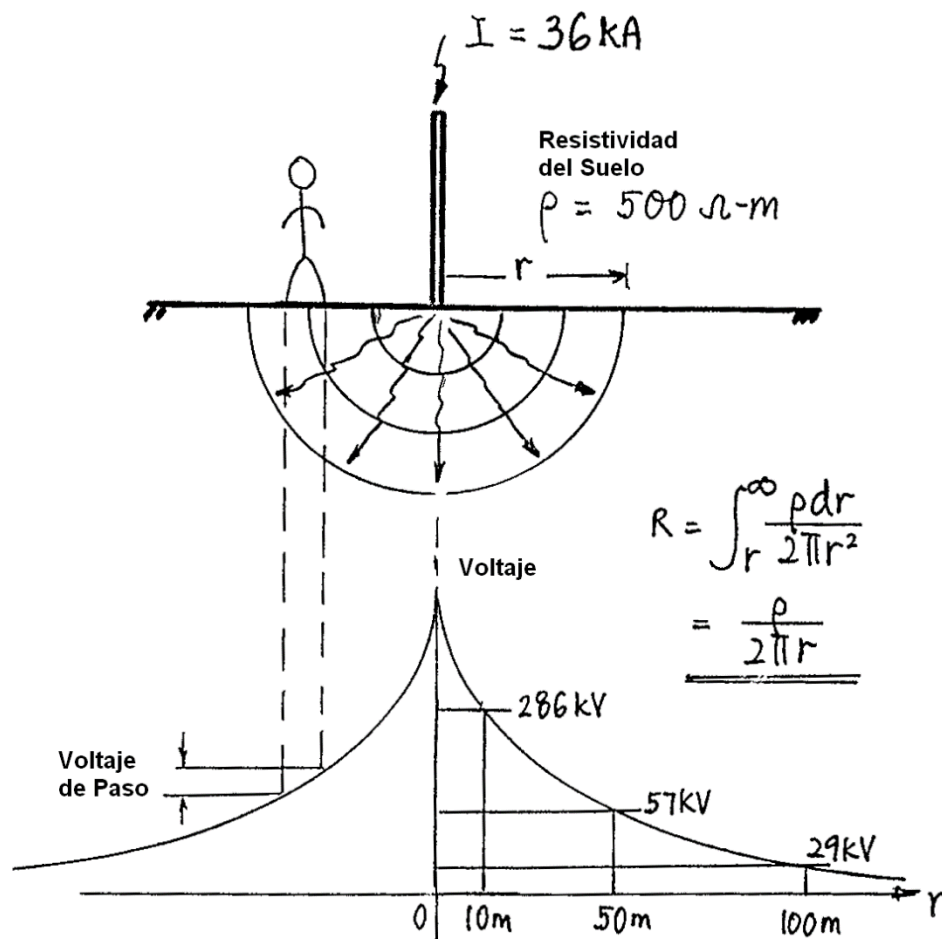


# TENSION DE PASO EN TIERRA



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  $x$

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

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

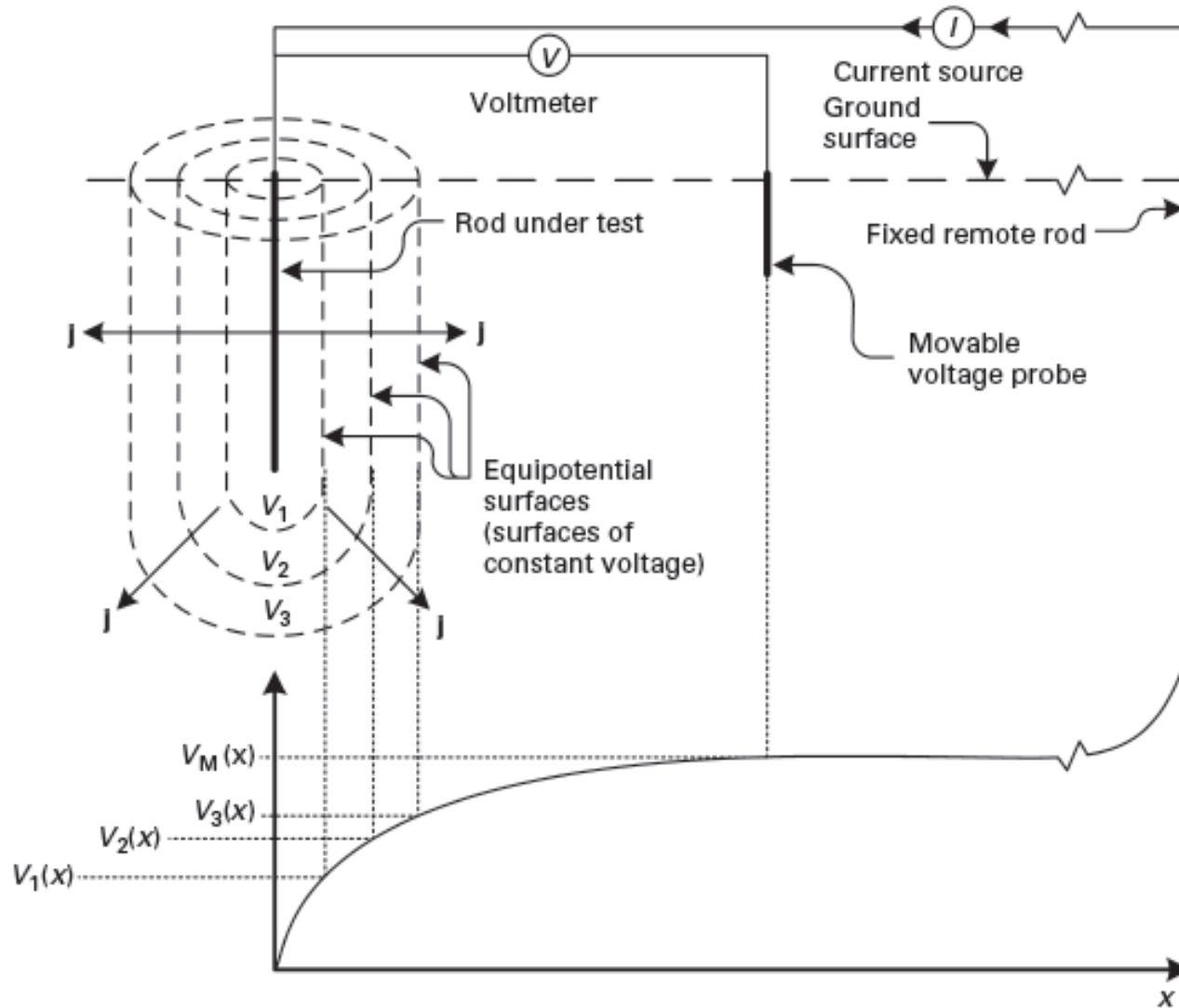
$$dV_x = I_d \cdot \frac{\rho \cdot dx}{S(x)}$$

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

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

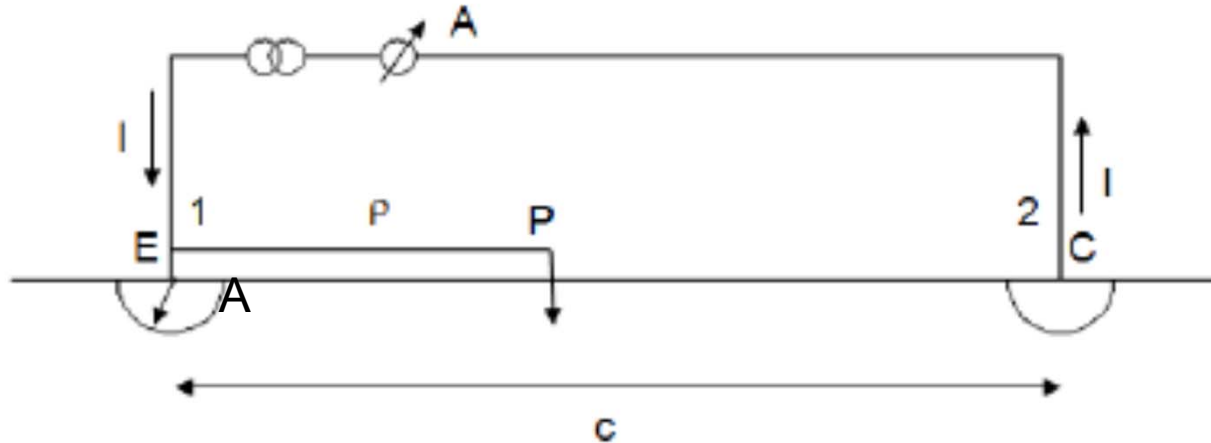
# MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

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)



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

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

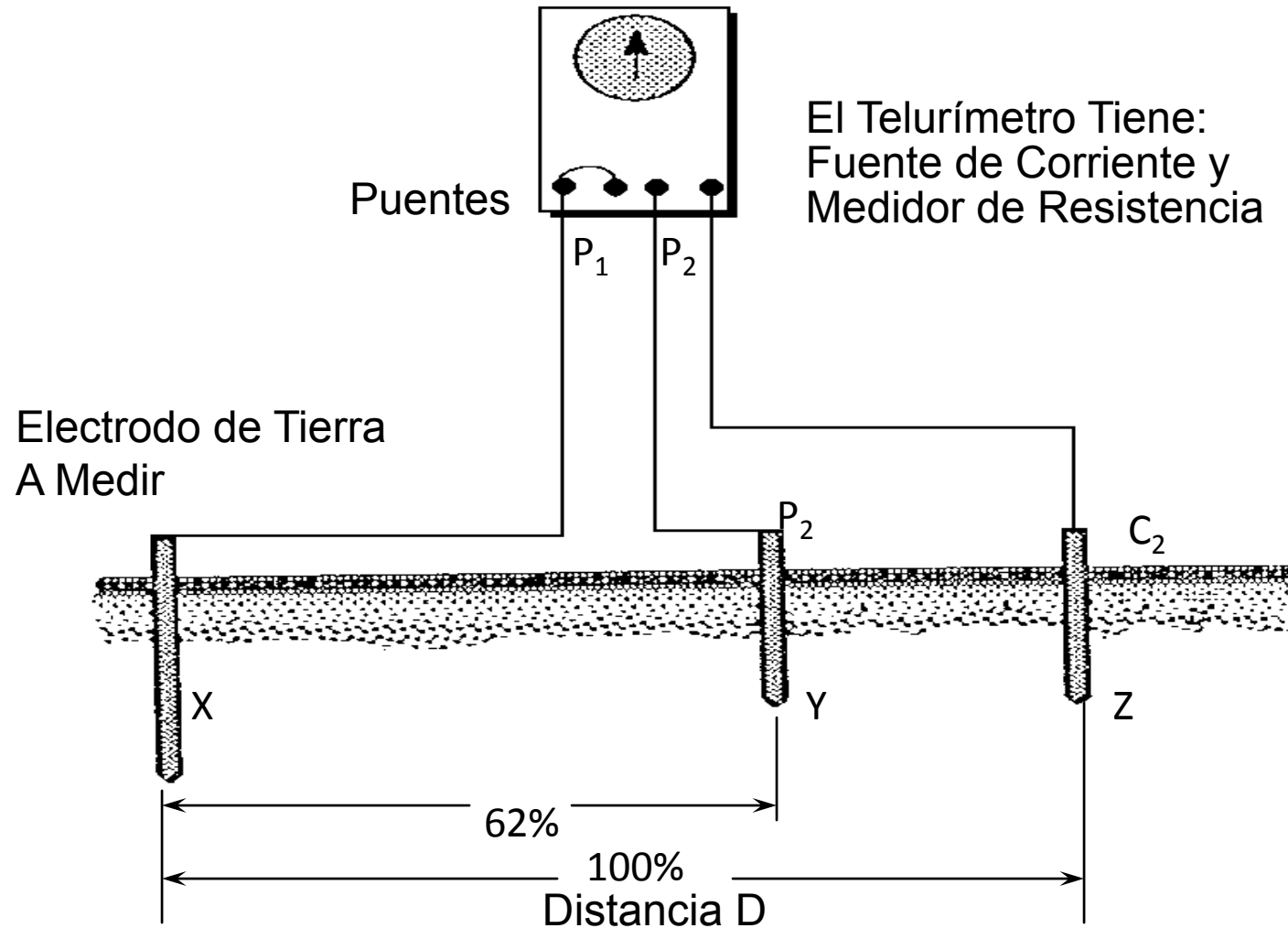
$$R_T = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{c-a} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} \right) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a} \left( 1 - \frac{1}{c-a} - \frac{1}{p} + \frac{1}{c-p} \right) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

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

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

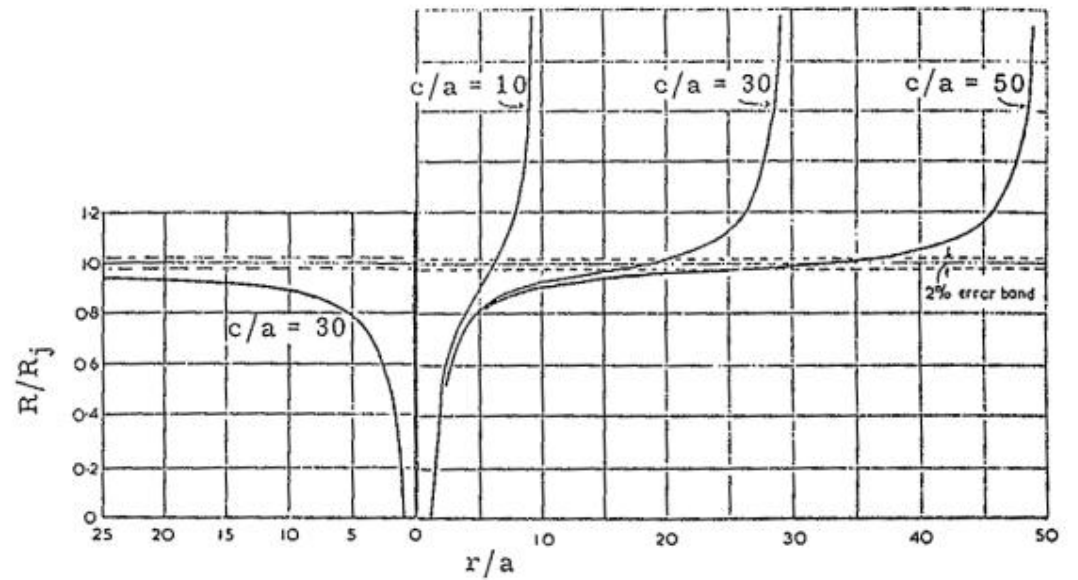
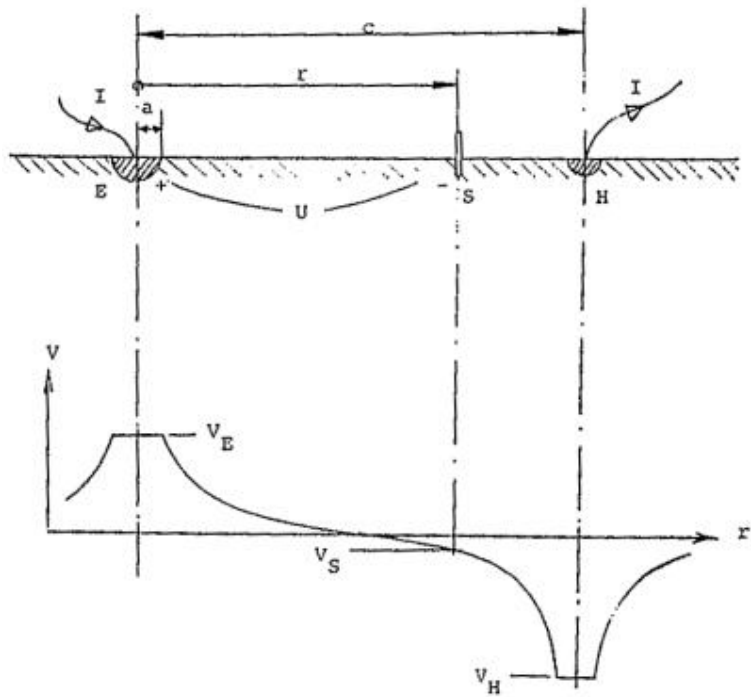
# MEDIDA DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

