



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Instalaciones Eléctricas

Puesta a Tierra y Conductores de Protección

Presentación 1

Objetivos de una Puesta a Tierra (PaT)

- 1) Permitir la descarga a tierra de una corriente de falla a tierra (CC, descarga atmosférica, etc.)
- 2) Conectar los Neutros si corresponde.
- 3) 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.
- 4) Mantener un potencial de referencia en algún punto del sistema eléctrico o electrónico.
- 5) En general: la (o las) PaT de una instalación eléctrica deberá diseñarse y ejecutarse para satisfacer las **prescripciones de seguridad**, y los **requerimientos funcionales** de las instalaciones.

Objetivos de una Puesta a Tierra (PaT)

- **Puesta a tierra de protección:**

Es la PaT 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).

- **Puesta a tierra funcional:**

Es la PaT 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.

Conceptos Básicos

- **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.

Conceptos Básicos

- **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.

Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

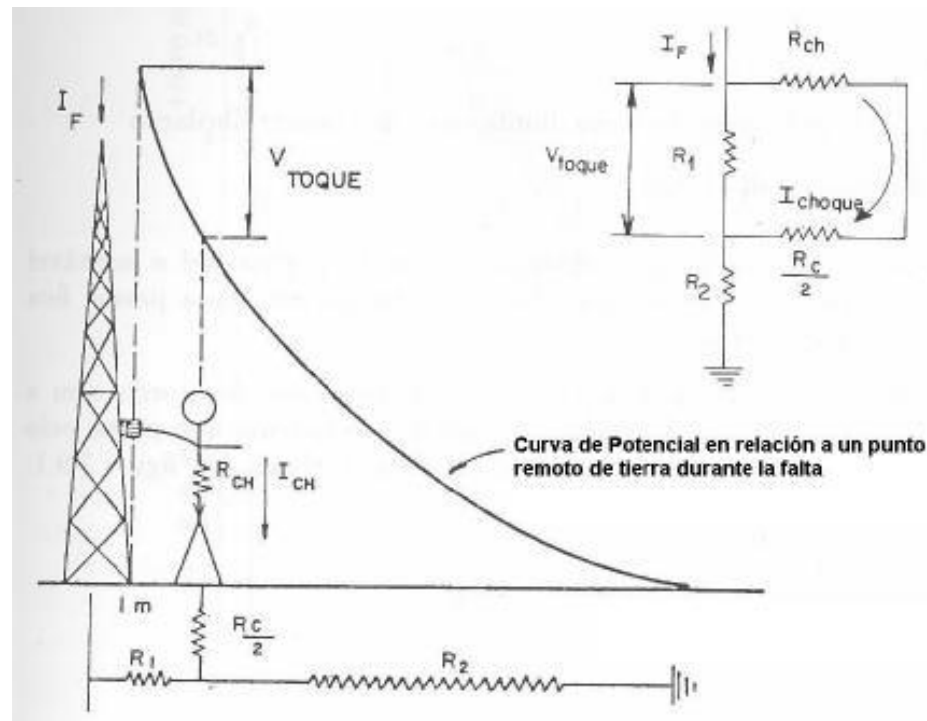
- **Tensión a tierra o Tierra Local (V_T):** Es la diferencia de potencial que se establece entre un electrodo de puesta a tierra y un punto a potencial cero, cuando a través del electrodo se difunde una corriente de defecto I_d .
- **Resistencia de puesta a tierra (R_T):** Para un electrodo o sistema 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 :

$$R_T = V_T / I_d$$

Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

La **tensión de toque** y la **tensión de paso** son dos parámetros que se definen para el diseño de las PaT 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.



Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

Considerando el circuito equivalente anterior:

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

Dónde:

- R_{ch} : resistencia del cuerpo humano = 1000 Ω
- R_c : resistencia de contacto $\cong 3\rho_S$
- ρ_S : resistividad superficial del suelo

Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

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

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

Con la corriente expresada en A y el tiempo en segundos.

