

Unidad VI

SISTEMAS DE TIERRA

Instalaciones eléctricas I-2017

Ing. Jorge Alberto Zetino CH

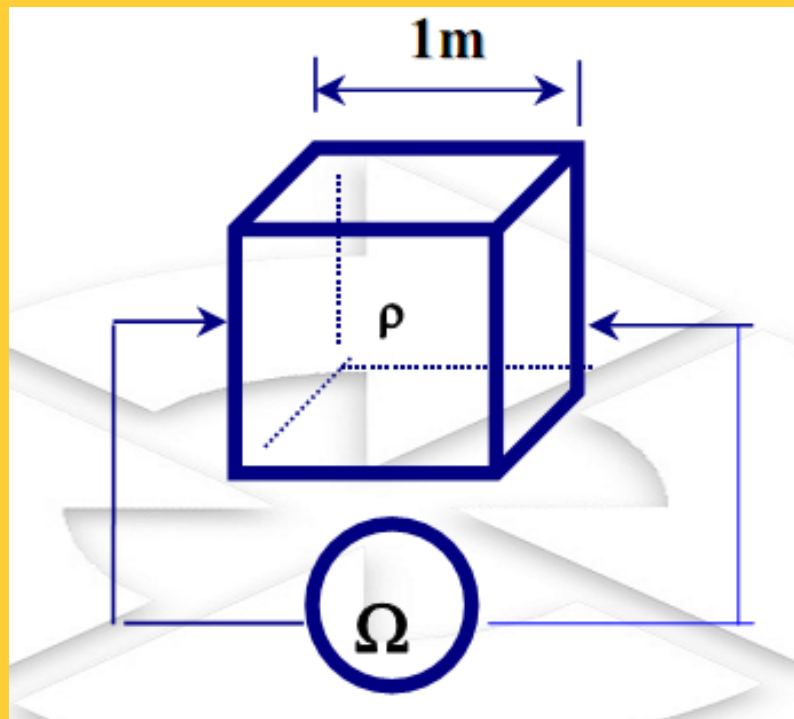
Objetivo: Estudio de los conceptos básicos y aplicaciones relacionados con la resistencia a tierra.

Contenido:

- Resistividad
- Forma de medirla
- Resistencia
- Métodos de medición
- Tipos de electrodos de tierra
- Configuraciones para reducir la R de tierra
- Sistemas de Distribución
- Aplicaciones

LA RESISTENCIA A TIERRA Y LA RESISTIVIDAD

- El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo
- La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, se mide en Ohmios-metro

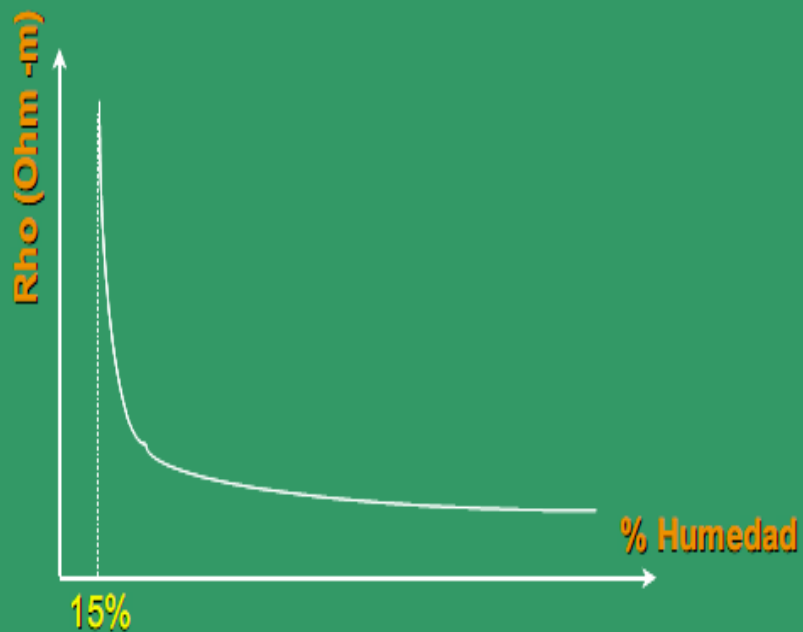


$$R = \rho L / A$$
$$R = \rho$$

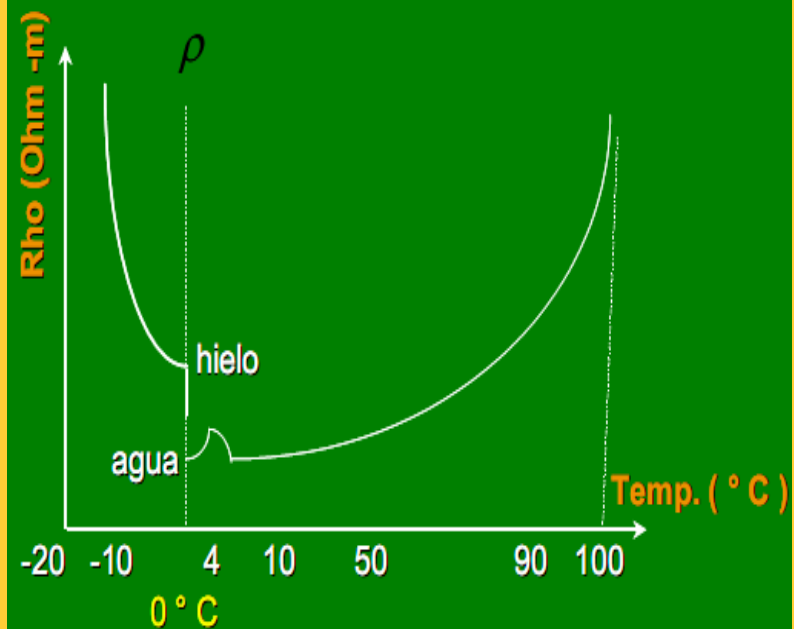
Factores que influyen en la resistividad

- ▶ Sales solubles, es decir la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas
- ▶ Composición propia del terreno, arcilla, piedra suelta, talpetate, tierra negra.
- ▶ Estratigrafía, el terreno no es uniforme en sus capas
- ▶ Granulometría, porosidad y poder retenedor de humedad
- ▶ Estado higrométrico, contenido de agua y humedad
- ▶ Temperatura, al disminuir la temperatura, por debajo de 0°C, la resistividad aumenta.
- ▶ Compactación, la resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación.

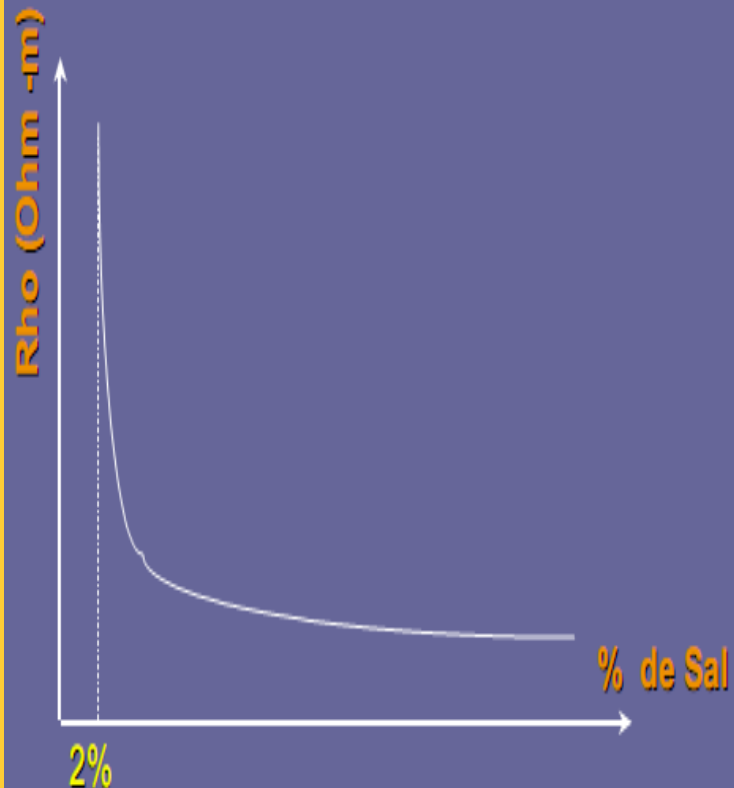
La Humedad



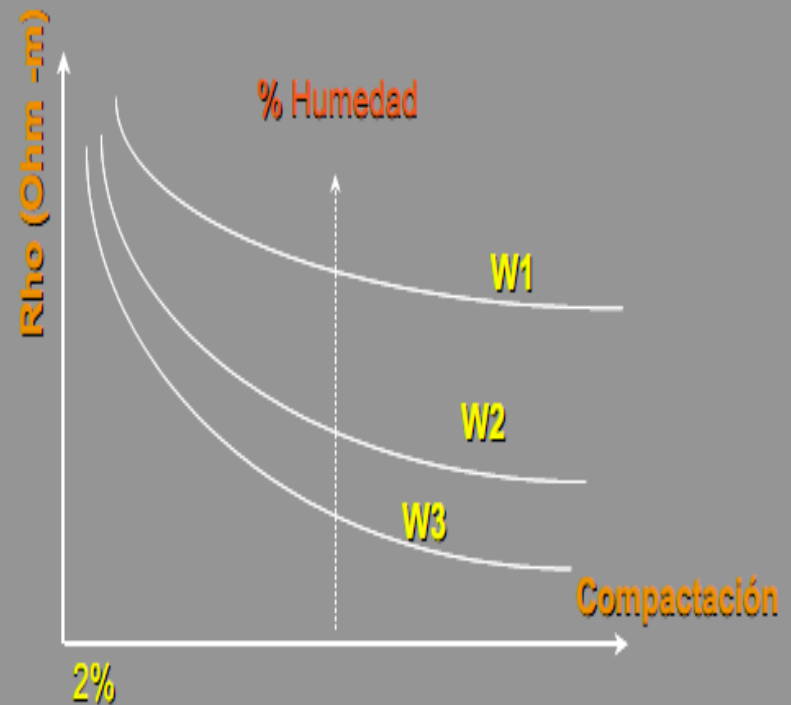
La Temperatura



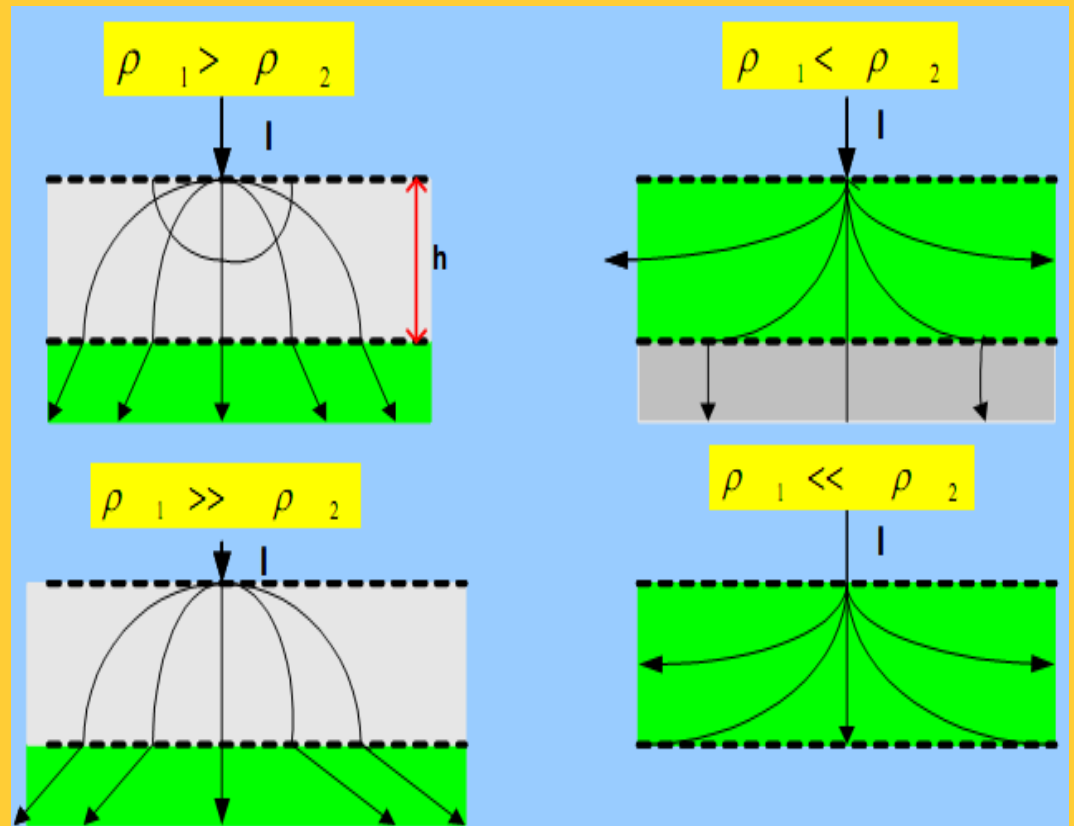
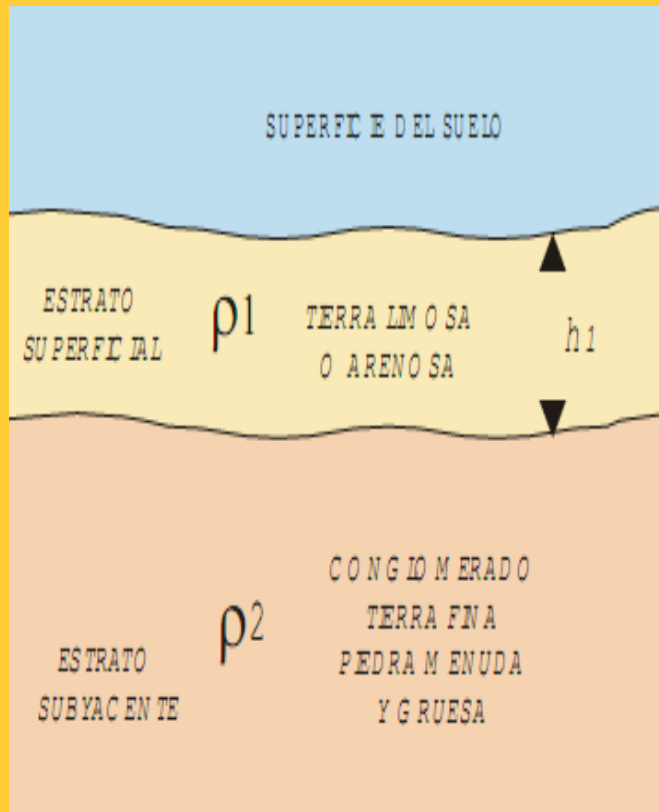
Concentración De Sales