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

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

**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

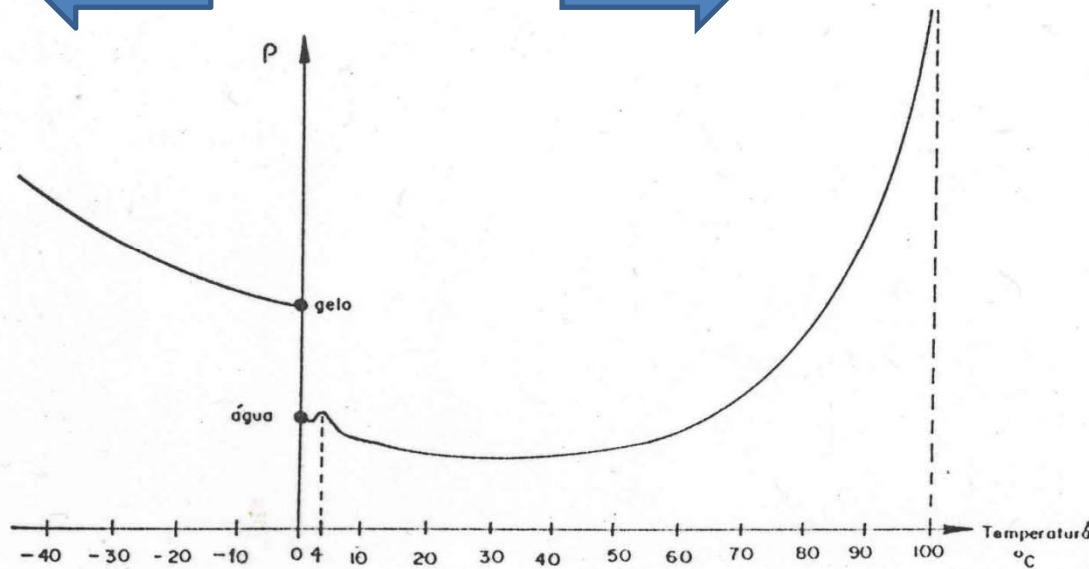
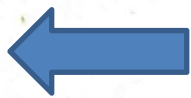
- conducción de cargas eléctricas predominantemente iónica.
- mayor porcentaje de humedad hace que las sales presentes en el suelo se disuelvan, formando un medio favorable para la conducción de la corriente iónica.

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

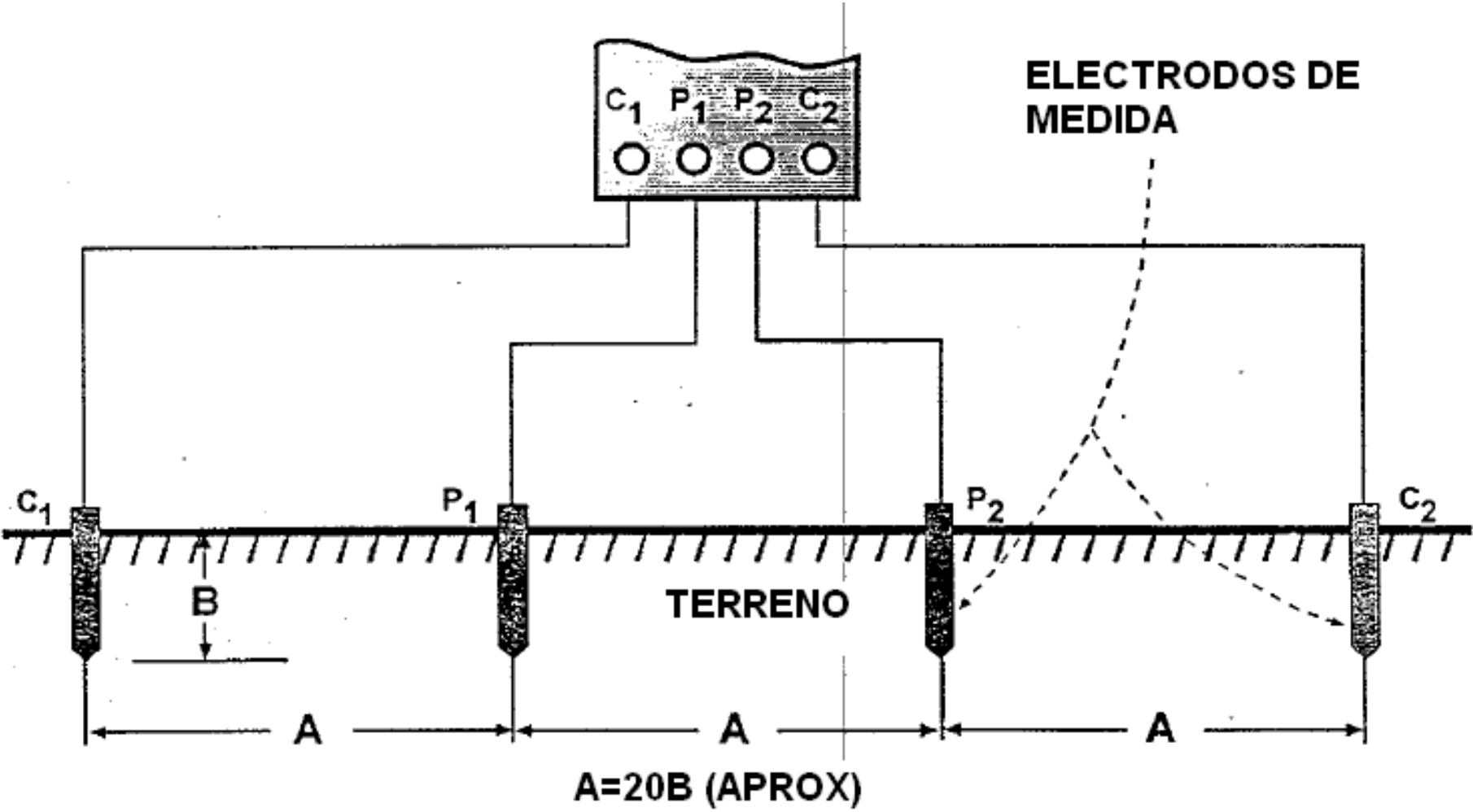
Baja la movilidad

Baja el porcentaje de humedad

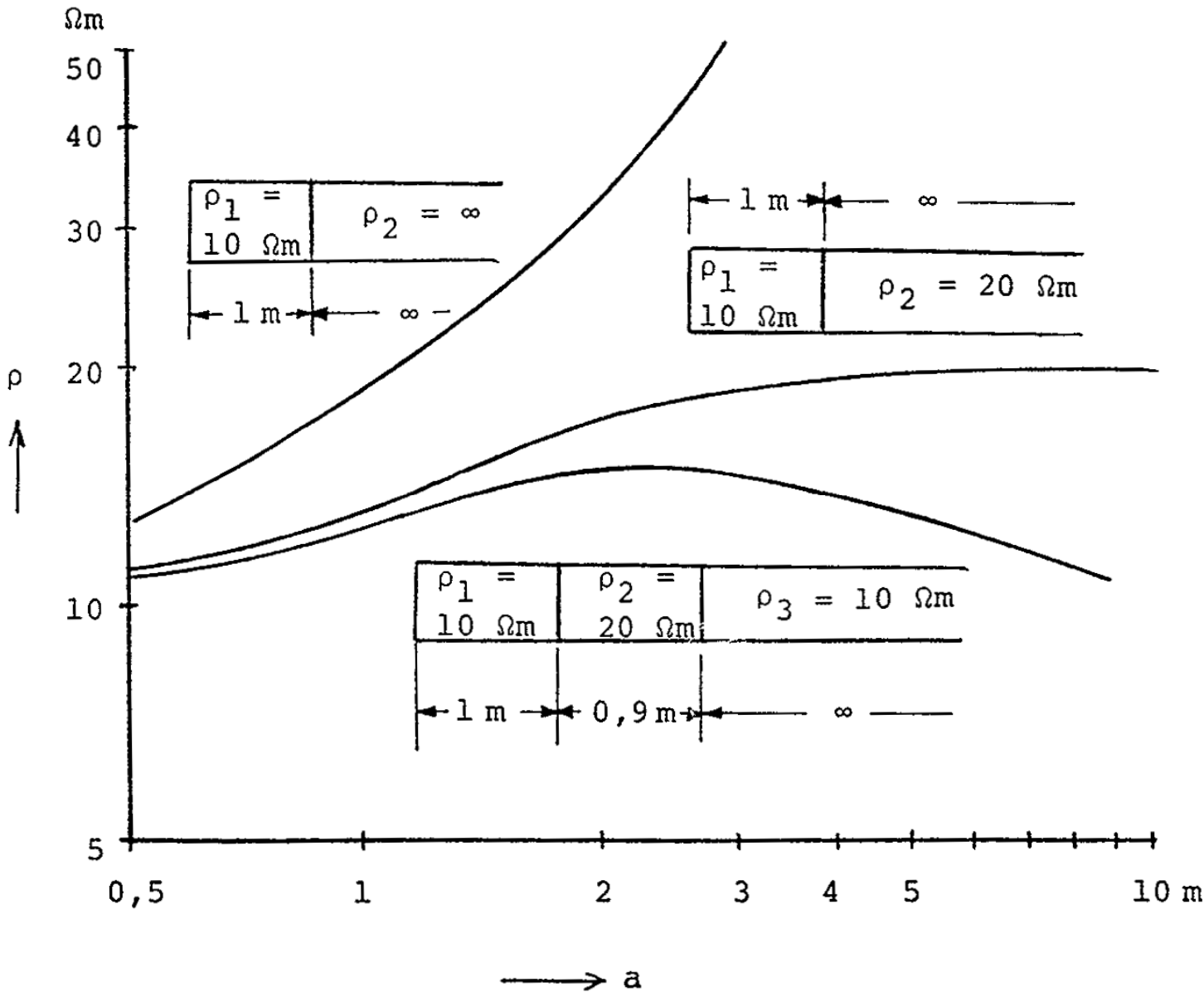


Temperatura (°C)	Resistividad de suelo arenoso (Ωm)
20	72
10	99
0 (agua)	138
0 (hielo)	300
-5	790
-15	3.300

# Método de Wenner para medida de resistividad



# Medida de la resistividad y estructura del terreno



# ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA TOMA DE TIERRA

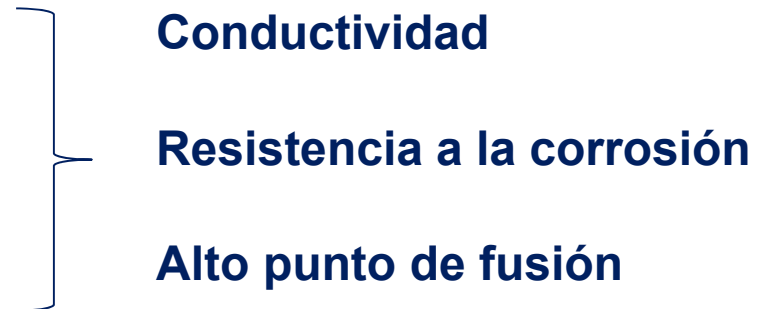
## ELECTRODOS DE TIERRA

### 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  $\pm 0.3$  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)

$\rho$ : 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

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

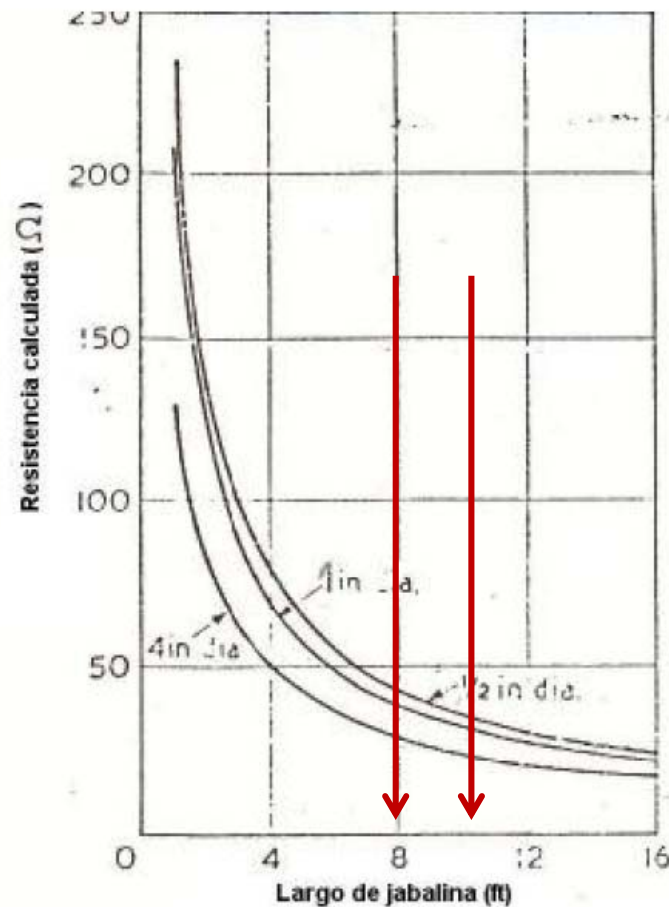
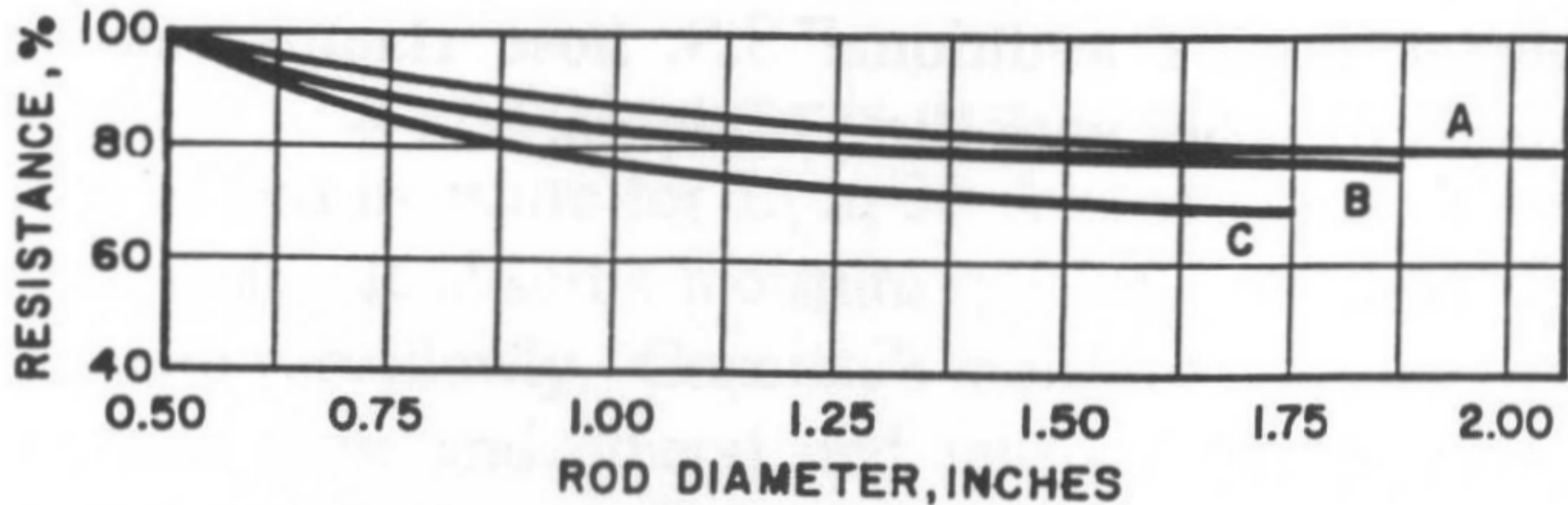