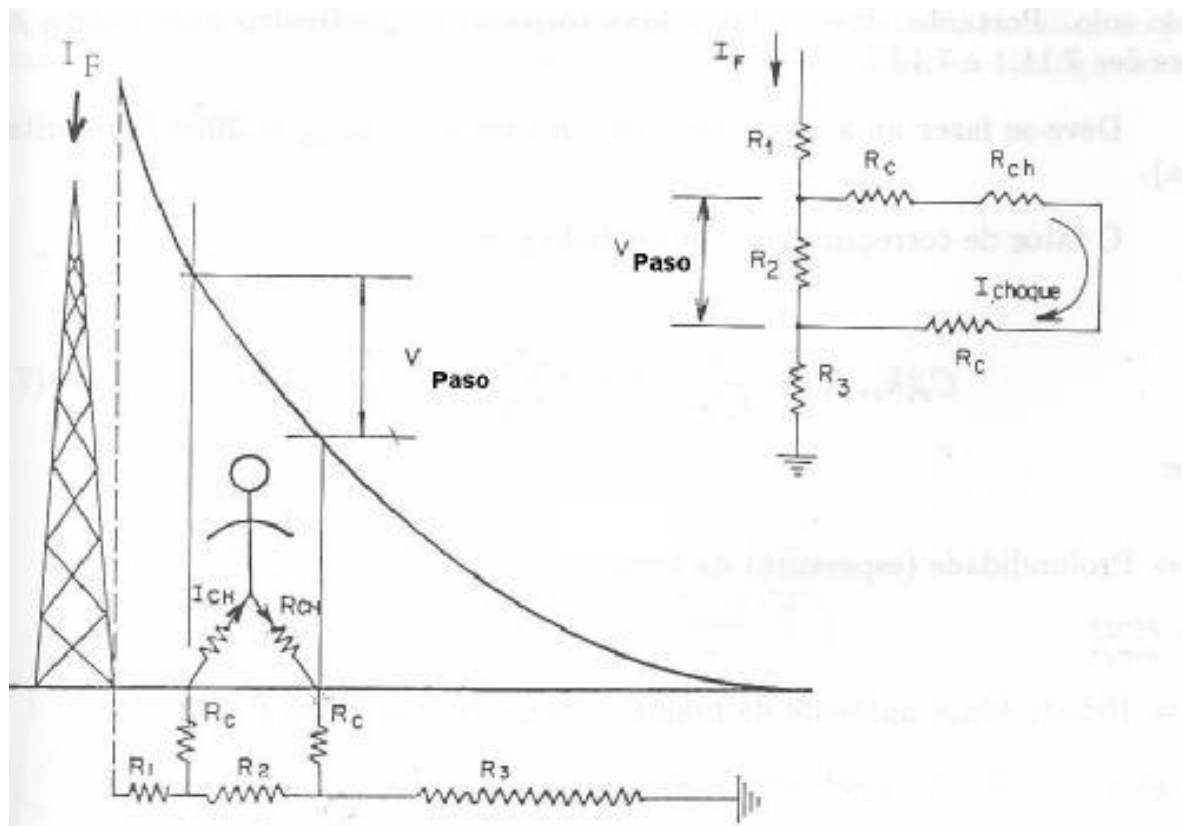
La tensión de toque máxima permitida será:

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

Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

- Tensión de paso:

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



Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

Razonando análogo a la tensión de toque:

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

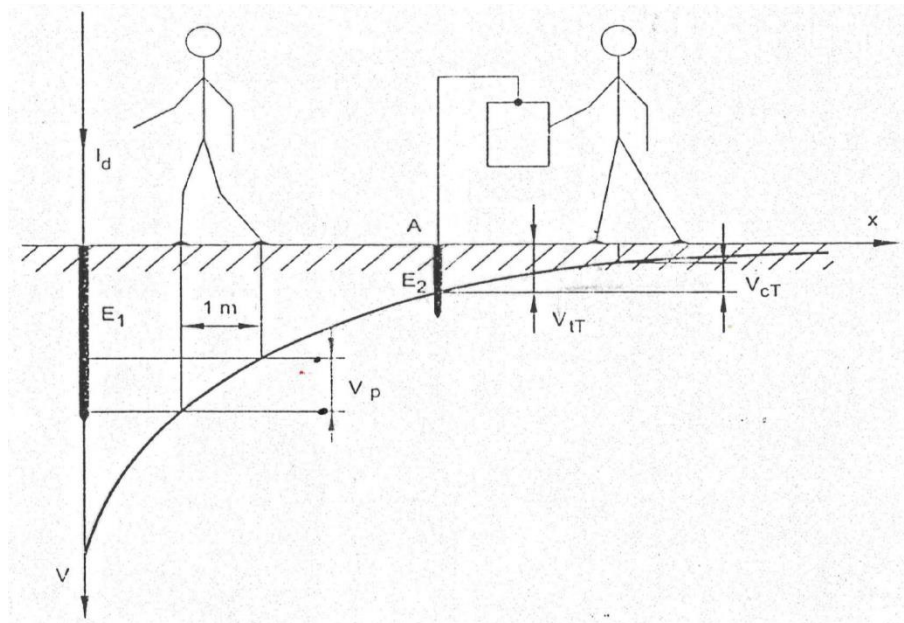
La tensión de paso máxima permitida será:

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

Parámetros que caracterizan a una instalación de PaT

- **Tensión transferida:**

Sean dos instalaciones de tierra distintas, con electrodos respectivos E_1 y E_2 , situados a una distancia d . Si ésta no es muy grande, al disiparse un defecto por E_1 , en el punto A ocupado por E_2 aparece un potencial que se transmite a todas las masas y elementos metálicos conectados a E_2 . La tensión a tierra transferida, es la tensión a tierra que aparece en las masas y elementos metálicos de una instalación de PaT como consecuencia de otra toma de tierra próxima.



