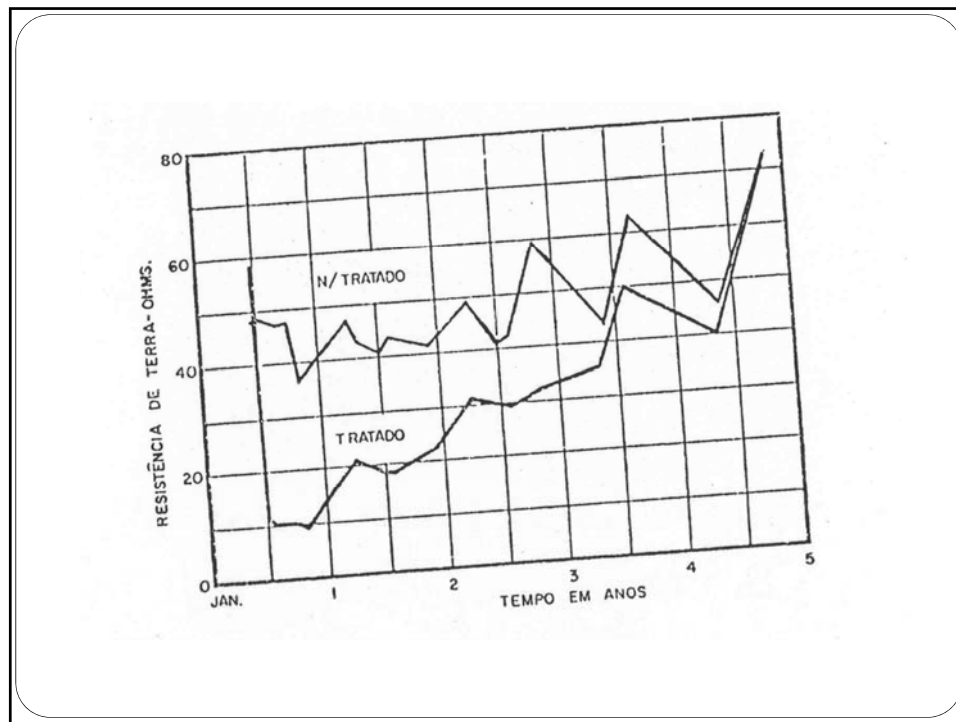
- Se observa que el aumento del diámetro de la jabalina produce una pequeña reducción, y a partir de determinado valor prácticamente no tiene influencia. En la práctica se utilizan los diámetros mínimos por razones de corrosión y resistencia mecánica

- 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.



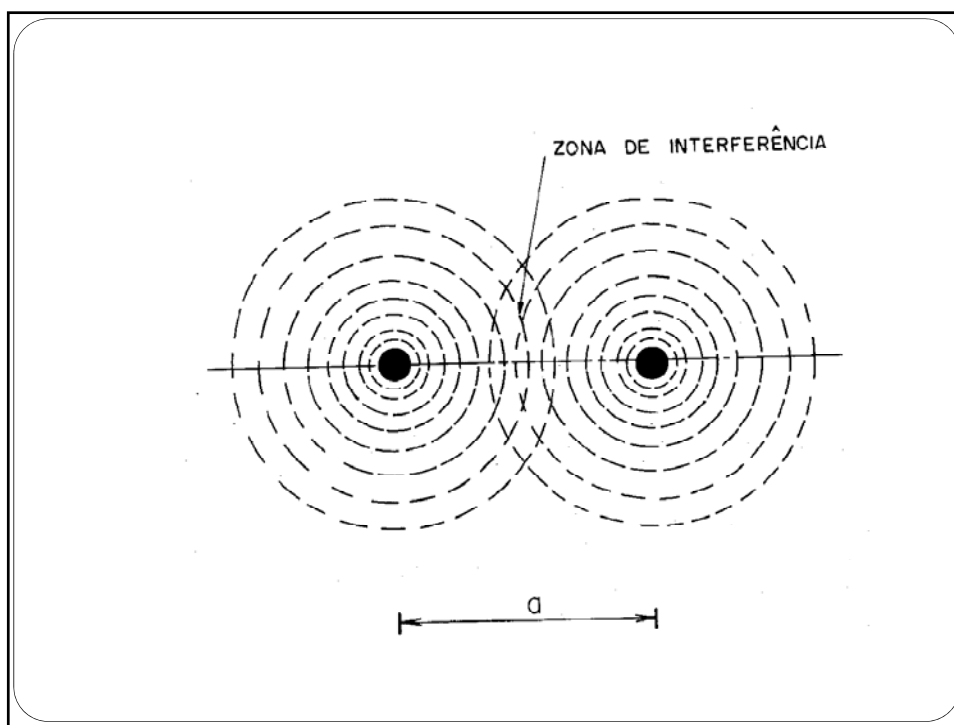
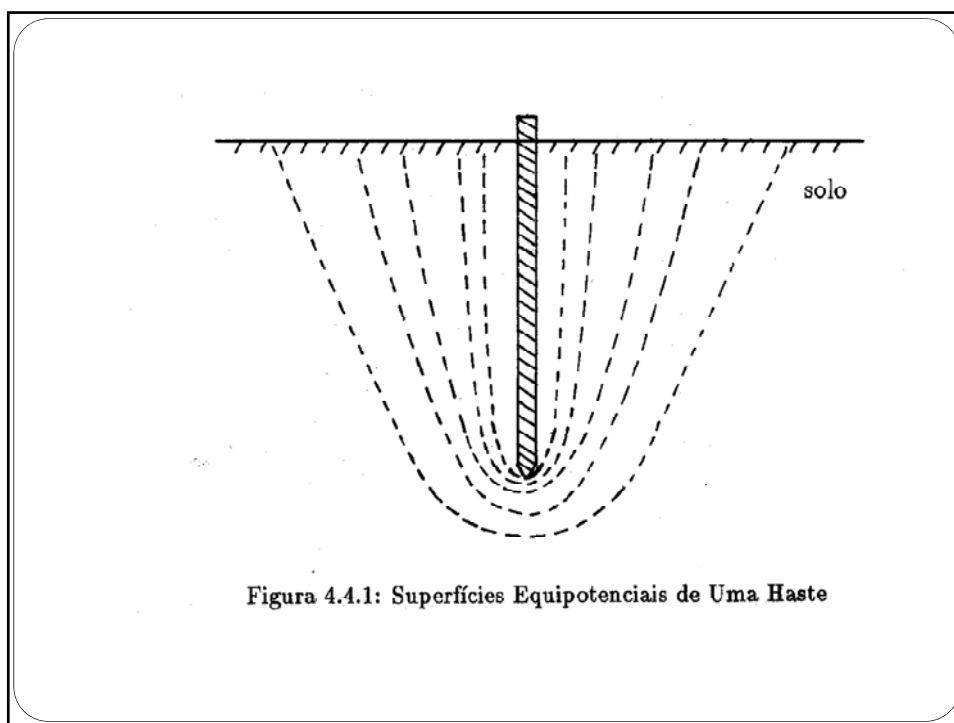
5.5.2: Tratamento Químico do Solo e as Variações Mensais da Resistência

