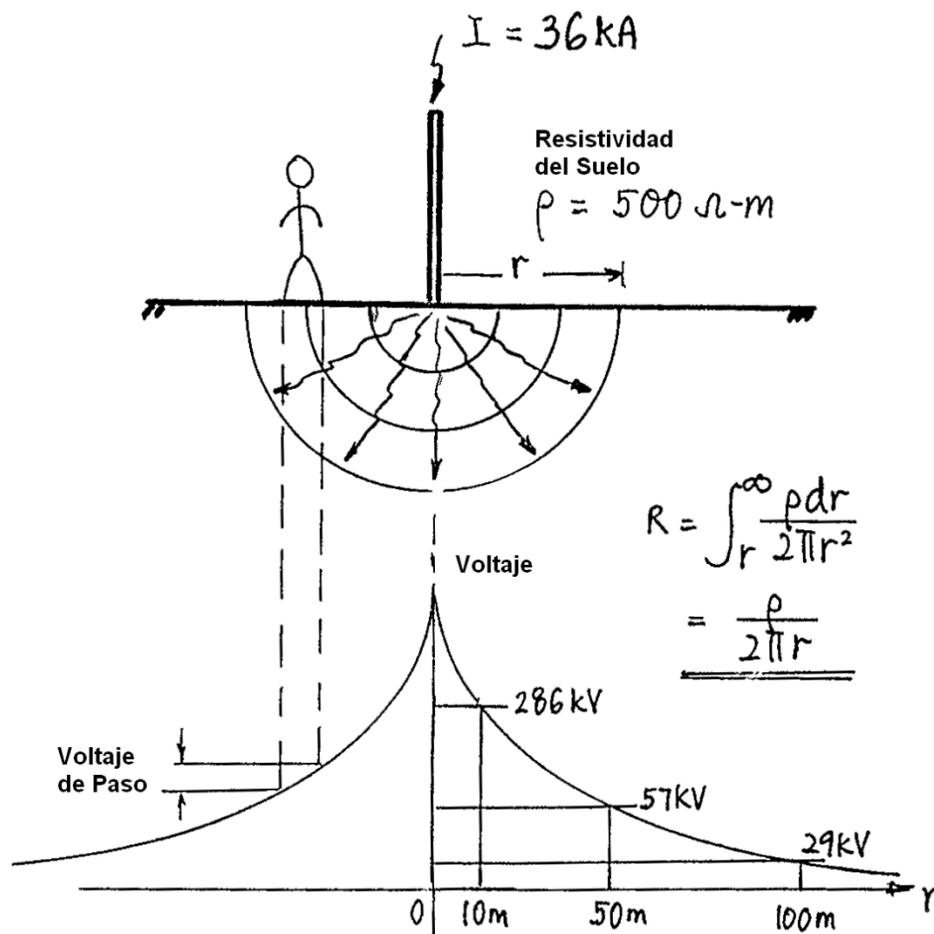


TENSION DE PASO EN TIERRA



Voltaje en la Distancia $r = V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r}$

$V(5\text{m}) = 573 \text{ kV}$

$V(100\text{m}) = 28.6 \text{ kV}$

$V(10\text{m}) = 286 \text{ kV}$

$V(200\text{m}) = 14.3 \text{ kV}$

$V(50\text{m}) = 57.3 \text{ kV}$

$V(1\text{m}) = 2.86 \text{ MV}$

ELECTRODO SEMIESFÉRICO

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA – POTENCIAL DE TIERRA

Simetría esférica:

I_d : corriente de descarga - se dispersa radialmente

$S(x)$: Área de las superficies equipotenciales - semiesferas de radio x

$$dR_x = \frac{\rho \cdot dx}{S(x)}$$

$$R_T = \int_a^\infty \frac{\rho \cdot dx}{2\pi \cdot x^2} = \left[-\frac{\rho}{2\pi \cdot x} \right]_a^\infty = \frac{\rho}{2\pi \cdot a}$$

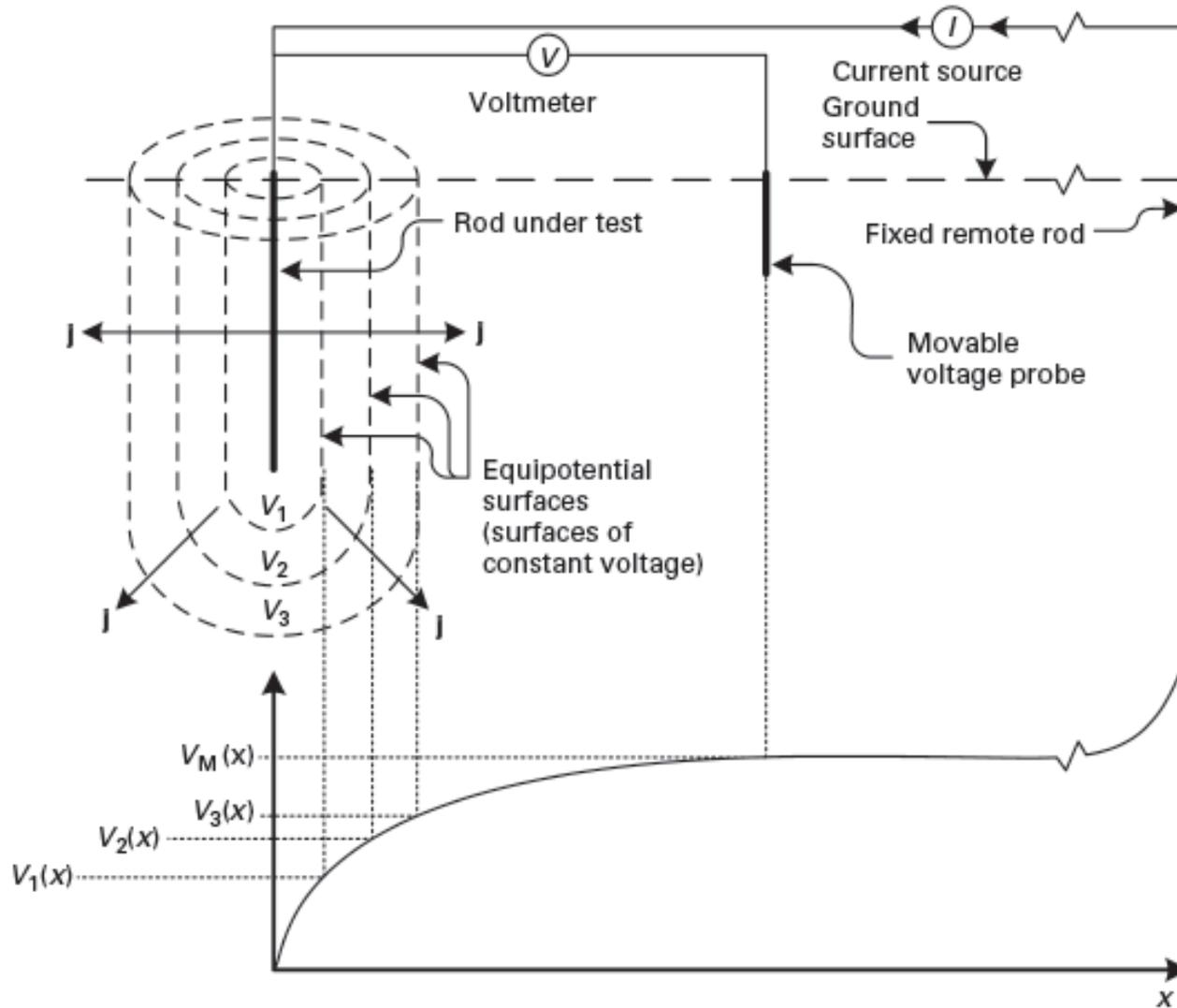
$$dV_x = I_d \cdot \frac{\rho \cdot dx}{S(x)}$$

$$V_{x_1^\infty} = \int_{x_1}^\infty I_d \cdot \frac{\rho \cdot dx}{2\pi \cdot x^2} = I_d \cdot \left[-\frac{\rho}{2\pi \cdot x} \right]_{x_1}^\infty = I_d \cdot \frac{\rho}{2\pi \cdot x_1}$$

$$V_T = V_{a^\infty} = I_d \frac{\rho}{2\pi \cdot a}$$

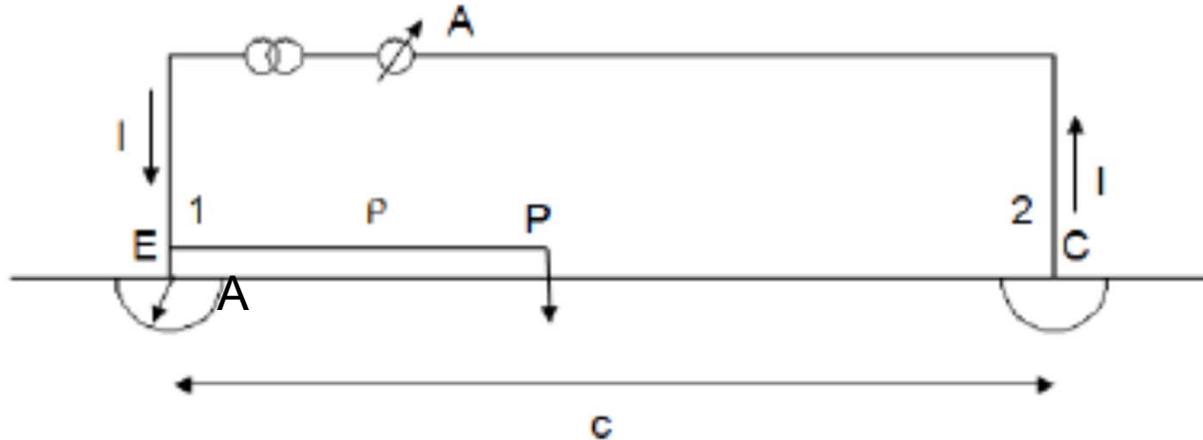
MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Método de la Caída de Potencial (Método de Tres Puntas)



MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Método de la Caída de Potencial (Método de Tres Puntas)



$$R_T = \frac{V_{A\infty} - V_{P\infty}}{I} \quad V_{A\infty} = V_{A\infty}(I) + V_{A\infty}(-I)$$

$$V_{A\infty} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{c-a} \right) \quad V_{P\infty} = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{c-p} \right)$$

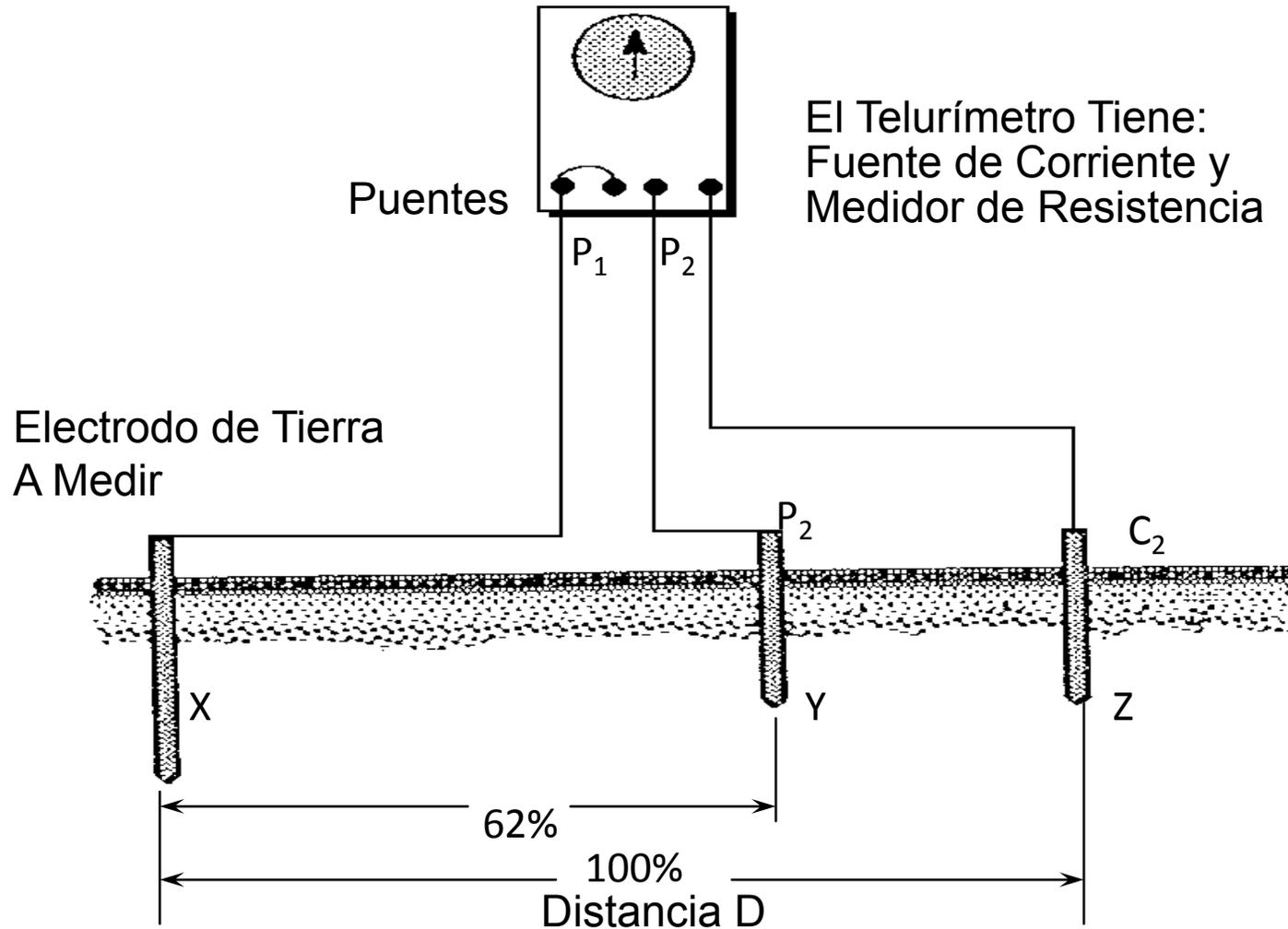
$$R_T = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{c-a} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} \right) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a} \left(1 - \frac{1}{c-a} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} \right) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

$$\left. \begin{array}{l} -\frac{1}{c-a} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} = 0 \\ a \ll c \end{array} \right\} -p(c-p) - c(c-p) + cp = 0$$

$$p = 0,62 \cdot c$$

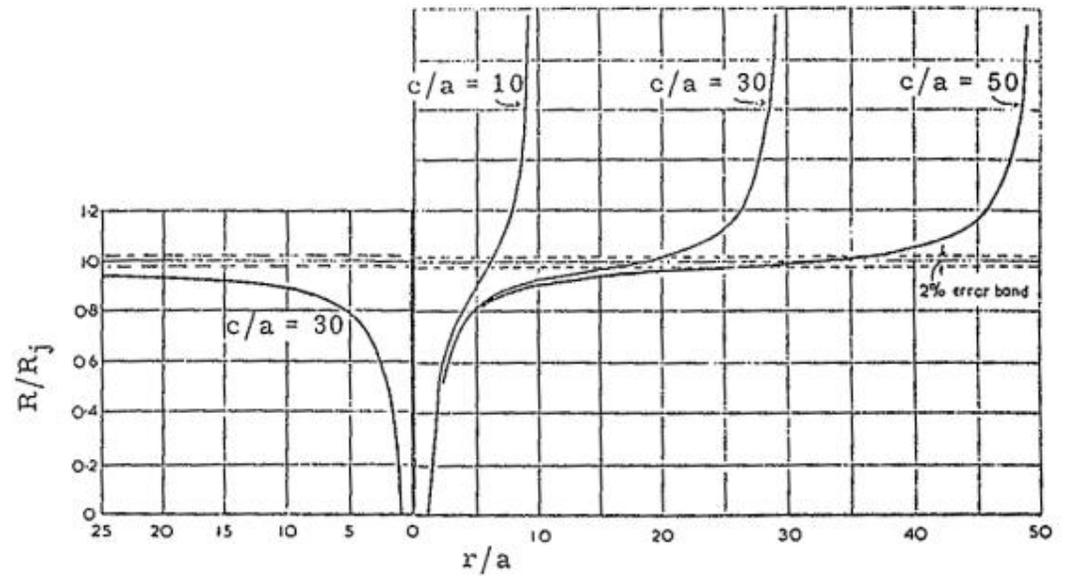
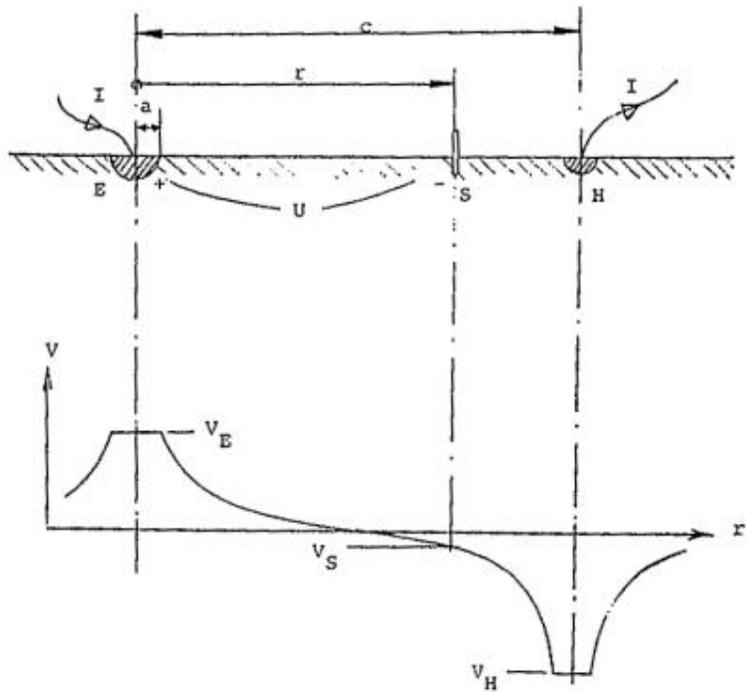
MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Método de la Caída de Potencial (Método de Tres Puntas)



INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE PICAS

Método de la Caída de Potencial (Método de Tres Puntas)



CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

$$R_T = \rho \cdot f(\textit{geometria})$$

Resistividad del suelo

TIPO DE SUELO
HUMEDAD
TEMPERATURA
USO DE MEJORADORES

Superficie de dispersión

TIPO DE ELECTRODO
DIMENSIÓN DEL ELECTRODO
DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS

RESISTIVIDAD DEL SUELO - valores típicos

Naturaleza del suelo	Resistividad - $\rho(\Omega m)$
Tierra	5 - 50
Arcilla	4 - 100
Arena y grava	50 - 1000
Piedra Caliza (superficial)	100 - 10000
Piedra caliza	5 - 4000
Roca sedimentaria	5 - 100
Arenisca	20 - 2000
Granito	900 - 1100
Pizarra	600 - 5000

RESISTIVIDAD DEL SUELO – Influencia de la humedad

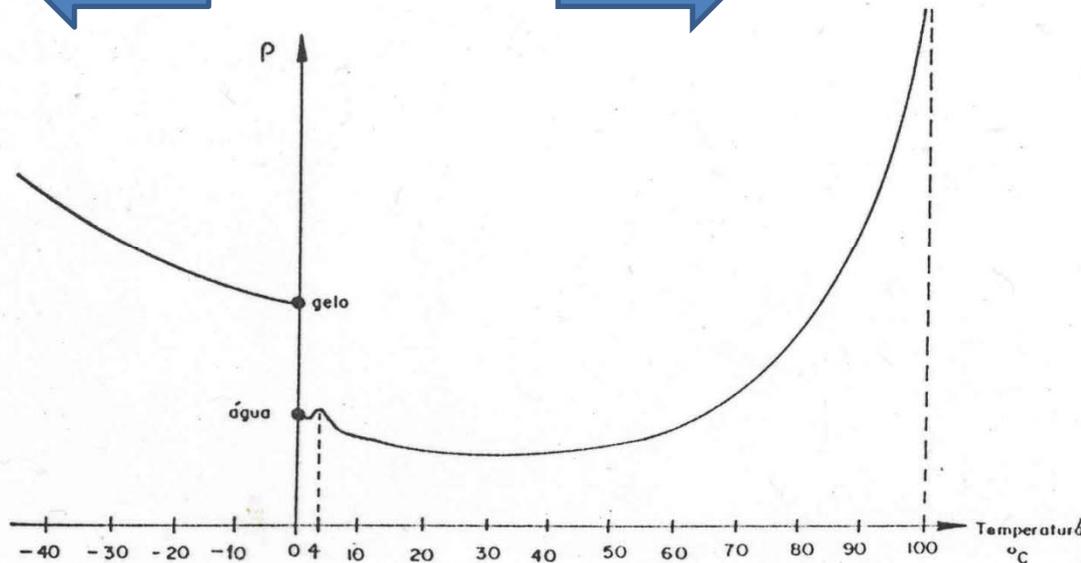
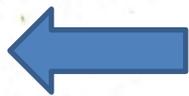
- conducción de cargas eléctricas predominantemente iónica.
- mayor porcentaje de humedad hace que las sales presentes en el suelo se disuelvan, formando un medio favorable para la conducción de la corriente iónica.

Índice de humedad (% en peso)	Resistividad de suelo arenoso ($\Omega.m$)
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

RESISTIVIDAD DEL SUELO – Influencia de la temperatura

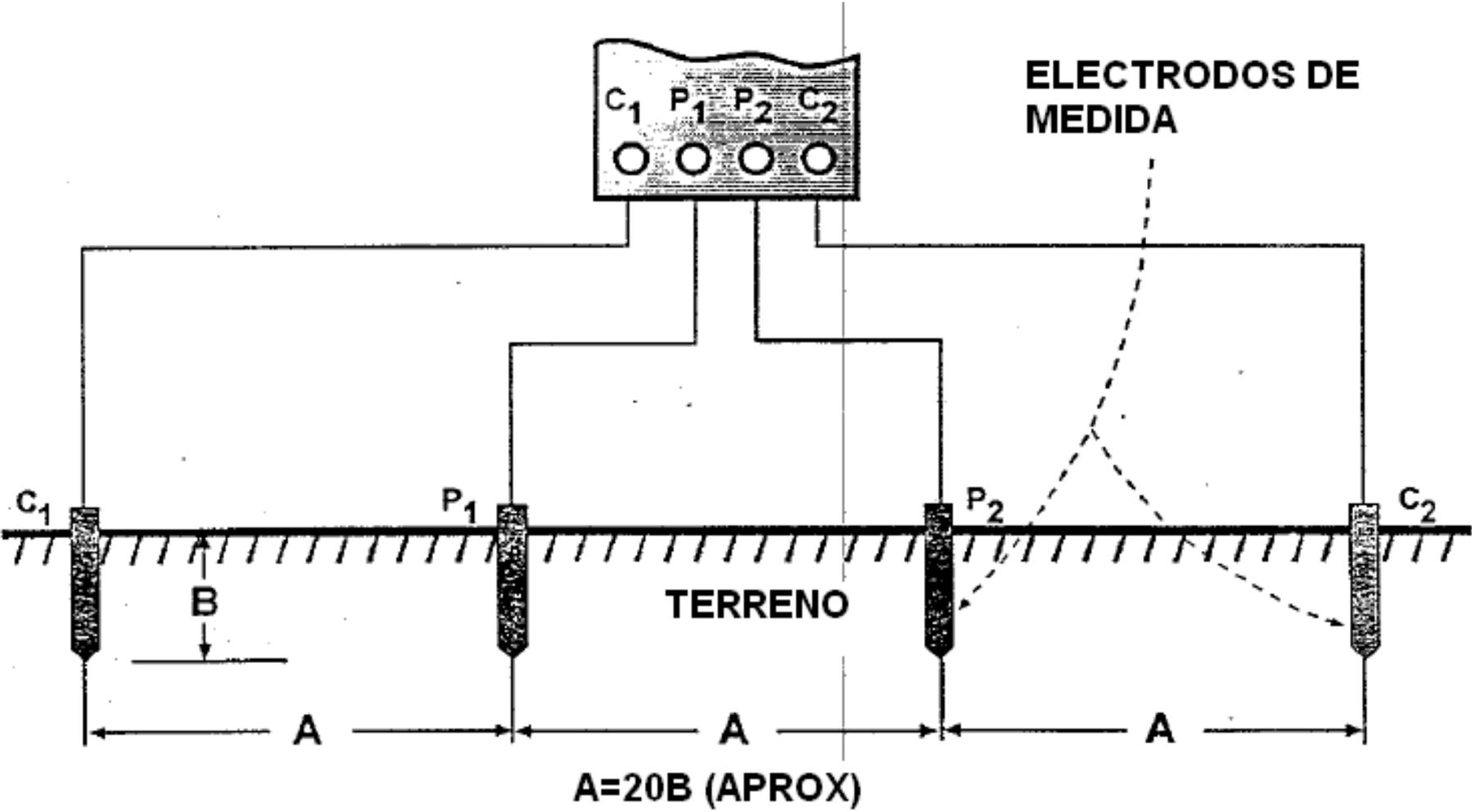
Baja la movilidad

Baja el porcentaje de humedad

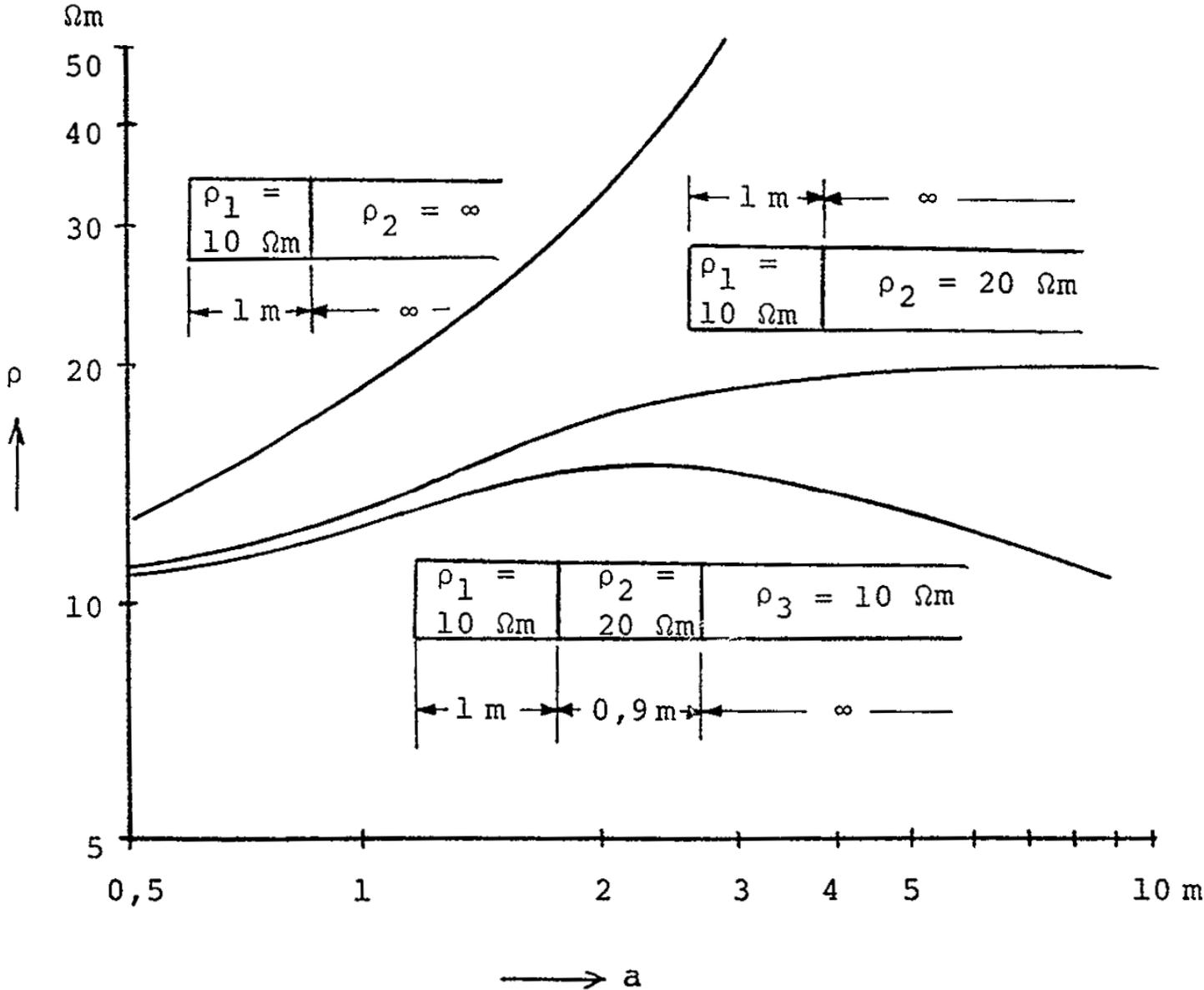


Temperatura (°C)	Resistividad de suelo arenoso (Ωm)
20	72
10	99
0 (agua)	138
0 (hielo)	300
-5	790
-15	3.300

Método de Wenner para medida de resistividad



Medida de la resistividad y estructura del terreno



ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA TOMA DE TIERRA

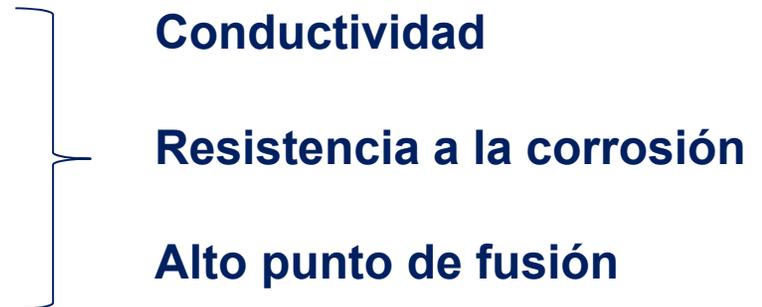
ELECTRODOS DE TIERRA

TIPOS

- Cintas o conductor desnudo multifilar
- Caños o barras (picas o jabalinas)
- Placas

MATERIALES

- Cobre
- Acero galvanizado en caliente
- Acero inoxidable
- Acero con recubrimiento de cobre



Comportamiento electroquímico de metales de interconexión

	MAGNESIUM	ALUMINUM	ZINC	IRON	CADMIUM	NICKEL	TIN	LEAD	COPPER	SILVER	PALLADIUM	GOLD
MAGNESIUM	0.00	-0.71	-1.61	-1.93	-1.97	-2.12	-2.23	-2.24	-2.71	-3.17	-3.36	-3.87
ALUMINUM	0.71	0.00	-0.90	-1.22	-1.26	-1.41	-1.52	-1.53	-2.00	-2.46	-2.65	-3.16
ZINC	1.61	0.90	0.00	-0.32	-0.36	-0.51	-0.63	-0.64	-1.10	-1.56	-1.75	-2.26
IRON	1.93	1.22	0.32	0.00	-0.04	-0.19	-0.30	-0.31	-0.78	-1.24	-1.43	-1.94
CADMIUM	1.97	1.26	0.36	0.04	0.00	-0.15	-0.27	-0.28	-0.74	-1.20	-1.39	-1.90
NICKEL	2.12	1.41	0.51	0.19	0.15	0.00	-0.11	-0.12	-0.59	-1.05	-1.24	-1.75
TIN	2.23	1.52	0.63	0.30	0.27	0.11	0.00	-0.01	-0.47	-0.94	-1.12	-1.64
LEAD	2.24	1.53	0.64	0.31	0.28	0.12	0.01	0.00	-0.46	-0.93	-1.11	-1.63
COPPER	2.71	2.00	1.10	0.78	0.74	0.59	0.47	0.46	0.00	-0.46	-0.65	-1.16
SILVER	3.17	2.46	1.56	1.24	1.20	1.05	0.94	0.93	0.46	0.00	-0.19	-0.70
PALLADIUM	3.36	2.65	1.75	1.43	1.39	1.24	1.12	1.11	0.65	0.19	0.00	-0.51
GOLD	3.87	3.16	2.26	1.94	1.90	1.75	1.64	1.63	1.16	0.70	0.51	0.00

← LESS NOBLE →

↑ LESS NOBLE ↓

Noble Metal Table: Accelerated corrosion can occur between unprotected joints if the algebraic difference in atomic potential is greater than ± 0.3 volts.