Cálculo de resistencia de una PaT

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:

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

Cálculo de resistencia de una PaT

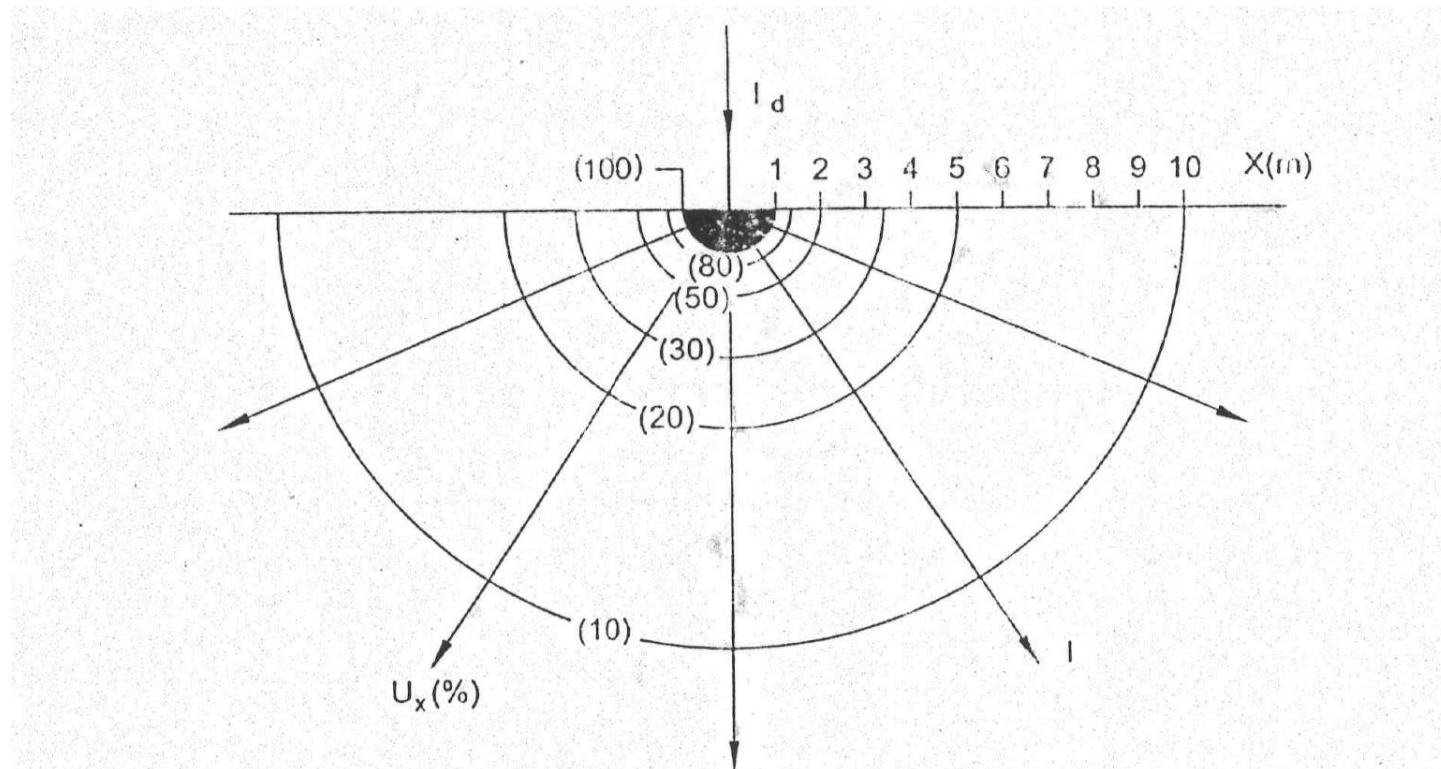
La resistividad del suelo depende de sus condiciones:

Naturaleza del suelo	Resistividad (Ωm) ^[1]
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	3.000 a 8.000
Calcáreo compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

[1] Son considerados “buenos conductores” los suelos con resistividad entre 50 y 100 Ωm .

Cálculo de resistencia de una PaT

- Caso ideal: un electrodo semiesférico:



Cálculo de resistencia de una PaT

- Caso real: se utiliza una configuración típica, en general:
 - **Jabalinas verticales** alineadas o dispuestas en triángulo o cuadrado.
 - **Conductores horizontales** dispuestos linealmente, en circunferencia o en otras disposiciones.

Cálculo de resistencia de una PaT

- Jabalina vertical:

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

Donde:

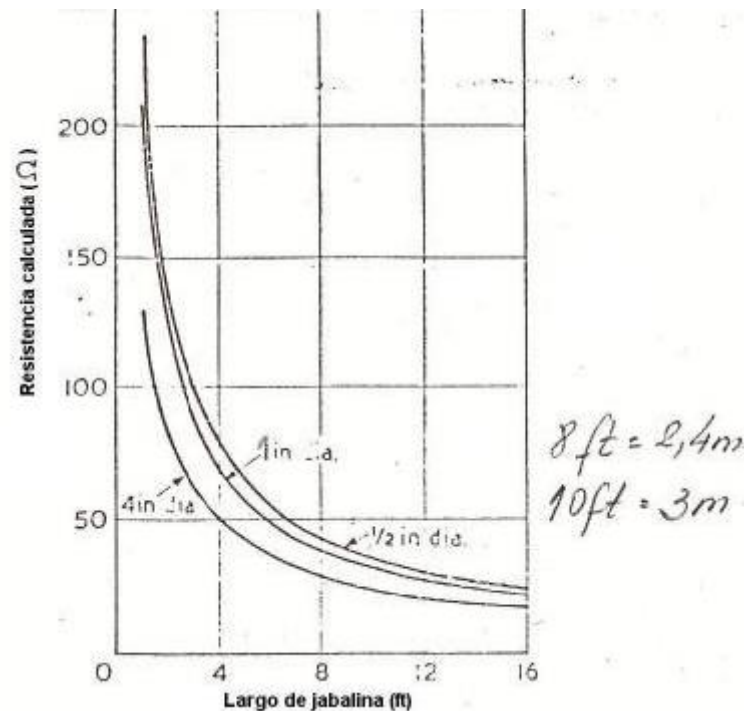
- ρ : resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)
- L : longitud de la jabalina (m)
- d : diámetro equivalente de la jabalina (m)