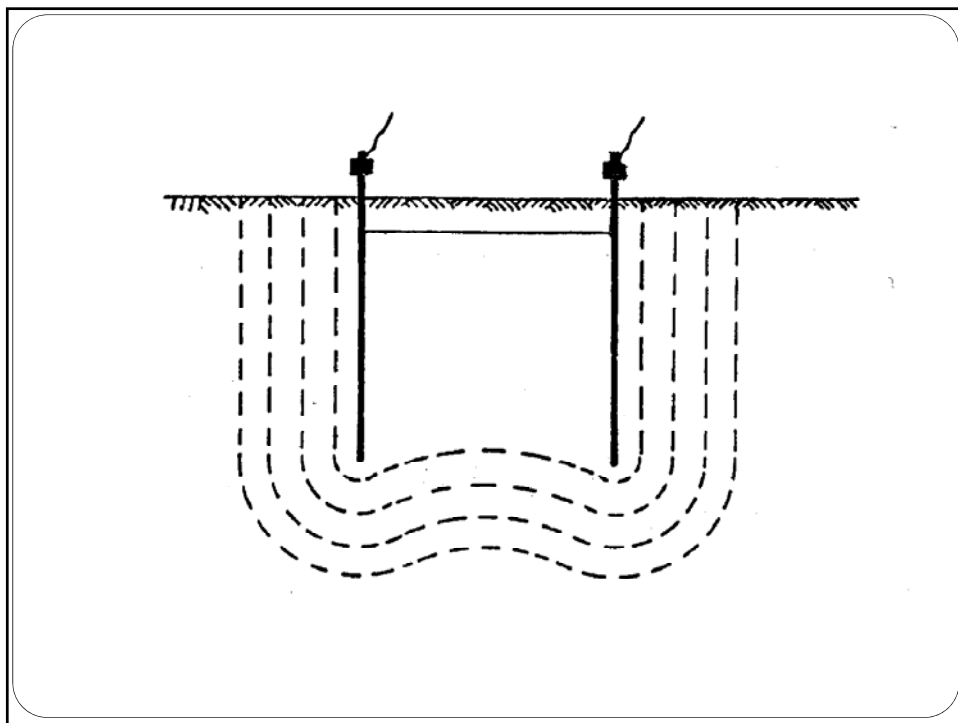
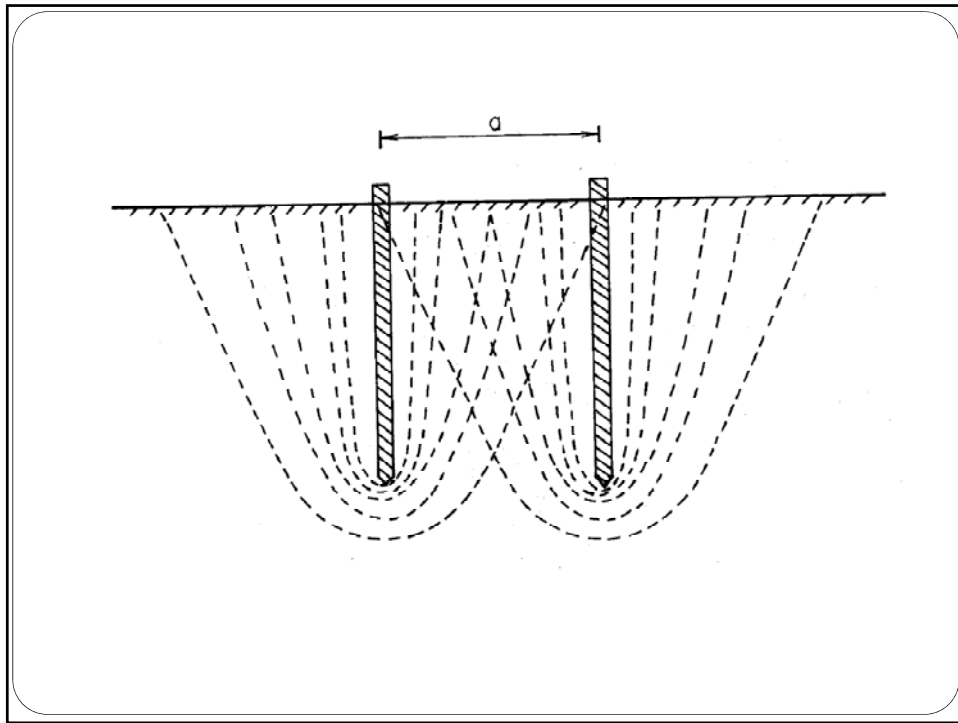


La instalación de **jabalinas en paralelo** disminuye sensiblemente el valor de la resistencia de la puesta a tierra.