Compactación Del Terreno



Estratificación del terreno

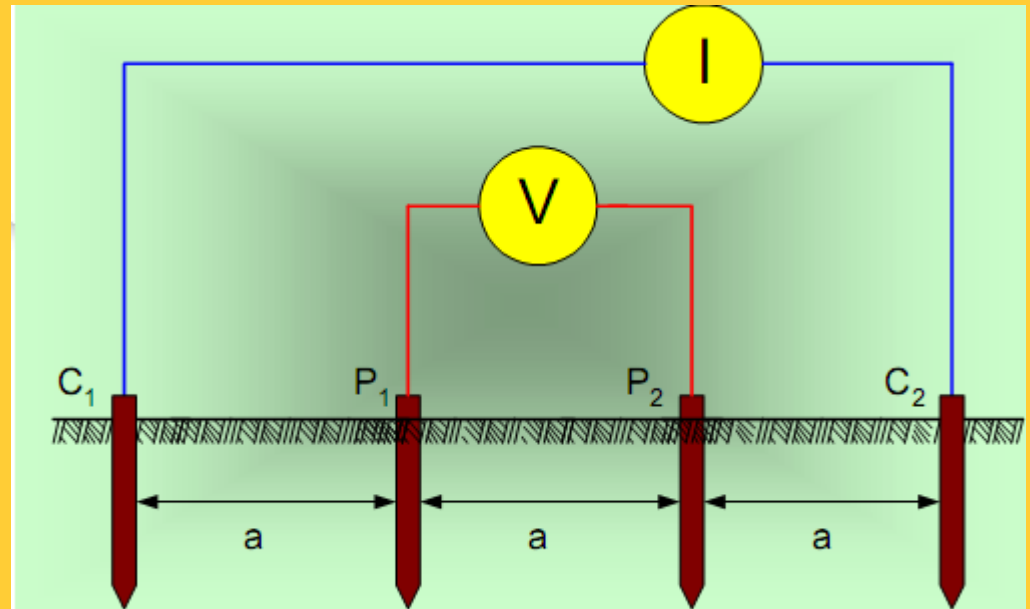


MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ρ DEL SUELO, MÉTODO DE WENNER

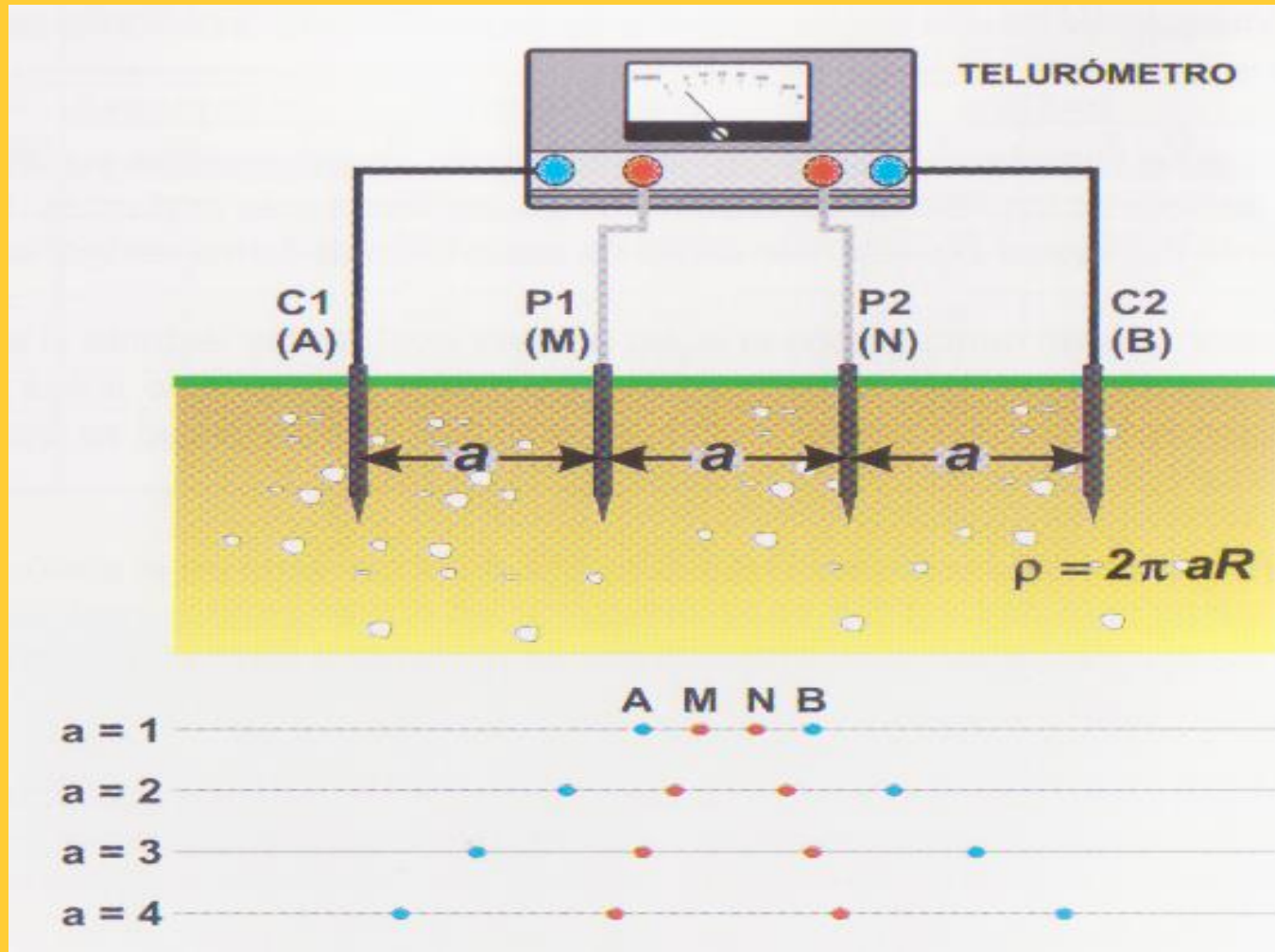
- Para medir la resistividad del suelo en ohmios-metro se requiere de un telurómetro o *Megger* de tierras de cuatro terminales.
- “a” en metros, debe ser mayor que 20B, $R = V/I$ es la resistencia aparente medida.

$$\rho = 2\pi a R$$

B, es la
profundidad del
electrodo
enterrado



Medición de la resistividad, con medidor de 4 terminales



Se recomienda efectuar dos juegos de mediciones en forma perpendicular : N-S y E-O, En la práctica, no se recomiendan separaciones “a” mayores de 8m, para profundidades de exploración de 6m.

Ejemplo tipo : Determinación del perfil de resistividad del terreno

ESTUDIO DE RESISTIVIDAD DEL SUELO						
SITIO				ESTADO DEL TERRENO		Húmedo
CIUDAD	Vereda Llano del Carmen			COLOR DEL SUELO		Negro
CLIENTE				METODO DE MEDICIÓN		WENNER
Profundidad de exploración	Separación m	Resistencia (Ω)		ρ ($\Omega.m$)		ρ ($\Omega.m$) Promedio
		N - S	E - O	N - S	E - O	
0.75	1	3839	3920	24121.15	24630.09	24375.62
1.50	2	1072	1200	13471.15	15079.64	14275.40
2.25	3	273	266	5145.93	5013.98	5079.96
3.00	4	140	144	3518.58	3619.11	3568.85
3.75	5	57	49	1790.71	1539.38	1665.04
4.50	6	38	41	1432.57	1545.66	1489.11
5.25	7	16	14	703.72	615.75	659.73
6.00	8	12.5	10.5	628.32	527.79	578.05



Responsable de la medición	Profundidad de exploración = 0.75a
----------------------------	------------------------------------

RECOMENDACIONES
Instalar electrodos tipo varilla de seis metros y tratamiento del terreno.

Ejemplo tipo

- Si la distancia entre electrodos “a” es de 3 metros, B es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohms, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, se calcula sustituyendo en la ecuación:
- $\rho = 2\pi aR$
- $\rho = 8.1 \text{ ohms-m}$
- Este valor corresponde a una profundidad de:
 $0.75 \times 3 = 2.25$ metros, aproximadamente igual a la separación entre electrodos.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD Ohmios-m
Terreno pantanoso	Hasta 30
Limo	20 A 100
Humos	10 A 150
Turba Húmeda	5 A 100
Arcilla Plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 A 200
Margas de jurásico	30 A 40
Arena arcillosa	50 A 500
Arena silícea	200 A 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 A 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 A 3000
Caliza blanda	100 A 300
Caliza compacta	1000 A 5000
Caliza agrietada	500 A 1000
Pizarra	50 A 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granito y gres procedentes de alteración	1500 A 10000
Granito y gres muy alterados	100 A 600

Nota: Es importante mencionar que un terreno con menor resistividad, presenta mayores problemas de corrosión

Método de tomografía eléctrica

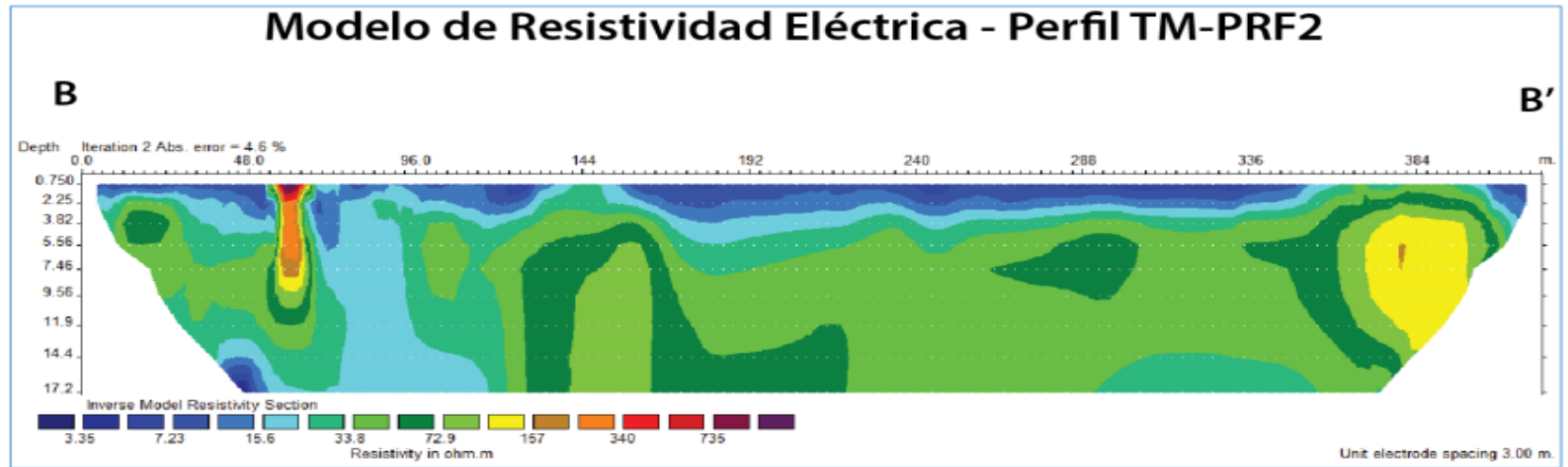


Figura 12. Modelo de resistividad eléctrica para el perfil TM-PRF2. La variación de resistividades para los primeros 7 m va de los 3 Ohm.m hasta los 70 Ohm.m.

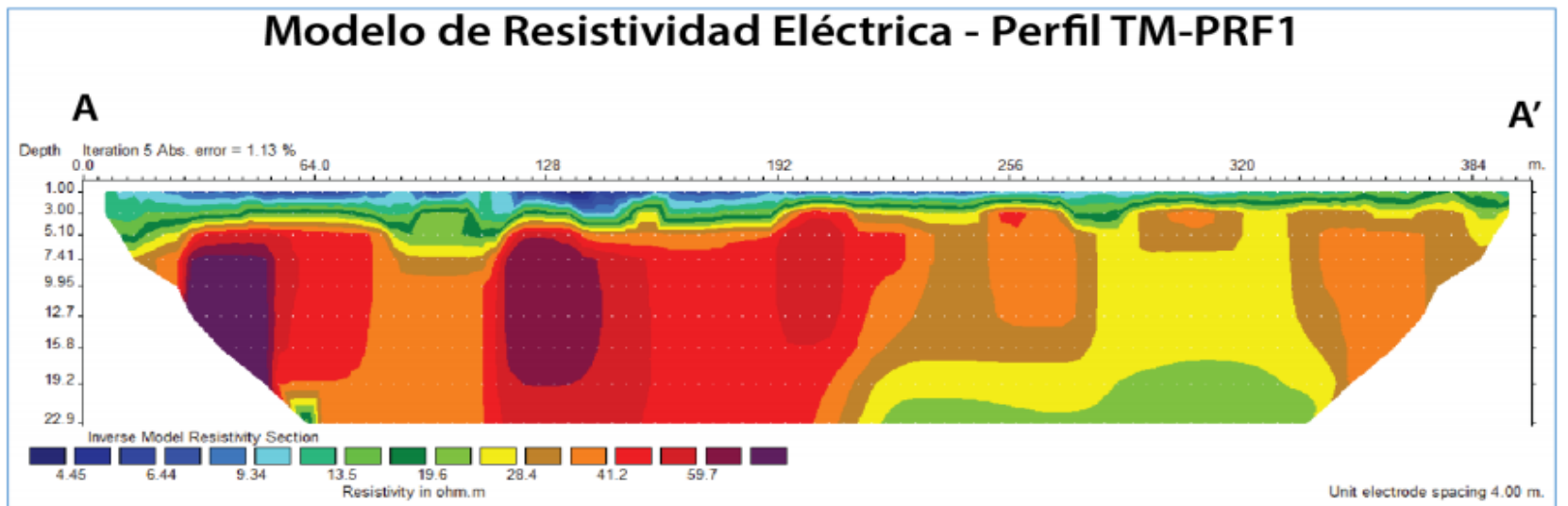


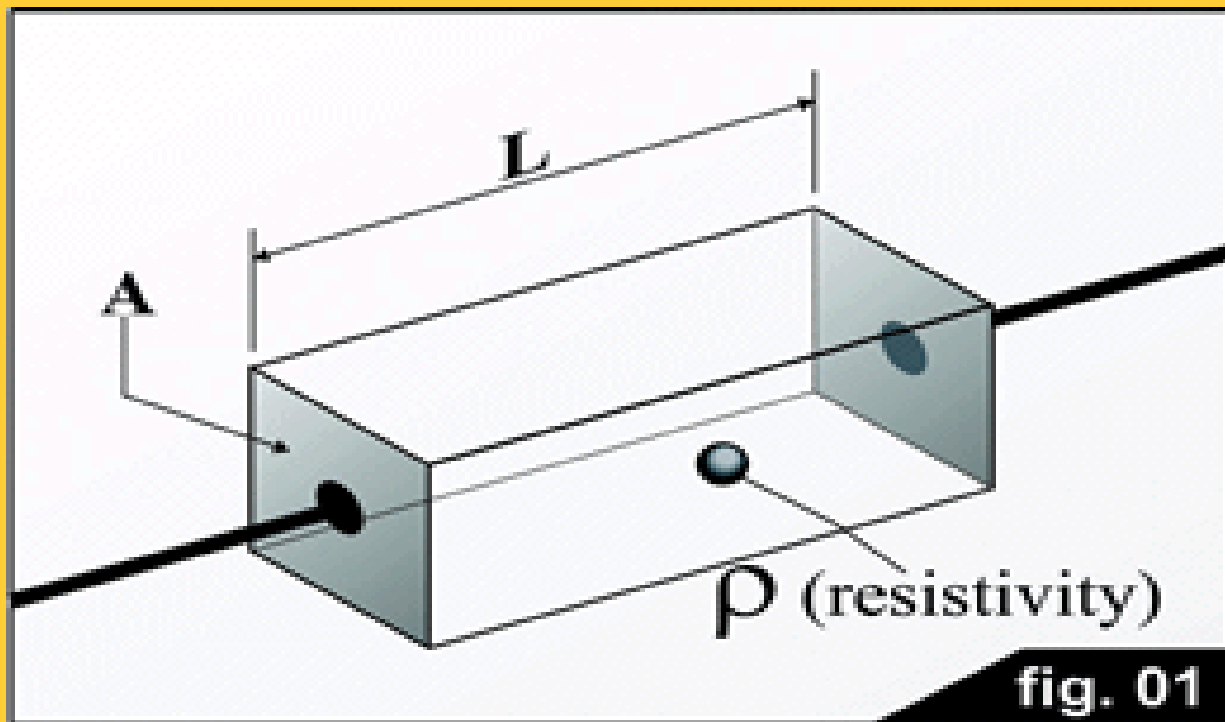
Figura 11. Modelo de resistividad eléctrica para el perfil TM-PRF1. La variación de resistividades para los primeros 7 m va de los 5 Ohm.m hasta los 35 Ohm.m.