Para **reducir** R_T hay distintas opciones:

- Aumentar el largo de la jabalina
- Aumentar el diámetro de la jabalina
- Bajar la resistividad del suelo
- Instalar jabalinas en paralelo

Cálculo de resistencia de una PaT

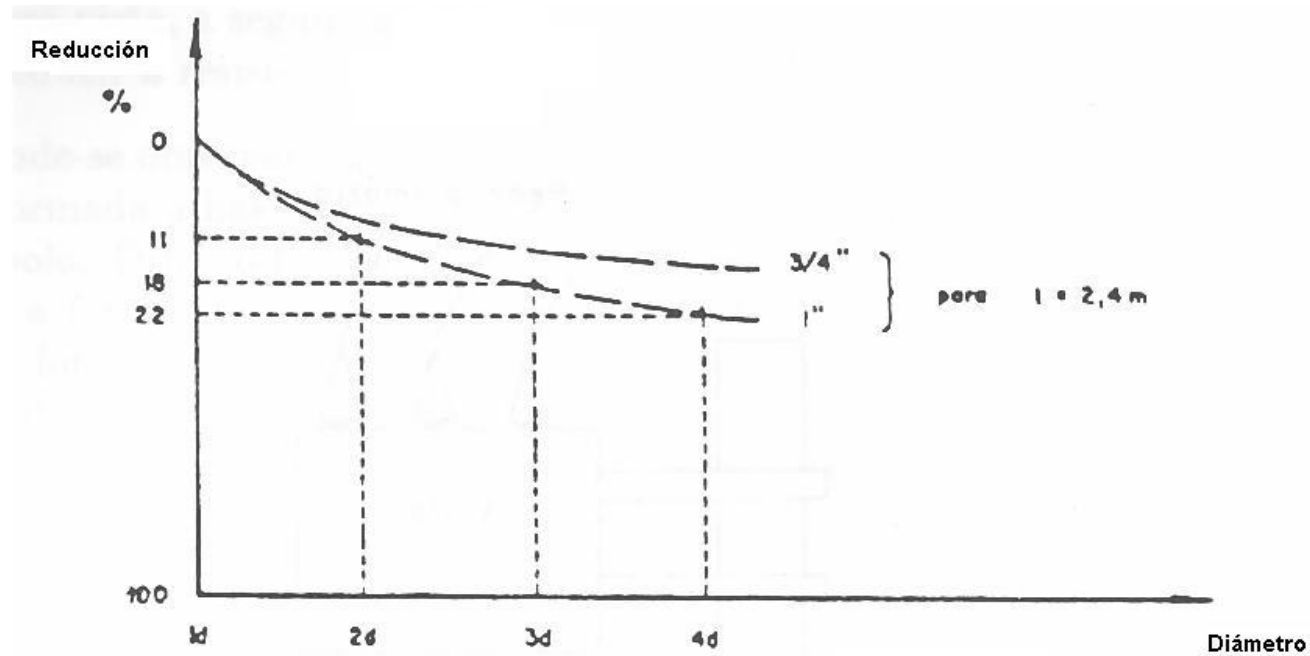
- Efecto de la longitud de la jabalina:



Donde se supuso suelo homogéneo de $1000 \Omega \cdot m$.
Se observa escasa mejora a partir de cierta longitud.

Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto del diámetro de la jabalina:

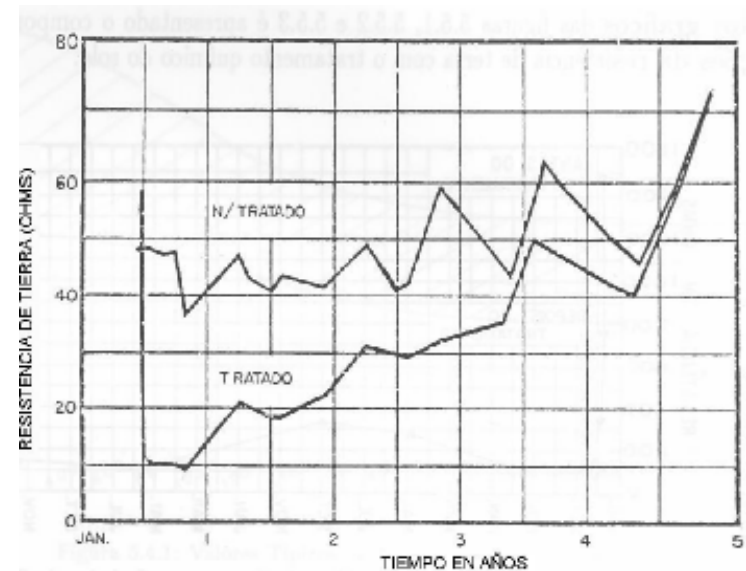
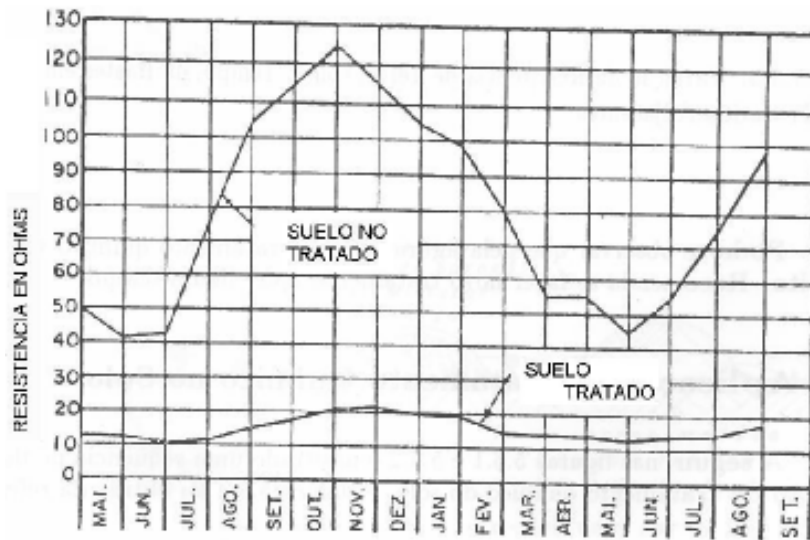