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

$$R_{1jabalina}/2 < R_{2jabalinas} < R_{1jabalina}$$





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

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

$$R_{nj} = K * R_{1j}$$

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

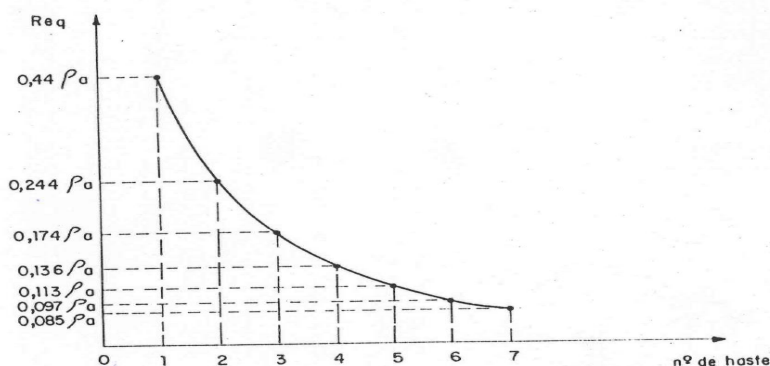
- Las siguientes tablas dan valores del factor de reducción para jabalinas alineadas de distintas dimensiones, y para distintas separaciones entre jabalinas

$L = 2m \quad d = 1'' \quad R_{l \text{ haste}} = 0,458 \rho a$								
Espaçamentos	2m		3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	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

$L = 3m \quad d = 1'' \quad R_{1\text{ haste}} = 0,327\rho a$						
Espaçamentos	3m		4m		5m	
Número de Hastes	$R_{eq} [\Omega]$	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

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

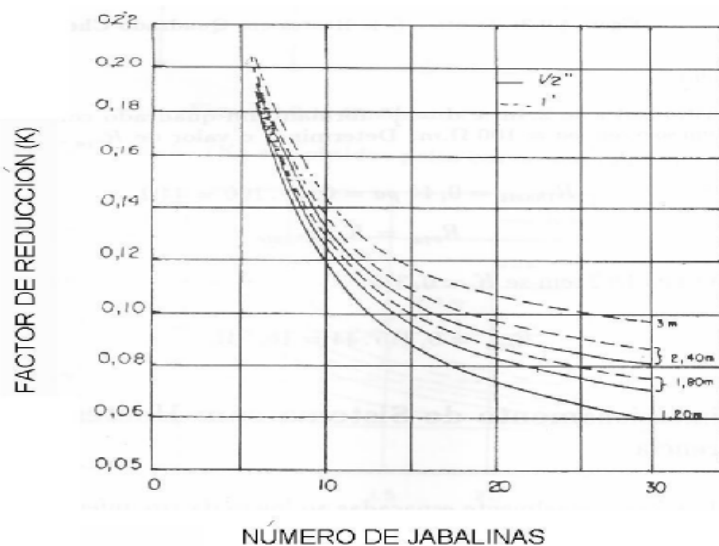
Si se grafica la disminución de la resistencia equivalente de n jabalinas alineadas en función del número de jabalinas, se obtiene una curva como la que se muestra en la figura siguiente, en la que puede verse que dicha disminución tiende a quedar constante a partir de $n = 7$.



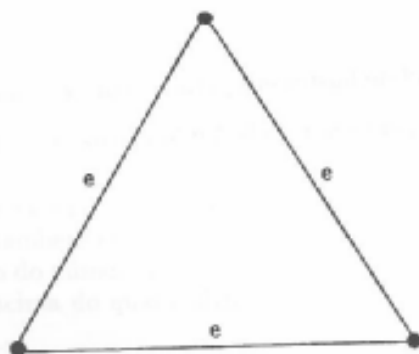
Jabalinas dispuestas en circunferencia



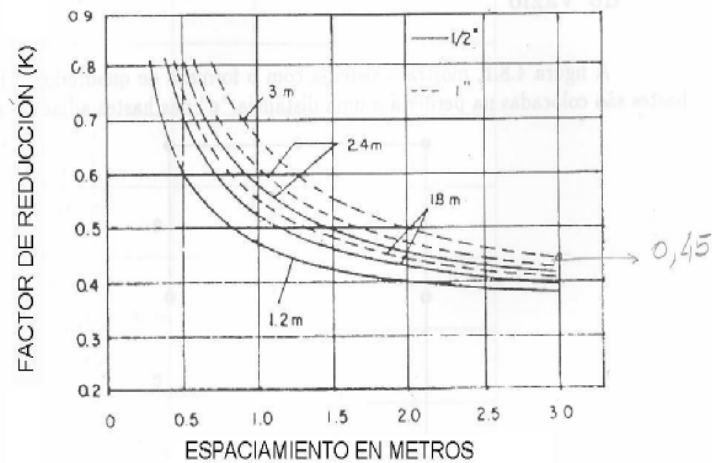
- Las curvas que se muestran a continuación corresponden a la distribución de n jabalinas en una circunferencia de 9m de radio, para jabalinas de distintos diámetros (1" y $\frac{1}{2}$ ") y longitudes (1.2m, 1.8, 2.4m y 3m).



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

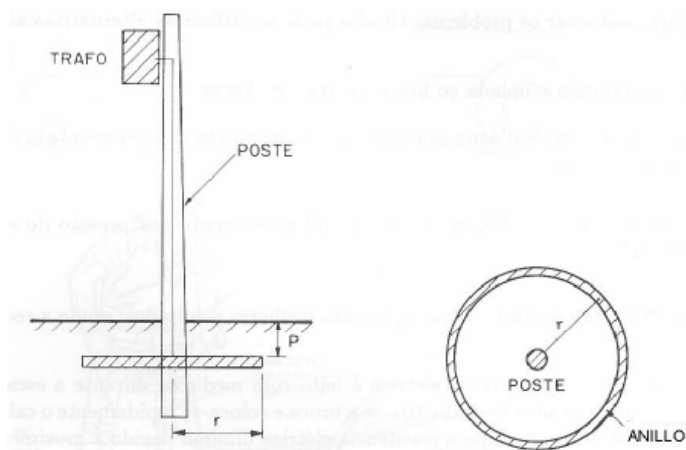
Los factores que pueden influir en la disminución de la resistencia de puesta a tierra cuando se utilizan jabalinas de gran longitud, son los siguientes:

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



- $R_t = (\rho / \pi^2 \cdot r) \cdot \ln(4 \cdot r^2 / d \cdot p)$

- 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).