Resistencia a tierra, necesidad

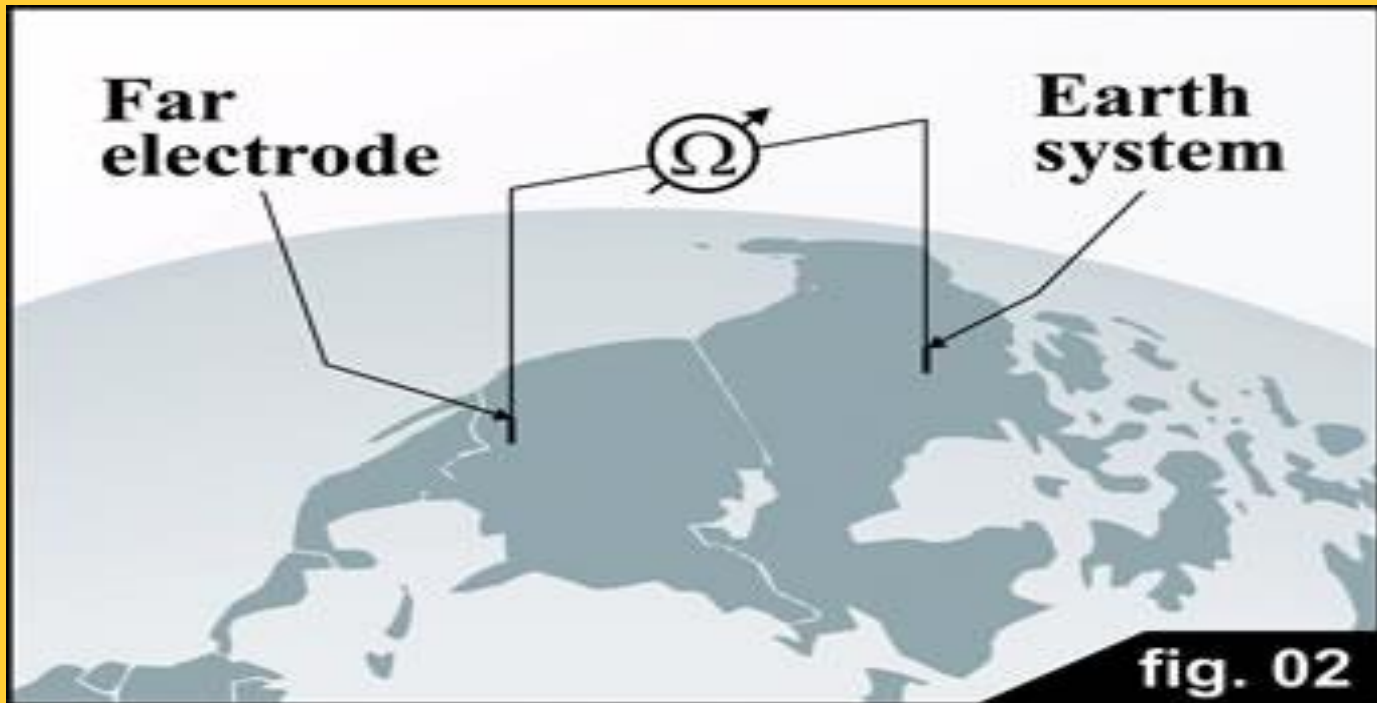
- Protección de las personas y equipo
- Permitir la rápida activación de los dispositivos de protección.
- Proveer un sistema equipotencial.
- Permitir que la energía del rayo se disipe en forma segura.
- Reducir las interferencias electromagnéticas.

Definición general de la resistencia de un material

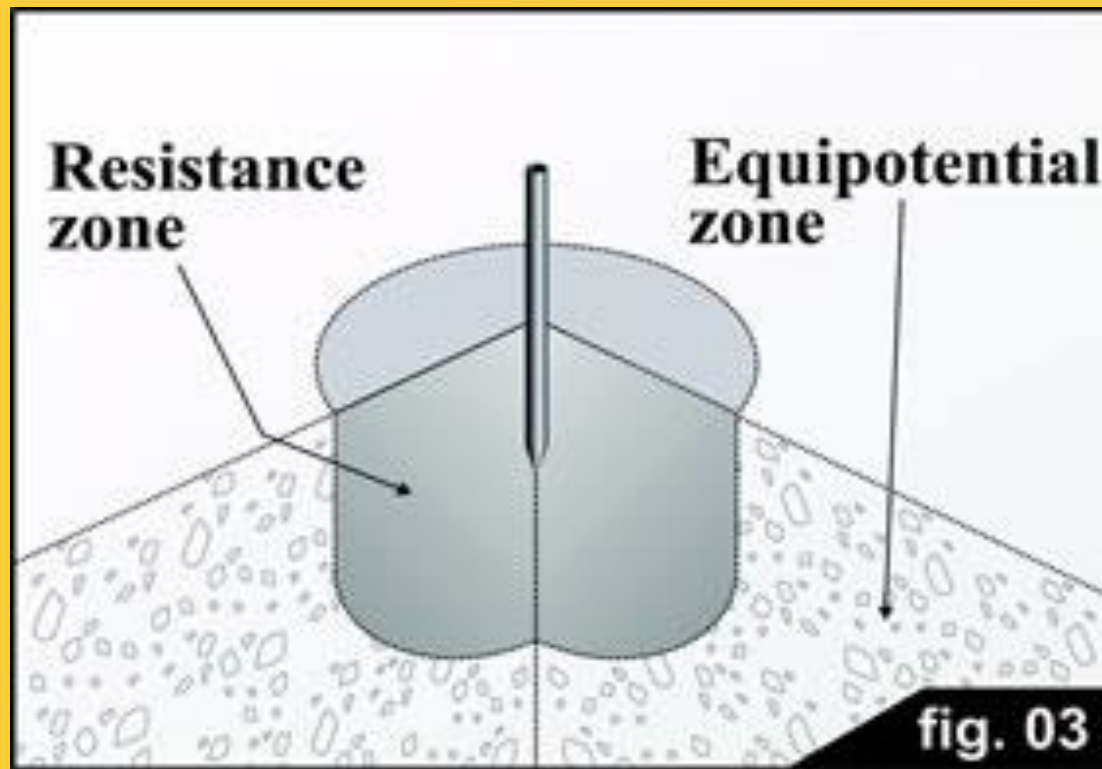
Resistencia entre 2 terminales = voltaje / corriente, si la expresamos en función de las dimensiones del material tenemos **$R = \rho \cdot L / A$**



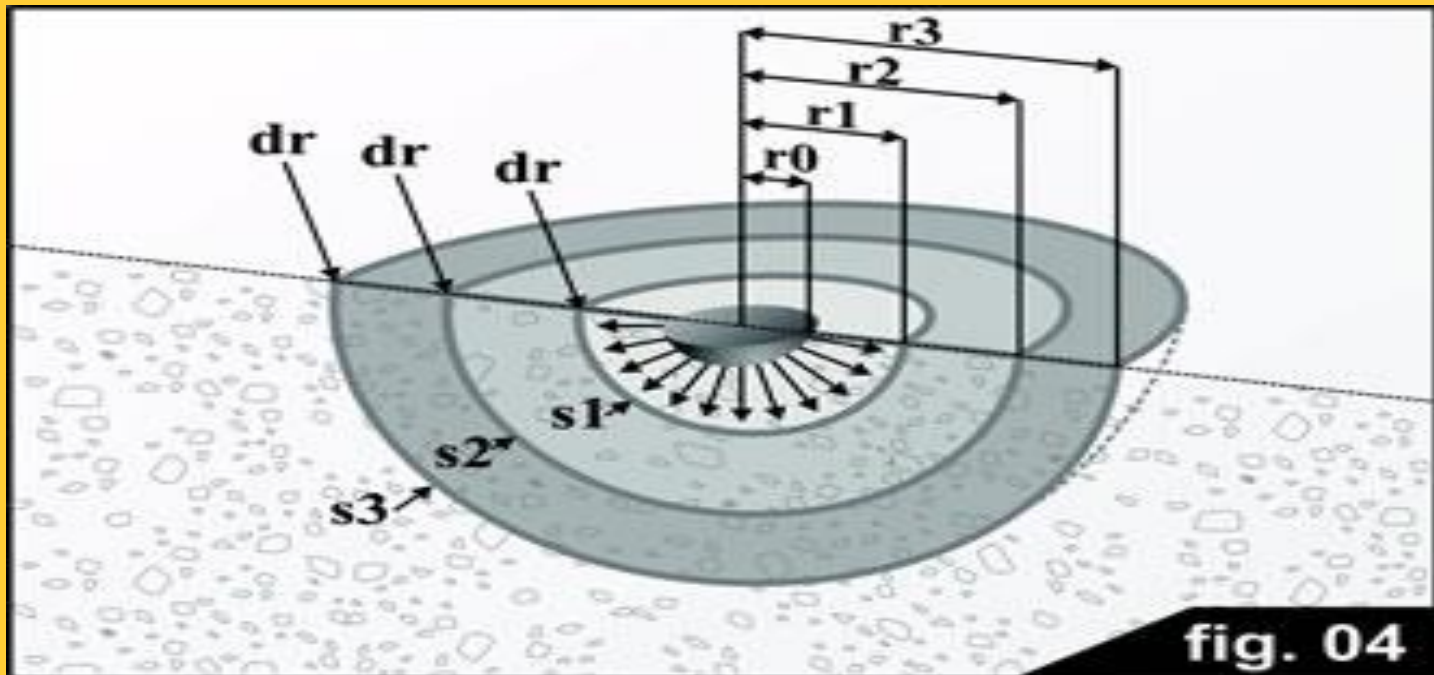
- **Resistencia de la tierra:** Sólo uno de los terminales es evidente en la resistencia de la tierra. Con el fin de encontrar el segundo terminal se debe recurrir a su definición: **la Resistencia de la Tierra es la resistencia que existe entre un electrodo enterrado y otro punto de la tierra, que está muy lejos**



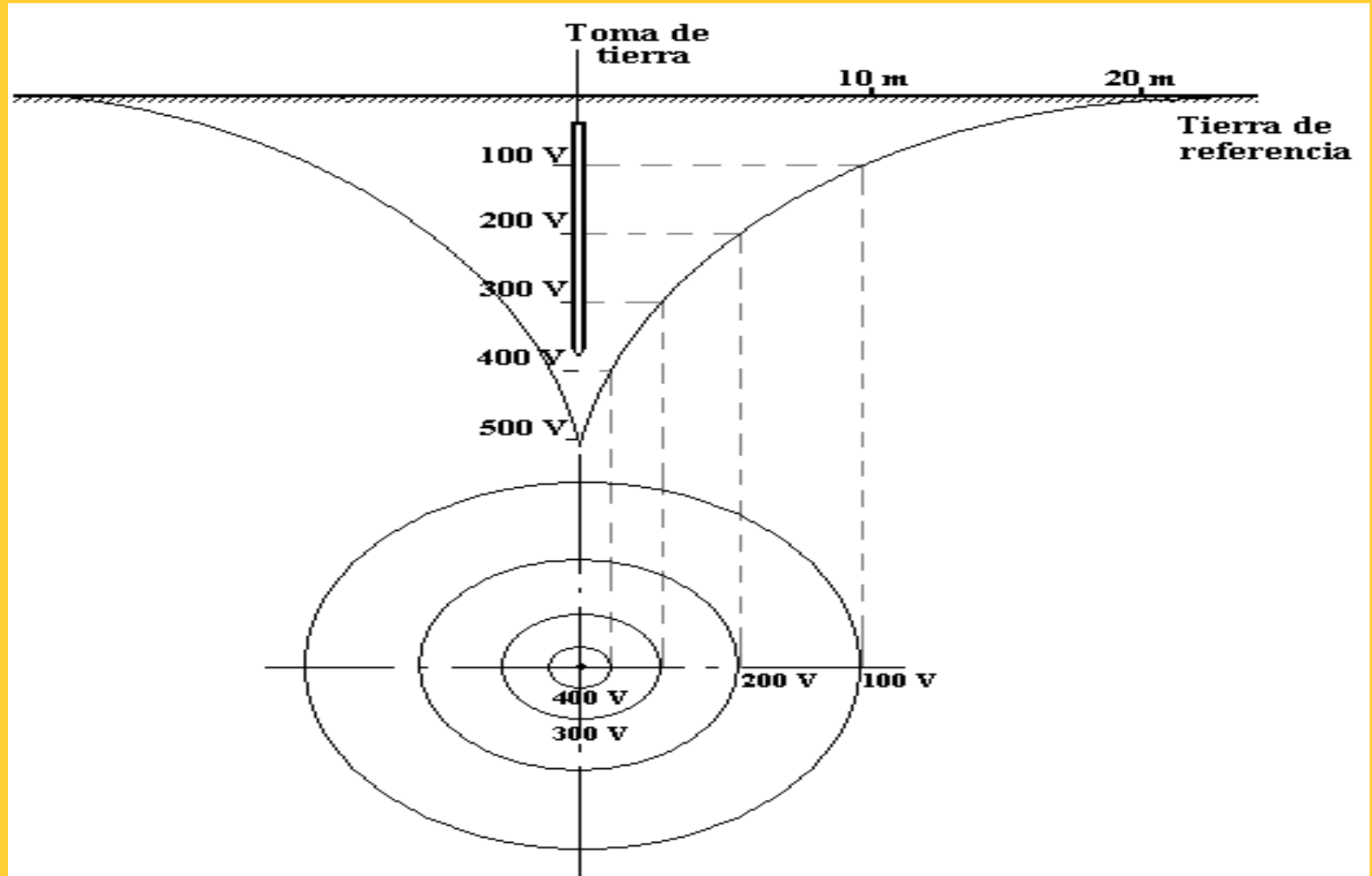
Al enterrar una barra se forma una zona de resistencia al paso de la corriente, (punto #1 a medir), toda la tierra es un punto de volumen equipotencial y puede ser considerado como el segundo electrodo de la resistencia de tierra.