FOTOS - EJECUCIÓN



FOTOS - EJECUCIÓN



FOTOS - EJECUCIÓN



CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

JABALINA VERTICAL

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

Donde:

L : es la longitud de la jabalina (m),

d : es el diámetro equivalente de la jabalina (m)

ρ : resistividad de suelo homogéneo

R_T 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

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

JABALINA VERTICAL – Influencia del largo

$$R_T = \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right)$$

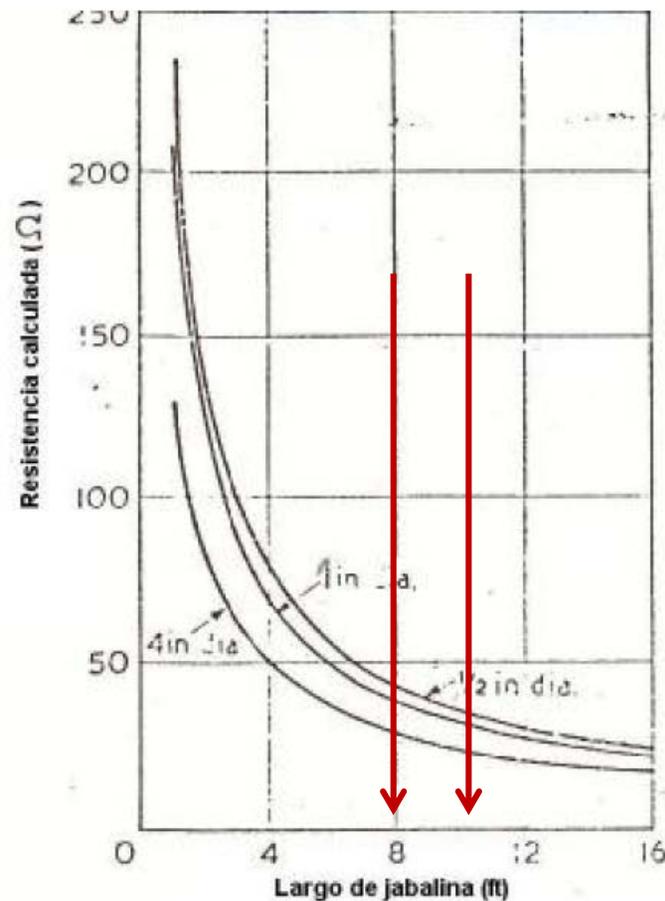
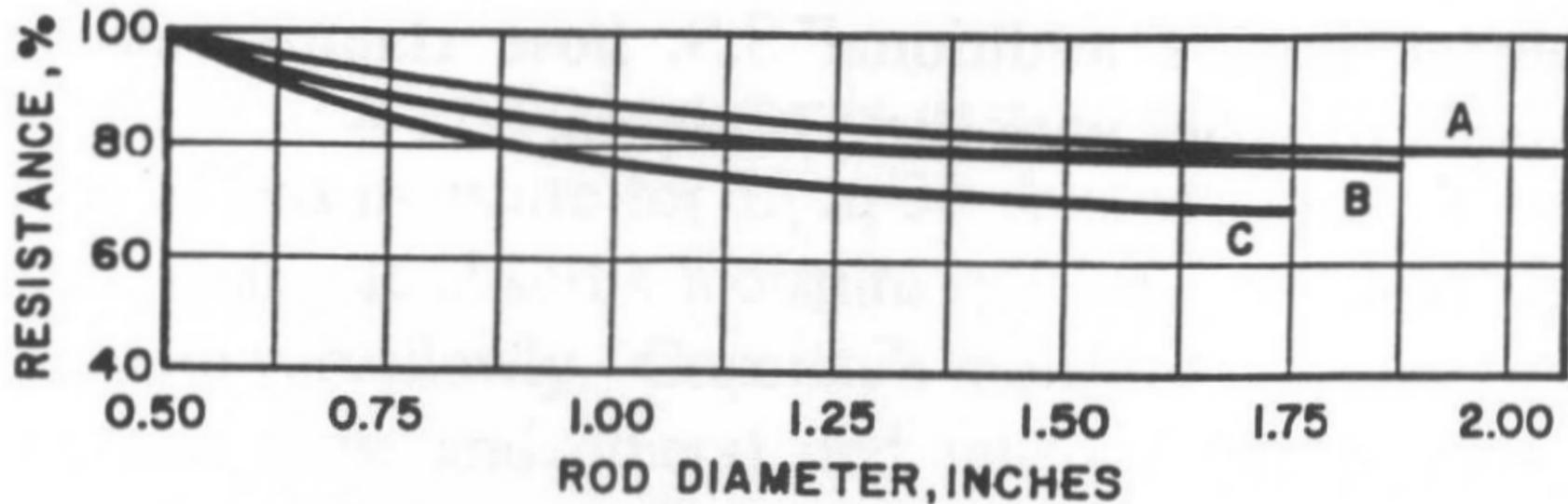


Fig. 3. Efecto del largo de la jabalina en el cálculo de la resistencia para suelo uniforme con resistividad 10000 ohm.cm

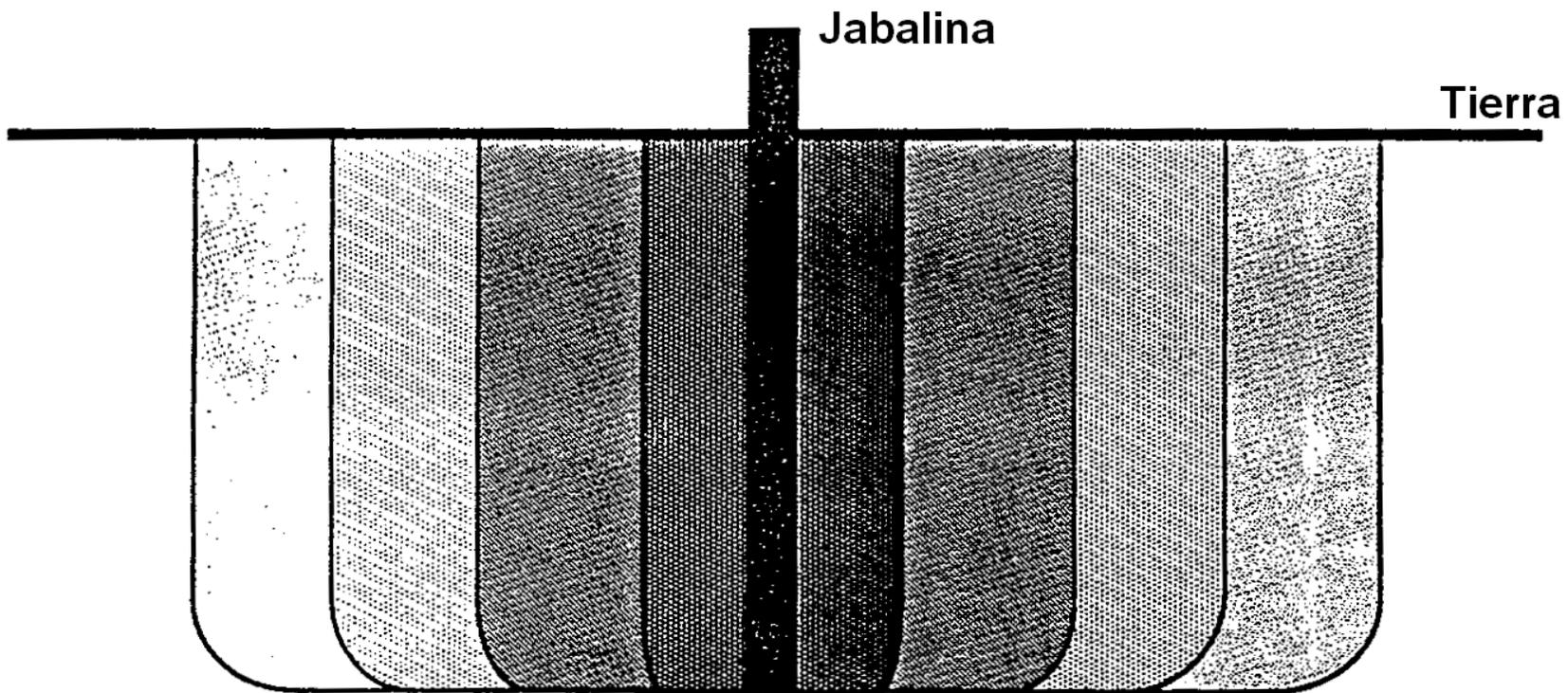
CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

JABALINA VERTICAL – Influencia del diámetro



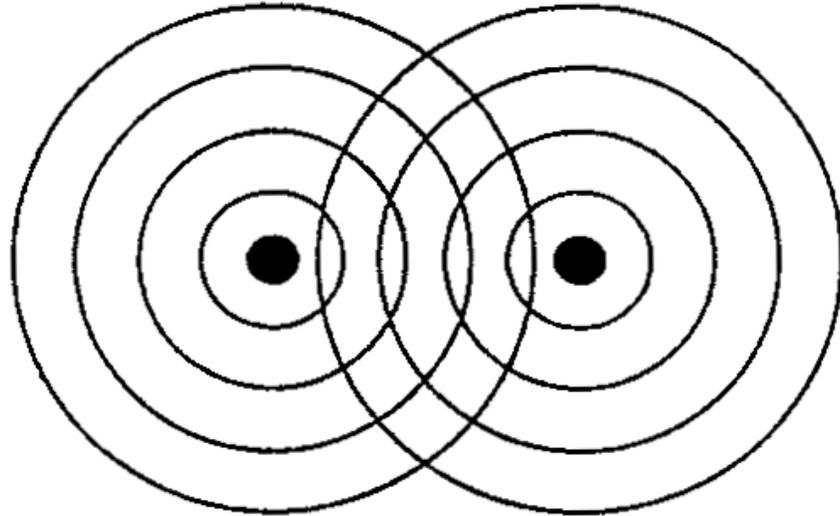
Three tests by different people (A, B & C.) Each took a 1/2-inch Ground Rod which was used as a reference and set to 100%. The Rod size was increased and different results are due to ground conductivity variations.

Esfera de influencia: Vista lateral



Esfera de influencia: Vista superior

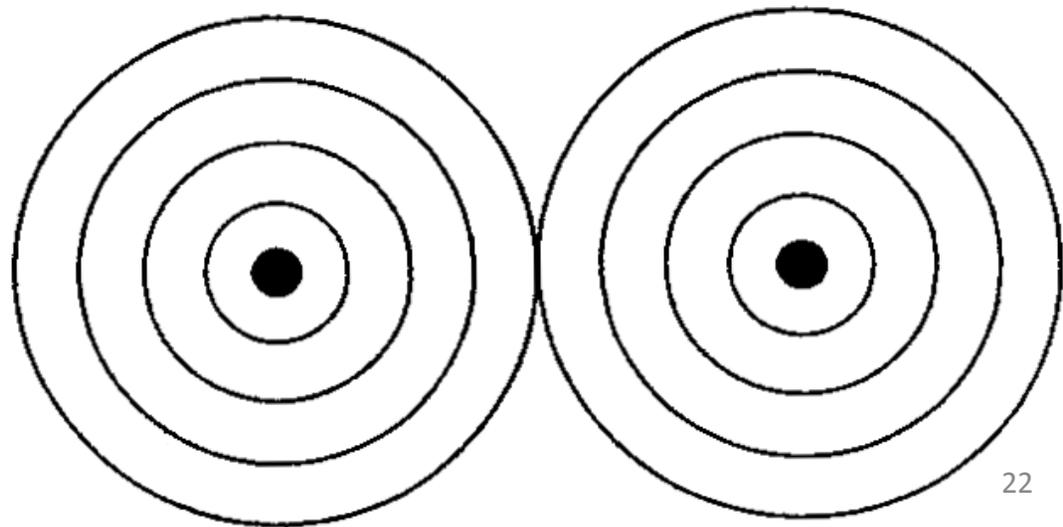
**Espaciamiento
Incorrecto**



**Espaciamiento
Correcto**

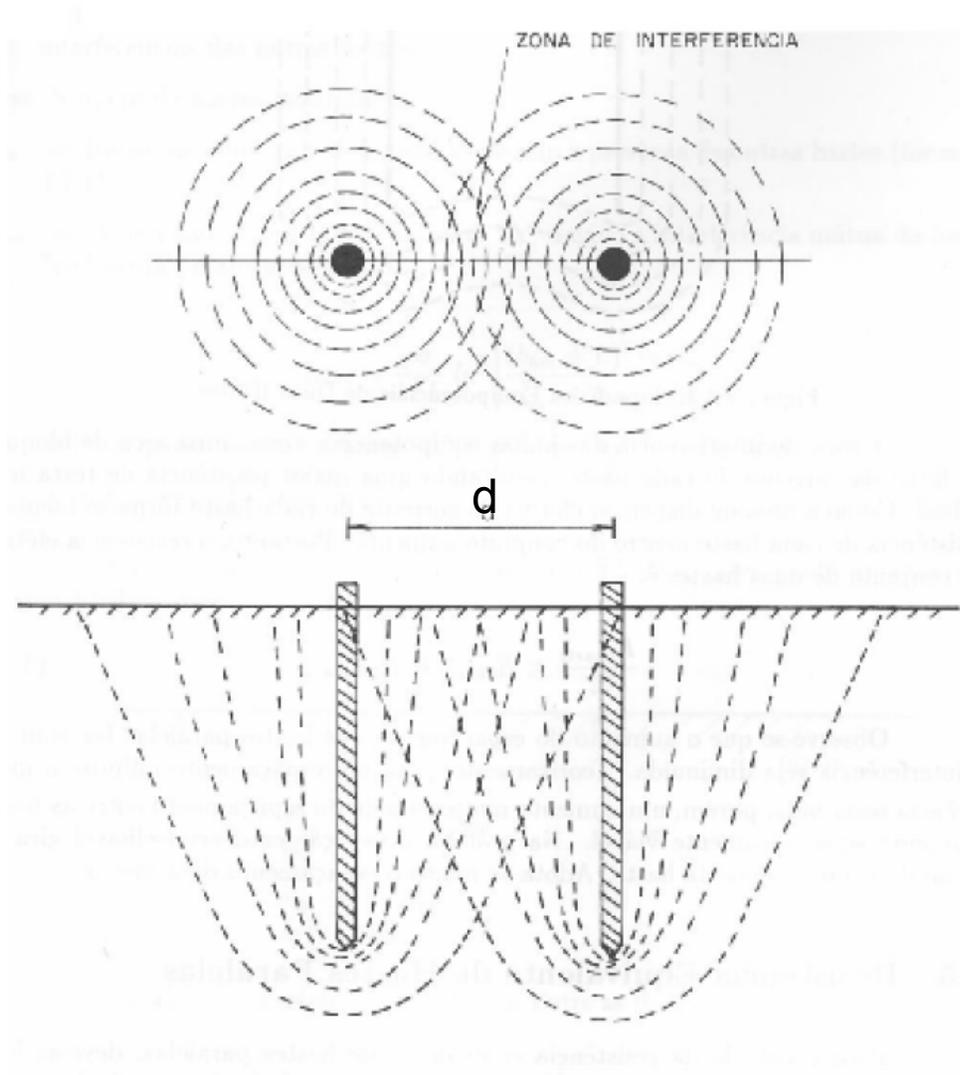
**Electrodo de 2,5 m - Tiene un Radio de
Influencia de 2,5 m**

**Electrodo de 3 m - Tiene un Radio de
Influencia de 3 m**

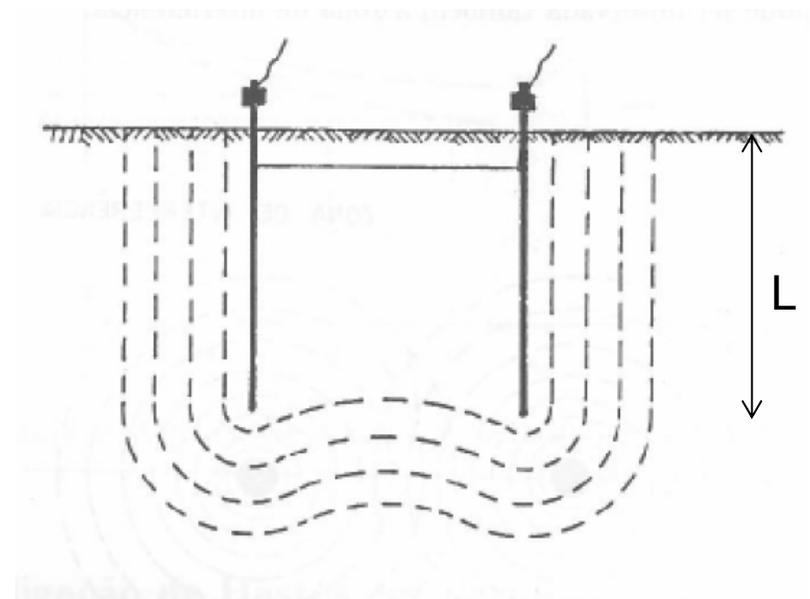


CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

JABALINAS VERTICALES EN PARALELO



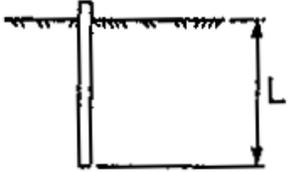
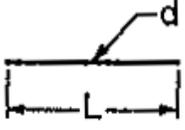
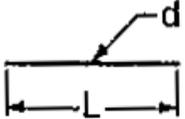
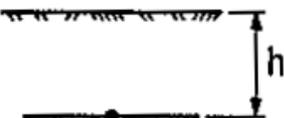
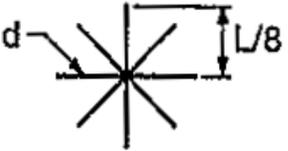
$$\frac{R_{T_1J}}{2} < R_{T_2J} < R_{T_1J}$$
$$d > L$$



Fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra (1)

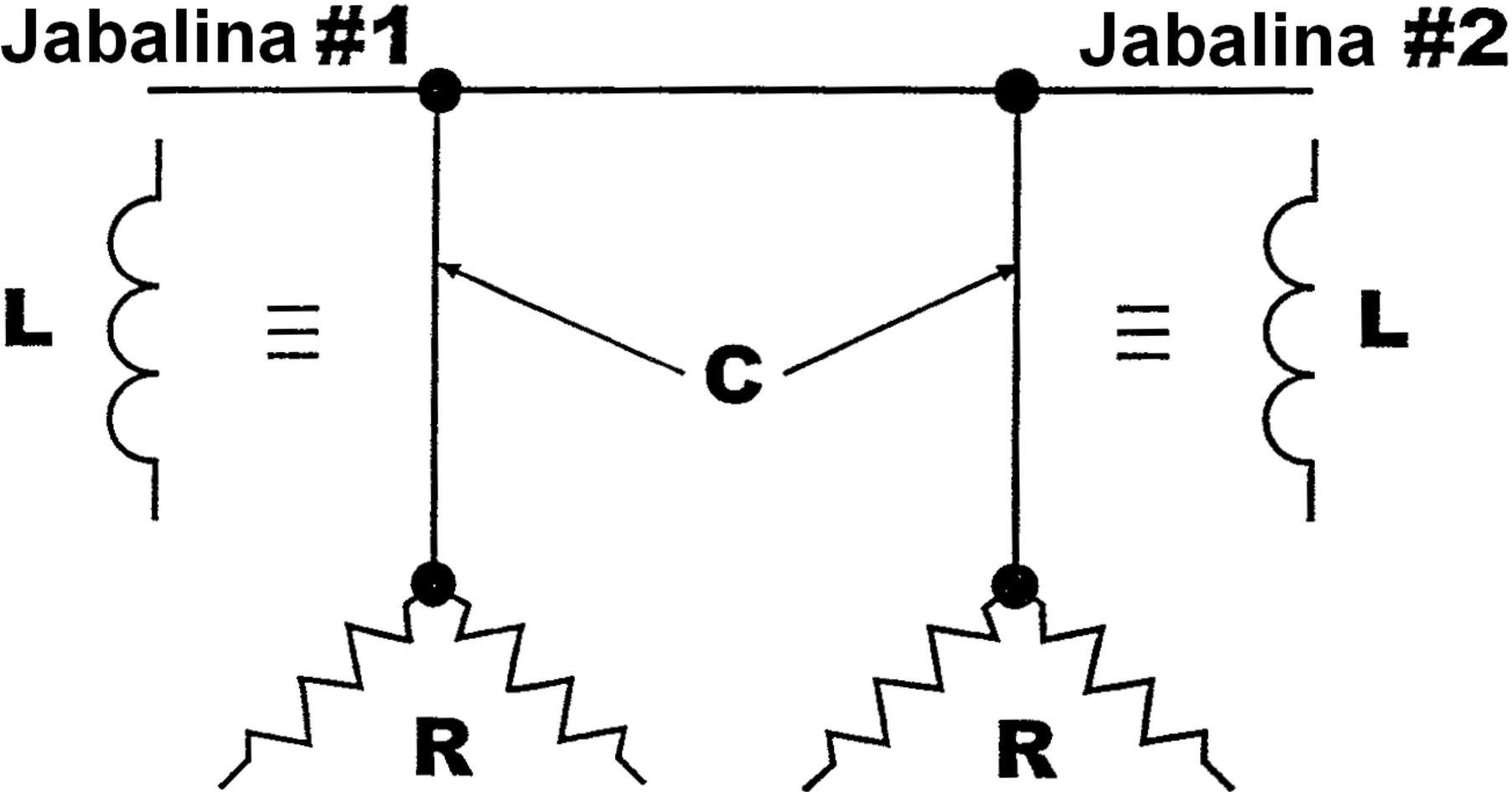
	Semiesfera, radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
	Un electrodo de tierra, largo L, radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	Dos electrodos de tierra s>L, espaciamiento s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
	Alambre horizontal enterrado, largo 2L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
	Anillo de alambre de diámetro D, diámetro de alambre d y profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
	Plato horizontal enterrado, radio a, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

Fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra (2)

Tipo de Electrodo	Vista Lateral	Vista de Arriba	Fórmula	Ref.
Electrodo Vertical en Superficie			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1.36 \cdot d}$	①
Conductor en Superficie			$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{1.36 \cdot d}$	①
Conductor Enterrado			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1.85 \cdot hd}$	②
Ocho Conductores Enterrados			$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2 \cdot 10^4}{2.69 \cdot hd}$	②
Tabla de Ref.: ① $d \ll L$ ② $d \ll 4h \ll L/n$ ③ $d \ll a \ll L/n$				

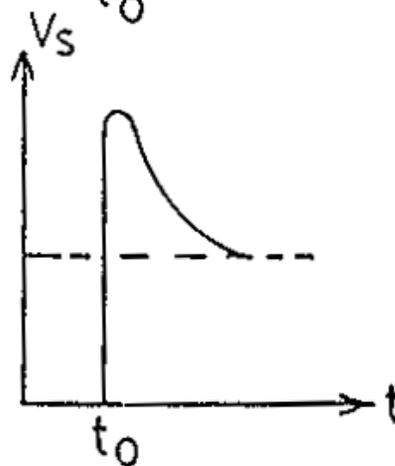
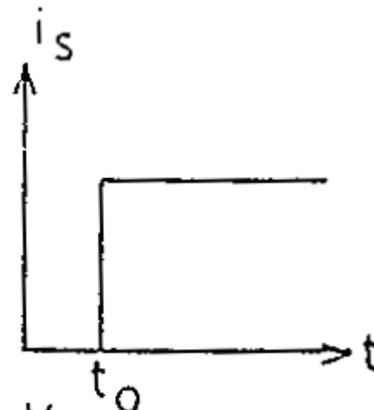
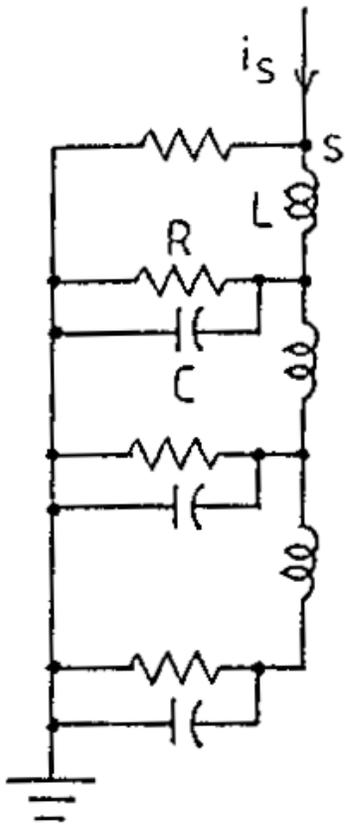
Nota: El largo del material enterrado es siempre el mismo.

Modelo dinámico de la puesta a tierra



Electrodos de Tierra – Respuesta a Transitorios (Modelo Lineal) (1)

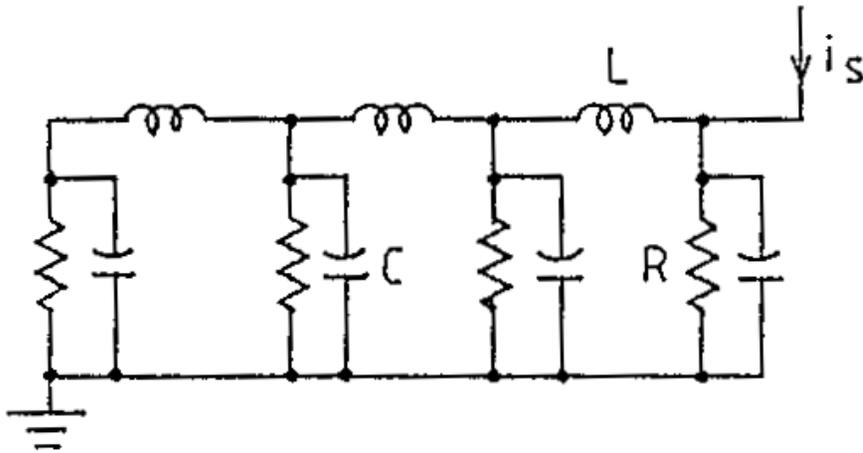
Electrodo Clavado Vertical



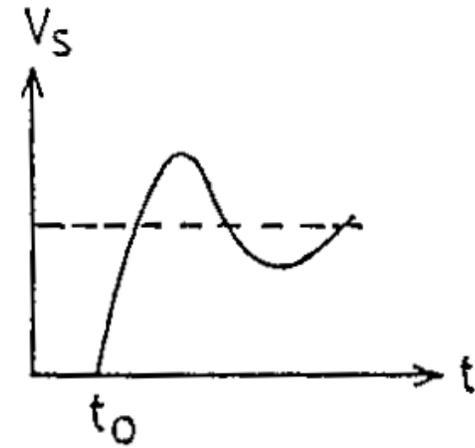
L (inductancia) = Alta
 C (capacidad) = Baja
 i_s = Fuente de corriente tipo escalón
 V_s = Respuesta en tensión al escalón de corriente

Electrodos de Tierra – Respuesta a Transitorios (Modelo Lineal) (2)

Conductor Horizontal Enterrado

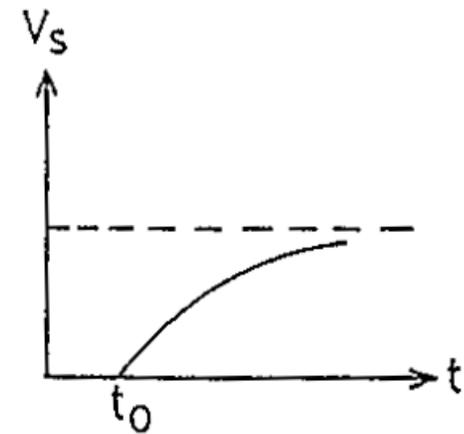
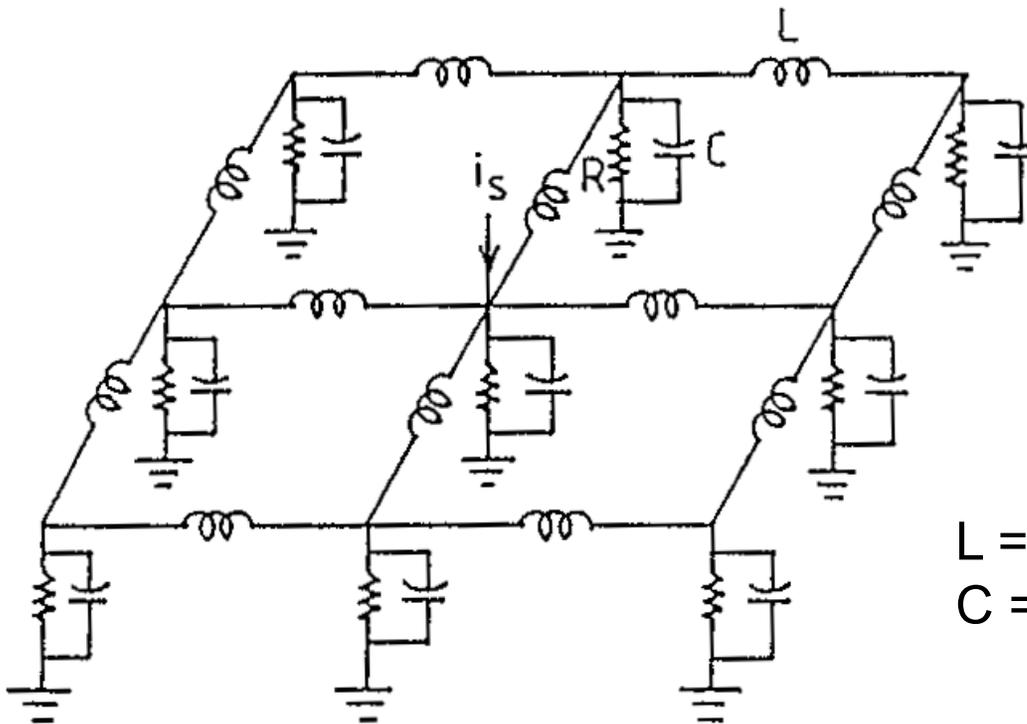


L = Alta
C = Alta

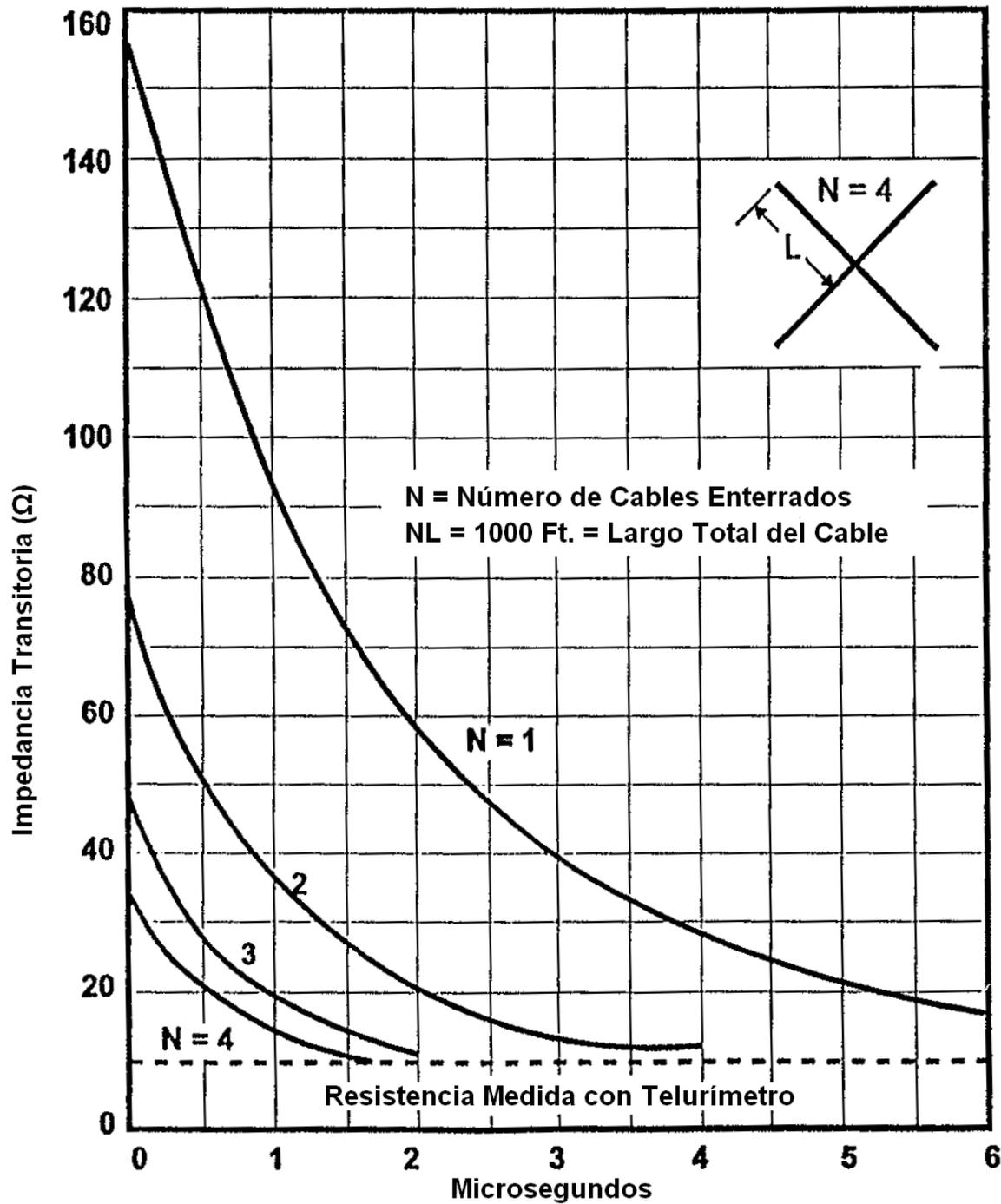


Electrodos de Tierra – Respuesta a Transitorios (Modelo Lineal) (3)