Fig. 3. Efecto del largo de la jabalina en el cálculo de la resistencia para suelo uniforme con resistividad 10000 ohm.cm

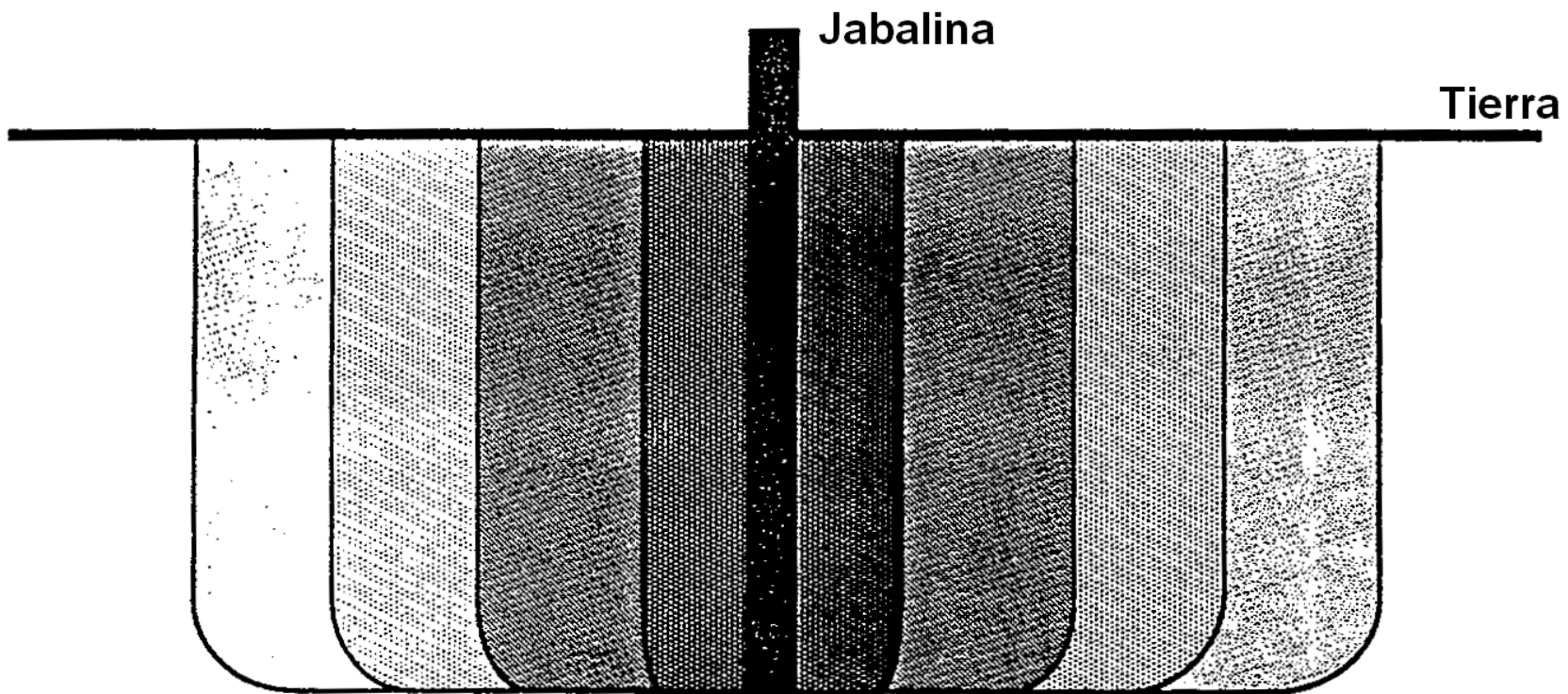
# CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

## JABALINA VERTICAL – Influencia del diámetro



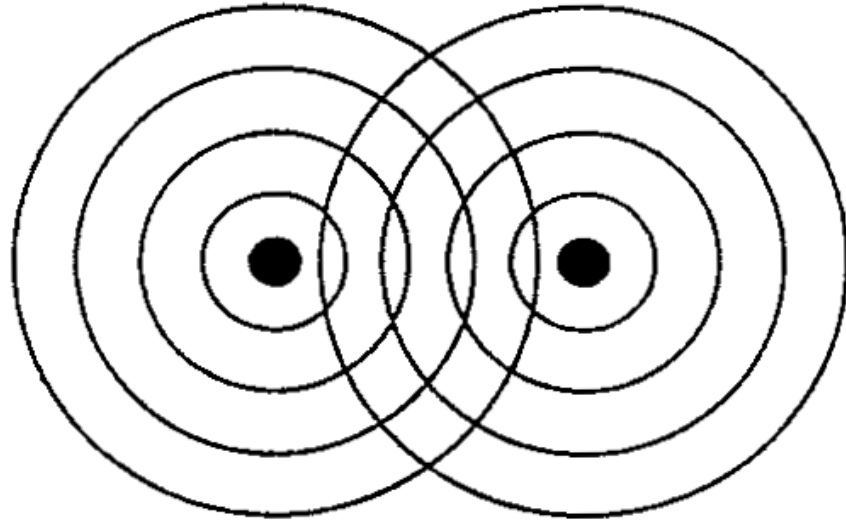
Three tests by different people (A, B & C.) Each took a 1/2-inch Ground Rod which was used as a reference and set to 100%. The Rod size was increased and different results are due to ground conductivity variations.

# Esfera de influencia: Vista lateral



# Esfera de influencia: Vista superior

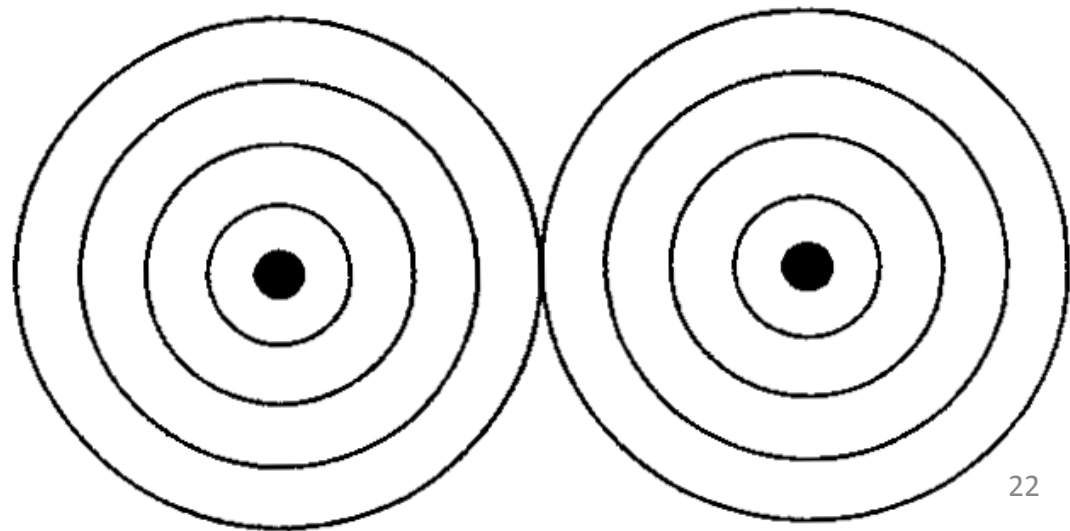
**Espaciamiento  
Incorrecto**



**Espaciamiento  
Correcto**

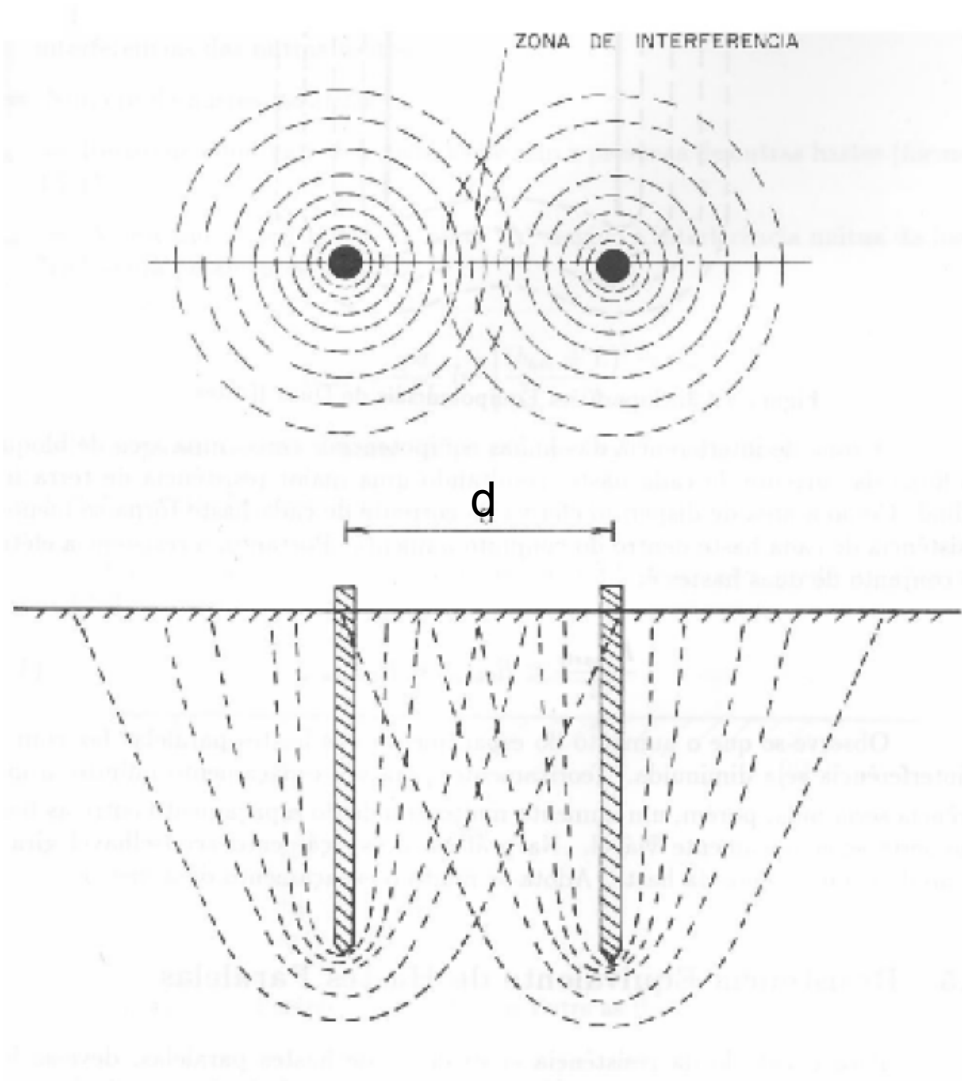
**Electrodo de 2,5 m - Tiene un Radio de  
Influencia de 2,5 m**

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

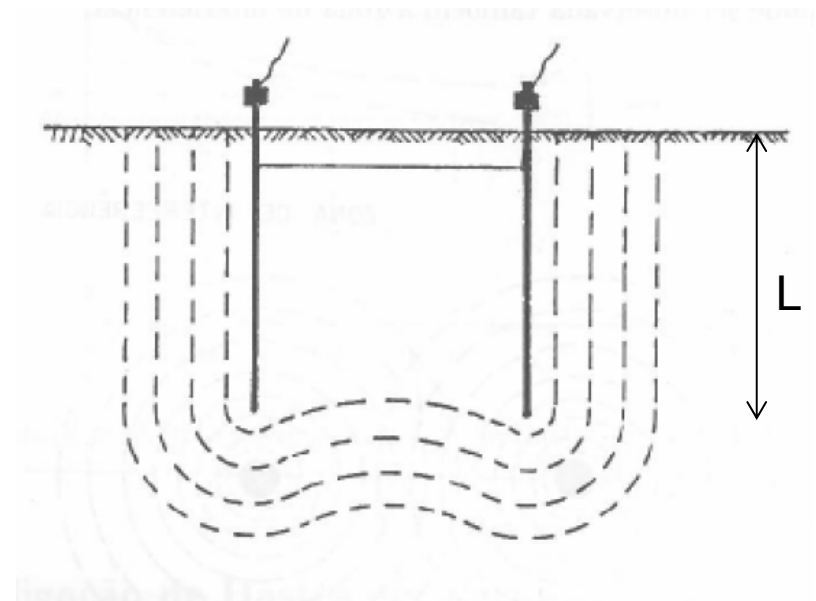


# CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA







## JABALINAS VERTICALES EN PARALELO



$$\frac{R_{T\_1J}}{2} < R_{T\_2J} < R_{T\_1J}$$
$$d > L$$



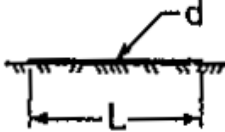


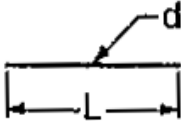
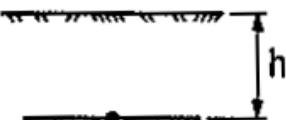
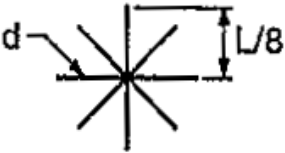


# Fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra (1)

	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	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