- Cada capa ofrece una resistencia, que es proporcional a la resistividad del terreno, a la longitud, espesor de la capa, r , e, inversamente proporcional área, s , de la capa de la zona, la R total es la suma de muchas pequeñas resistencias en serie.
- En la zona más cercana al electrodo se concentra la mayor resistencia; a 10 veces el radio del electrodo, se concentra el 90% de la R total.
- En otras palabras, la resistencia de las capas situadas fuera de este ámbito no es significativa. Y como no hay resistencia, no hay caída de potencial. Por tanto, fuera de la región más cercana al electrodo, toda la tierra está en el mismo potencial.



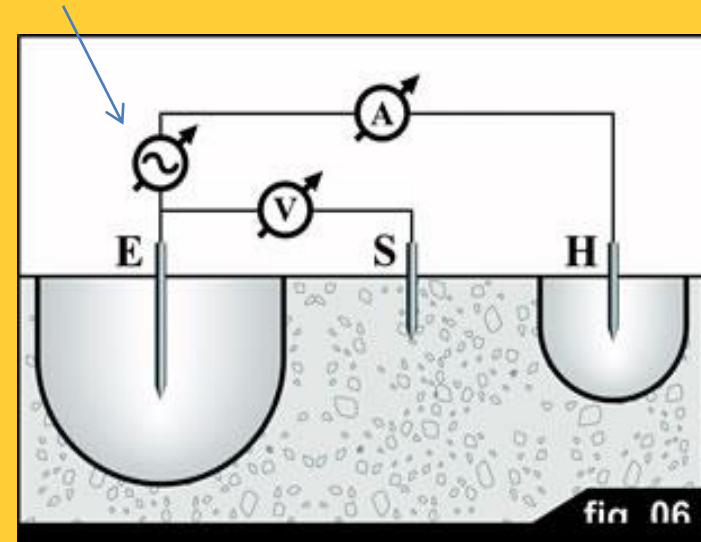
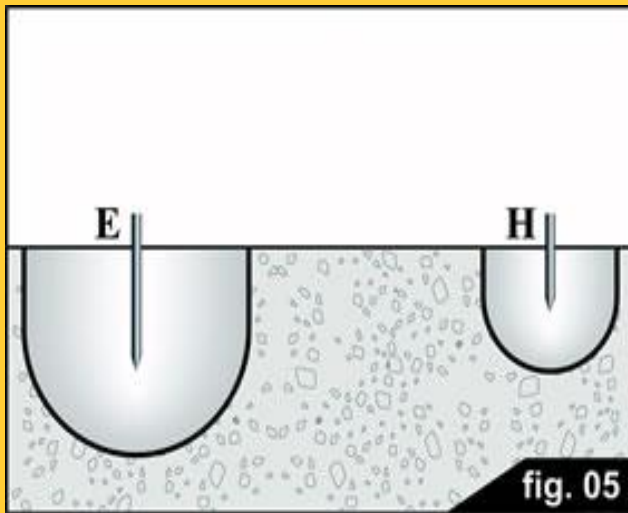
Niveles de V alrededor del electrodo



Medición de R a tierra, Método de Caída de Potencial

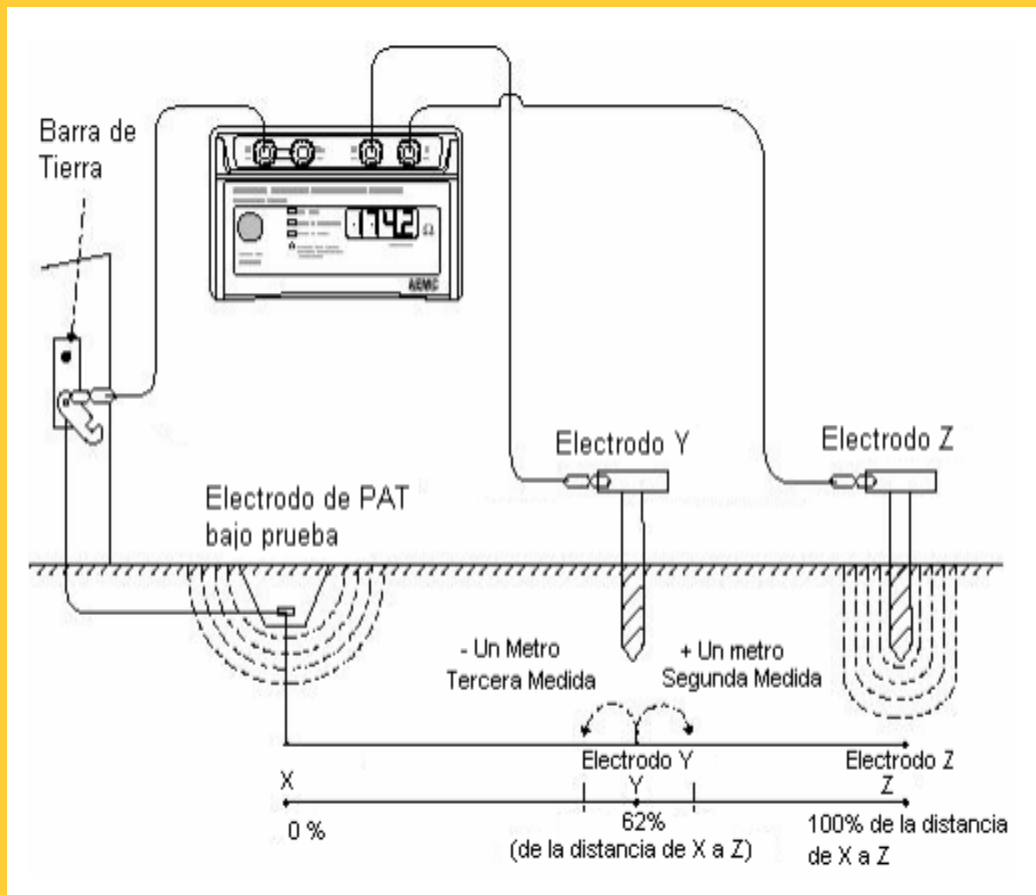
- Con el fin de medir la resistencia de puesta a tierra, Se aplica un voltaje entre los dos electrodos. Uno de los electrodos es E, el que se quiere medir, el segundo, es cualquier otro punto de la tierra alejado de E, que llamaremos H. El segundo electrodo tendrá su propia tierra, la resistencia y la zona de resistencia. Un tercer electrodo S se utiliza con el fin de evitar el error introducido por la resistencia de tierra del electrodo de H, S se ubica en cualquier punto fuera de las zonas de influencia de E y H.

Fuente de V.

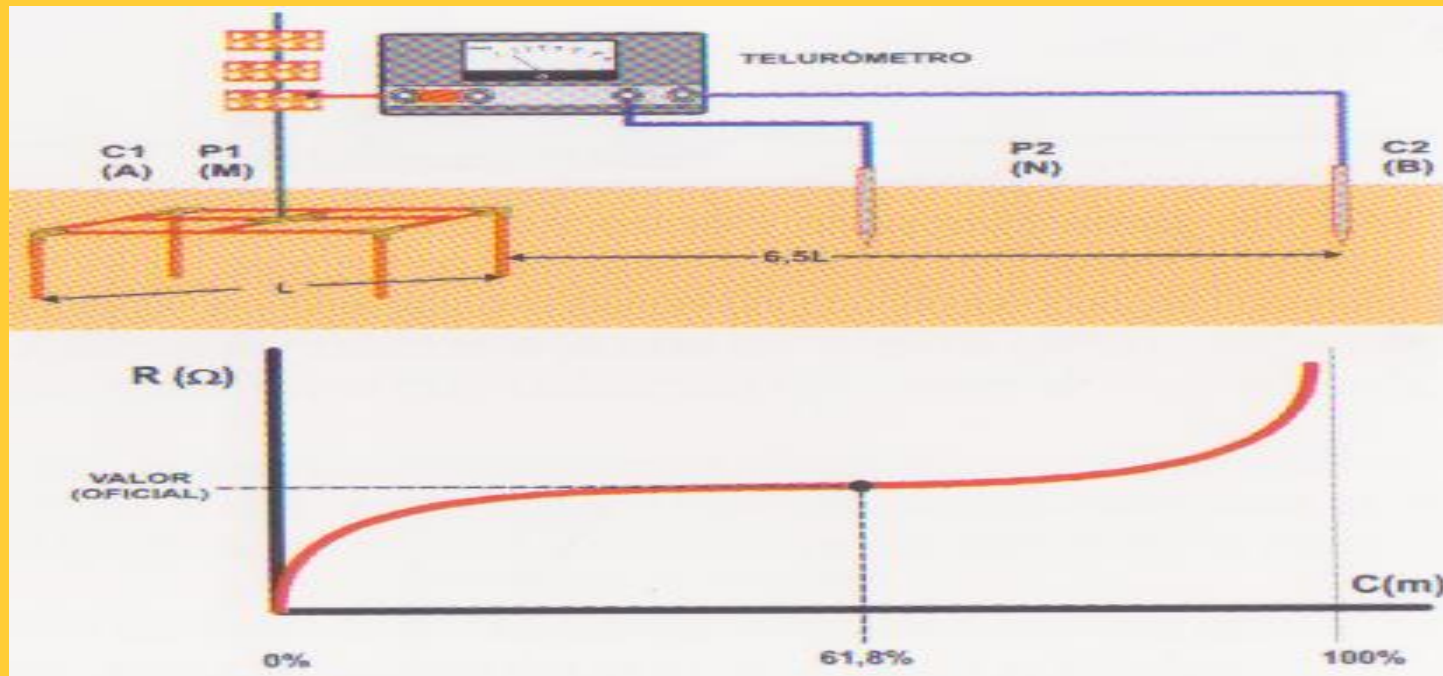
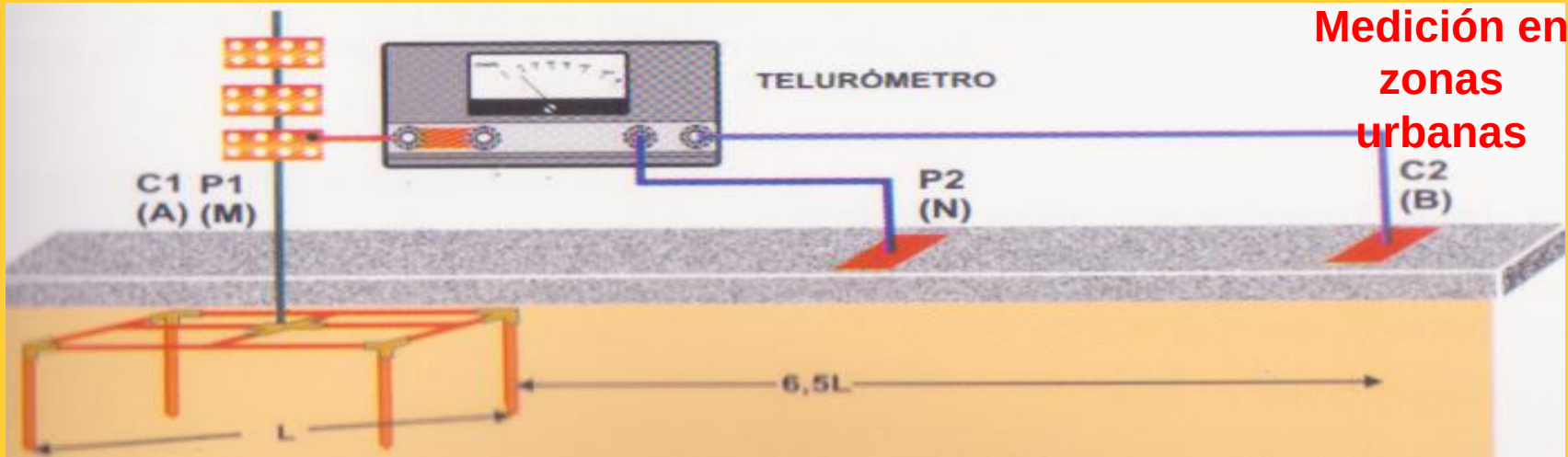


ANSI/IEEE Std 81-83. IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, extended or Interconnected Grounding Systems,