Malla de Tierra Enterrada

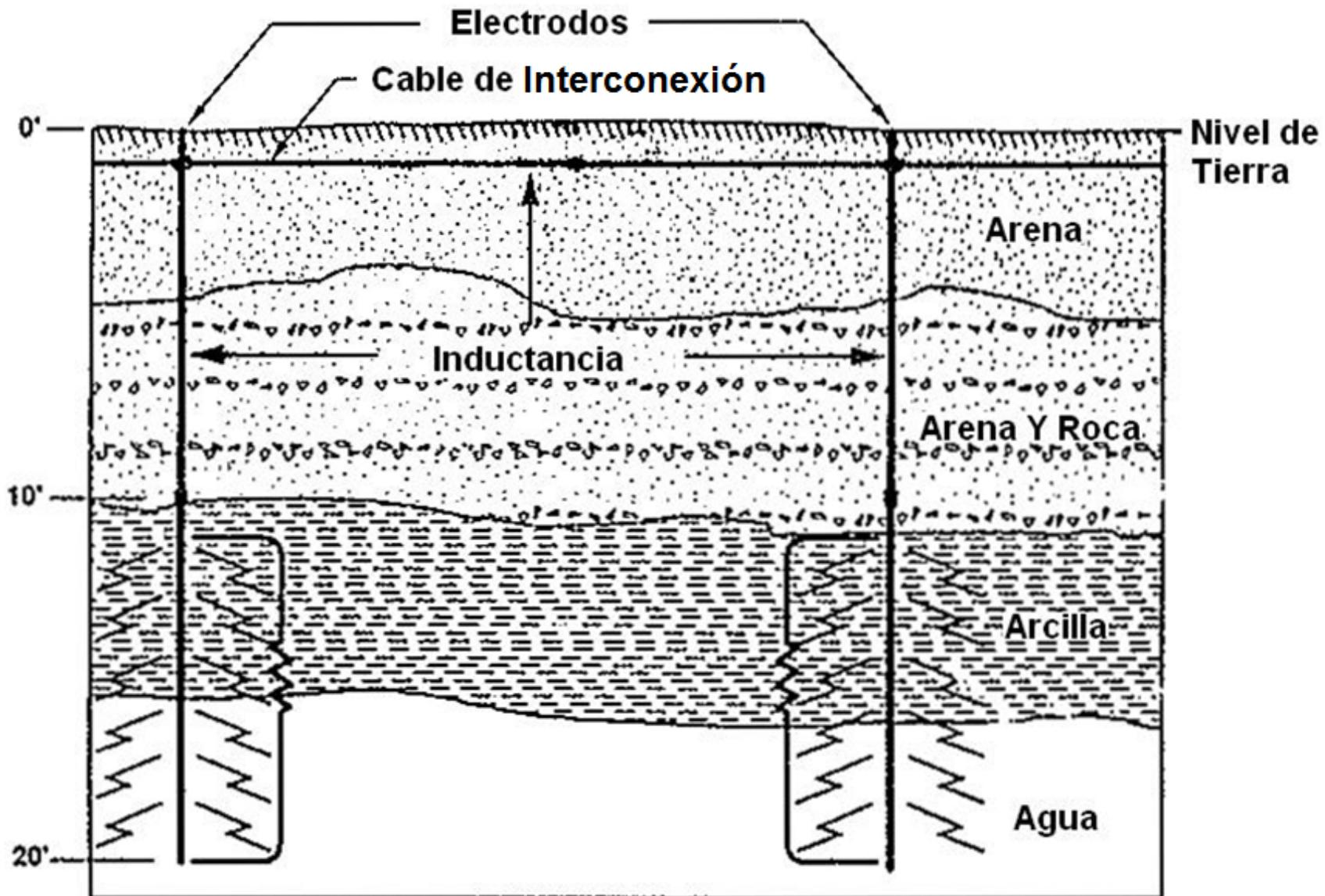


$L = \text{Baja}$
 $C = \text{Alta}$

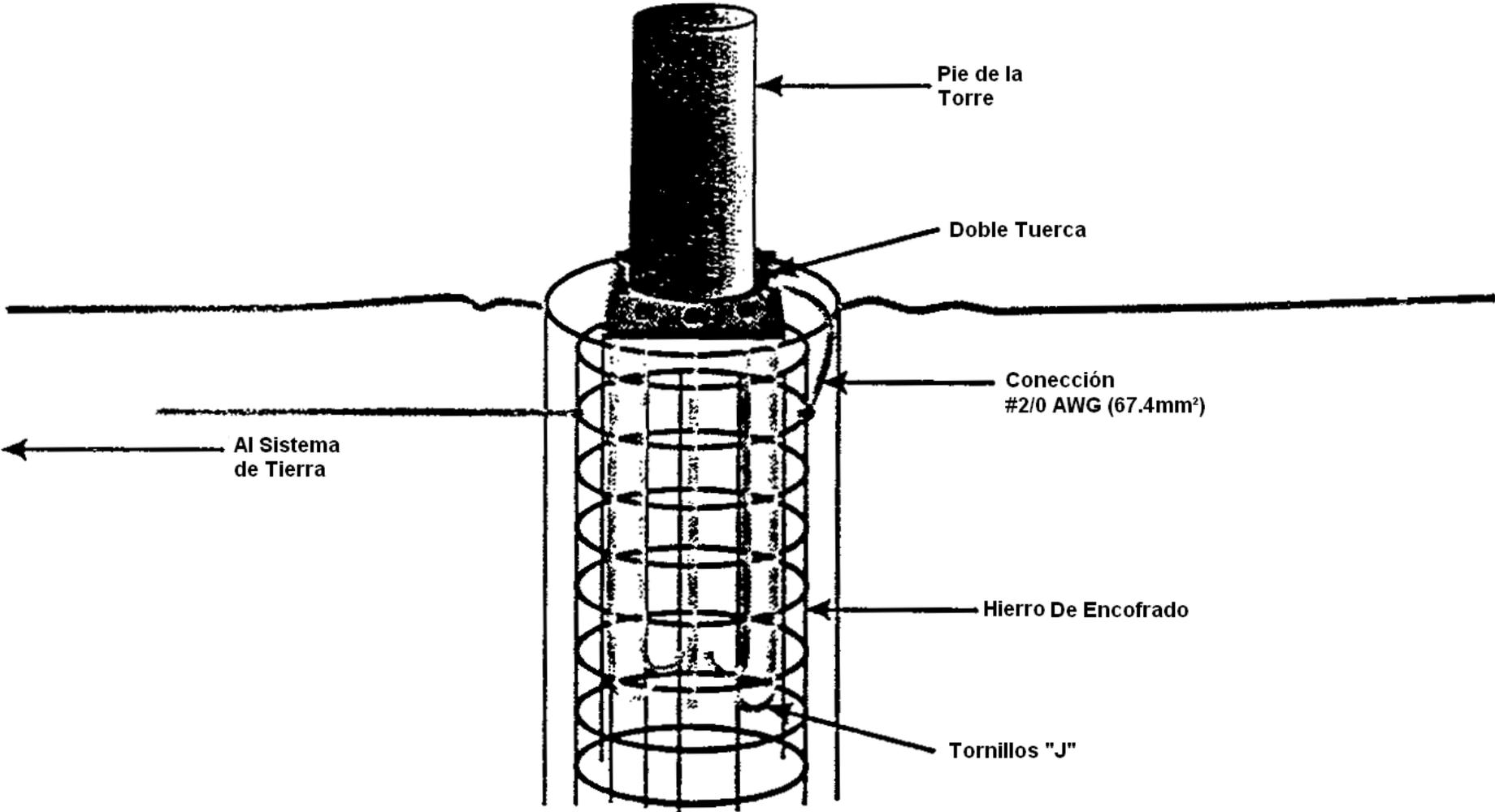


Comportamiento
dinámico de
electrodos
horizontales

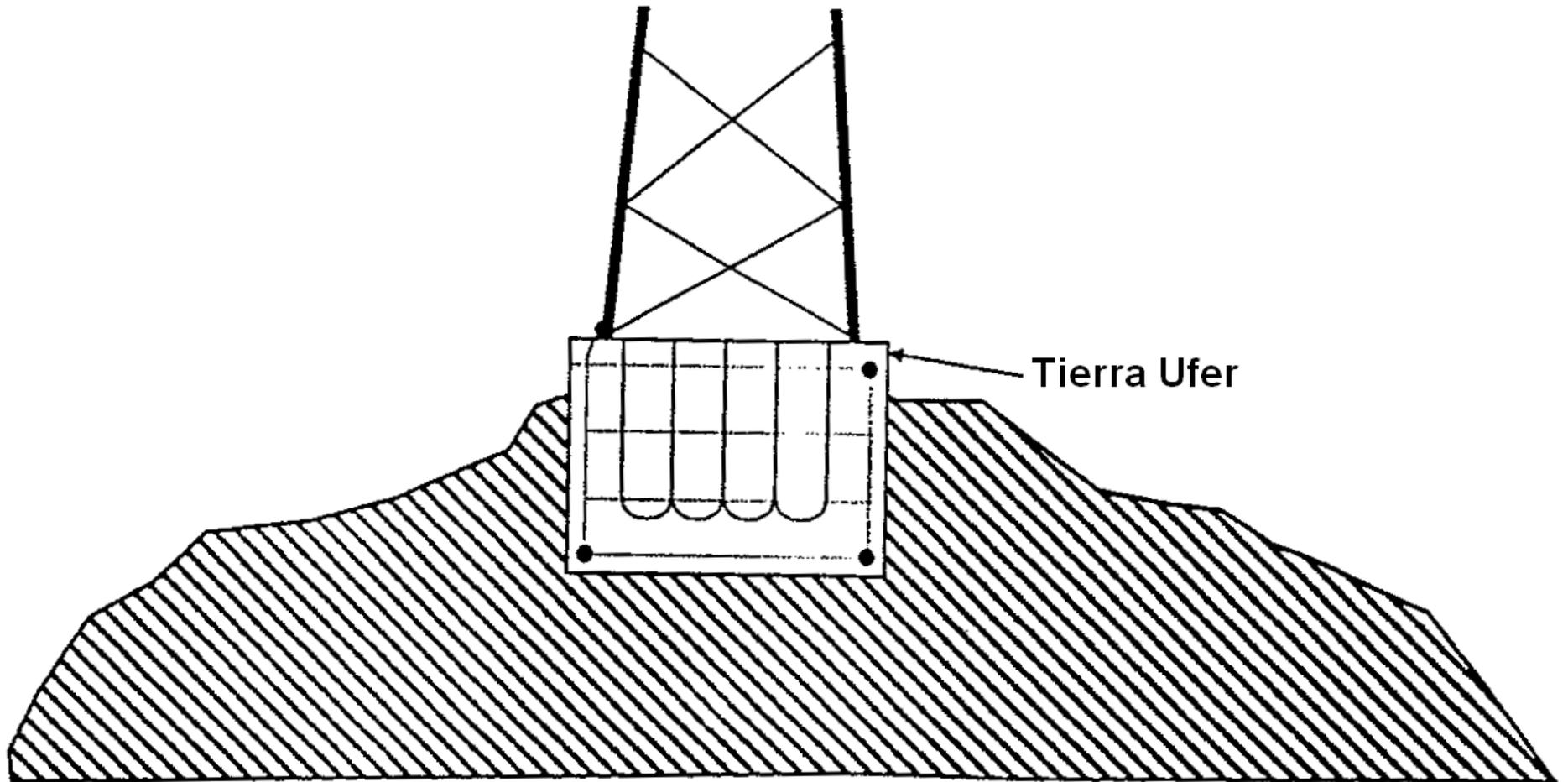
Electrodos en suelo no homogéneo con baja resistencia en la profundidad



Tierra Ufer



Cimiento de torre



Puesta a tierra natural

Recomendaciones IEC 62305

Adicionalmente a la interconexión de los hierros por ataduras, instalar una malla metálica adicional conectada a la armadura.

Puentear los gaps entre partes de la fundación con continuidad eléctrica

Si se instalan electrodos adicionales prever los puntos de conexión sobre nivel de piso

Resistencias de puesta a tierra

Cálculo aproximado en función del volumen del hormigón armado (V) para un suelo de $\rho = 100 \Omega\text{m}$

$$R_T = \frac{\rho}{\pi \times 1,57 \times \sqrt[3]{V}}$$

CASO	V(m3)	RT(Ω)
Fundación arbitraria	5	12
Fundación semiesférica - r= 0,45m	0,2	35
Fundación semiesférica - r= 0,7m	0,7	23

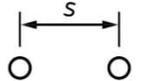
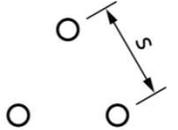
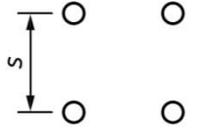
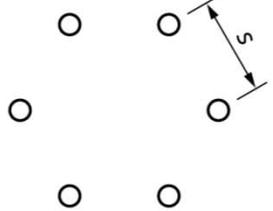
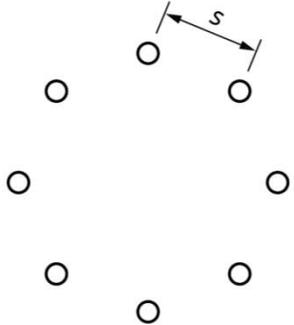
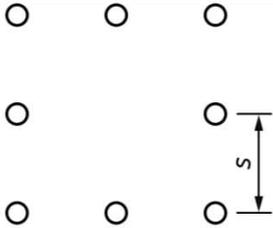
Resistencias de puesta a tierra

Cálculo para pilares con diferentes configuraciones de hierros de armadura

$$R = \frac{1}{2\pi L} \left[(\rho_c - \rho_s) \ln \left(1 + \frac{\delta}{z} \right) + \rho_s \ln \left(\frac{2L}{z} \right) \right]$$

$\rho(\Omega.m)$	Resistencia del suelo
$\rho_c(\Omega.m)$	Resistencia del hormigón
$L(m)$	Longitud de la barra por debajo del nivel del suelo
$\delta(\Omega.m)$	Espesor del hormigón entre las barras y el suelo
$a(m)$	Radio de la barra
$s(m)$	Distancia entre barras adyacentes
$z(m)$	Distancia media geométrica
$R(\Omega)$	Resistencia del pilote

Geometric mean distance z for closely spaced reinforcing rods in a symmetrical pattern

Number of rods	Arrangement of rods	z
2		$\sqrt[2]{as}$
3		$\sqrt[3]{as^2}$
4		$\sqrt[4]{2as^3}$
6		$\sqrt[6]{6as^5}$
8		$\sqrt[8]{52as^7}$
8		$\sqrt[8]{23as^7}$

Resistencias de puesta a tierra

Calculo para pilares con diferentes configuraciones de hierros de armadura y de resistividad del suelo