Conductor horizontal dispuesto linealmente

- $R = (\rho / 2\pi L) \ln[(2L^2 / r p) - 2 + (2p/L) - (p/L)^2 + (1/2)(p/L)^4]$

- Donde:

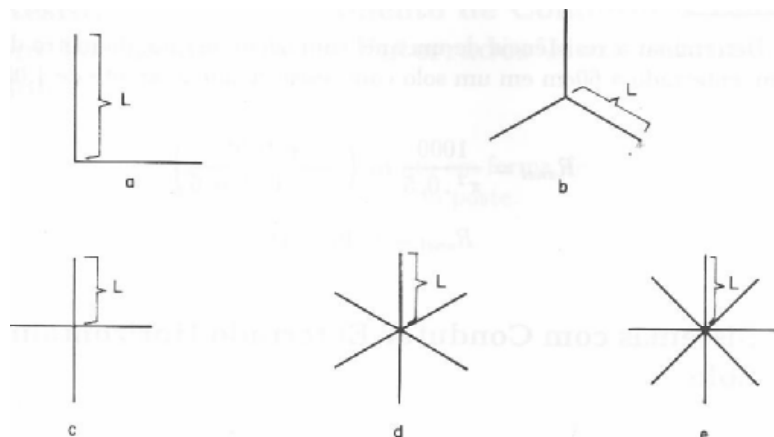
***p** es la profundidad a la que esta enterrado el conductor (m),*

***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 p/L pueden despreciarse.

Conductores horizontales en otras disposiciones



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

$$R = (\rho / 2\pi L) + [\ln(L^2 / 2rp) - 0.2373 + 0.8584(p/L) + 1.656(p/L)^2 - 10.85(p/L)^4]$$

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**

$$R = (\rho / 3\pi L) + [\ln(L^2 / 2rp) + 1.077 - 0.836(p/L) + 3.808(p/L)^2 - 13.824(p/L)^4]$$

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

$$R = (\rho / 4\pi L) + [\ln(L^2 / 2rp) + 2.912 - 4.284(p/L) + 10.32(p/L)^2 - 37.12(p/L)^4]$$

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

$$R = (\rho / 6\pi L) + [\ln(L^2 / 2rp) + 6.851 - 12.512(p/L) + 28.128(p/L)^2 - 125.4(p/L)^4]$$

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

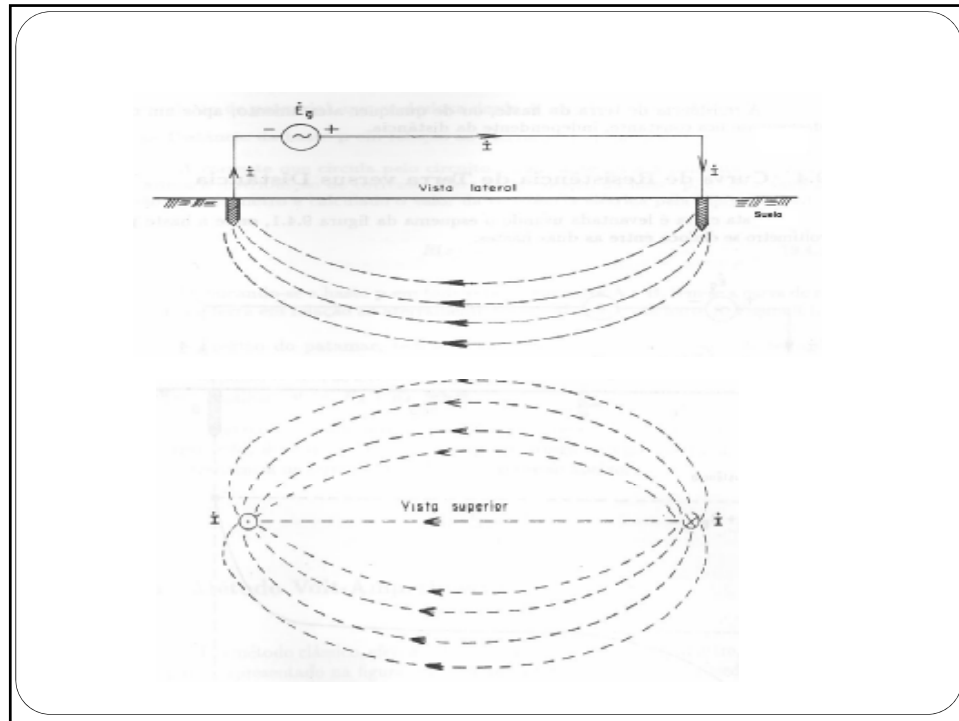
$$R = (\rho / 8\pi L) + [\ln(L^2 / 2rp) + 10.98 - 22.04(p/L) + 52.16(p/L)^2 - 299.52(p/L)^4]$$

- Ejemplo: Se dispone de 60m de un conductor con diámetro de 6mm. Calcular la resistencia para todas las configuraciones posibles vistas en a) hasta e), enterrando el conductor a 60cm de la superficie, teniendo un suelo con resistividad aparente de $1000 \Omega \cdot m$.

Configuración	Resistencia (Ω)
1 conductor	35.00
2 conductores	64.77
Estrella con 3 puntas	67.23
Estrella con 4 puntas	73.21
Estrella con 6 puntas	87.17
Estrella con 8 puntas	101.83

Medida de la resistencia de una puesta a tierra

- La medición de la resistencia de una puesta a tierra se realiza por el método voltamperimétrico, 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.

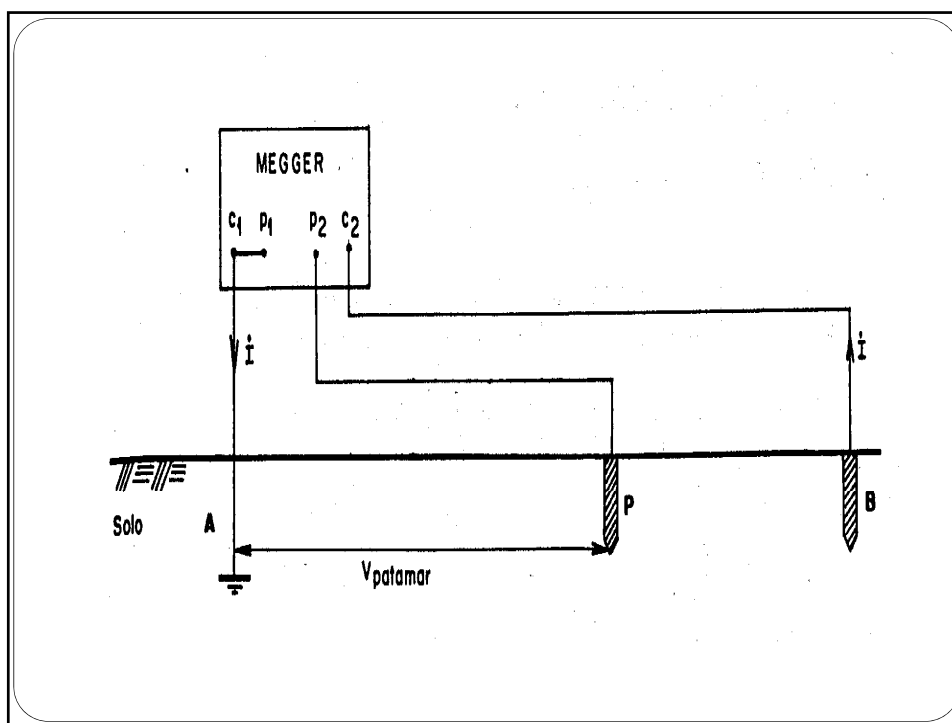


- La densidad de corriente es máxima junto a la jabalina, y disminuye a medida que nos alejamos de la misma, y podemos expresar la resistencia de la puesta a tierra como