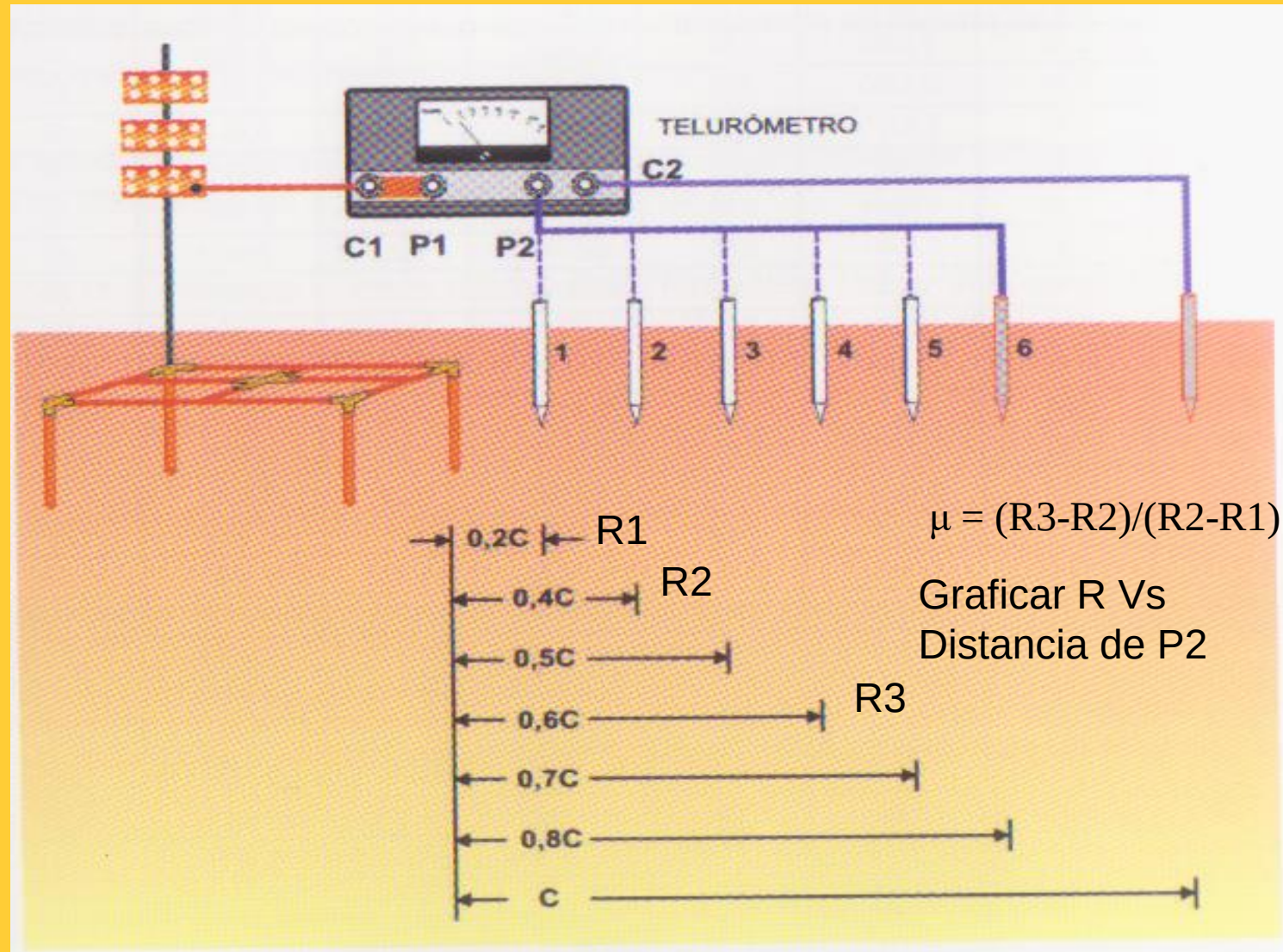
Método de caída de potencial o del 62%



Medición en
zonas
urbanas



Método de la pendiente, para medir sistemas grandes



Valores de k en función de μ para el método de la pendiente

VALORES DE k EN FUNCION DE μ PARA EL METODO DE LA PENDIENTE									
u	k	u	k	u	k	u	k	u	k
0.01	0.6932	0.3900	0.6446	0.7700	0.5856	1.1500	0.5071	1.5300	0.3740
0.02	0.6921	0.4000	0.6432	0.7800	0.5838	1.1600	0.5046	1.5400	0.3688
0.03	0.6909	0.4100	0.6418	0.7900	0.5821	1.1700	0.5020	1.5500	0.3635
0.04	0.6898	0.4200	0.6404	0.8000	0.5803	1.1800	0.4994	1.5600	0.3580
0.05	0.6886	0.4300	0.6390	0.8100	0.5785	1.1900	0.4968	1.5700	0.3523
0.06	0.6874	0.4400	0.6375	0.8200	0.5767	1.2000	0.4941	1.5800	0.3465
0.07	0.6862	0.4500	0.6361	0.8300	0.5749	1.2100	0.4914	1.5900	0.3404
0.08	0.6850	0.4600	0.6346	0.8400	0.5731	1.2200	0.4887	1.6000	0.3342
0.09	0.6838	0.4700	0.6331	0.8500	0.5712	1.2300	0.4859	1.6100	0.3278
0.10	0.6826	0.4800	0.6317	0.8600	0.5693	1.2400	0.4831	1.6200	0.3211
0.11	0.6814	0.4900	0.6302	0.8700	0.5675	1.2500	0.4802	1.6300	0.3143
0.12	0.6801	0.5000	0.6287	0.8800	0.5656	1.2600	0.4773	1.6400	0.3071
0.13	0.6789	0.5100	0.6272	0.8900	0.5637	1.2700	0.4743	1.6500	0.2997
0.14	0.6777	0.5200	0.6258	0.9000	0.5618	1.2800	0.4713	1.6600	0.2920
0.15	0.6764	0.5300	0.6243	0.9100	0.5598	1.2900	0.4683	1.6700	0.2840
0.16	0.6752	0.5400	0.6228	0.9200	0.5579	1.3000	0.4652	1.6800	0.2758
0.17	0.6739	0.5500	0.6212	0.9300	0.5559	1.3100	0.4620	1.6900	0.2669
0.18	0.6727	0.5600	0.6197	0.9400	0.5539	1.3200	0.4588	1.7000	0.2578
0.19	0.6714	0.5700	0.6182	0.9500	0.5519	1.3300	0.4556	1.7100	0.2483
0.20	0.6701	0.5800	0.6167	0.9600	0.5499	1.3400	0.4522	1.7200	0.2383
0.21	0.6688	0.5900	0.6151	0.9700	0.5479	1.3500	0.4489	1.7300	0.2278
0.22	0.6675	0.6000	0.6136	0.9800	0.5458	1.3600	0.4454	1.7400	0.2167
0.23	0.6662	0.6100	0.6120	0.9900	0.5437	1.3700	0.4419	1.7500	0.2051
0.24	0.6649	0.6200	0.6104	1.0000	0.5416	1.3800	0.4383	1.7600	0.1928
0.25	0.6636	0.6300	0.6088	1.0100	0.5395	1.3900	0.4346	1.7700	0.1797
0.26	0.6623	0.6400	0.6072	1.0200	0.5373	1.4000	0.4309	1.7800	0.1658
0.27	0.6610	0.6500	0.6056	1.0300	0.5352	1.4100	0.4271	1.7900	0.1511
0.28	0.6597	0.6600	0.6040	1.0400	0.5330	1.4200	0.4232	1.8000	0.1352
0.29	0.6583	0.6700	0.6024	1.0500	0.5307	1.4300	0.4192	1.8100	0.1183
0.30	0.6570	0.6800	0.6008	1.0600	0.5285	1.4400	0.4152	1.8200	0.1000
0.31	0.6556	0.6900	0.5991	1.0700	0.5262	1.4500	0.4111	1.8300	0.0803
0.32	0.6543	0.7000	0.5975	1.0800	0.5239	1.4600	0.4068	1.8400	0.0588
0.33	0.6529	0.7100	0.5958	1.0900	0.5216	1.4700	0.4025	1.8500	0.0353
0.34	0.6516	0.7200	0.5941	1.1000	0.5193	1.4800	0.3980		
0.35	0.6502	0.7300	0.5924	1.1100	0.5169	1.4900	0.3935		
0.36	0.6488	0.7400	0.5907	1.1200	0.5144	1.5000	0.3888		
0.37	0.6474	0.7500	0.5890	1.1300	0.5121	1.5100	0.3840		
0.38	0.6460	0.7600	0.5873	1.1400	0.5096	1.5200	0.3791		

Tabla valores de μ

Pasos método de pendiente

1-Obtener K en función de μ

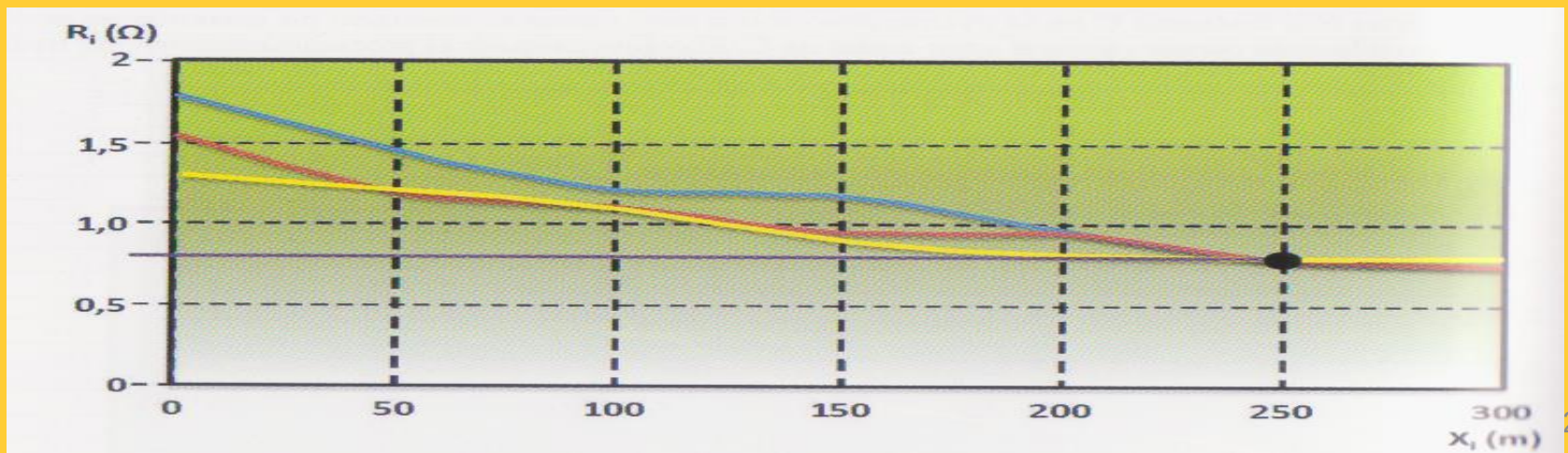
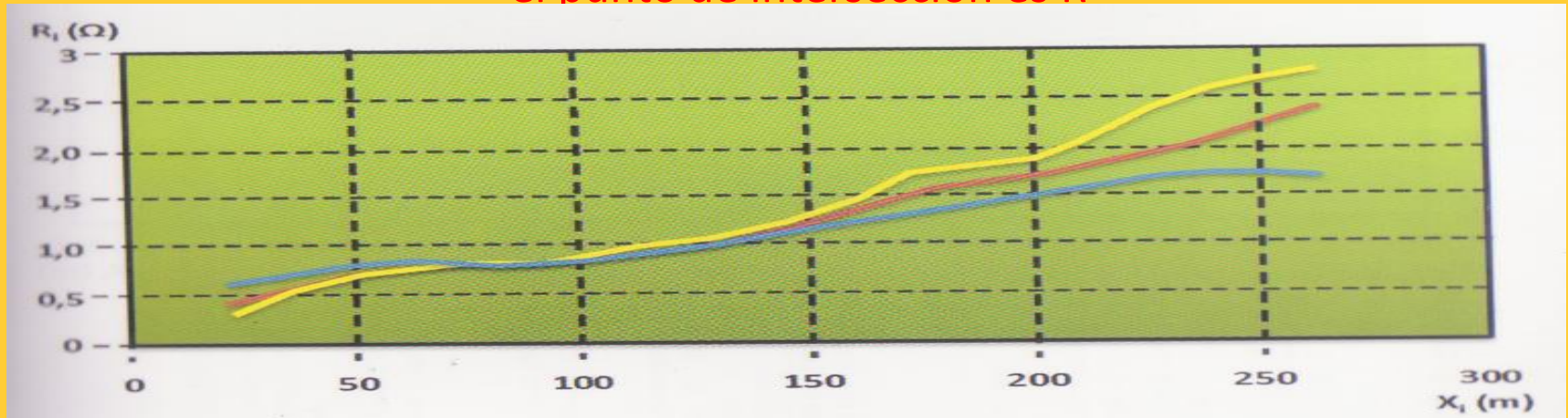
2-Calcular: $P = K \times C$ (m)

3- Poner el electrodo P2 en P y medir esta nueva posición, o Comprobar en la curva R-P2

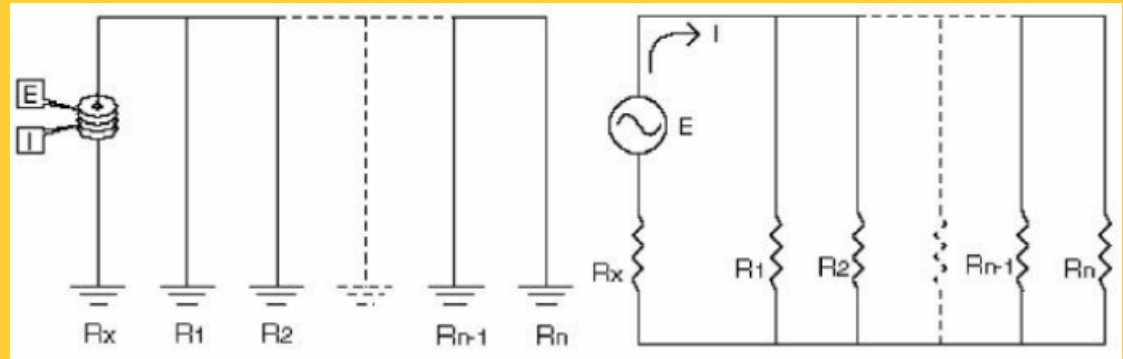
Si el valor de μ , no se encuentra en la tabla debe incrementarse C

Método de intersección de curvas, para áreas de más de 20000 m², no requiere ubicar los electrodos a gran distancia

Se toma una distancia C_i y diferentes valores de X_i entre 0 y 90% de C , luego se cambia la dirección de C_i y se repite, se grafica y calcula $P_i = 0.62(C + X_i) - X_i$. Para cada P_i se toma R_i de la primer gráfica y se grafica nuevamente contra X_i , el punto de intersección es R .