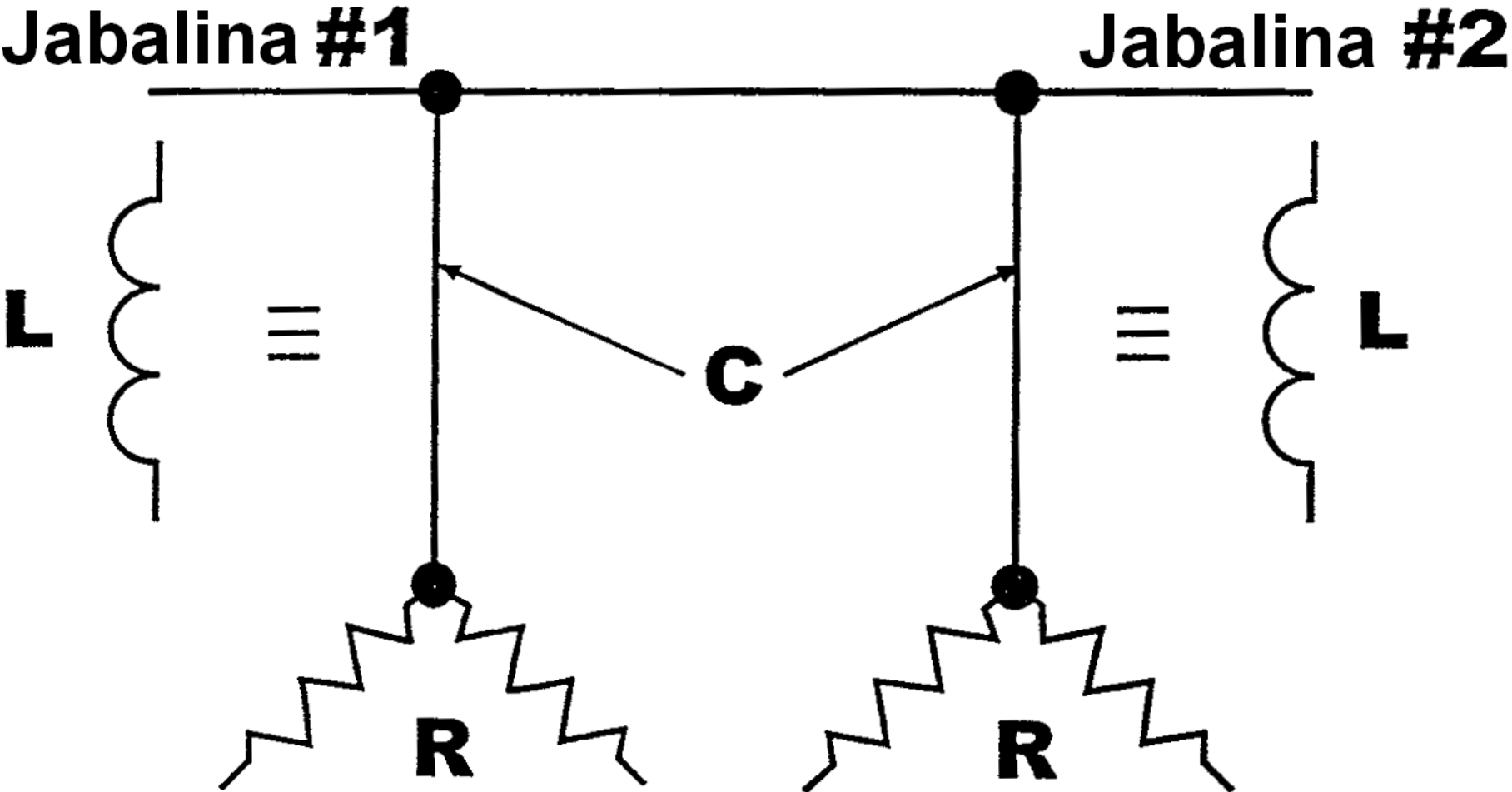


# Fórmulas aproximadas para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra (2)

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 $d \ll a \ll L/n$				

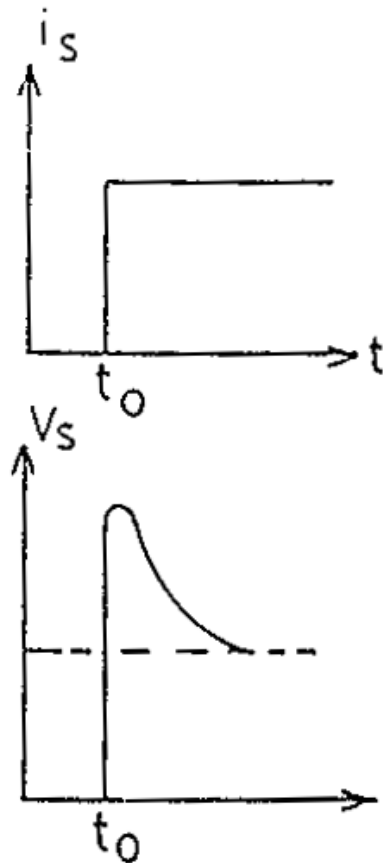
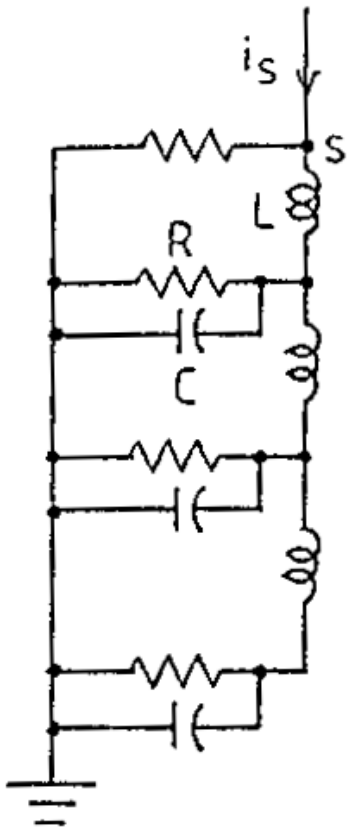
Nota: El largo del material enterrado es siempre el mismo.

# Modelo dinámico de la puesta a tierra



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

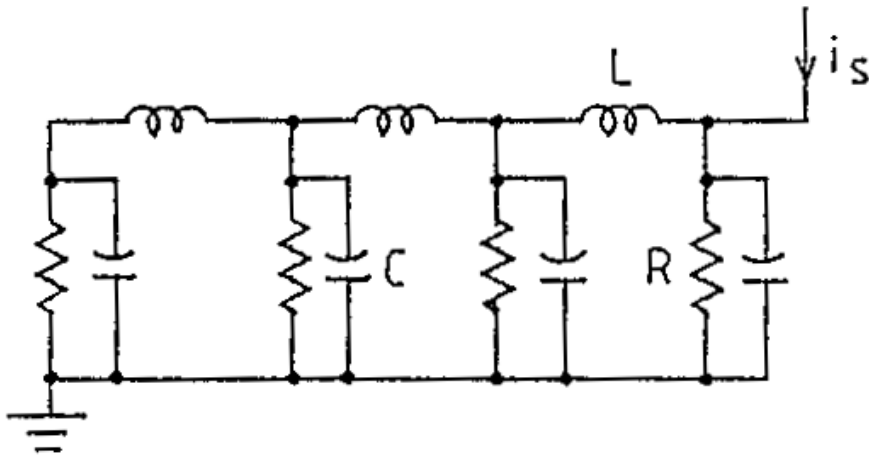
## Electrodo Clavado Vertical



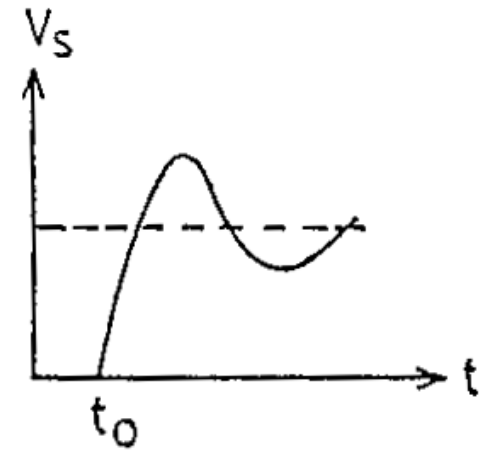
$L$  (inductancia) = Alta  
 $C$  (capacidad) = Baja  
 $i_s$  = Fuente de corriente tipo escalón  
 $V_s$  = Respuesta en tensión al escalón de corriente

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

## Conductor Horizontal Enterrado

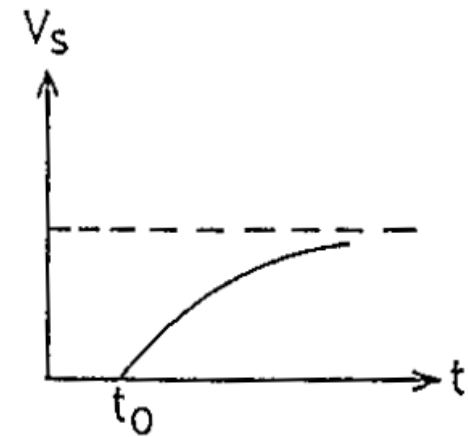
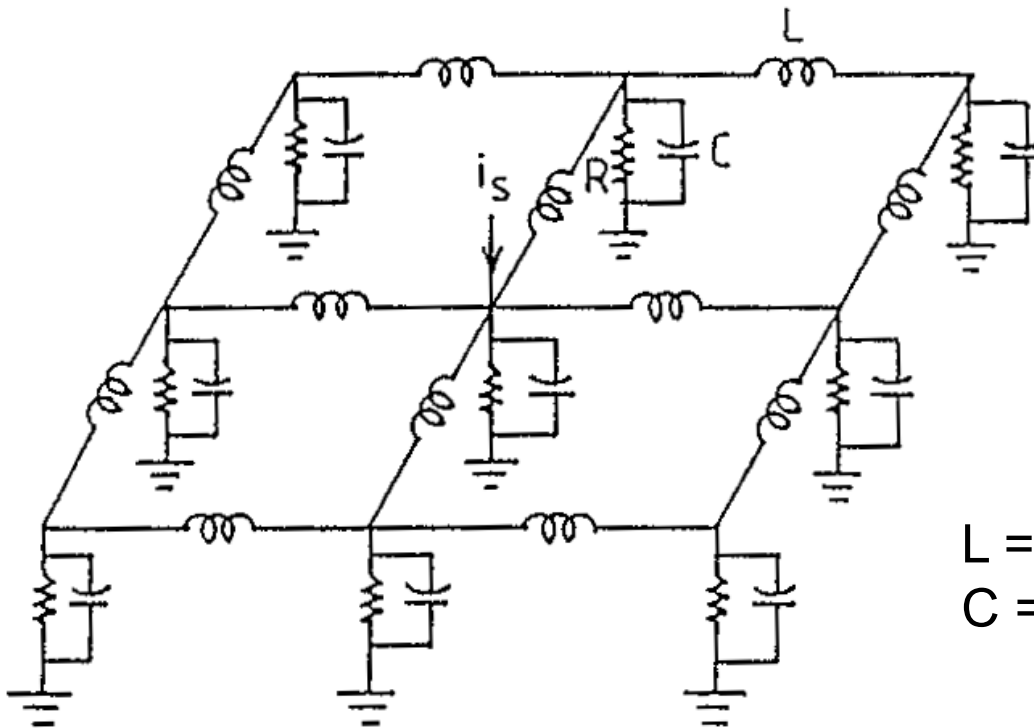