$$R_t = \rho * \sum \left(\frac{\Delta x_i}{S_i} \right)$$

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 las segunda jabalina.

Si consideramos el sistema de medición completo:



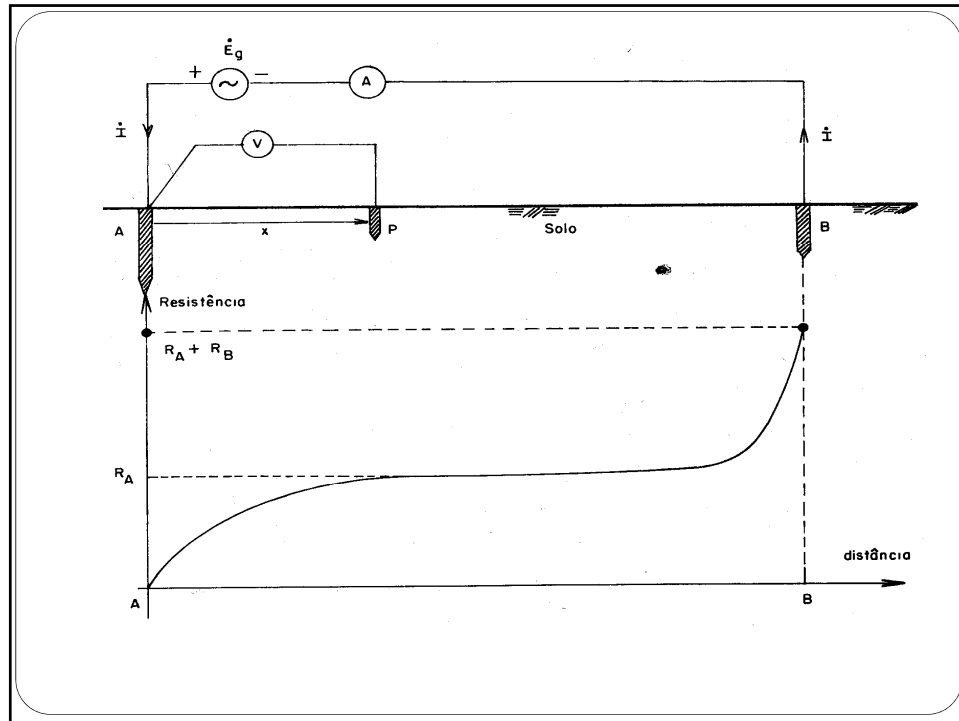
- Donde:

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.



Resistividad del suelo

- 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 .

- **Factores que influyen en el valor de la resistividad del suelo**

Tipo de suelo

Estratificación del suelo

Humedad

Temperatura

Composición y concentración de las sales disueltas en el suelo

- **Influencia de la humedad:**

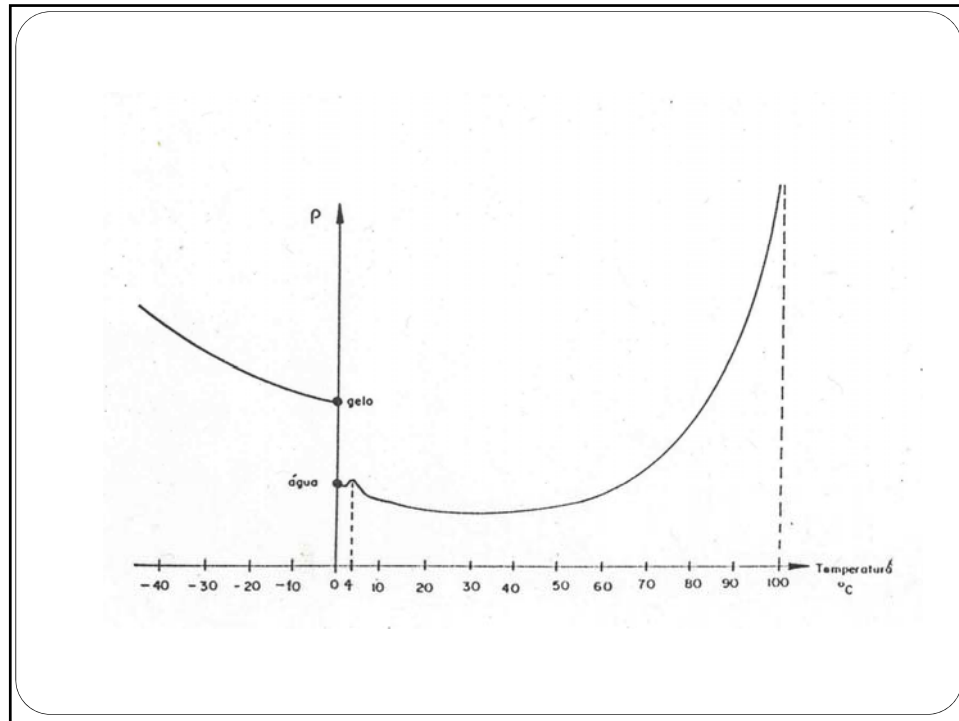
- La variación de la resistividad del suelo con la humedad se debe a que la conducción de cargas eléctricas en el suelo es predominantemente iónica. Un porcentaje mayor de humedad hace que las sales presentes en el suelo se disuelvan, formando un medio favorable al pasaje de la corriente iónica. Un suelo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

Ej: Variación de la resistividad de un terreno arenoso con la concentración de humedad

Indice de humedad (% por peso)	Resistividad ($\Omega.m$) 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