Medidor de gancho para la resistencia a tierra. El TC abraza todo el poste



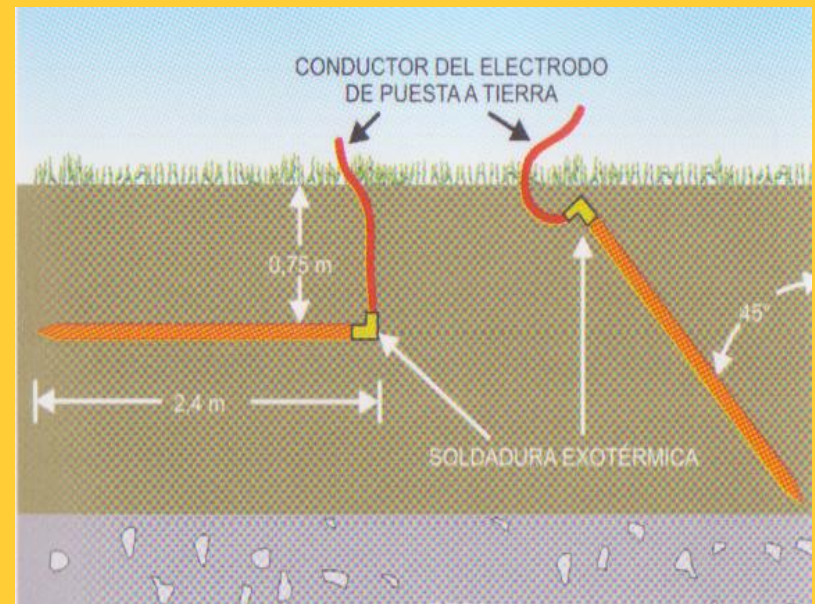
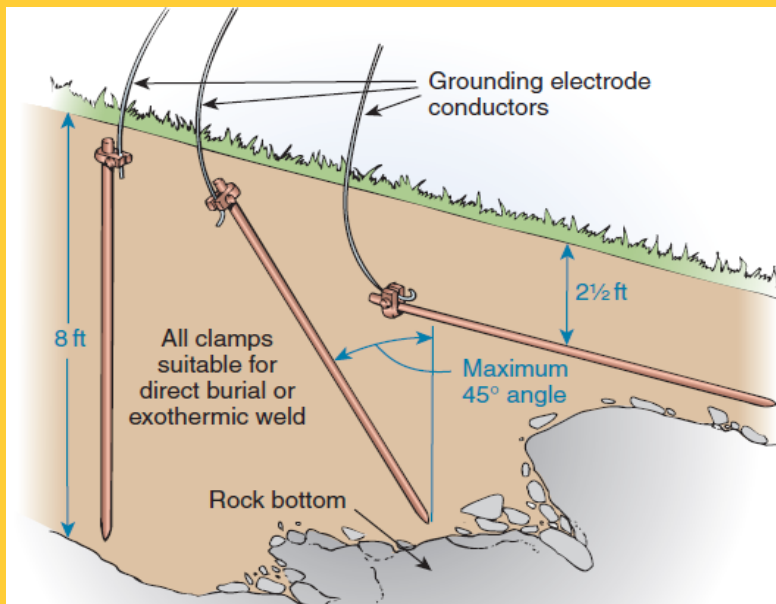
Se aplica en sistemas puestos a tierra en más de un punto, múltiple aterrizado (CKT. Equivalente). Se asume una resistencia en paralelo del sistema despreciable

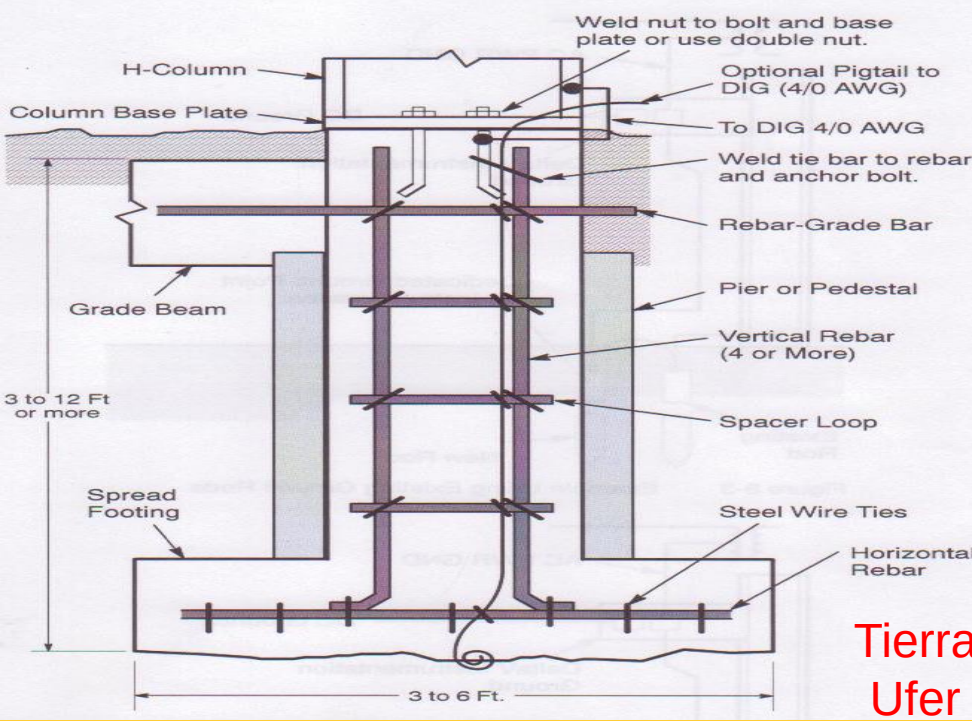
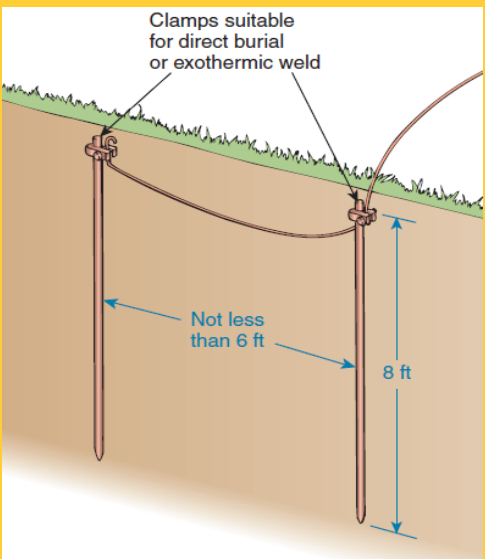
El principio de operación es el siguiente: El neutro de un sistema puesto a tierra en más de un punto, puede ser representado como un circuito simple de resistencias de puesta a tierra en paralelo. Si una tensión “E” es aplicada al electrodo o sistema de puesta a tierra Rx, la corriente “I” resultante fluirá a través del circuito.

Típicamente los instrumentos poseen un oscilador de tensión a una frecuencia de 1.6 kHz, y la corriente a la frecuencia generada es recolectada por un receptor de corriente. Un filtro interno elimina las corrientes de tierra y ruido de alta frecuencia.

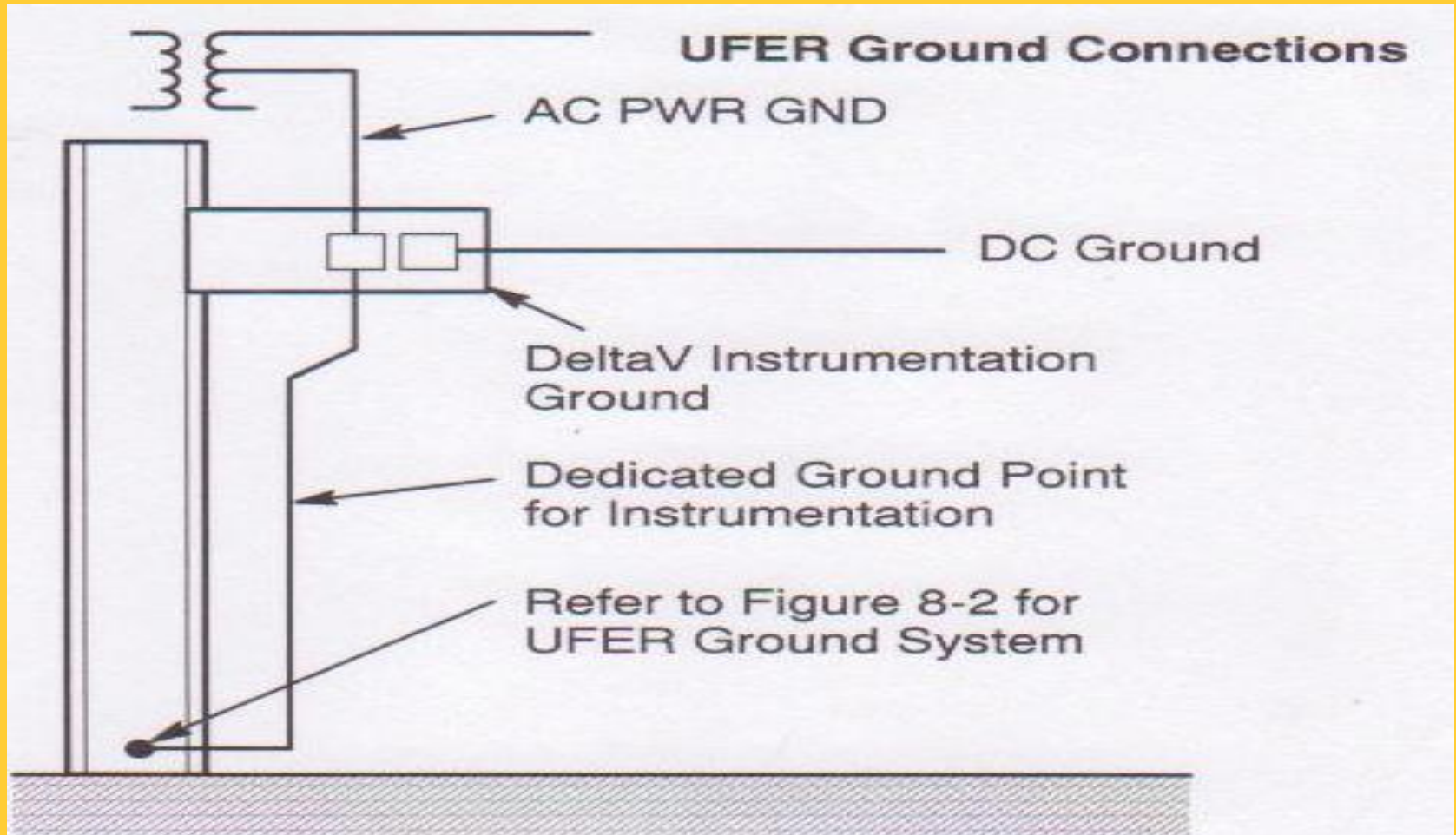
MÉTODOS	SITIOS DE APLICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
1.- De la curva de caída de potencial.	Para puestas a tierra pequeñas o más complejas, si se gráfica toda la curva.	De fácil comprensión. Exige pocos cálculos.	En PT extensas exige grandes longitudes de cable.	Es el método más didáctico. Incluso las gráficas sirven para la aplicación de otros métodos.
2.- De la regla del 62%	Para puestas a tierra pequeñas, medianas y grandes.	Simple y rápido de aplicar.	Requiere conocer el centro eléctrico. Exige distancias grandes.	Es el más aplicado. Cuando el valor hallado no satisface, se debe verificar la resistividad del terreno y las zonas de influencia a respetar.
3.- De los cuatro potenciales.	Para puestas a tierra medianas y grandes.	No es necesario la determinación del centro eléctrico.	Exige distancias tan grandes como los métodos anteriores. Requiere muchos cálculos.	Es un método poco utilizado. Los resultados son aceptables, cuando se toman distancias grandes.
4.- De intersección de curvas	Para grandes puestas a tierra, como, de subestaciones de potencia o estaciones de comunicación.	Permite menores distancias que los anteriores. No es necesario determinar el centro eléctrico.	Necesita más ingeniería, como cálculos y gráficos.	Es un método que ahorra distancias y permite calcular el valor, donde otros métodos no lo podrían hacer por falta de espacio.
5.- De la pendiente	El ideal para grandes puestas a tierra, como subestaciones.	Idem al anterior. Es más gráfico y necesita menos cálculos.	En suelos no homogéneos, debe tenerse mayor cuidado.	Buena técnica para grandes sistemas. Se lo puede usar en combinación con el método anterior como verificación.
6.- Estrella triángulo.	Para pequeñas puestas a tierra en locales urbanos.	No requiere distancias largas.	Necesita muchos cálculos. Con distancias pequeñas el error es grande.	Técnica para áreas urbanas. Debe usarse cuando los métodos anteriores no aplican.
7.- Por corriente inyectada	Para subestaciones grandes o terrenos de muy alta resistividad.	Garantiza una alta corriente.	Requiere una planta de energía portátil o una fuente lejana.	Puede tener interferencias con otros sistemas de baja frecuencia.
8.- Por tensión inducida	Para puestas a tierra de un solo electrodo.	Solución para casos donde el error no es importante.	Presenta errores grandes cuando hay corrientes de desbalance.	Son pinzas diseñadas para lazos de tierra. Solamente se debe usar como una aproximación.
9.- Con referencia natural	Uso en último caso, sólo para alguien calificado.	Resuelve el problema, de que siempre se puede medir.	Puede confundir y el resultado no es confiable.	Pueden cometerse errores grandes. Debe utilizarse solamente en caso de que otro método no pueda ser usado.
10.- Selectivo (doble pinza)	Torres de transmisión pequeñas	No requiere desconectar cable de guarda	Tamaño del lazo limita. Costo del equipo. Requiere cálculos en sitio.	No está en normas