L = Alta  
C = Alta

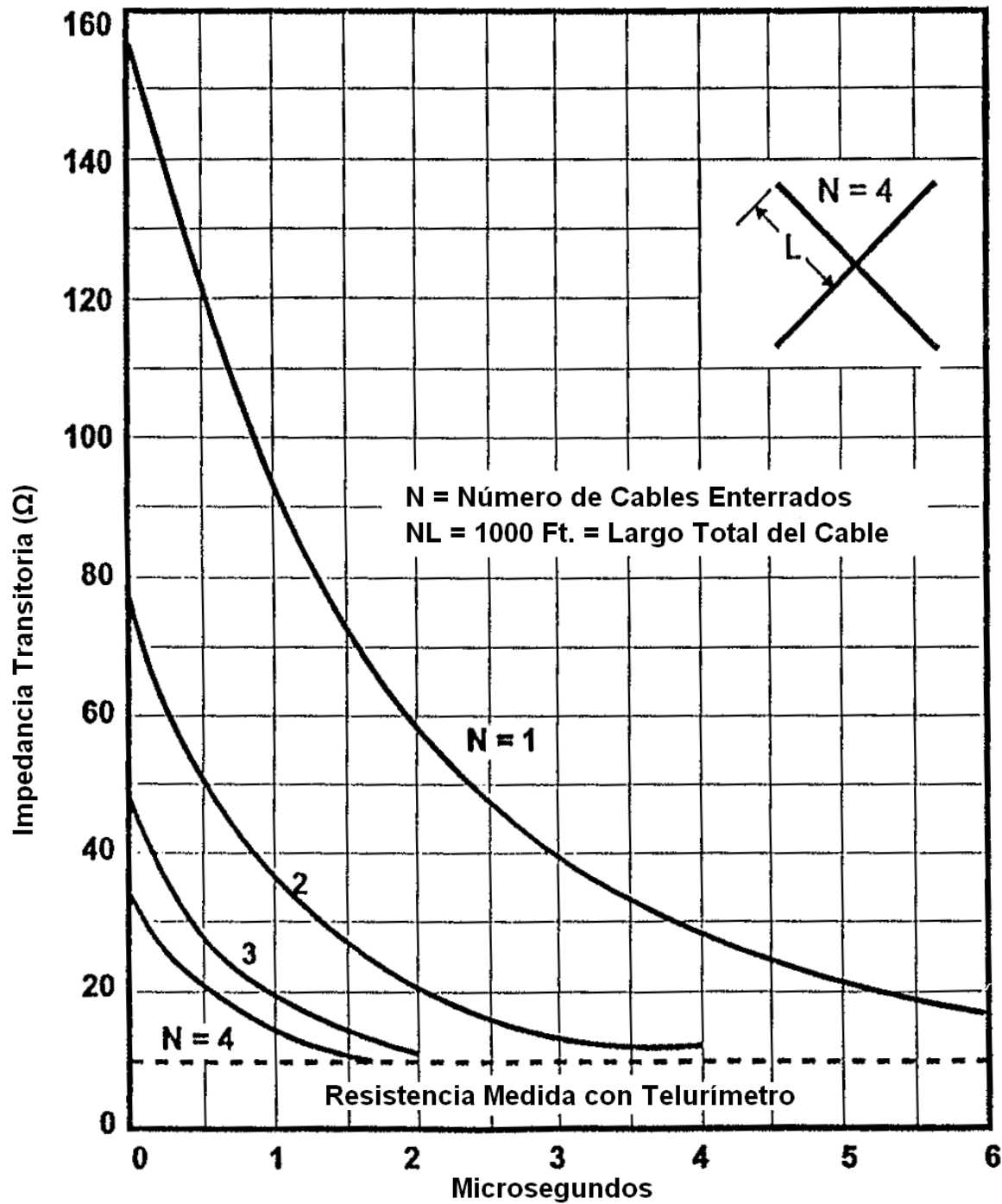


# Electrodos de Tierra – Respuesta a Transitorios (Modelo Lineal) (3)

## Malla de Tierra Enterrada

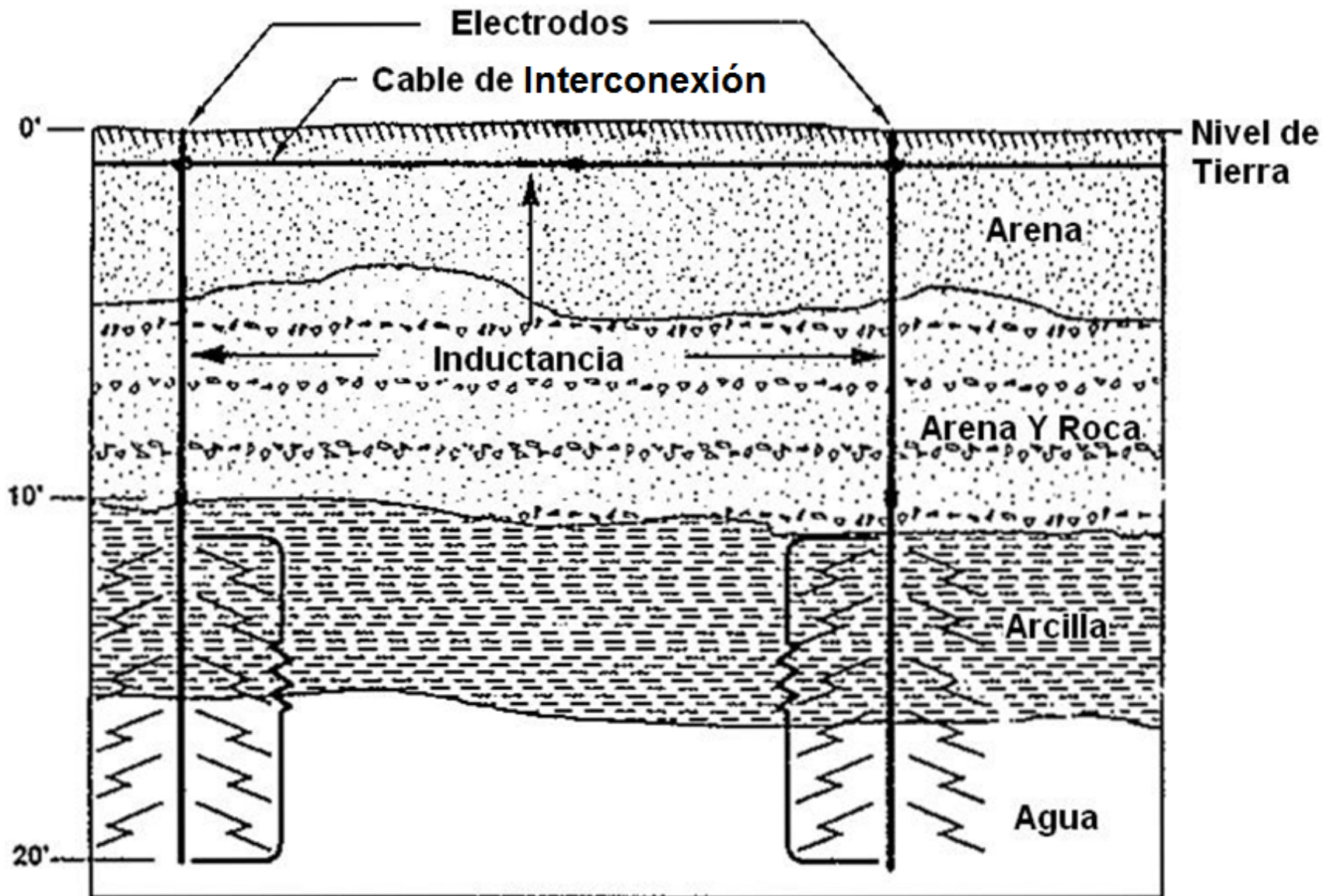


$L = \text{Baja}$   
 $C = \text{Alta}$

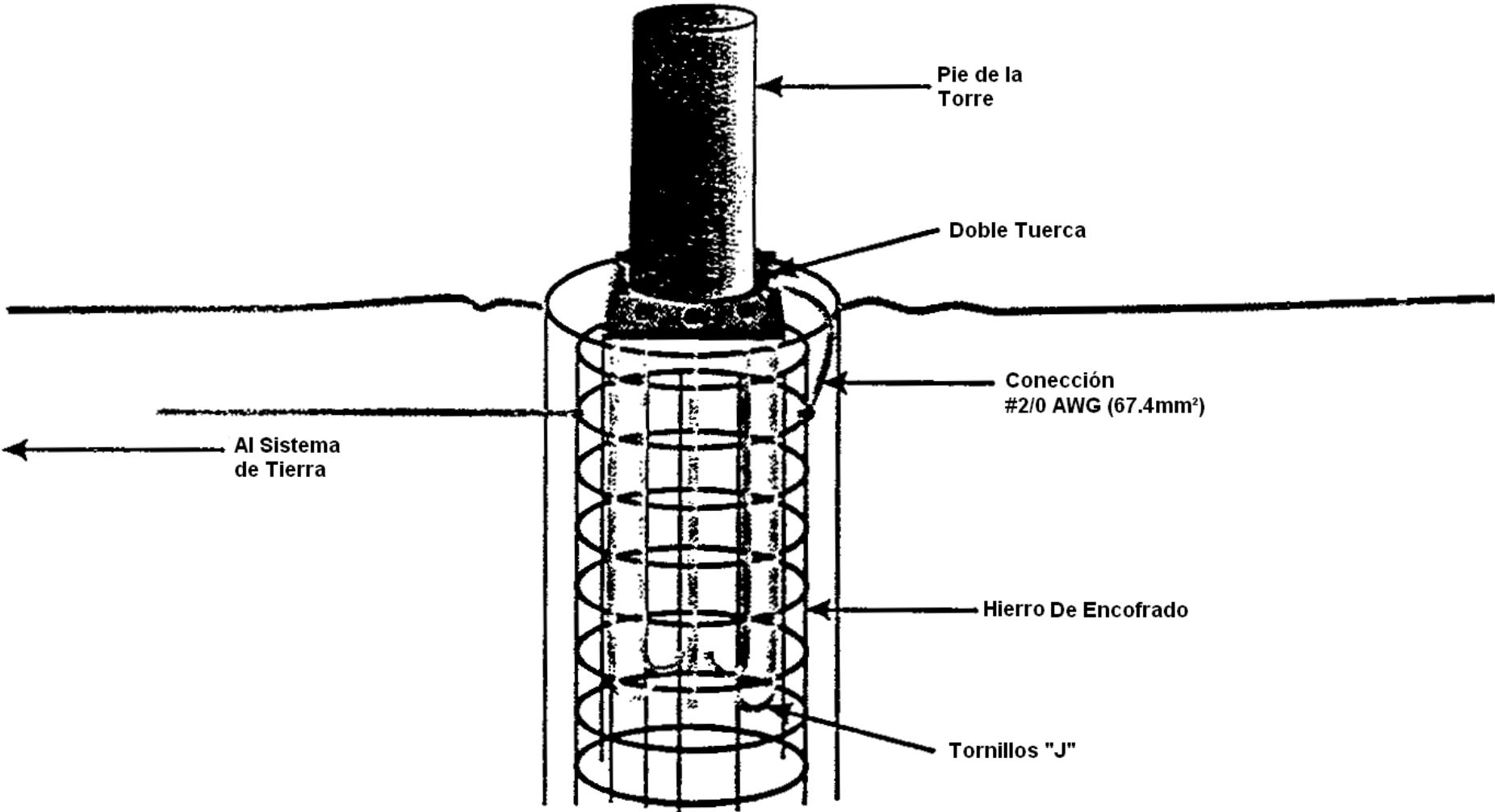


Comportamiento  
dinámico de  
electrodos  
horizontales

# Electrodos en suelo no homogéneo con baja resistencia en la profundidad

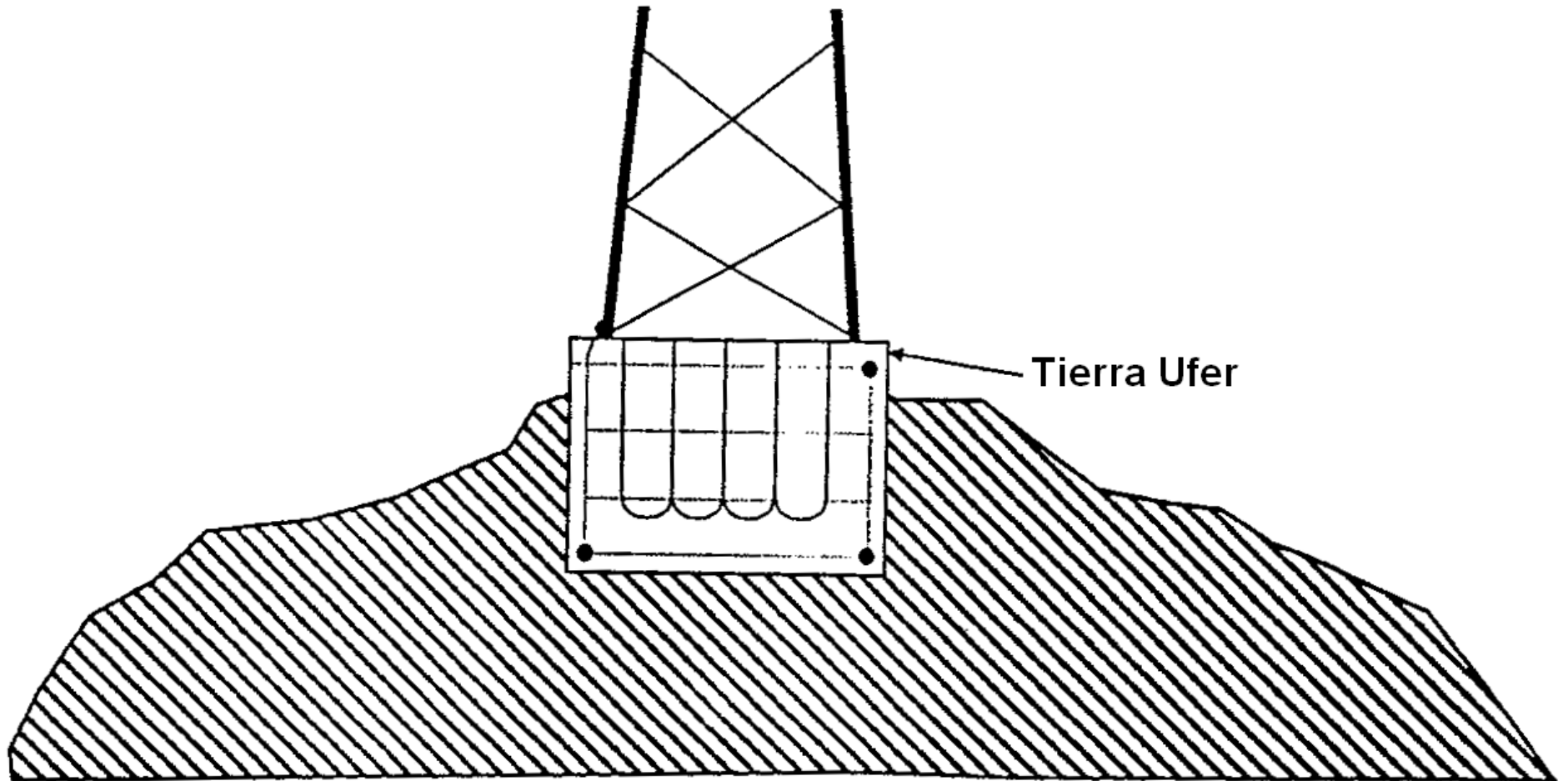


# Tierra Ufer





# 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( $\Omega$ )
Fundación arbitraria	5	12
Fundación semiesférica - r= 0,45m	0,2	35
Fundación semiesférica - r= 0,7m	0,7	23

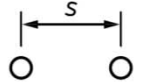
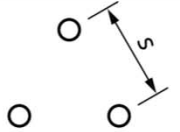
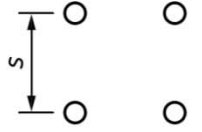
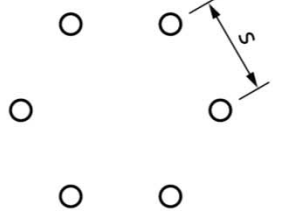
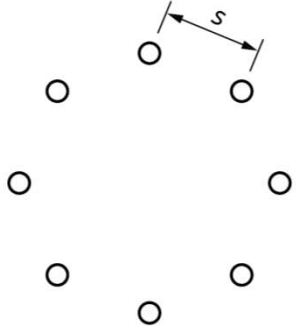
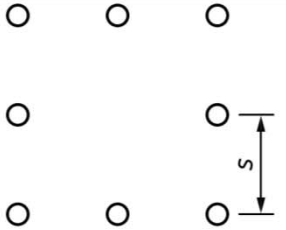
# Resistencias de puesta a tierra

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

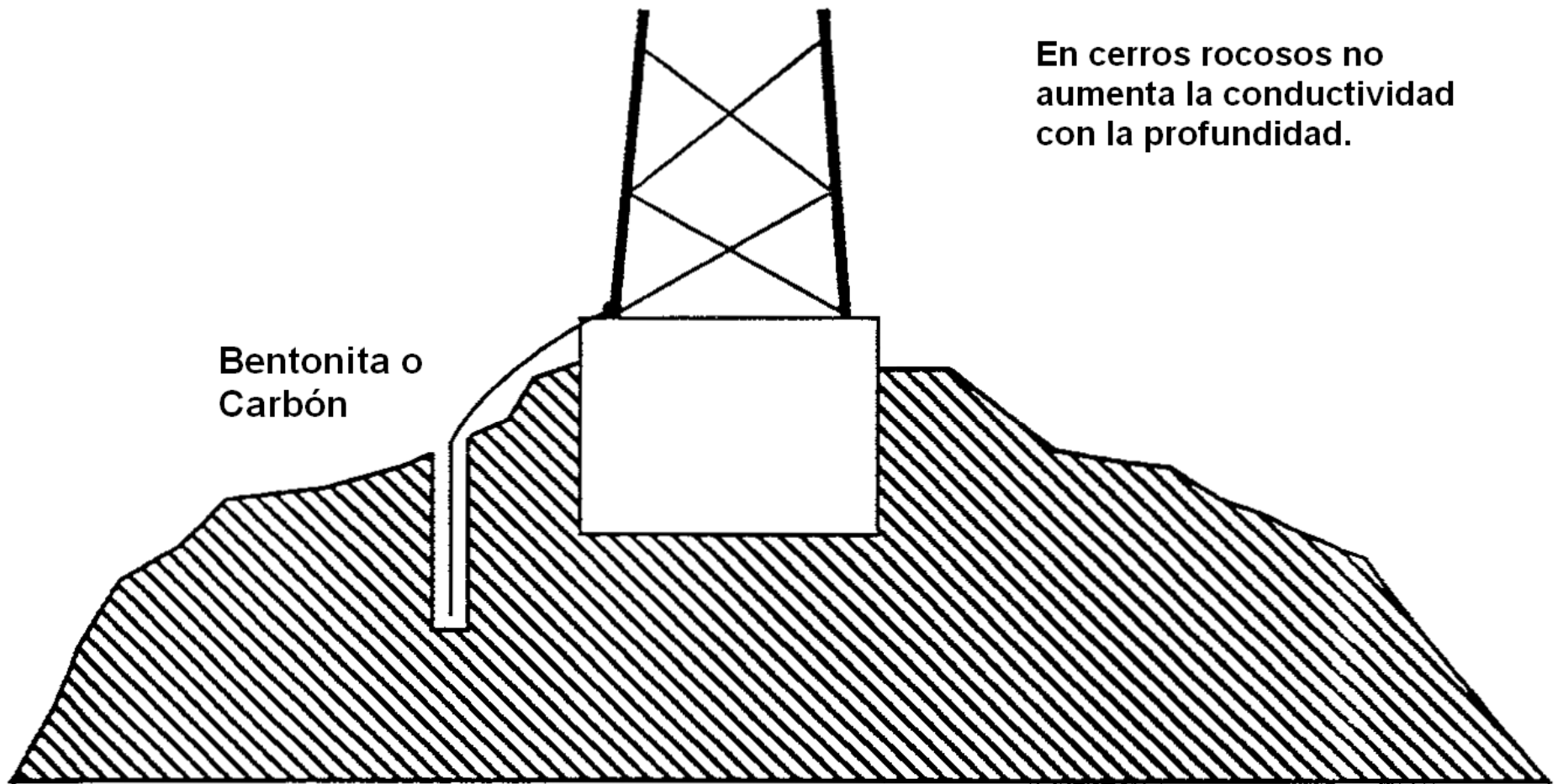
parámetros	2 barras		4 barras		6 barras	
$\rho(\Omega.m)$	15	500	15	500	15	500
$\rho_c(\Omega.m)$	30	30	30	30	30	30
$L(m)$	4	4	4	4	4	4
$g(\Omega.m)$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$a(m)$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
$s(m)$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$z(m)$	0,024	0,024	0,059	0,059	0,084	0,084
$R(\Omega)$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

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.