El efecto de aumentar el diámetro es marginal.

Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de variar la resistividad del suelo:

Puede lograrse mediante tratamiento del suelo (bentonita). Se logra un mejoramiento de las condiciones de resistividad pero decae con los años:



Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de variar la resistividad del suelo:

La bentonita es un material arcilloso que tiene gran capacidad de absorción de humedad del suelo circundante.

Esta propiedad ayuda a estabilizar la impedancia del electrodo a lo largo del año. Tiene baja resistividad - aproximadamente 5 ohm - metro y no es corrosiva.

Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

Instalar dos jabalinas en paralelo no resulta en una reducción al 50% de la resistencia:

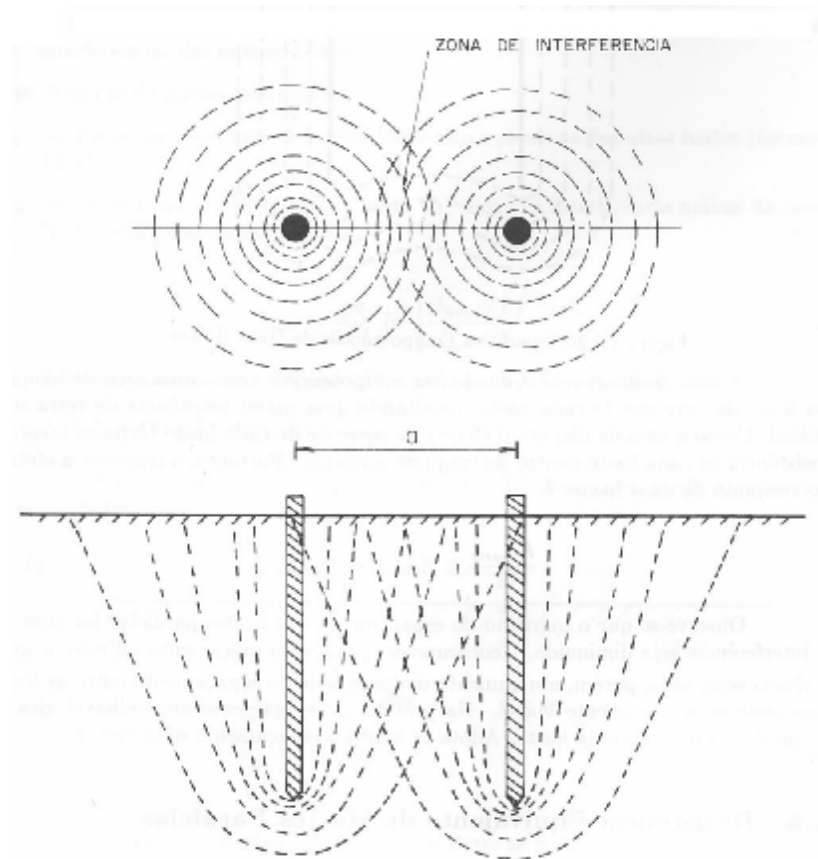
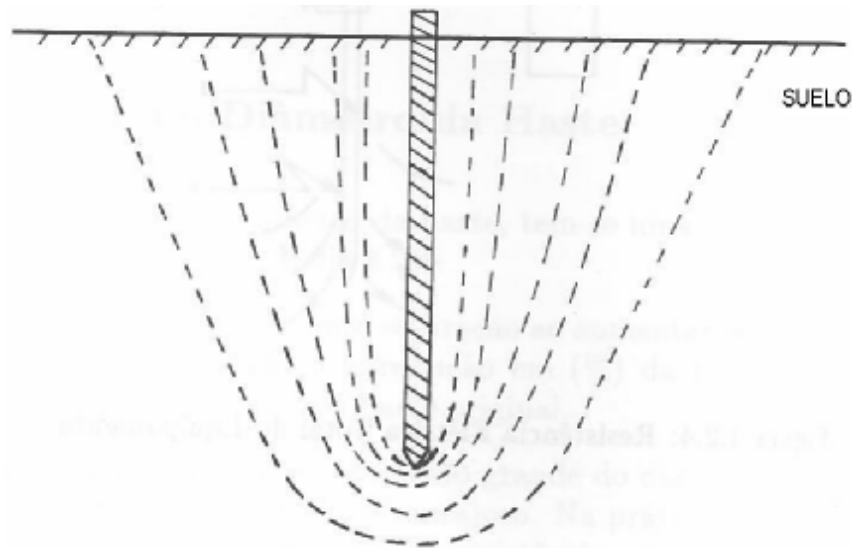
$$\frac{R_{1j}}{2} < R_{2j} < R_{1j}$$