- **Influencia con la Temperatura.**

Temperatura ($^{\circ}C$)	Resistividad ($\Omega.m$) Suelo arenoso
20	72
10	99
0 (agua)	138
0 (hielo)	300
-5	790
-15	3.300

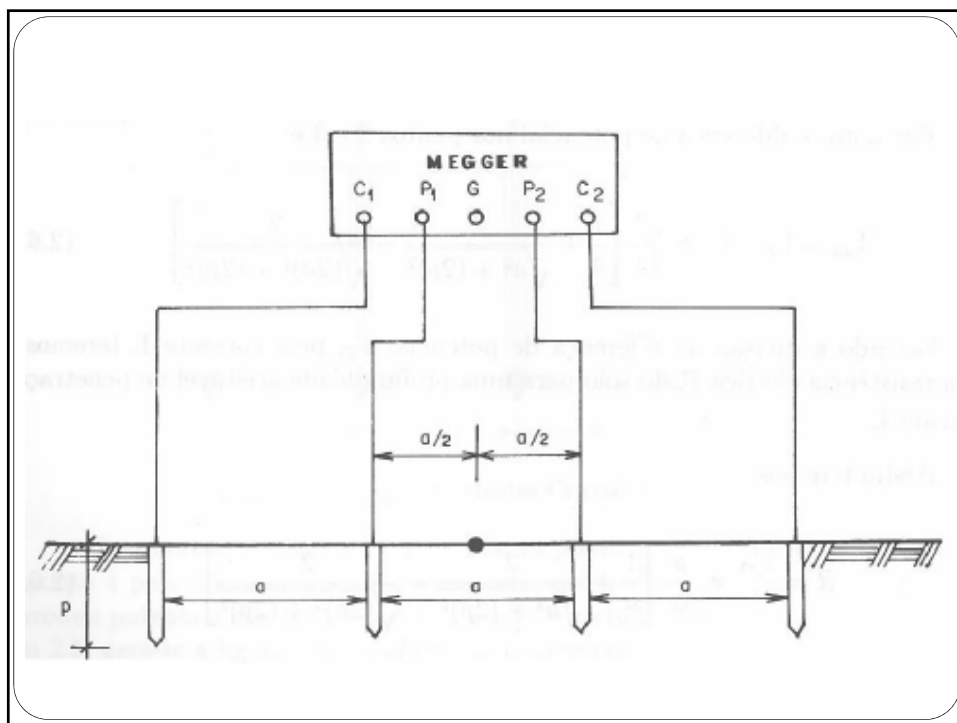


- **Influencia de la estratificación del suelo.**

En su gran mayoría, los suelos no son homogéneos, estando formados por diversas capas de resistividad y profundidad diferentes. Estas capas, debido a su formación geológica, son en general horizontales y paralelas a la superficie del suelo. Hay veces en que estas capas se presentan inclinadas y hasta verticales, debido a alguna falla geológica. Debido a que estos casos son poco típicos, los consideraremos, de haber, horizontales.

Medicion de la resistividad del suelo

- 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 ρ_i , y profundidad p_i .
- 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).

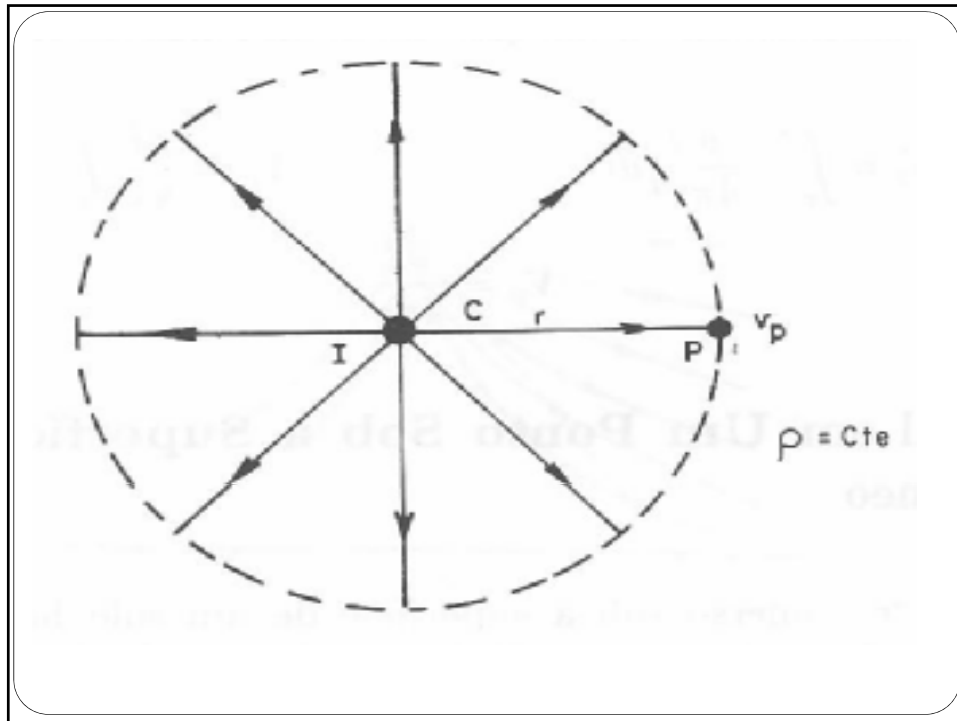


- $RM = (VP1 - VP2)/(IC1 - C2)$

Para llegar a la expresión que relaciona la resistencia medida RM, 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.