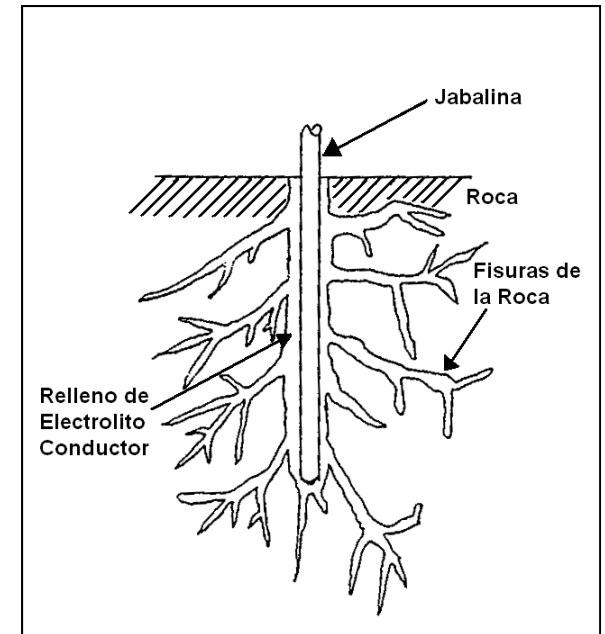


Bentonita o  
Carbón

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.

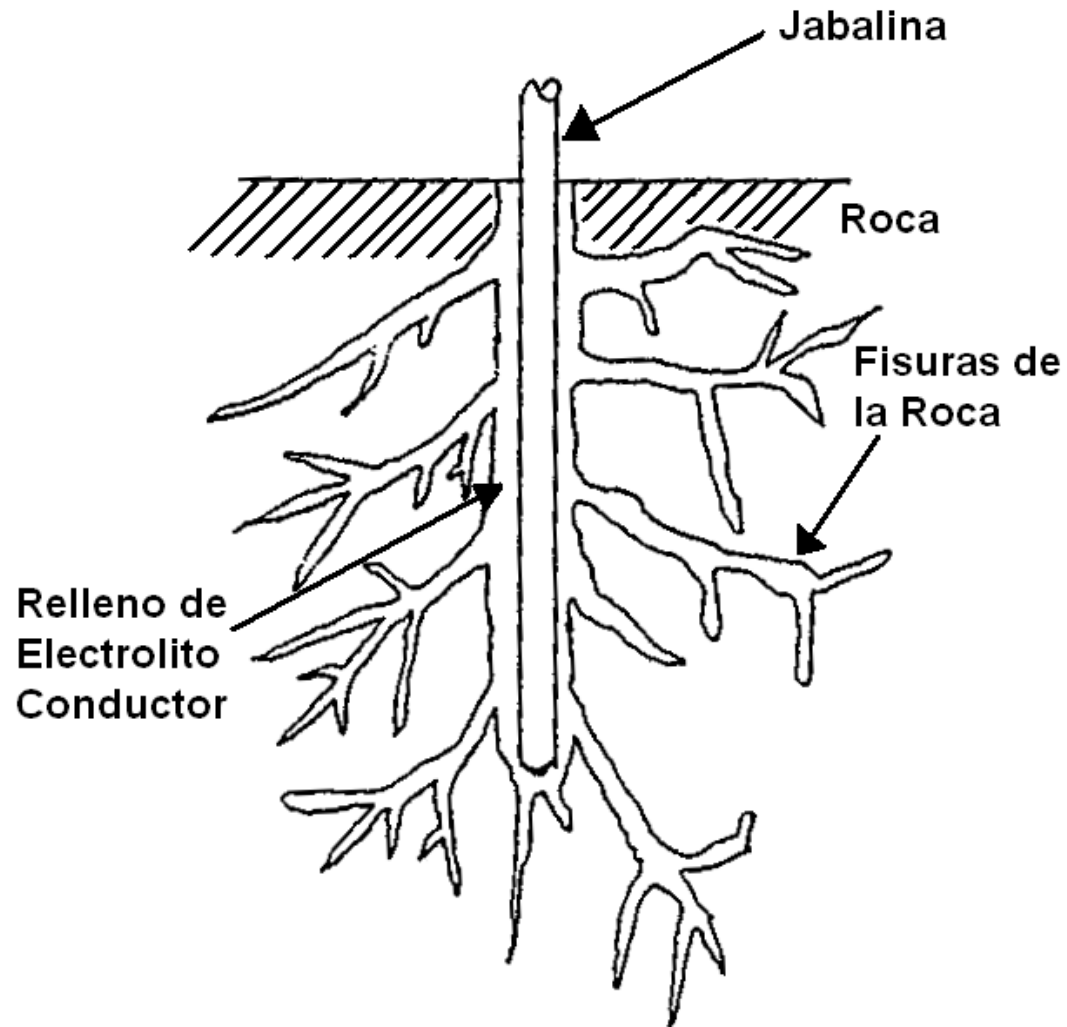


Una electrolito exitoso puede ser una mezcla de Bentonita:

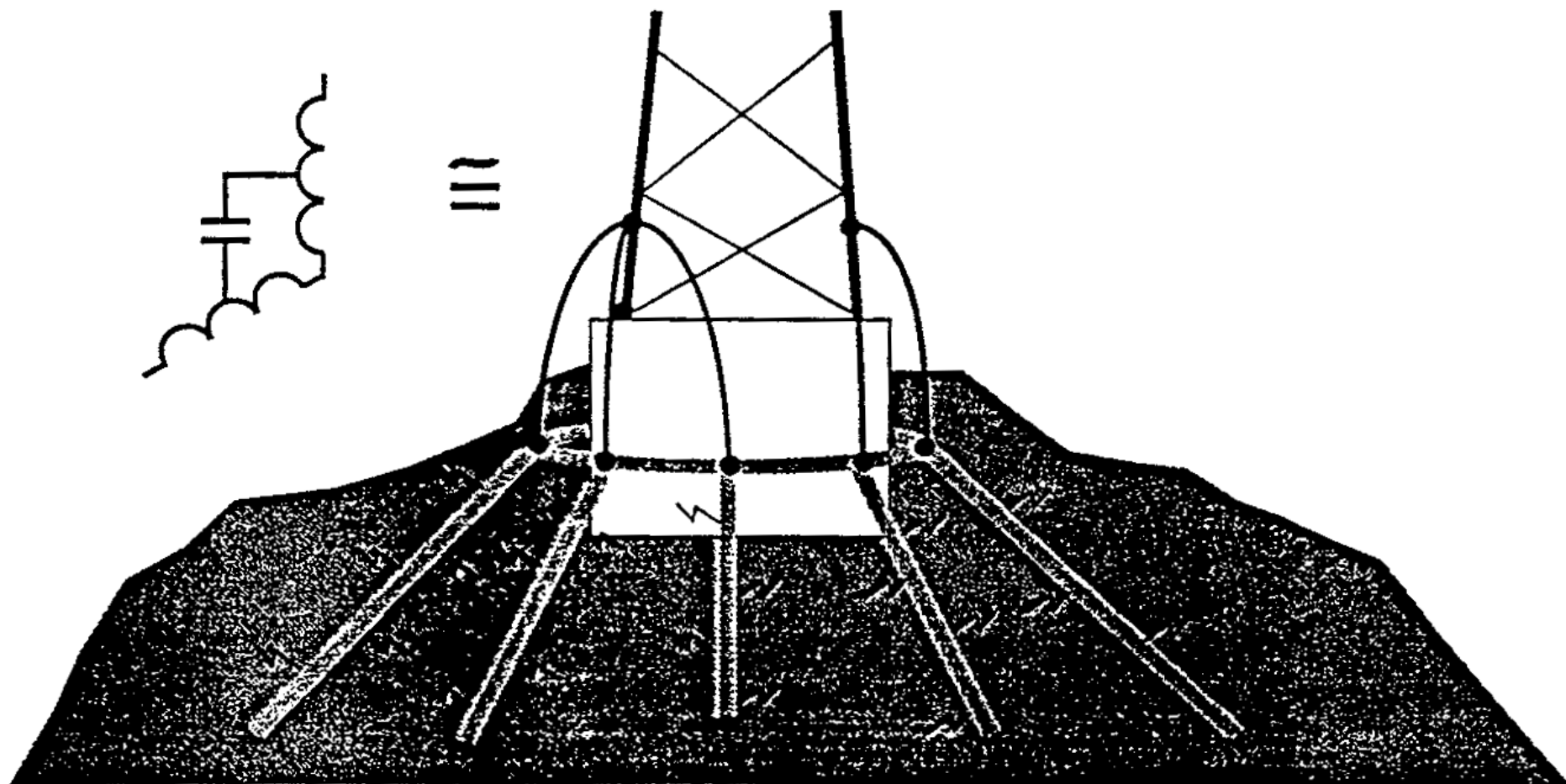
- 1 parte de Bentonita
- 1 parte de Sulfato de Sodio
- 10 partes de Agua



## Puesta a tierra en roca de alta resistividad (2)

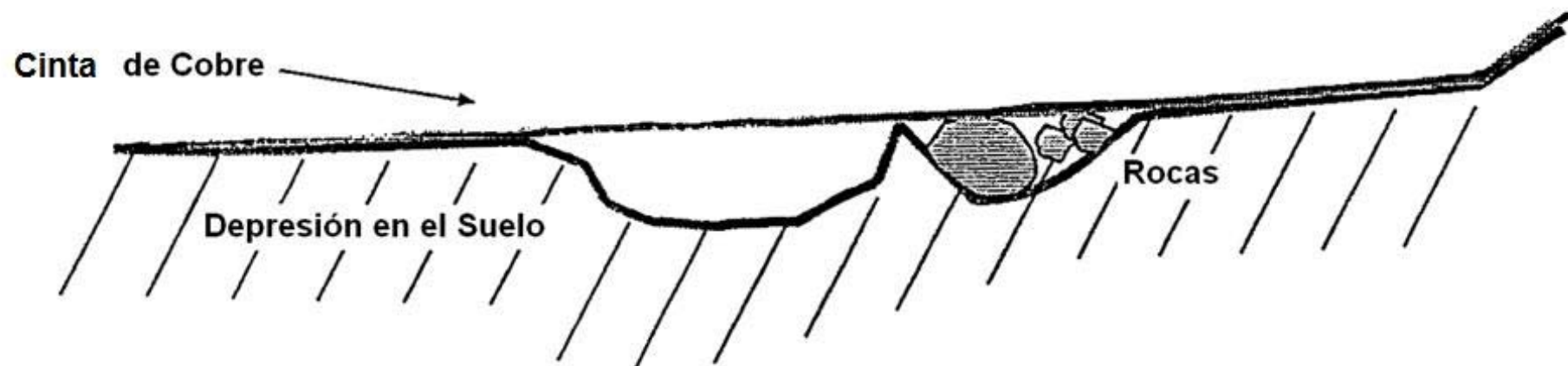


Puesta a tierra en suelo rocoso utilizando radiales:

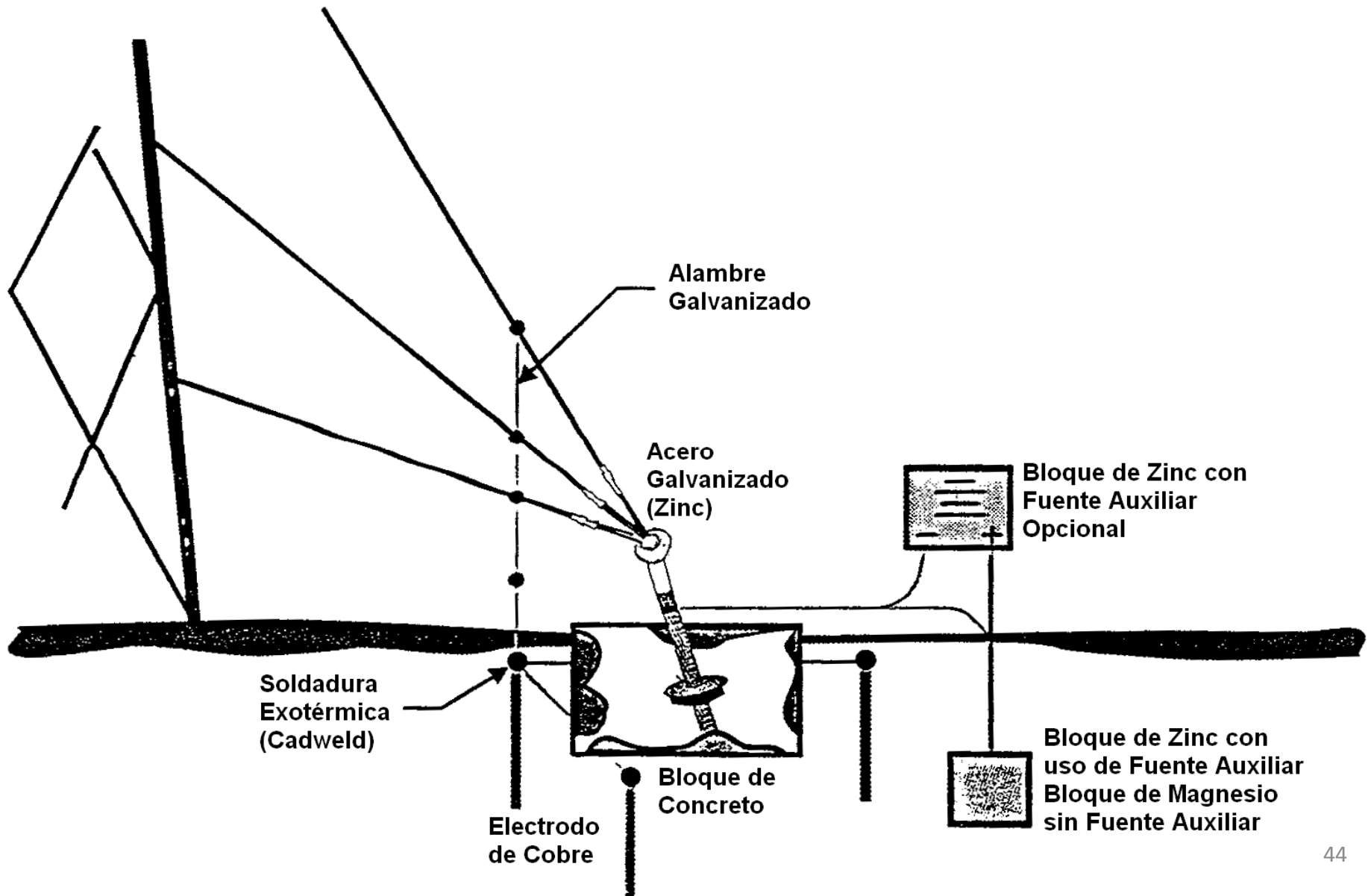


Proc.: Polyphaser

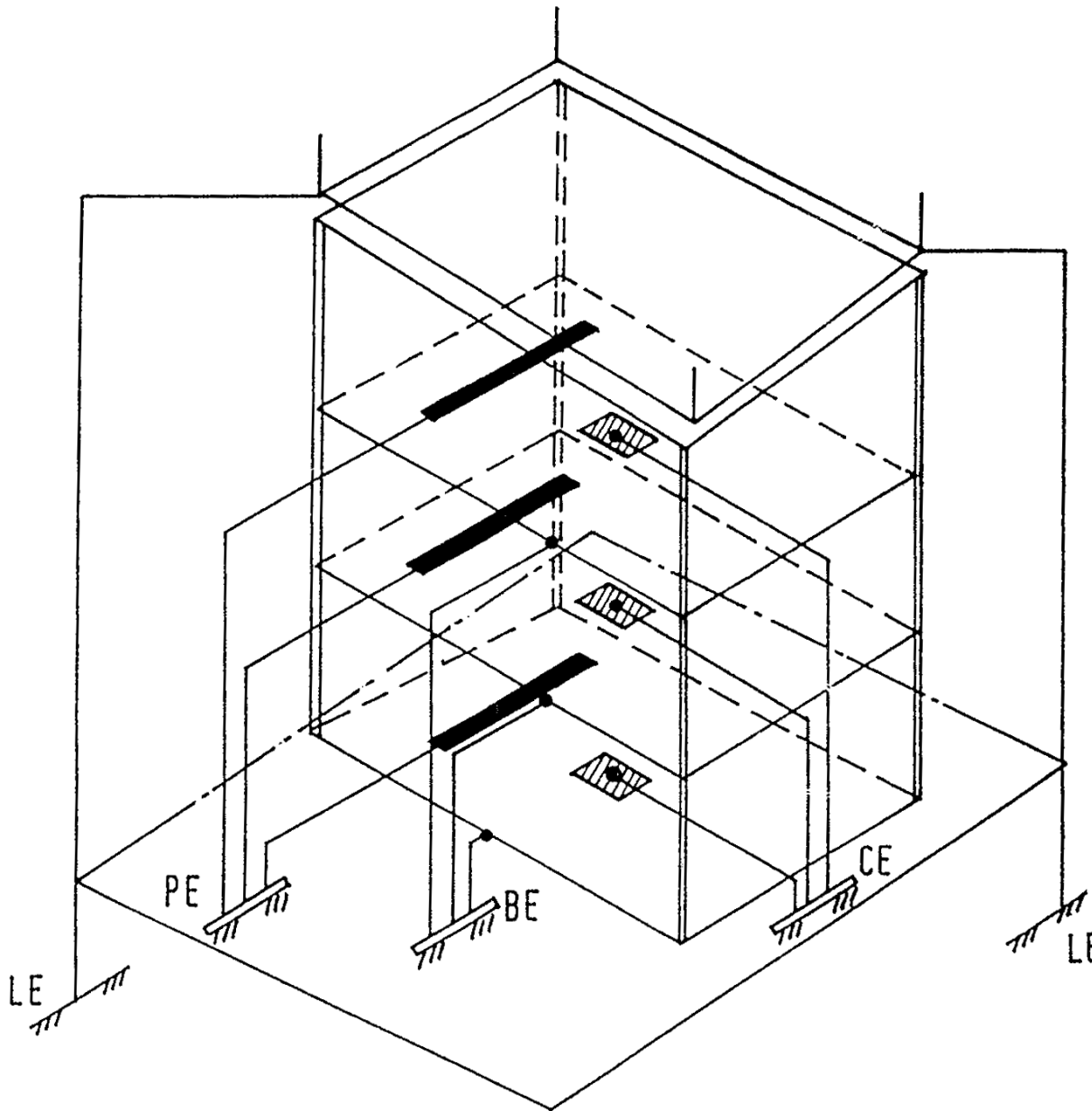
# Instalación de cintas radiales



# Puesta a tierra de riostras



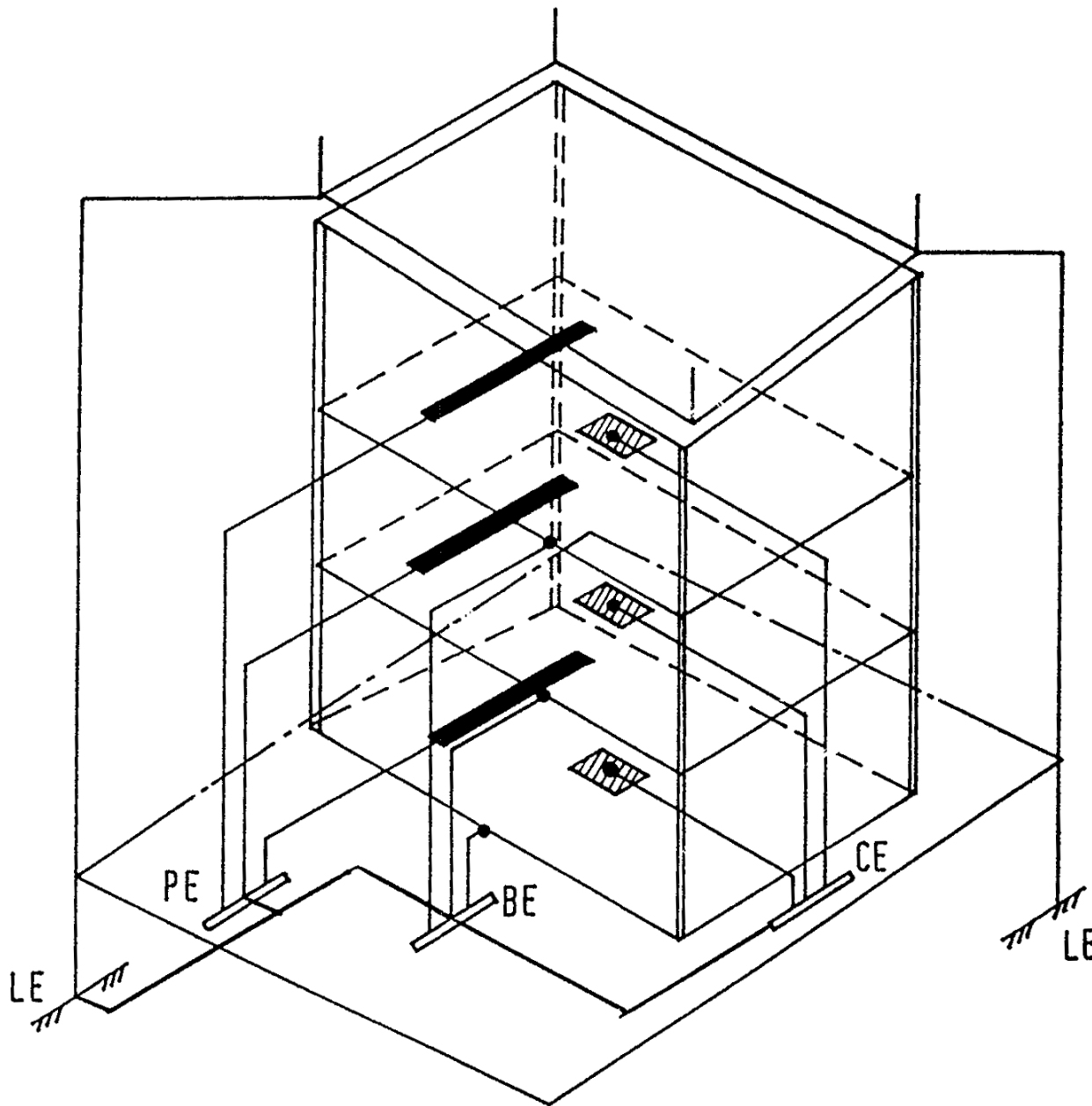
# Puesta a Tierra en Edificios (1)



Tierras  
Separadas

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

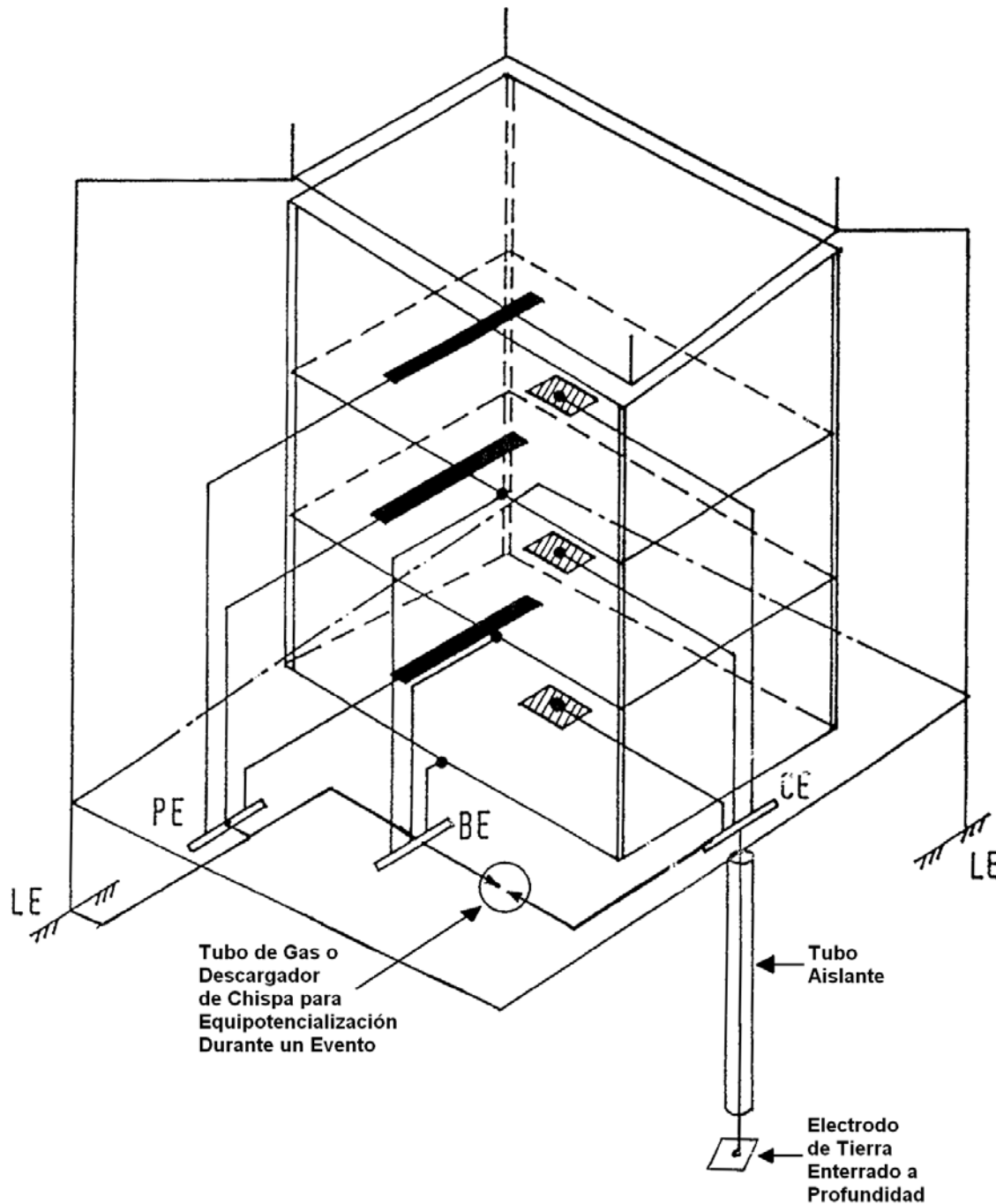
# Puesta a Tierra en Edificios (2)



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)



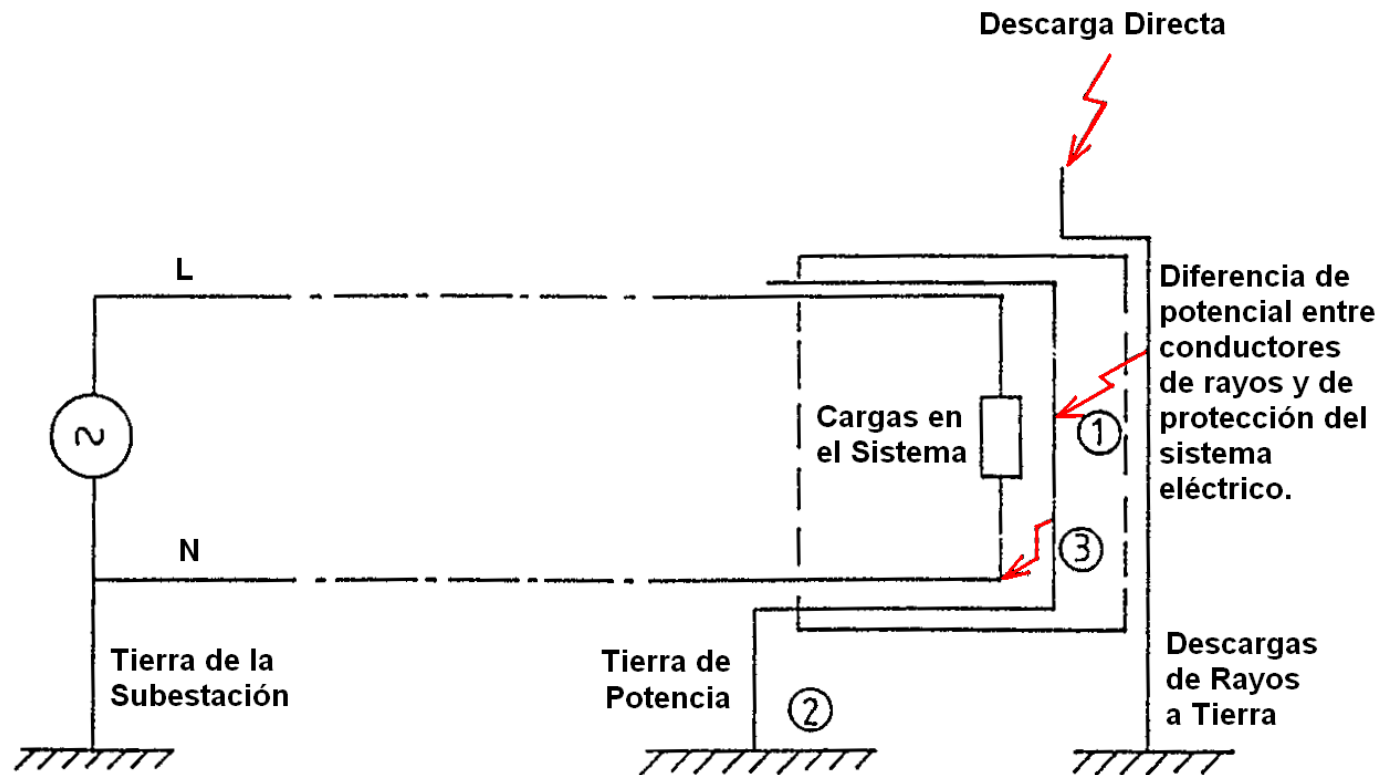
Tierra Común y  
Tierra Dedicada  
Aislada con  
Protección