Esto se debe a que existe una zona de interferencia donde se bloquea el flujo de corriente, este efecto puede atenuarse con mayor separación entre jabalinas (separación mínima: el largo de la jabalina).

Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

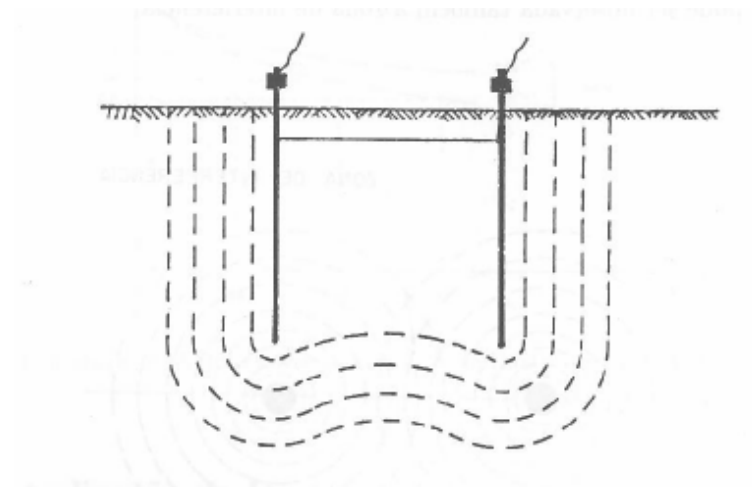
Interferencia:



Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

Superficies equipotenciales:



Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

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

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

Calculando entonces la resistencia del conjunto de n jabalinas en función de la de una jabalina.

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.

Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

Factor K de reducción, jabalinas alineadas:

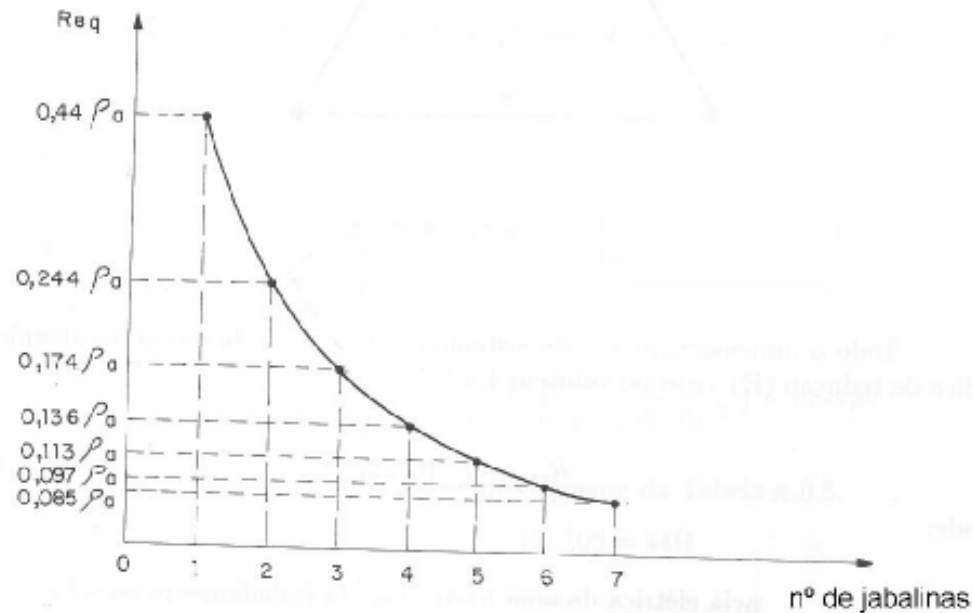
ESPACIAMIENTOS	2,5 m		3,0 m		4,0 m		5,0 m	
Número de jabalinas	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,248 ρ_a	0,564	0,244 ρ_a	0,555	0,239 ρ_a	0,543	0,235 ρ_a	0,535
3	0,178 ρ_a	0,406	0,174 ρ_a	0,395	0,168 ρ_a	0,381	0,164 ρ_a	0,372
4	0,141 ρ_a	0,321	0,136 ρ_a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