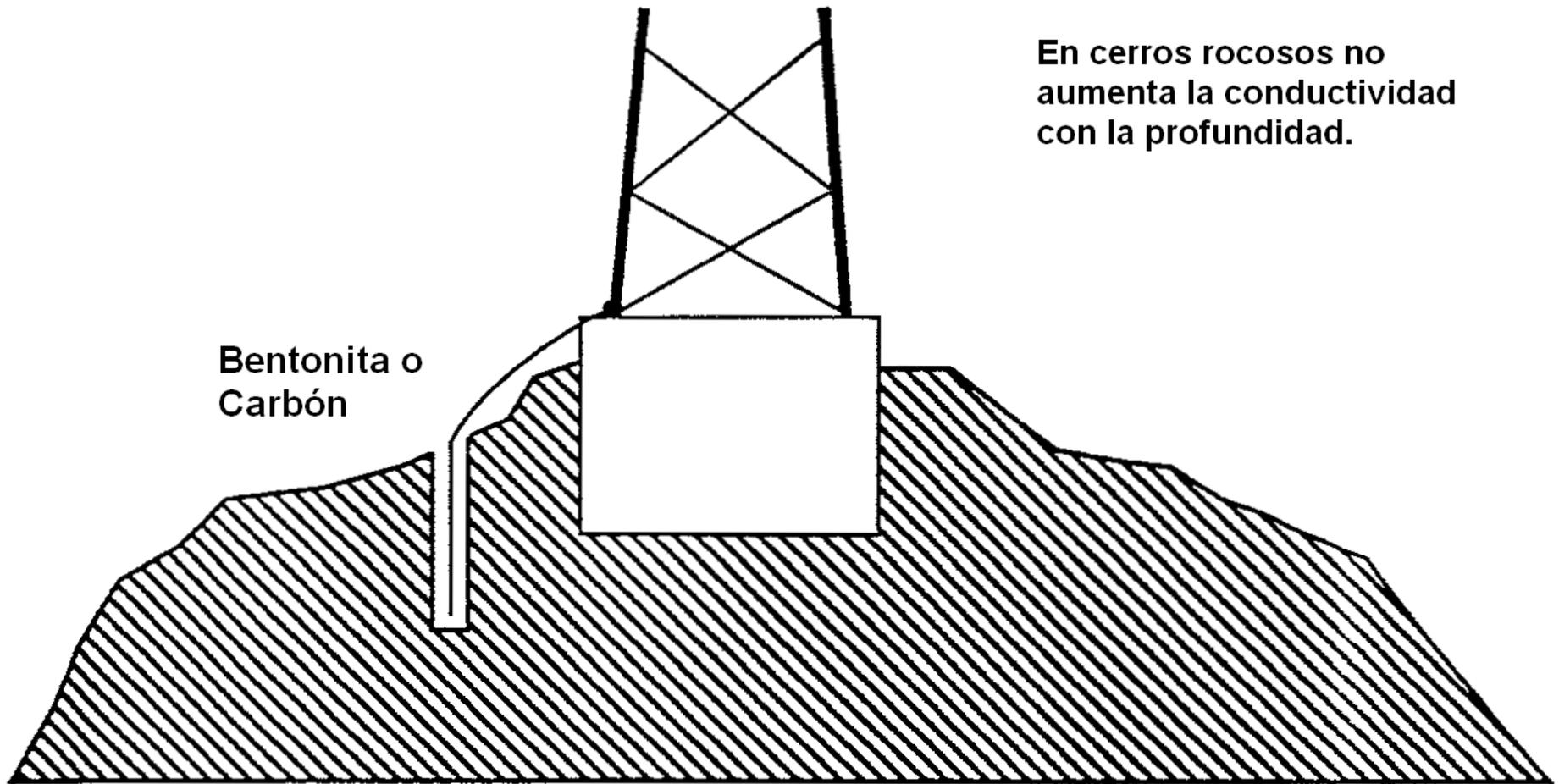
parámetros	2 barras		4 barras		6 barras	
$\rho(\Omega.m)$	15	500	15	500	15	500
$\rho_c(\Omega.m)$	30	30	30	30	30	30
$L(m)$	4	4	4	4	4	4
$g(\Omega.m)$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$a(m)$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
$s(m)$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$z(m)$	0,024	0,024	0,059	0,059	0,084	0,084
$R(\Omega)$	5	74	4	70	3	68

1 jabalina de $L = 4$ m y 16 mm de diámetro, en un suelo de $\rho = 15\Omega.m$: $R_T = 3,3\Omega$

1 jabalina de $L = 4$ m y 16 mm de diámetro, en un suelo de $\rho = 500\Omega.m$: $R_T = 110\Omega$

La roca como aislante:

En cerros rocosos no aumenta la conductividad con la profundidad.

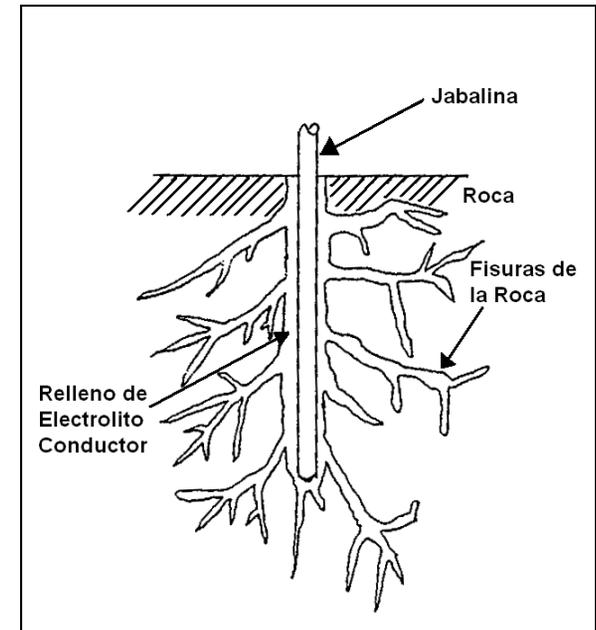


Bentonita o
Carbón

Proc.: Polyphaser

Puesta a tierra en roca de alta resistividad (1)

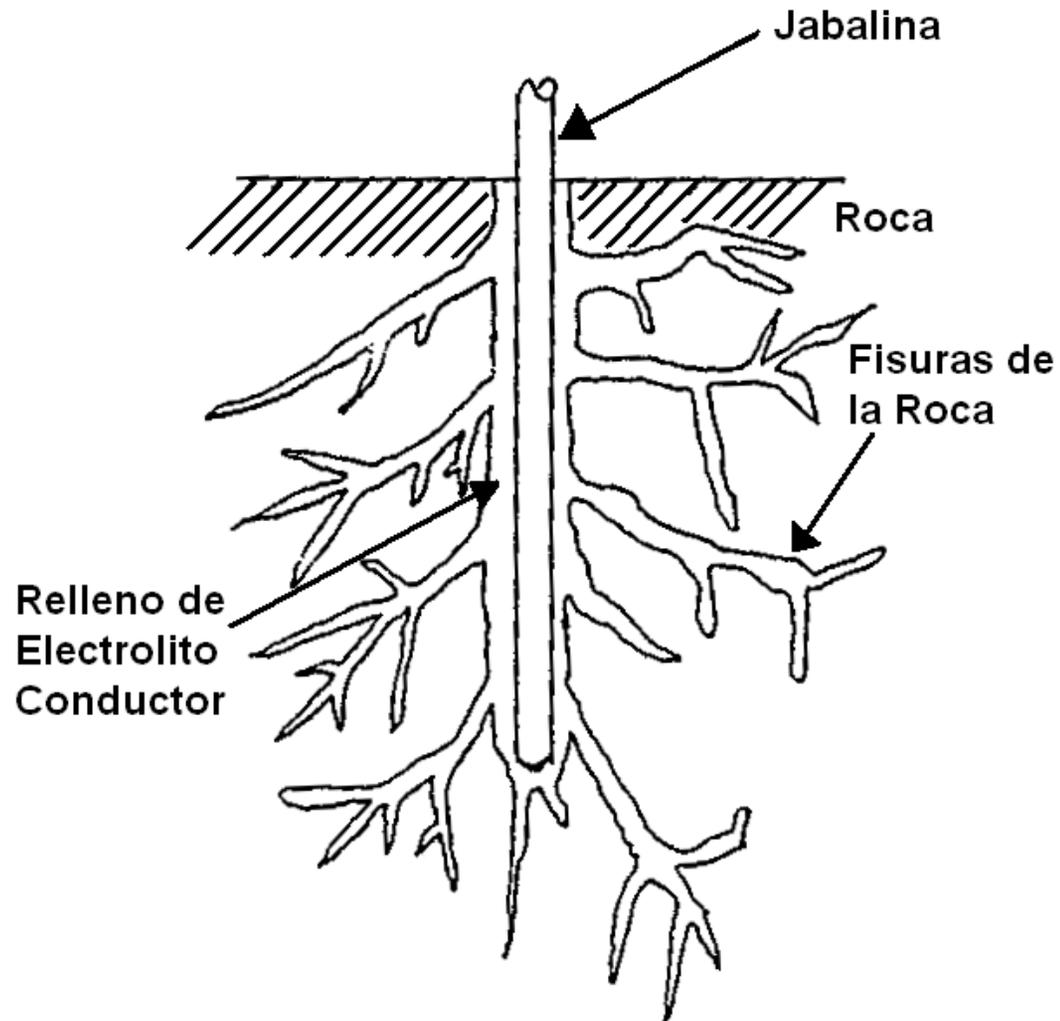
1. Perforar Agujero de $\text{Ø}=75$ mm a una profundidad de 15 m.
2. Colocar una jabalina de hierro/acero revestido en cobre junto con 1 kg de explosivo para rocas.
3. Llenar el agujero de agua para contener el efecto de la explosión.
4. Detonar el explosivo.
5. Llenar el agujero y las fisuras creadas por la explosión con un electrolito conductor. Rellenar hasta el tope durante varios días.



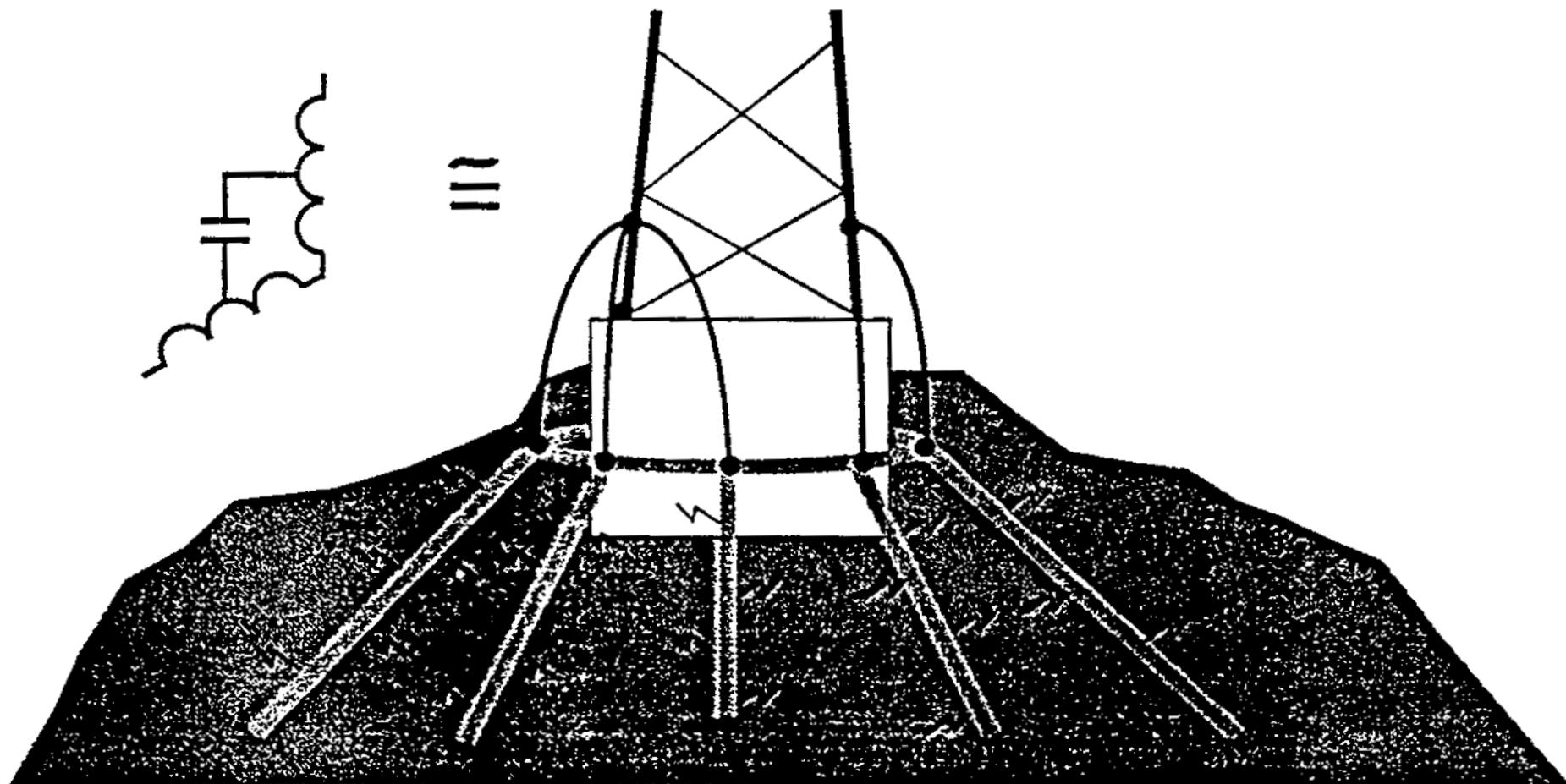
Una electrolito exitoso puede ser una mezcla de Bentonita:

- 1 parte de Bentonita
- 1 parte de Sulfato de Sodio
- 10 partes de Agua

Puesta a tierra en roca de alta resistividad (2)

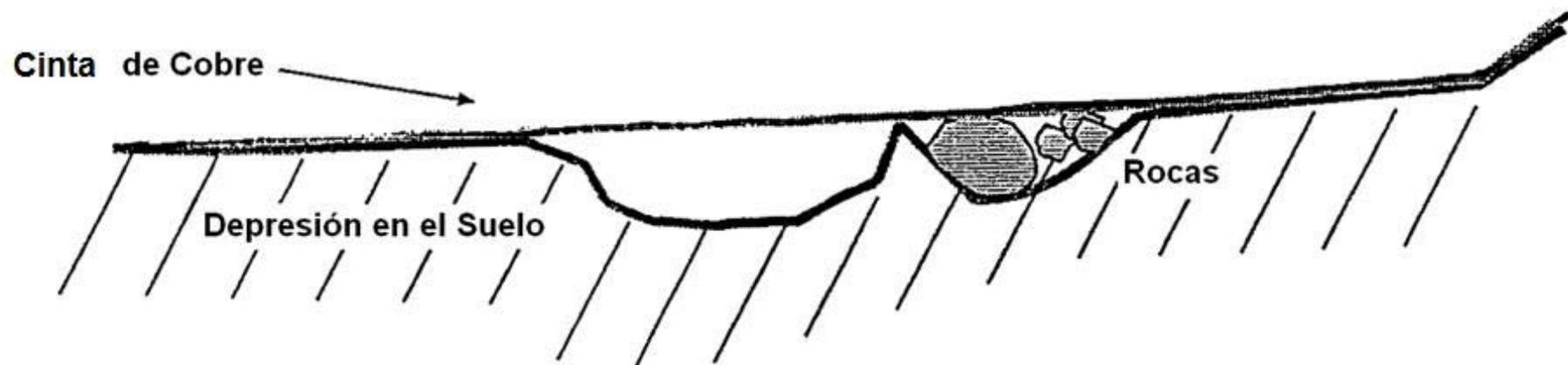


Puesta a tierra en suelo rocoso utilizando radiales:

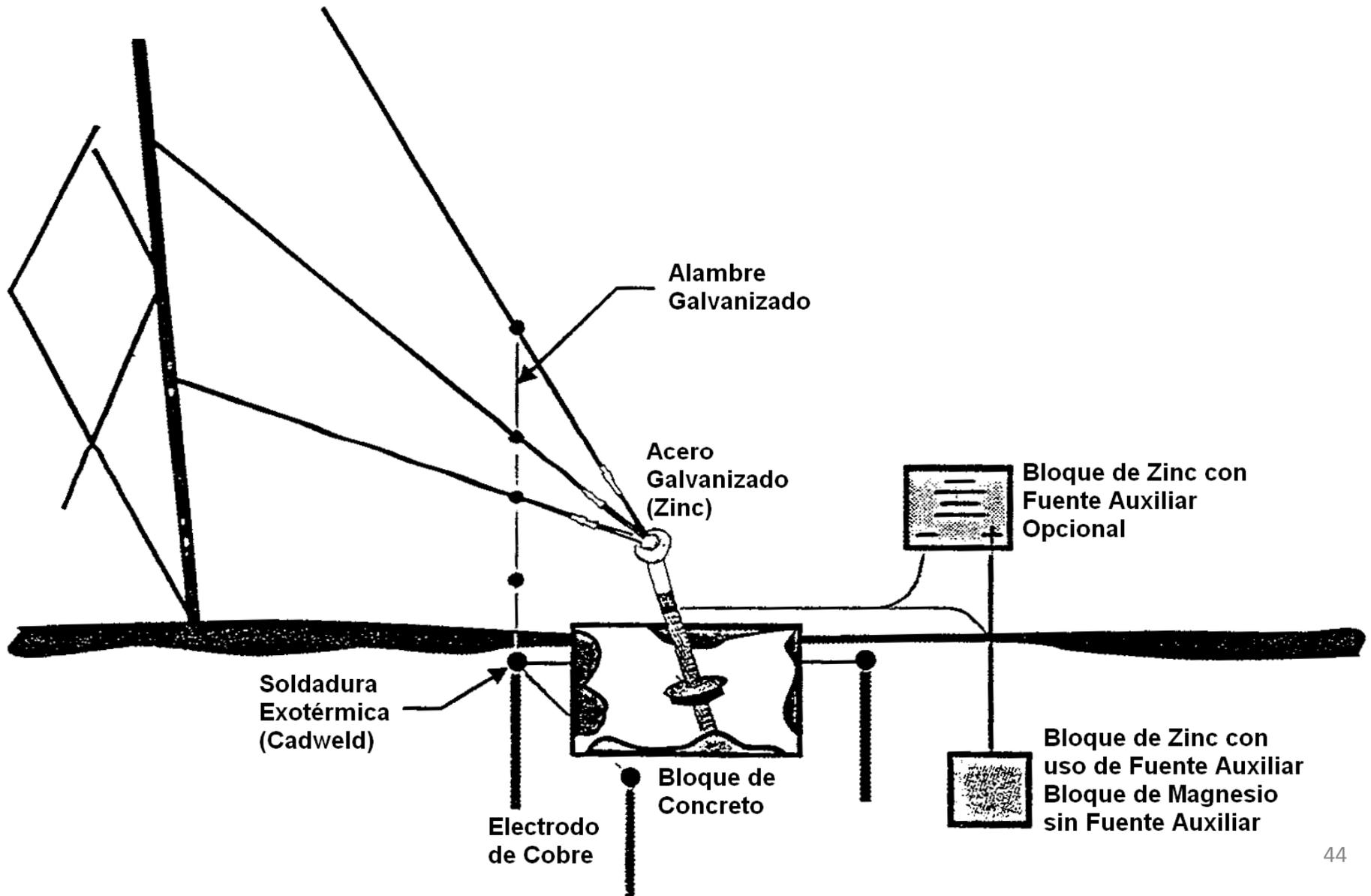


Proc.: Polyphaser

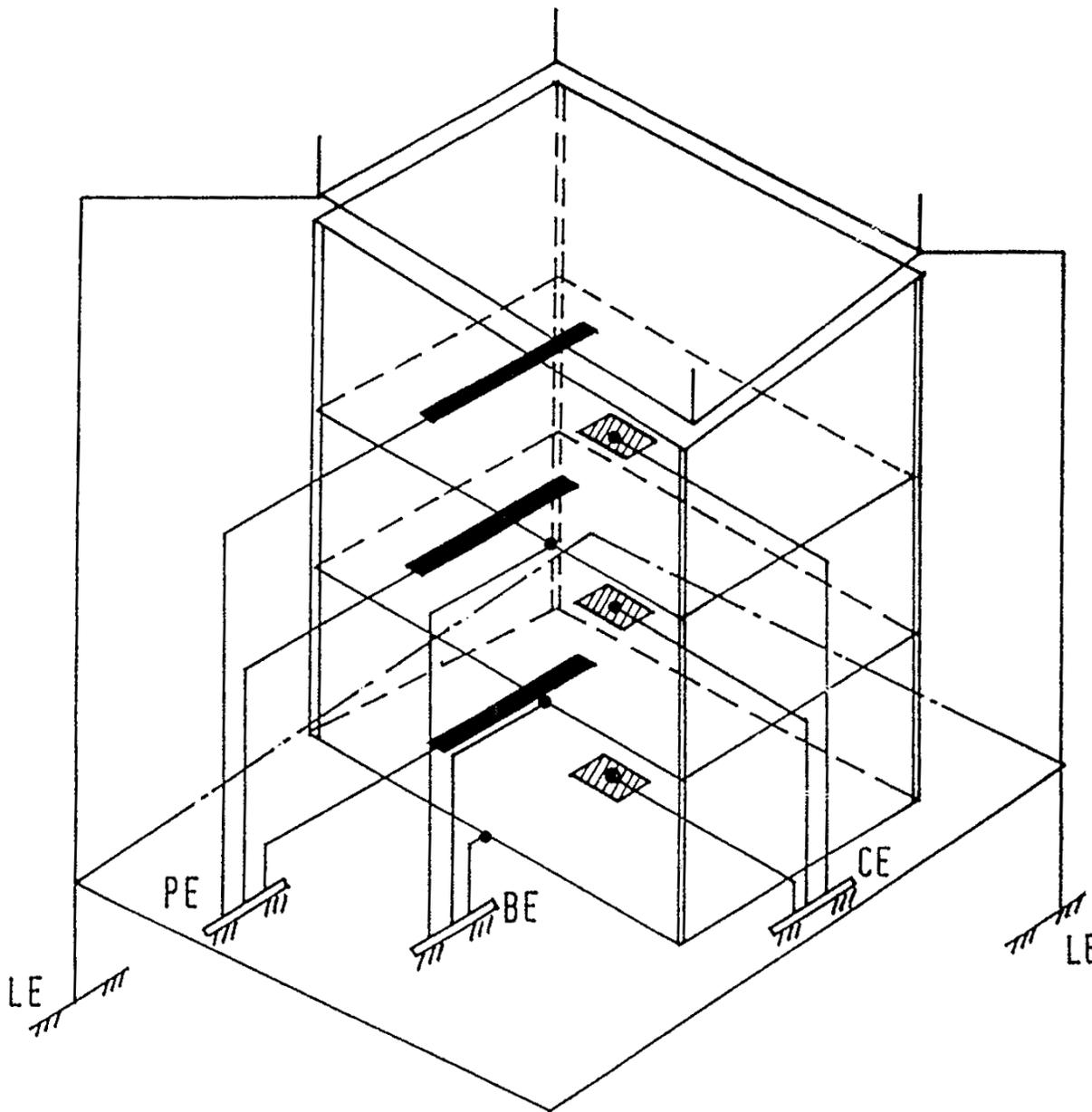
Instalación de cintas radiales



Puesta a tierra de riostras



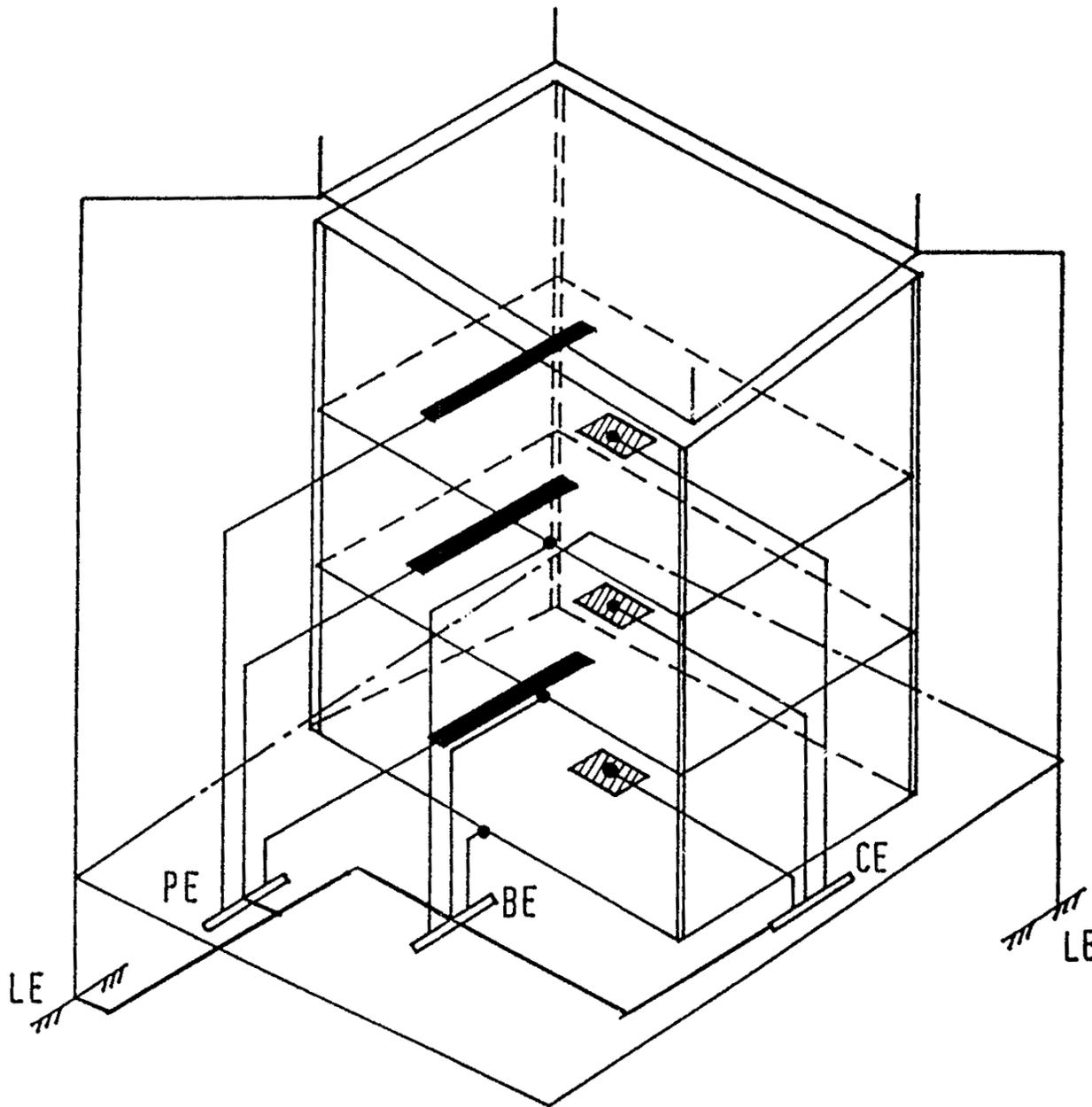
Puesta a Tierra en Edificios (1)



Tierras
Separadas

LE = Descargas de Rayos a Tierra
PE = Tierra de Potencia y Protección
BE = Tierra del Edificio
CE = Referencia de Señal

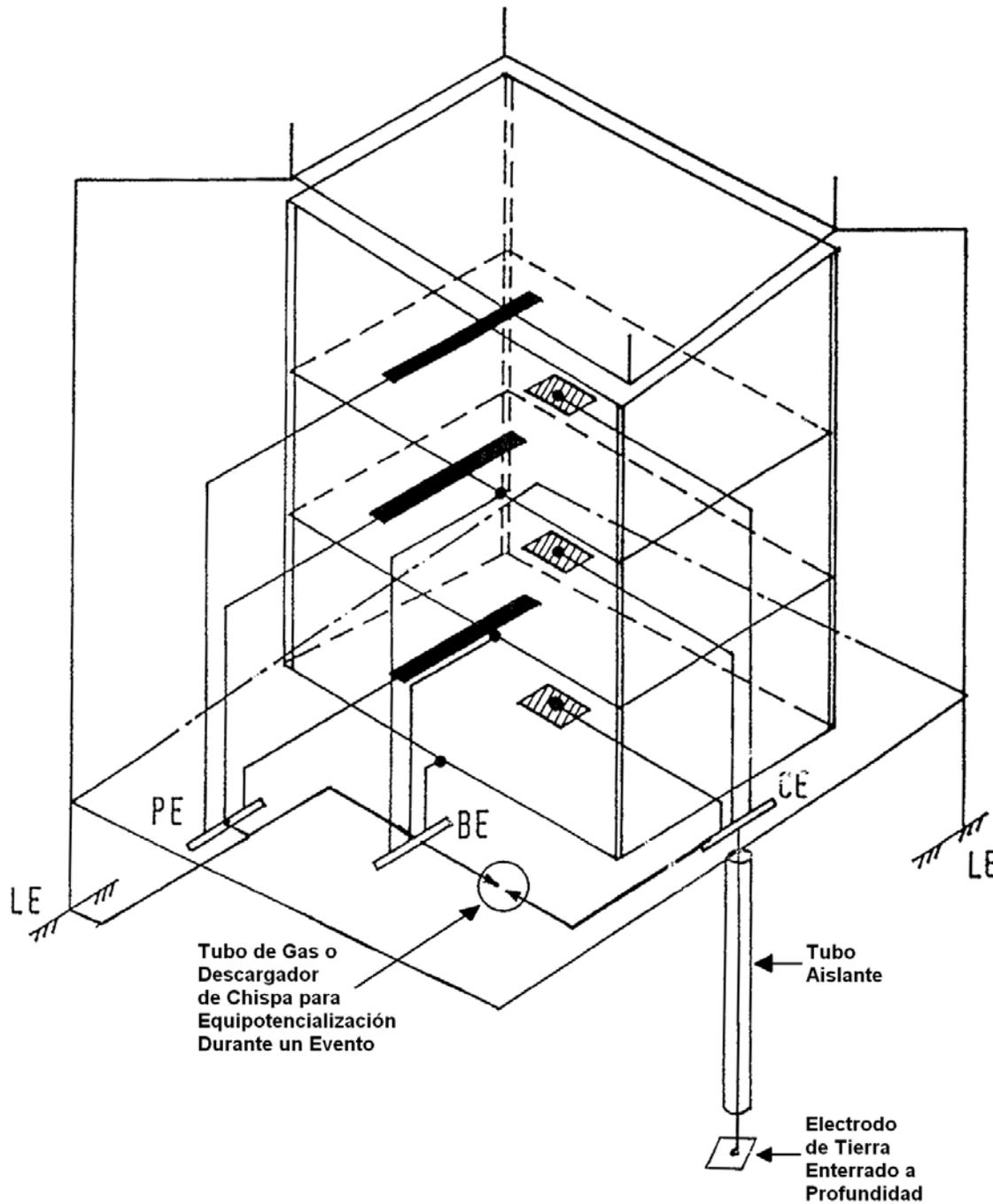
Puesta a Tierra en Edificios (2)



Tierras
Conectadas o
Tierra Común

LE = Descargas de Rayos a Tierra
PE = Tierra de Potencia y Protección
BE = Tierra del Edificio
CE = Referencia de Señal

Puesta a Tierra en Edificios (3)



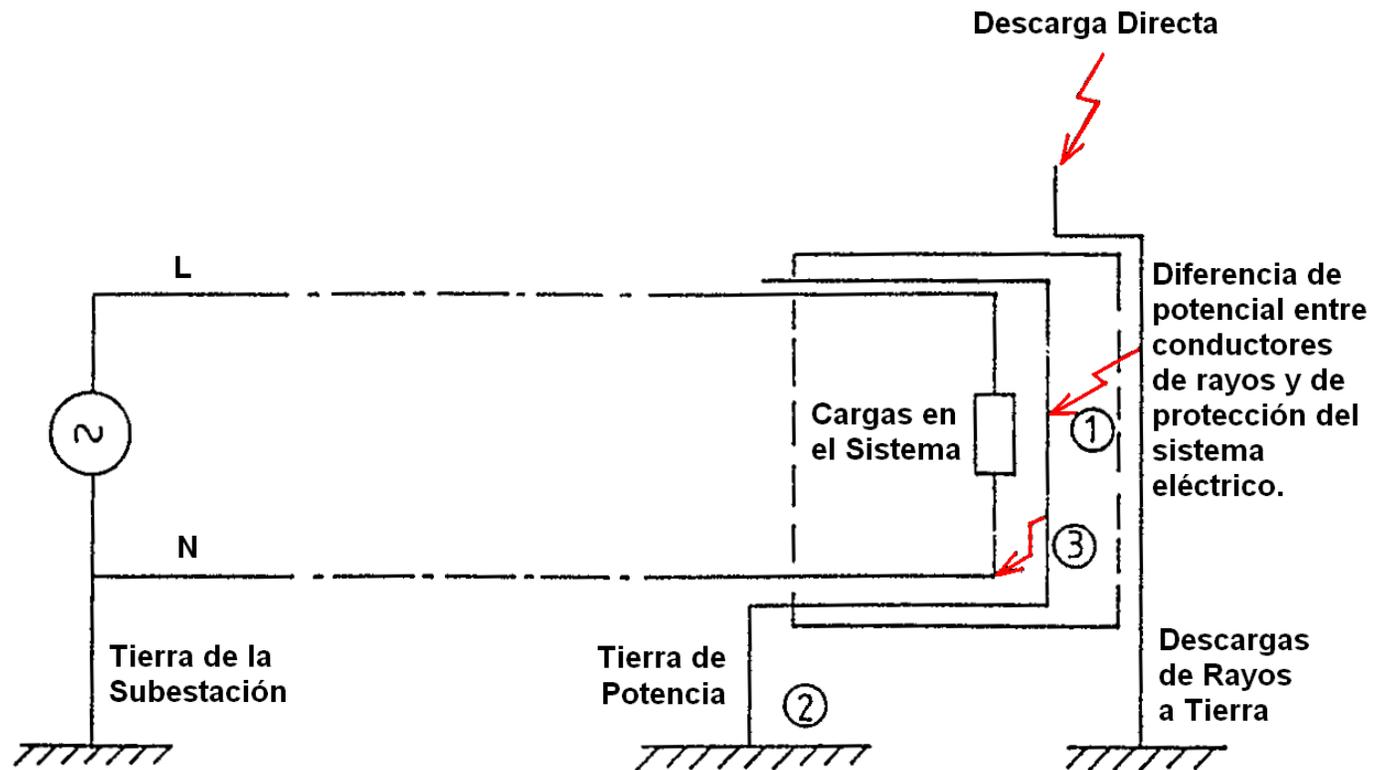
Tierra Común y
Tierra Dedicada
Aislada con
Protección