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

## A: Tierras Separadas

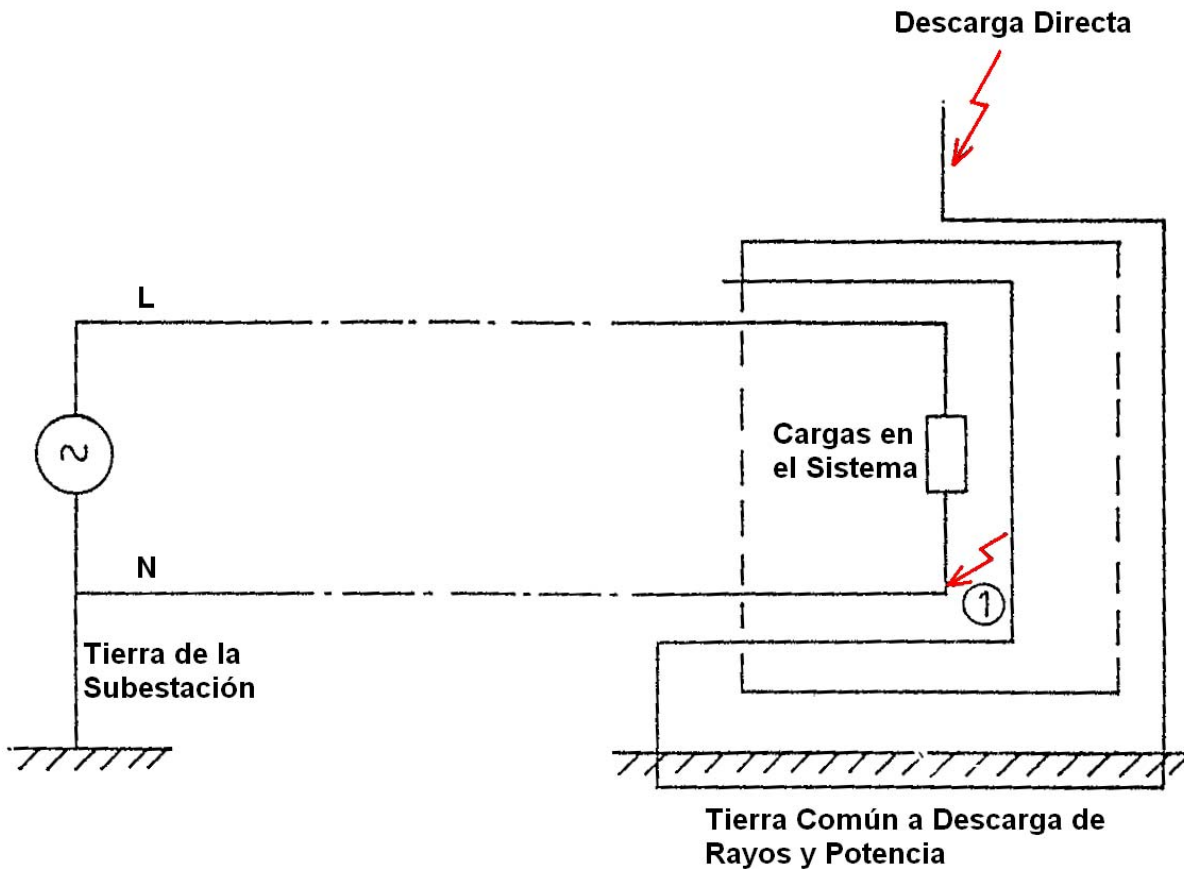
① Alta probabilidad de arco a equipo conectado a tierra del sistema eléctrico.

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

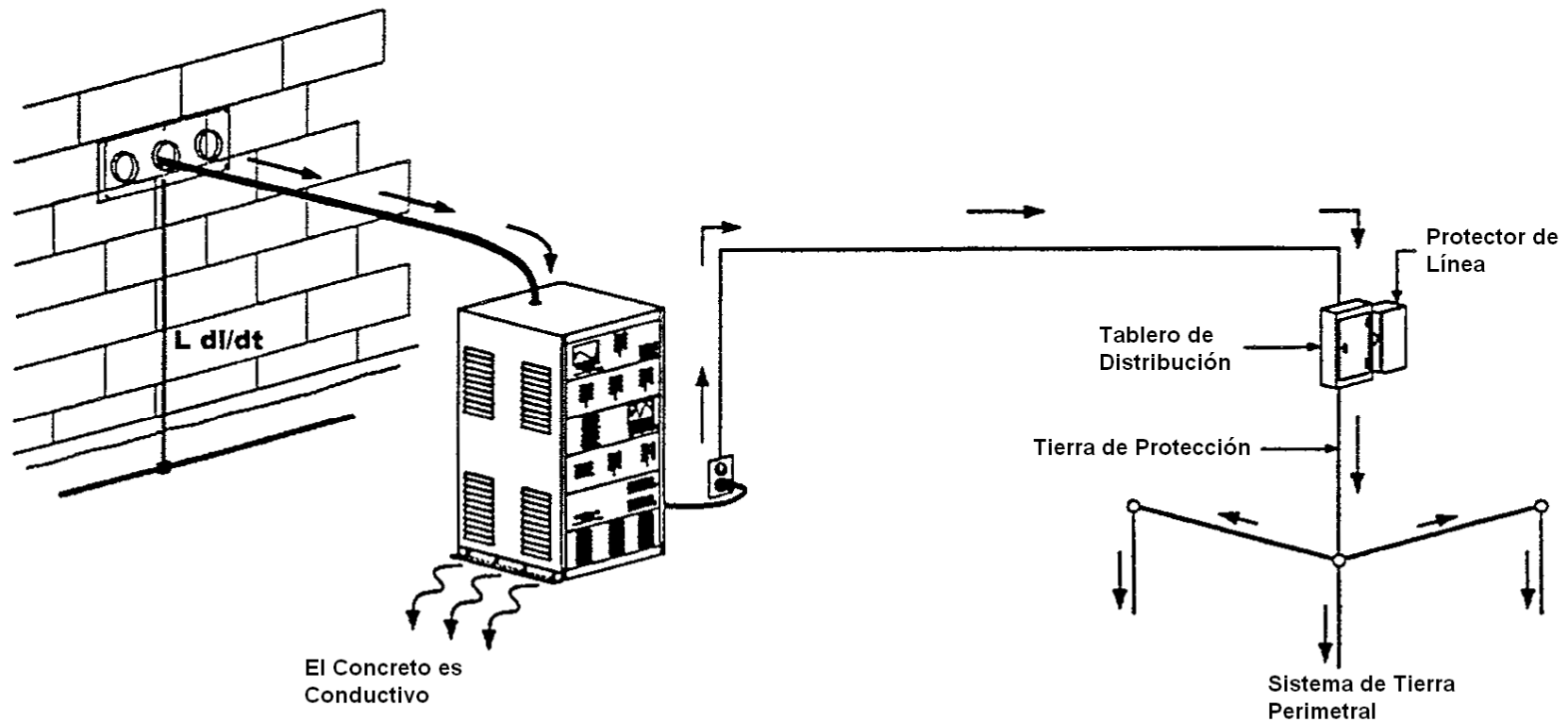


① La probabilidad de arco entre tierra y cargas se mantiene ya que el neutro está puesto a tierra en la subestación.

Ventajas:

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

# Aterramiento de Equipo (1)

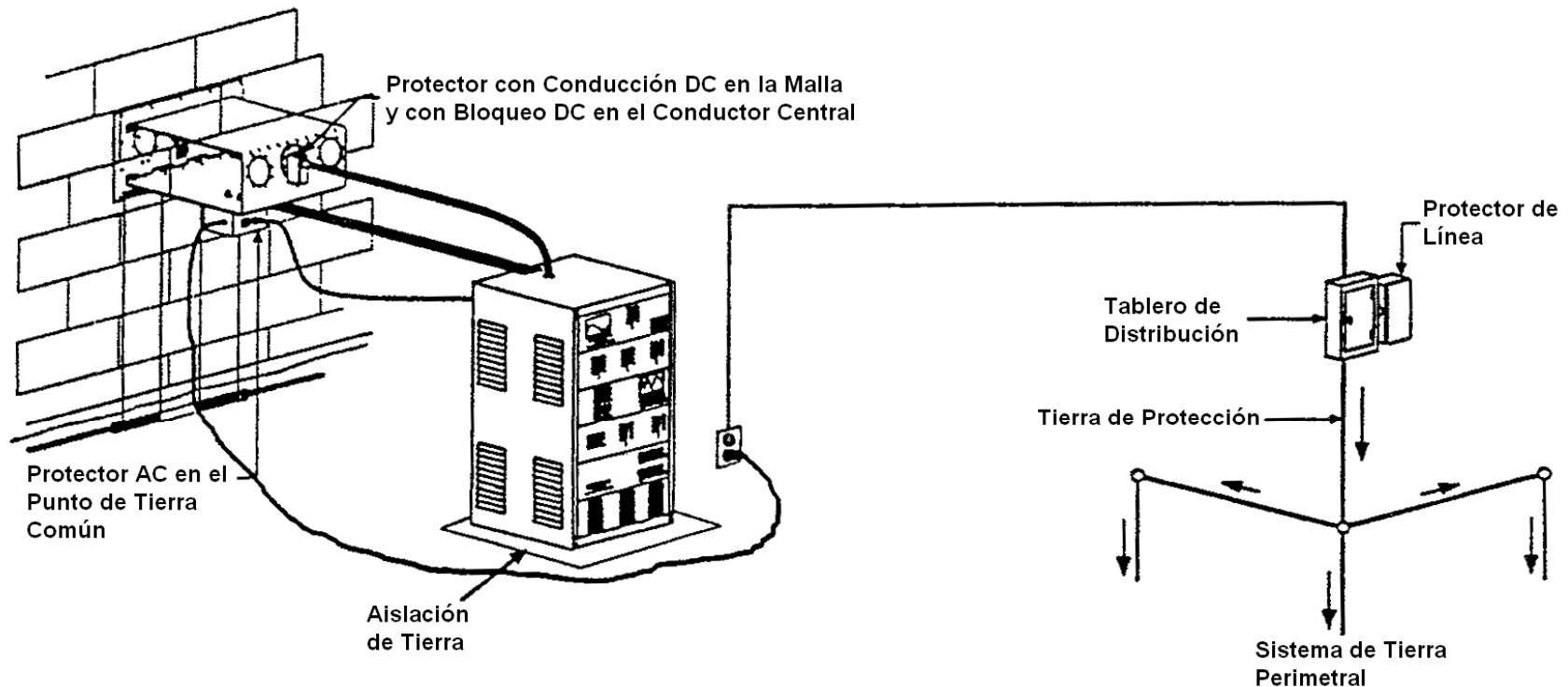


## 1) Problemas en Instalaciones Típicas

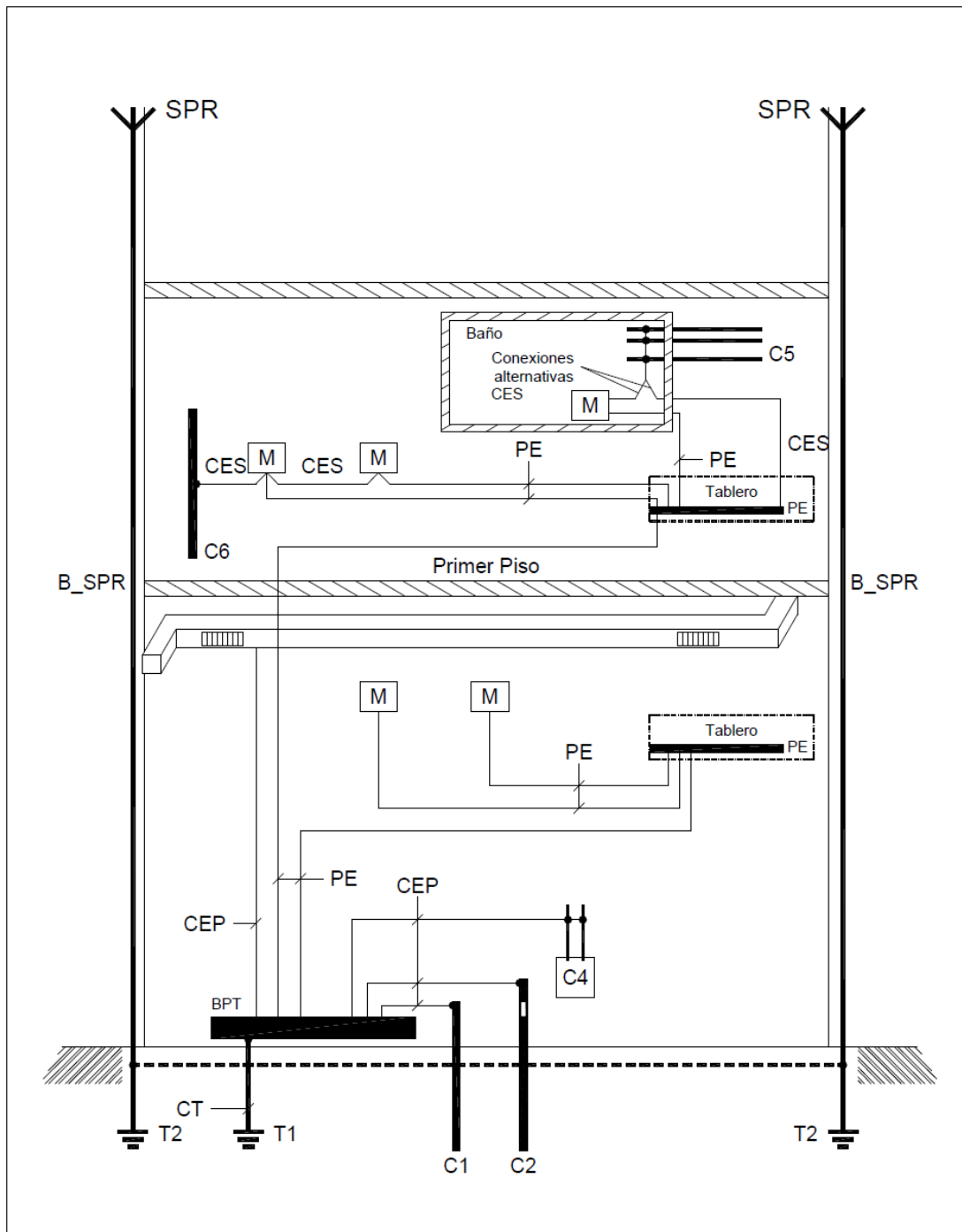
# Conexión de Protectores y Coaxiales a un Punto Único de Tierra



# 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 : 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.