Formas de instalar las barras de polarización

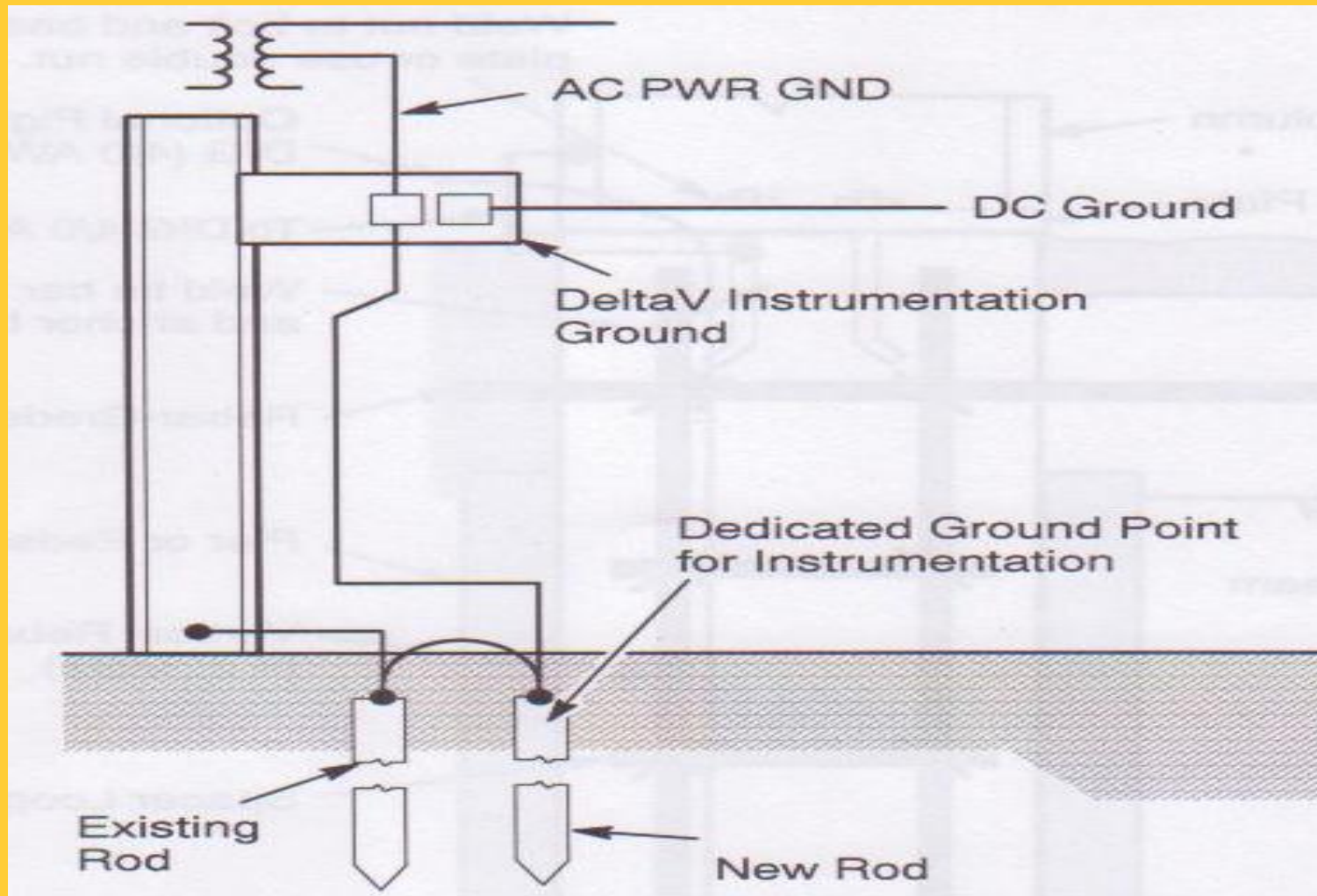




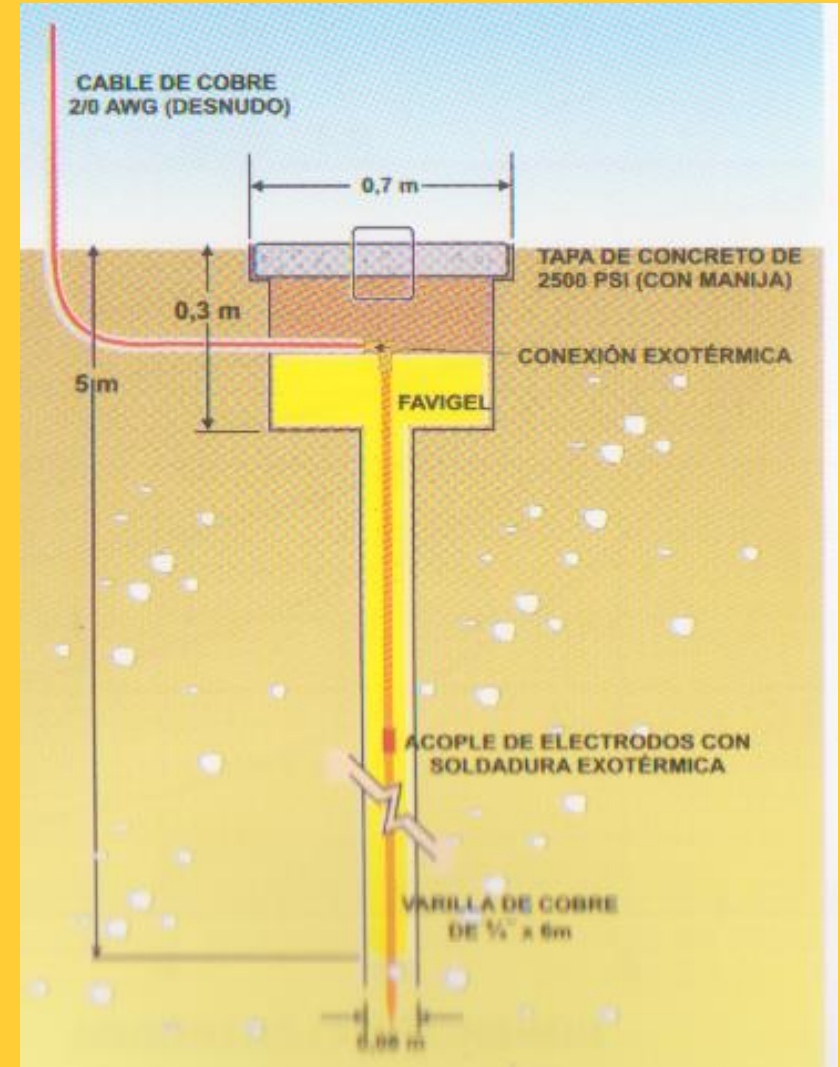
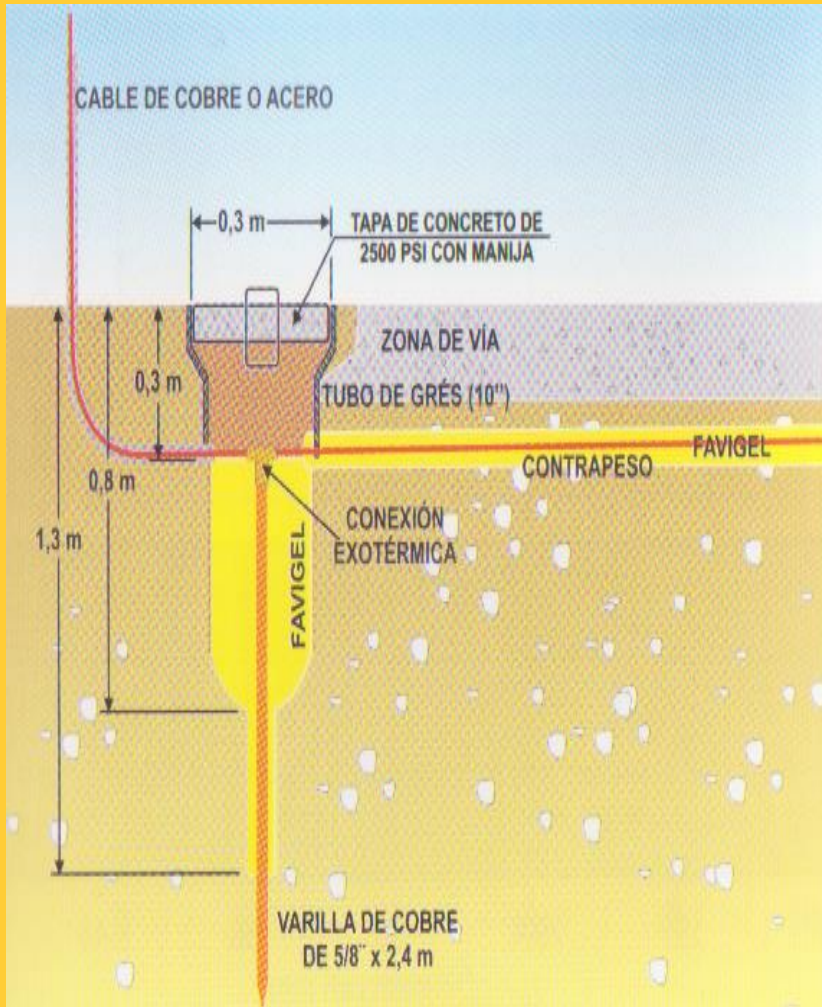
Ejemplo conexión a estructura metálica



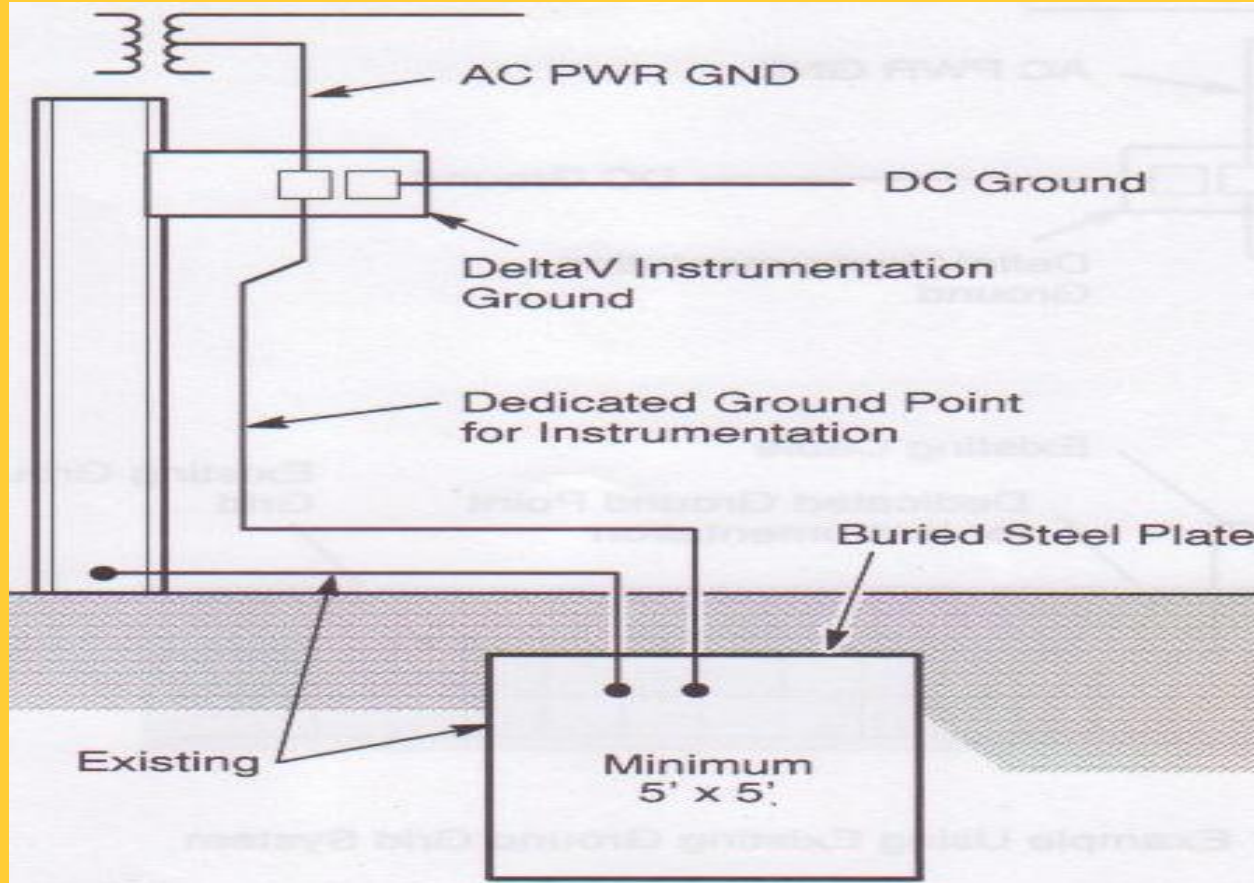
Sistema de electrodos de tierra



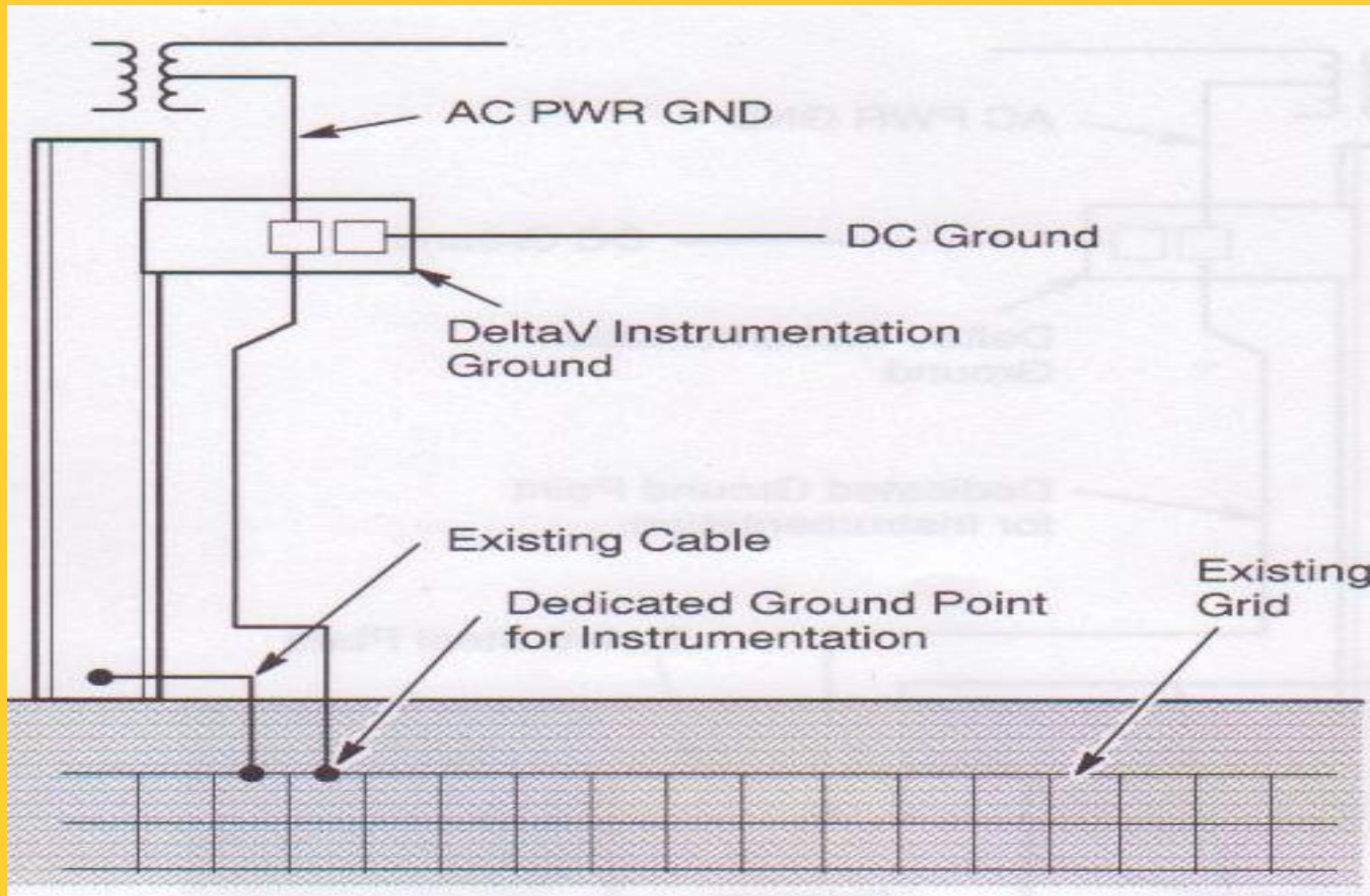
Disposición de electrodos y electrodos profundos