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

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

- $E_p = \rho j_p$

E_p es el campo eléctrico en el punto P,

j_p es la densidad de corriente en el punto P, y

ρ es la resistividad del suelo

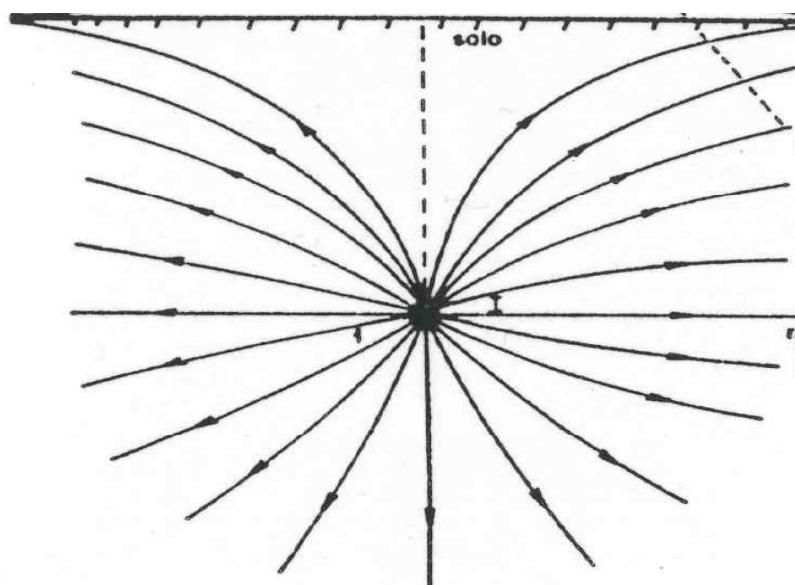
$$j_p = I / (4\pi r^2)$$

- La diferencia de potencial respecto a un punto infinito:

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

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

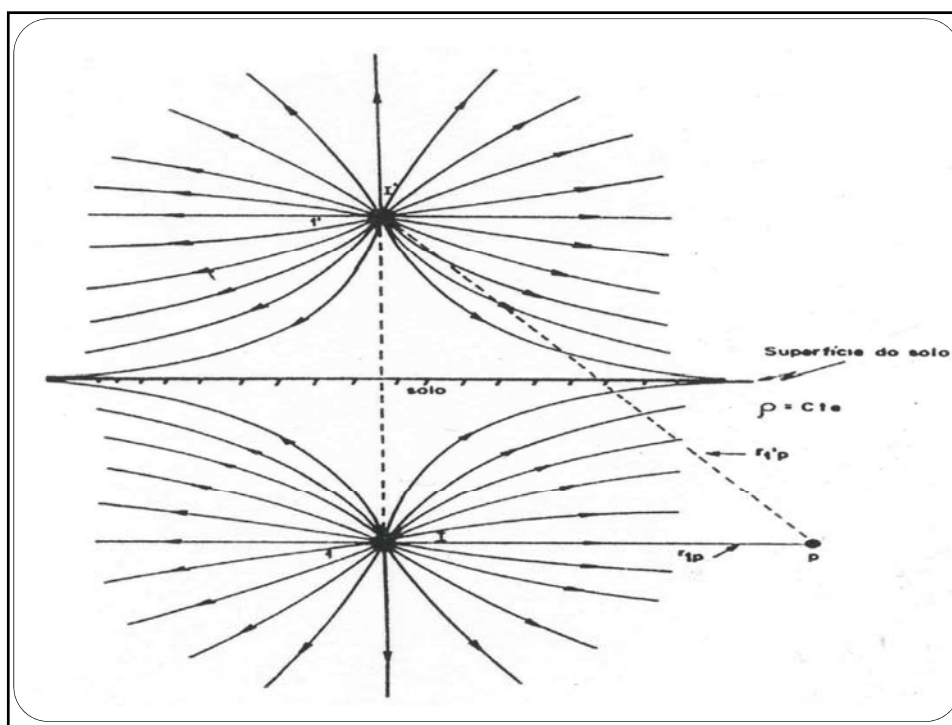
- Sea un punto C, inmerso en una superficie de un suelo homogéneo, emanando una corriente eléctrica I . Con la condición de borde que impone el límite del suelo, las líneas de corriente se comportan como se muestra en la figura siguiente.



- 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.

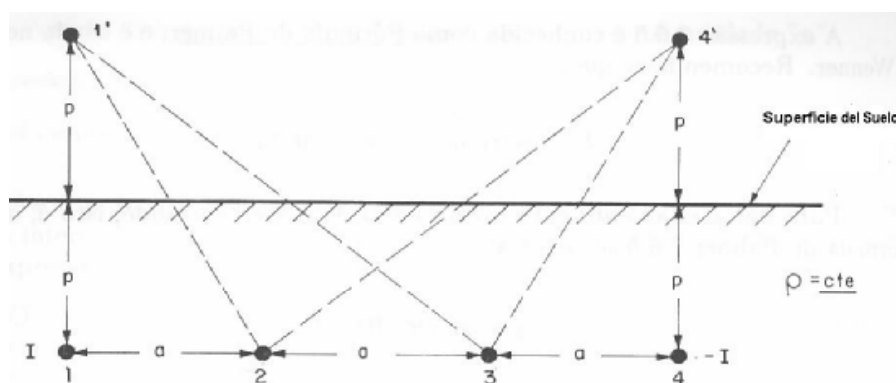
Luego siendo válido el principio de superposición.

Puede hacerse el cálculo del potencial en un punto P superponiendo el efecto de cada fuente independientemente de su fuente imagen.



$$V_p = \frac{\rho l}{4\pi r_{1p}} + \frac{\rho l'}{4\pi r'_{1p}} = \frac{\rho l}{4\pi} * \left[\frac{1}{r_{1p}} + \frac{1}{r'_{1p}} \right]$$

CONFIGURACION DE WENNER.



- En esta configuración es inyectada una corriente I en el punto 1 y recogida 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.