Conexión de la Tierra de Rayos y la Tierra del Sistema Eléctrico

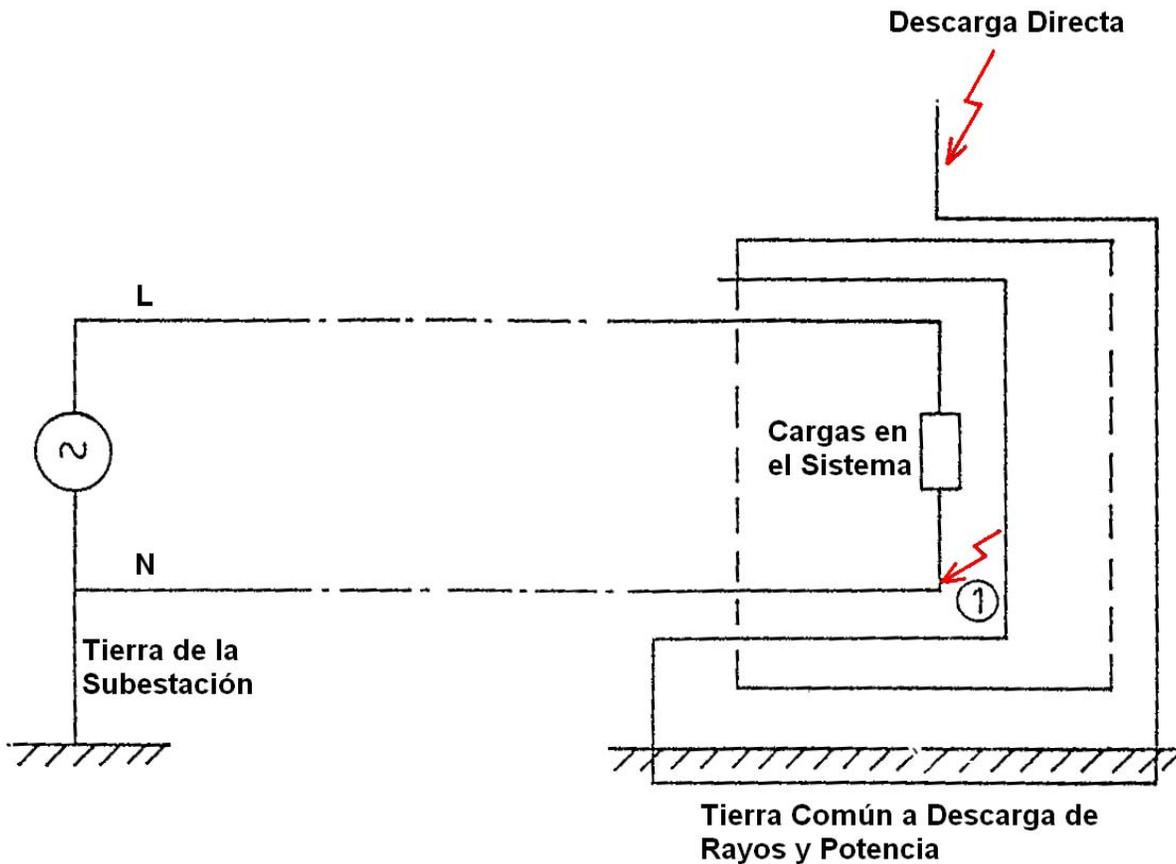
A: Tierras Separadas

① Alta probabilidad de arco a equipo conectado a tierra del sistema eléctrico.

② El potencial de la puesta a tierra de potencia crece, no tanto como si estuviera unida a la tierra de rayos, pero lo suficiente como para producir ③ descarga entre conductores línea-neutro y tierra de potencia.



Conexión de la Tierra de Rayos y la Tierra del Sistema Eléctrico B: Tierras Unidas

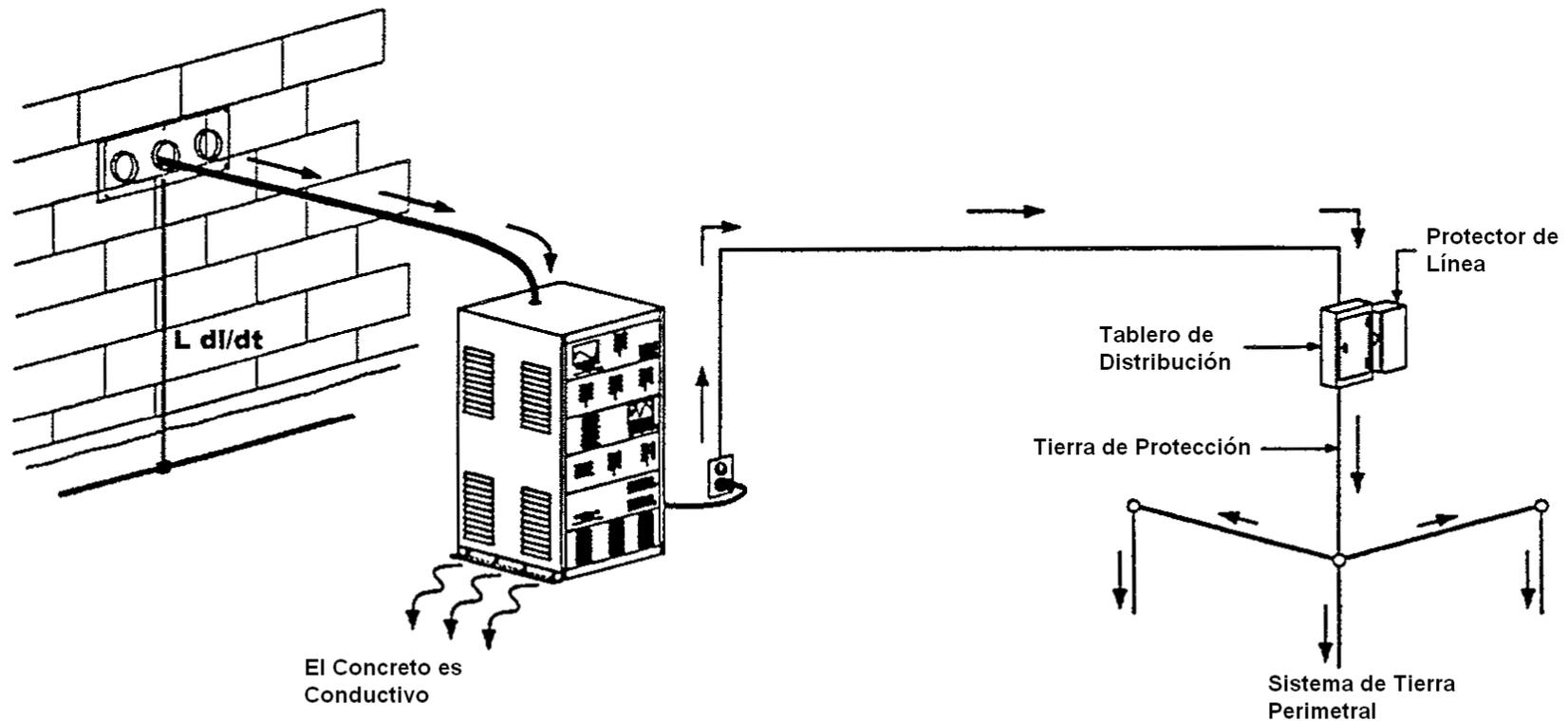


① La probabilidad de arco entre tierra y cargas se mantiene ya que el neutro está puesto a tierra en la subestación.

Ventajas:

- Baja probabilidad de arco entre tierra de rayos y tierra del sistema
- Menor resistencia total de puesta a tierra.

Aterramiento de Equipo (1)

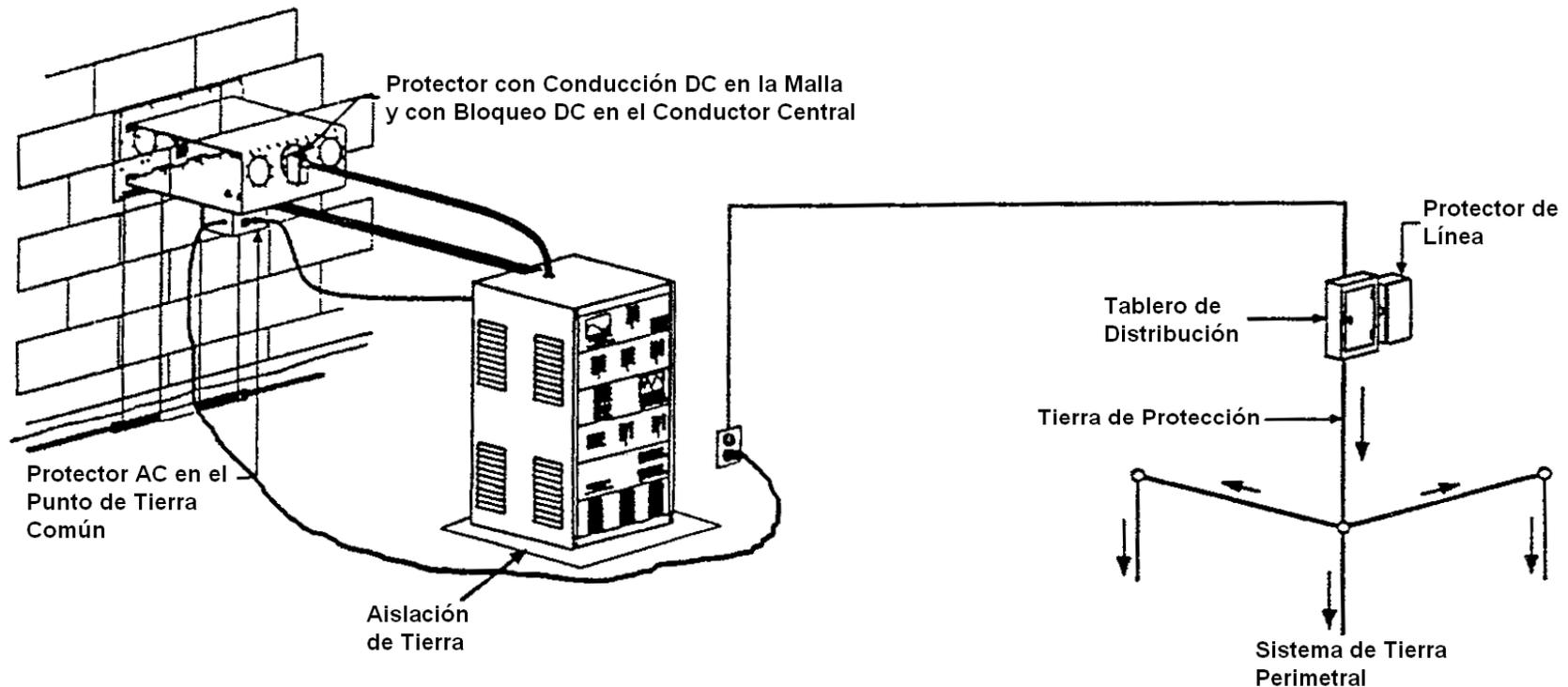


1) Problemas en Instalaciones Típicas

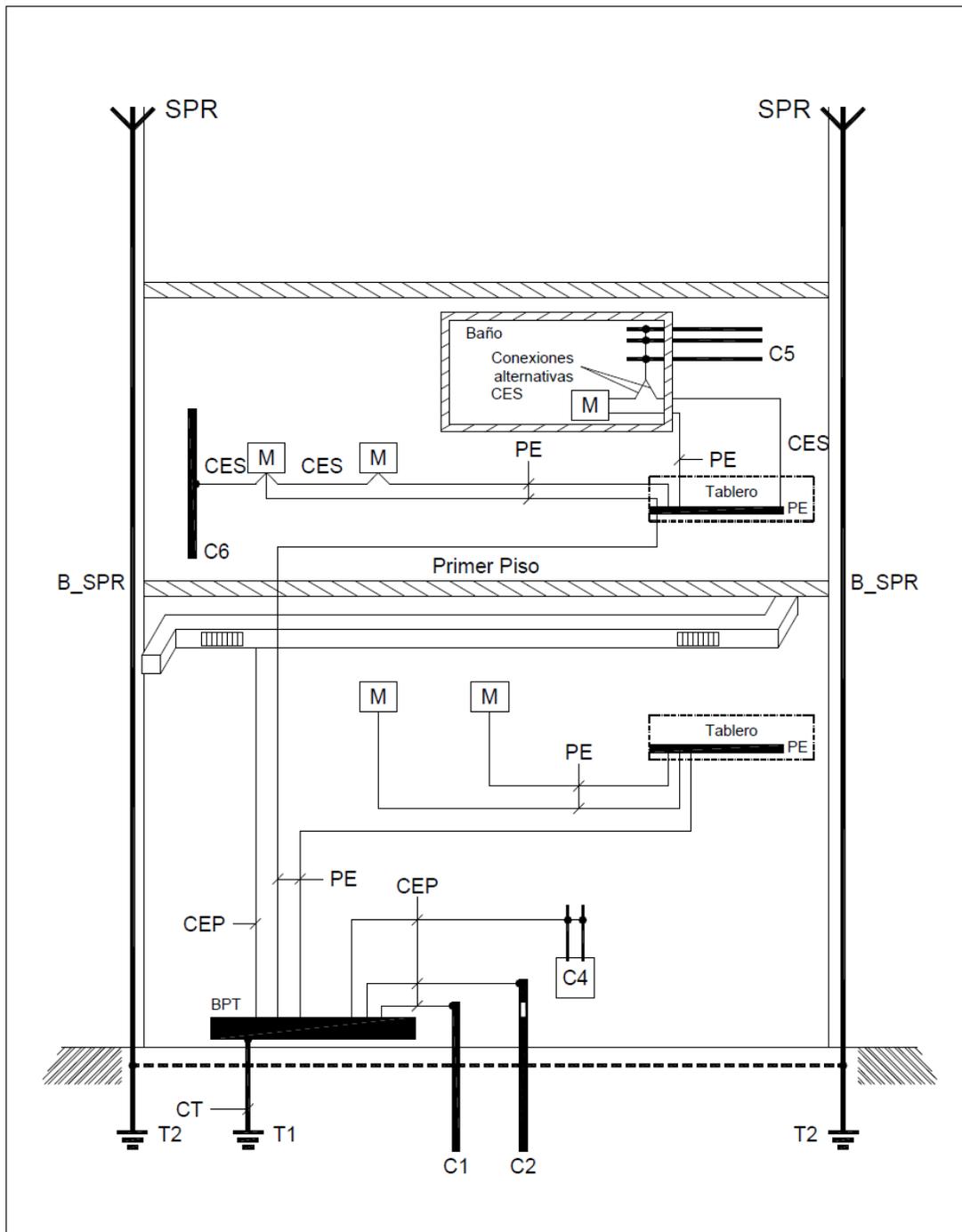
Conexión de Protectores y Coaxiales a un Punto Único de Tierra



Aterramiento de Equipo (4)



4) Solución: Todos los Protectores RF, CA Descargan a Tierra en un Único Punto



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
T1 Toma de tierra de protección.

T2 Toma de tierra del sistema de protección contra rayos.

PE Conductor 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.