En este ejemplo: $L=2,4m$; $d=1/2''$; $R_{1j}=0,440 \rho_a$

Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

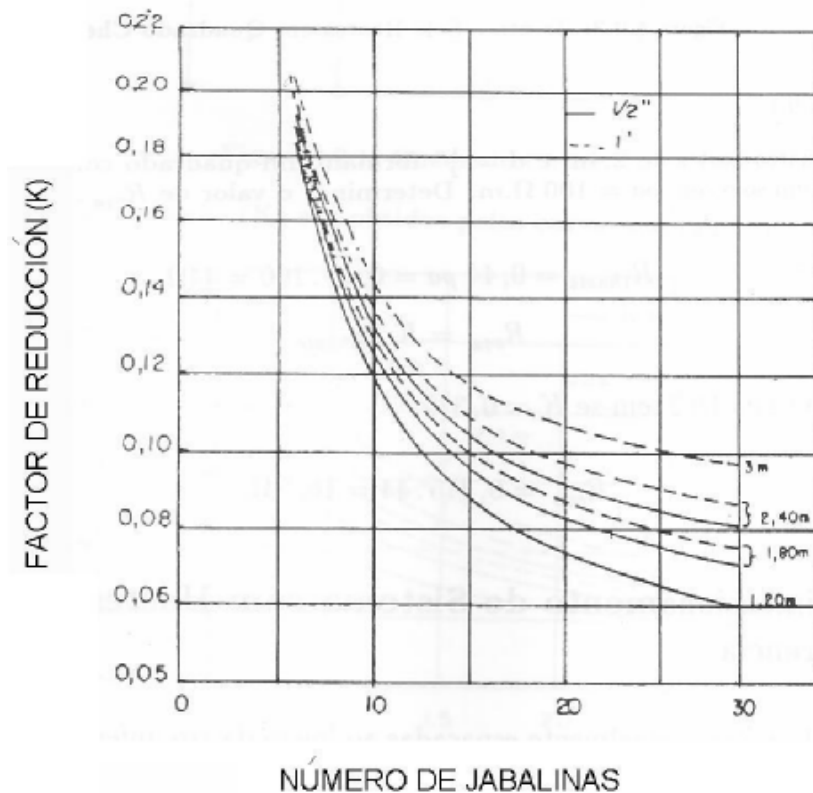
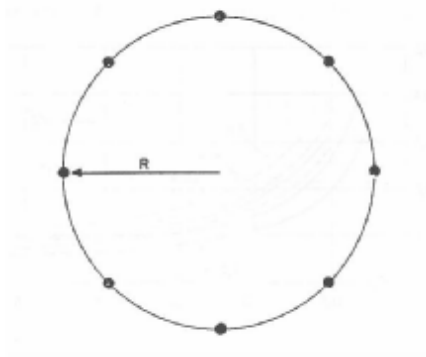
Si se grafica la evolución de la resistencia equivalente:



Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

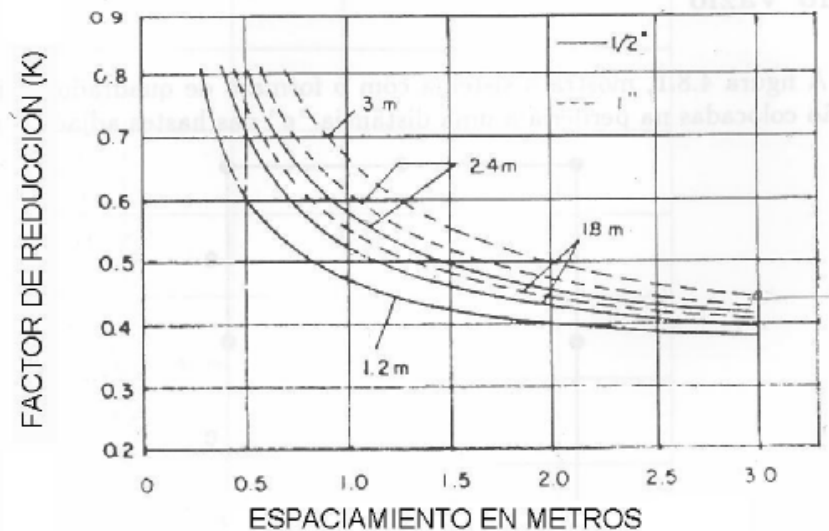
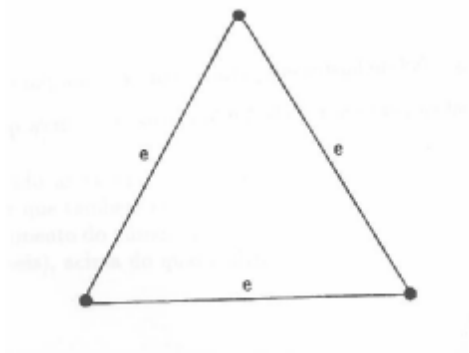
Si se opta por una distribución en circunferencia:



Cálculo de resistencia de una PaT

- Efecto de colocar varias jabalinas en paralelo:

Con jabalinas en **triángulo**:



Cálculo de resistencia de una PaT

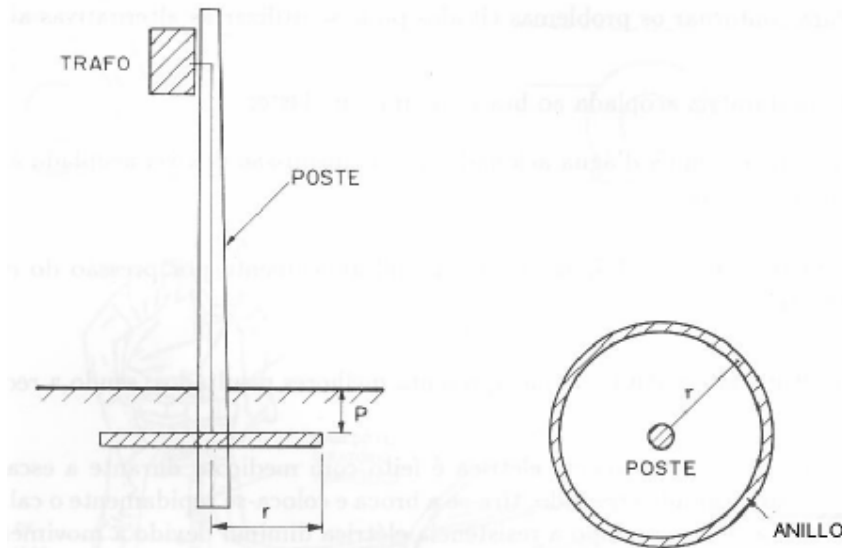
- Utilización de jabalinas profundas:

Puede reducirse la resistencia de PaT mediante jabalinas de gran longitud debido a:

- 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.

Cálculo de resistencia de una PaT

- Conductor horizontal dispuesto en circunferencia:



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

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

Cálculo de resistencia de una PaT

- Conductor horizontal dispuesto linealmente:

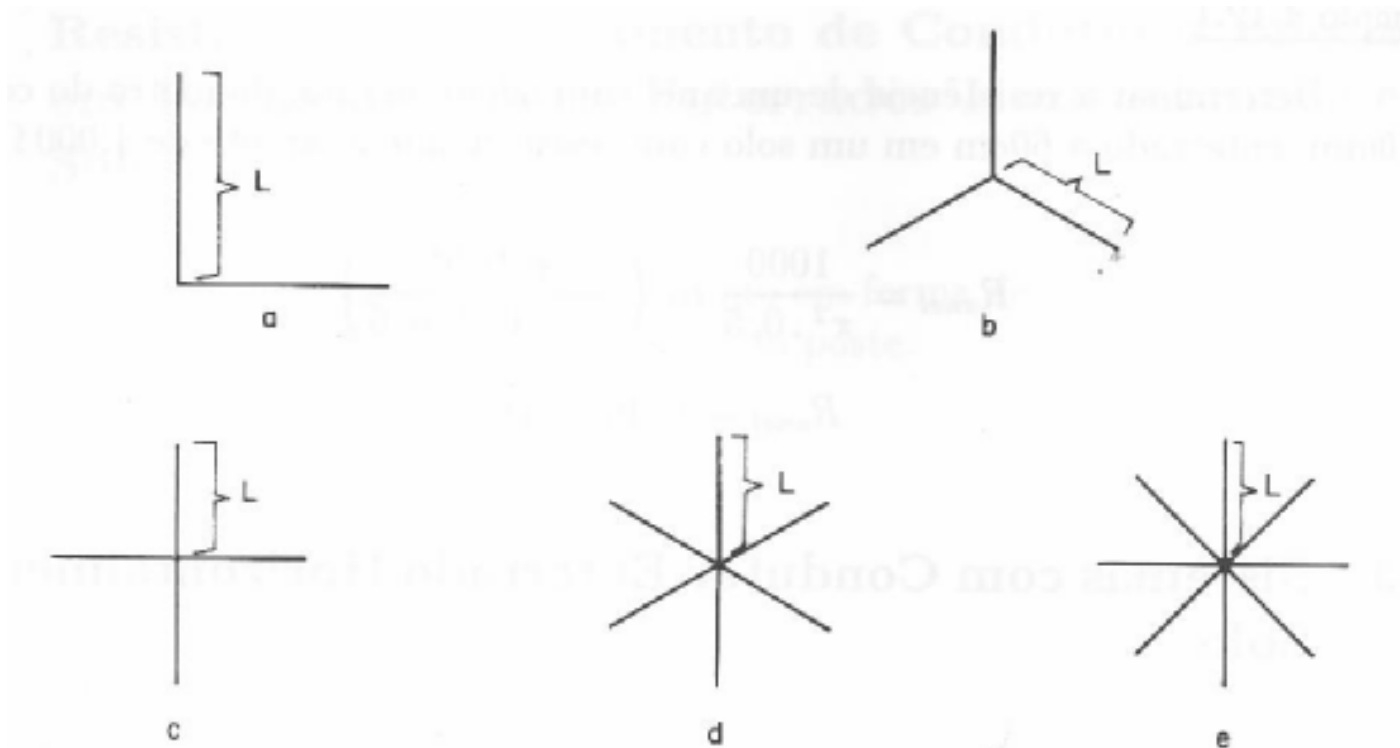
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[L_n \left(\frac{2L^2}{r \times p} \right) - 2 + \frac{2p}{L} - \left(\frac{p}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{p}{L} \right)^4 \right]$$

Donde:

- p : profundidad a la que está enterrado el conductor (m).
- L : longitud del conductor (m).
- r : radio equivalente del conductor (m).

Cálculo de resistencia de una PaT

- Conductor horizontal en otras disposiciones:



Existen fórmulas de cálculo de la resistencia equivalente, específicas para cada caso.