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

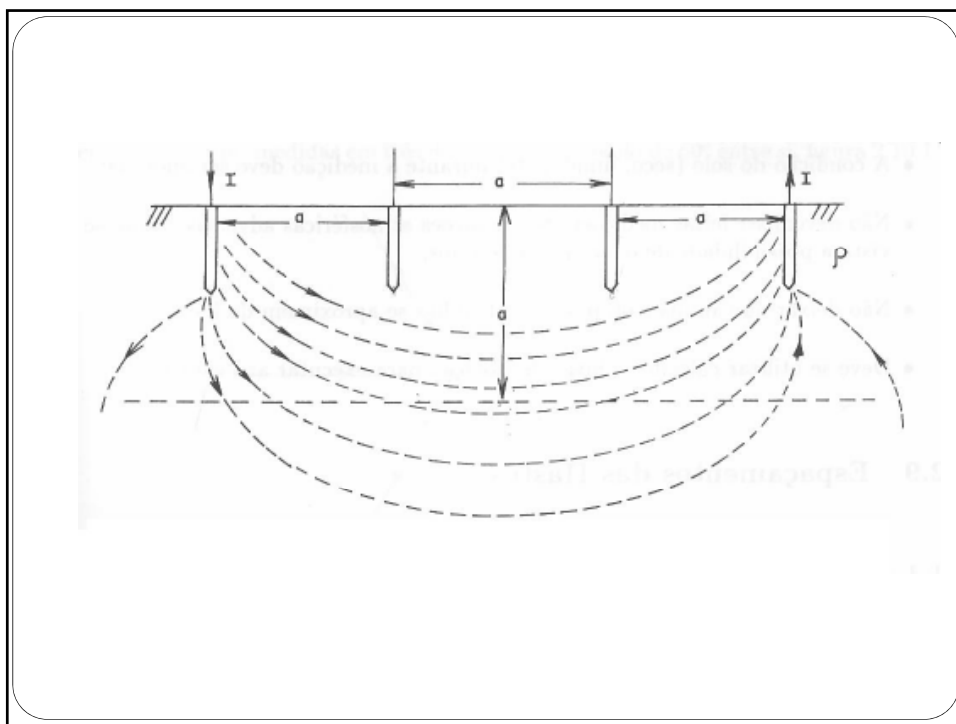
$$\rho = 4\pi RM a \left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{[(2a)^2 + (2p)^2]}} \right]$$

- Si $a > 20p$, entonces:

$$\rho = 2\pi a RM$$

Entonces calculamos la resistividad del suelo considerado homogéneo en función de la resistencia medida con la configuración de Wenner.

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)



- 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 ($\rho(a)$).

La expresión anterior queda:

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

Permite relevar la curva $\rho(a)$ realizando diferentes medidas de la resistencia R_M , para distintas separaciones entre picas.

- **Dimensiones de las picas**

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

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

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.

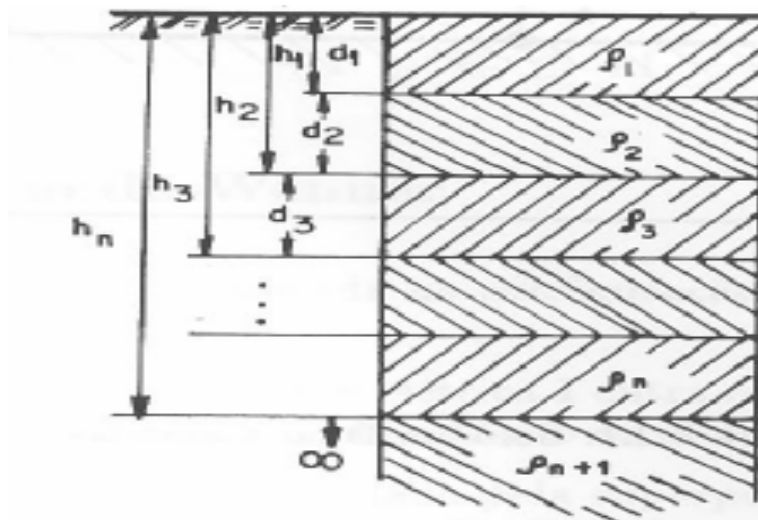
Análisis de las medidas

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 valor 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 $\rho(a)$.

Estratificación del suelo

- El modelo más usado es el de 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.
- Supongamos 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



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

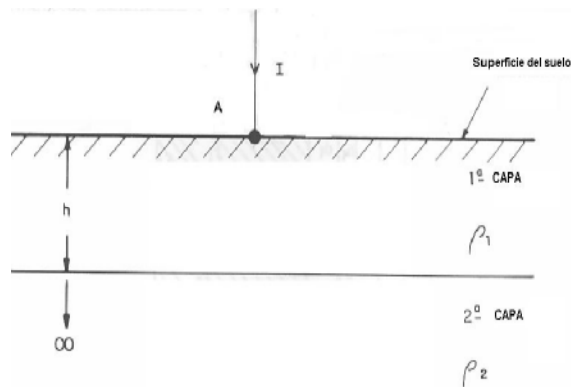
$$\rho_1 = \rho_{eq} = [d_1 + d_2 + \dots + d_n] + [(d_1 + \rho_1) + (d_2 + \rho_2) + \dots + (d_n + \rho_n)]$$

$$= \sum_{i=1}^n d_i + \left[\sum_{i=1}^n d_i / \rho_i \right]$$

$$h = d_{eq} = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n = \sum_{i=1}^n d_i$$

$$d_2 = \infty$$

$$\rho_2 = \rho_n + 1$$



Resistividad aparente

- El pasaje de la corriente eléctrica en un sistema de aterramiento depende de:
 - La composición del suelo con sus diferentes capas
 - La geometría del sistema de aterramiento
 - El tamaño del sistema de aterramiento, el cual corresponde a la profundidad de penetración de la corriente.

Definimos resistividad aparente, la resistividad vista por el sistema de aterramiento en su integración con el suelo. Si colocamos un sistema de aterramiento con la misma geometría en suelos distintos, se tendrán resistencias eléctricas diferentes. Esto es porque la resistividad que el suelo presenta a este aterramiento es diferente.

- La resistencia eléctrica de un sistema de aterramiento depende de:
 - Resistividad aparente que el suelo presenta para dicho aterramiento
 - Geometría y forma en que el sistema de aterramiento está enterrado en el piso.

Entonces en cualquier sistema de aterramiento se tiene. Siendo ρ_a la resistividad aparente, $f(g)$ una función que depende de la geometría del sistema y forma de colocación en el suelo:

$$R_{aterr} = \rho_a \times f(g)$$

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

- 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.

- Coeficiente de penetración (α).

Indica el grado de penetración de las corrientes por el aterramiento en el suelo. Está dado por: $\alpha = r/dsq$

El valor de r se define para algunas configuraciones:

- Jabalinas alineadas e igualmente espaciadas una distancia e .
 $r = (n-1) \cdot e / 2$
- Otras configuraciones: $r = A/D$, siendo A el área del aterramiento, D la mayor dimensión del aterramiento.

- Coeficiente de divergencia (β).

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.

$$\beta = \rho(n+1) + \rho_{eq}$$

Conociendo α y β , se puede determinar la resistividad aparente del aterramiento especificado en relación al suelo de dos capas. Se obtiene usando las curvas de Endrenyi, donde α se coloca en el eje de las abscisas, y β es una curva, obteniéndose el valor de $N = \rho_a / \rho_{eq}$