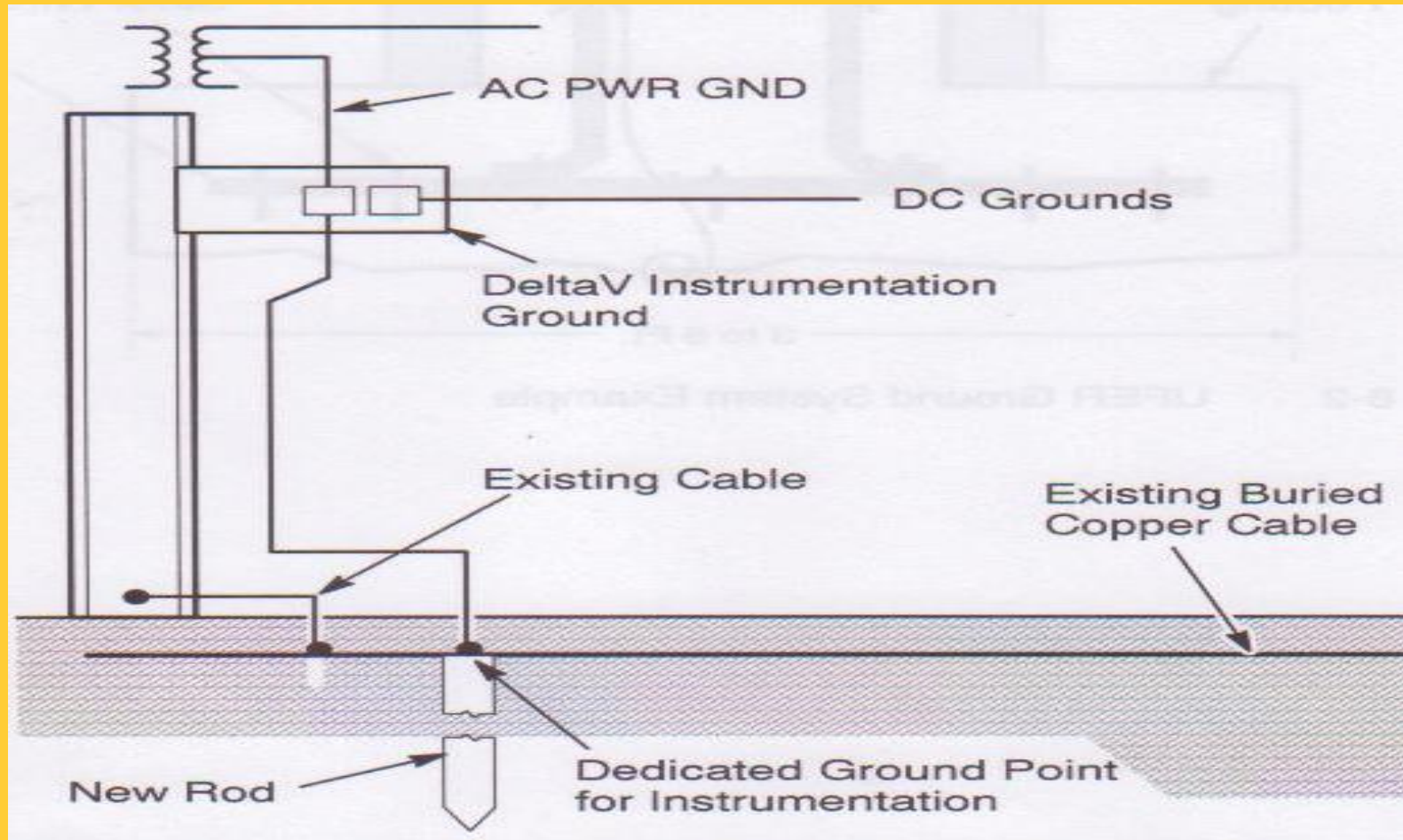
Placa como electrodo de tierra



Conexión a grilla de tierra



Anillo de tierra existente

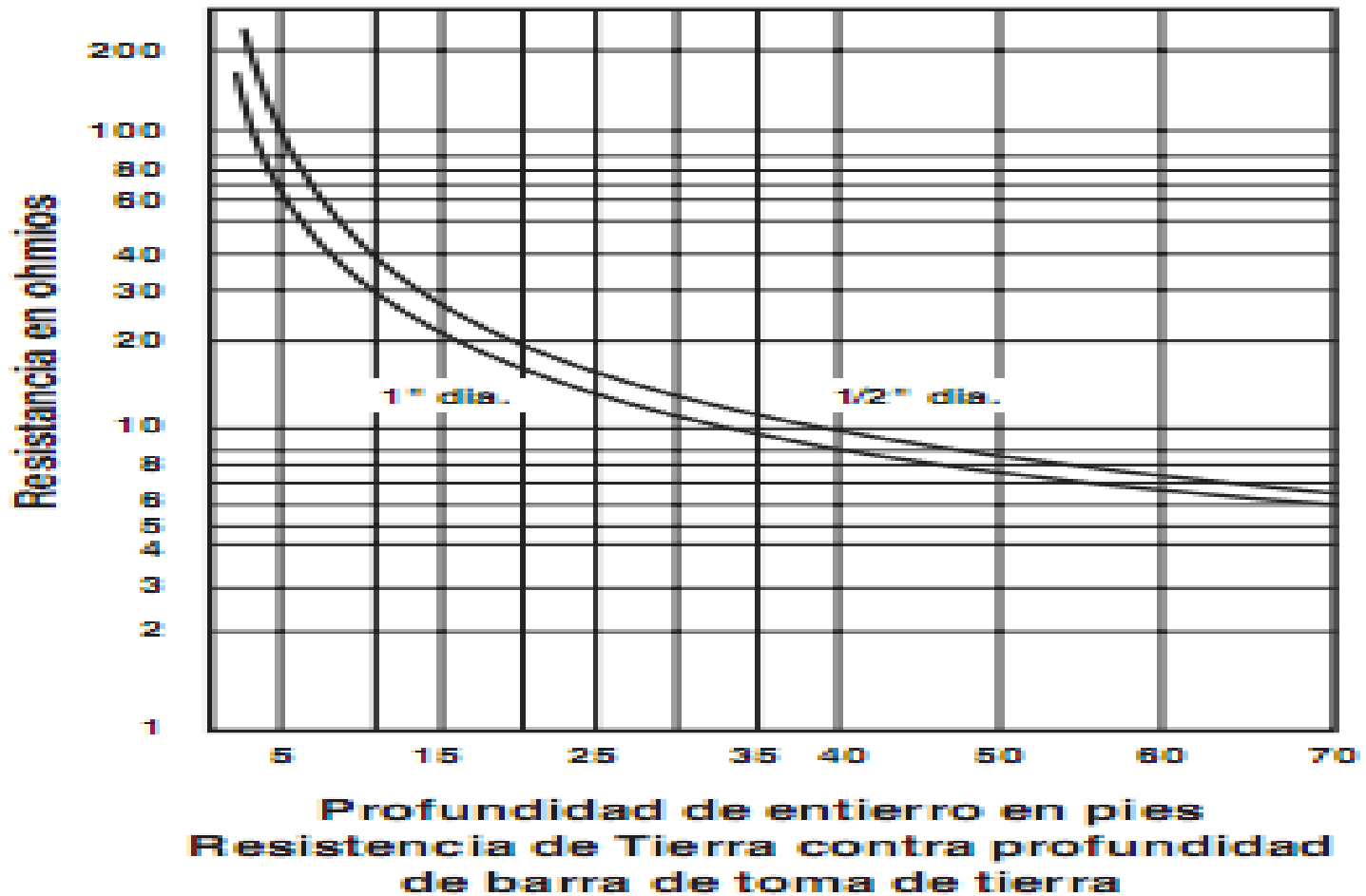


MÉTODOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

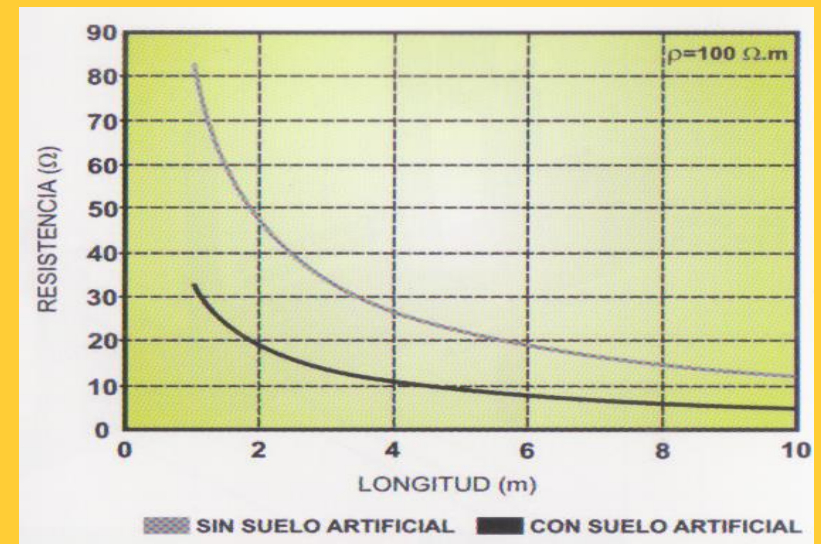
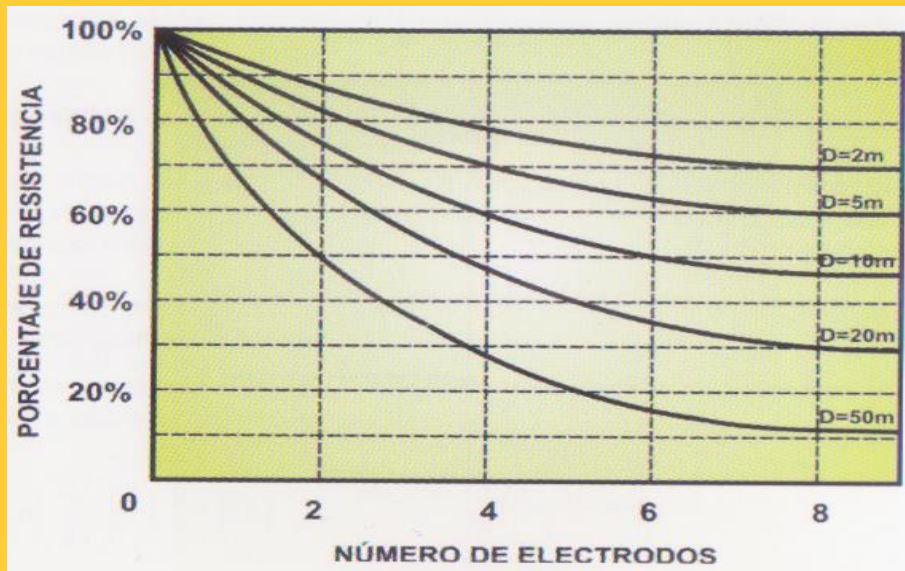
Existen distintos métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos. Los métodos para la reducción son los siguientes:

- a)- El aumento del número de electrodos en paralelo
- b)- El aumento de la distancia entre ejes de los electrodos
- c)- El aumento de la longitud de los electrodos.
- d)- El aumento del diámetro de los electrodos
- e)- El cambio del terreno existente por otro de menor resistividad.
- f)- El tratamiento químico electrolítico del terreno.

Profundidad de enterramiento



Influencia del diámetro de la barra, separación D y # de barras, y longitud o profundidad de los electrodos



Estimación de la resistencia con varias barras en paralelo, factores de multiplicación a emplear:

Número de barras en paralelo Multiplicador a emplear

2	1.16
3	1.29
4	1.36
8	1.68
12	1.80
16	1.92
20	2.00
24	2.16

Ejemplo: si con una barra obtengo 50 ohms, con dos barras en paralelo se obtiene: $50/2 \times 1.16 = 29$ ohms y con cuatro: $50/4 \times 1.36 = 17$ ohms

Valores de red de tierra en transformadores

- El valor de la resistencia de puesta a tierra, debe construirse y diseñarse conforme a lo indicado en la siguiente tabla (tabla N°22 Acuerdo N° 29-E-2000)

Capacidad de la subestación MVA	Resistencia de la red de tierra (Ohmios)
Menor o igual 0.05	12
0.05- 0.1	6
0.1 – 0.5	2
0.5 - 1	1.5
1 - 50	1
50 - 100	0.5
Mayor de 100	0.2

- Las varillas de la red de tierra deben ser como mínimo de 2.4 mts de largo y 12.7 mm de diámetro

- **GPR:** Elevación del potencial de tierra, se define como el máximo potencial eléctrico que un electrodo de tierra, malla o sistema puede alcanzar con respecto a un punto de tierra remoto, dada una elevación de voltaje debido a una corriente de falla drenada a tierra. Esta elevación de voltaje, no debe representar peligro para el personal que se encuentre dentro de la subestación o a aquellos en su perímetro o que toquen su cerca perimetral. El GPR debe ser menor o igual a 5 KV.

- La cuadrícula del sistema de tierras puede diseñarse sin varillas o con varillas, dependerá de los resultados que se obtengan y de los criterios del diseñador.
- En cuanto al calibre del conductor de la red de tierra el Estándar IEEE-80, recomienda el 2/0 AWG como mínimo, basado en los esfuerzos mecánicos y a la robustez requerida en este tipo de aplicaciones.

Información requerida para el cálculo del sistema de tierras:

- Resistividad en la zona de construcción de la red.
- Geometría del terreno: rectangular- cuadrado- otro
- Dimensiones del terreno de la subestación: largo_____ ancho_____
- Capacidad de la subestación y transformadores.
- Impedancia del o los transformadores.
- Relación x/r (Reactancia /resistencia)
- Corriente de falla o MVA de cortocircuito en el punto de entrega (se solicita al distribuidor o ETESAL, dependiendo del punto de conexión).
- Definir los tiempos máximos de apertura de falla en base a la coordinación de protecciones.
- Planos del sistema de generación fotovoltaico, diagrama unifilar, planos de conjunto (...).
- Desarrollar o entregar el estudio de cortocircuito para los diferentes transformadores.
- Con toda la información anterior se procede a evaluar y diseñar los diferentes sistemas de tierra.

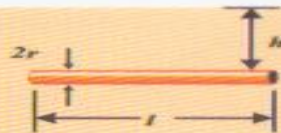
Fórmulas para el cálculo de resistencia de tierras

SEMIESFERA



$$R = \frac{\rho}{2\pi b}$$

CABLE (HORIZONTAL)



$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l}{r} + \ln \frac{l}{2h} \right); h \geq 6r$$

VARILLA (VERTICAL)

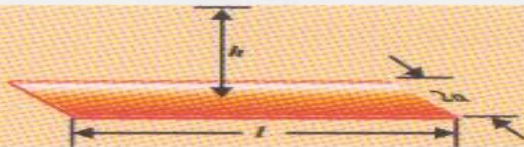


$$\ln(4l/r) - 1$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{r} \right)$$

FLEJE

Placa Horizontal



$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{a} + \ln \frac{l}{2h} \right); h \geq 3a$$

ANILLO



$$R = \frac{\rho}{4\pi^2 b} \left(\ln \frac{8b}{r} \right)$$

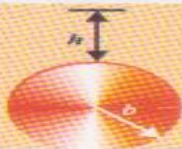
DISCO HORIZONTAL



Cerca de la superficie

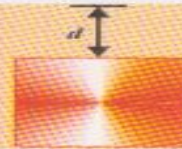
$$R = \frac{\rho}{4b}$$

DISCO VERTICAL



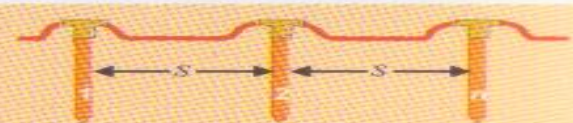
$$R = \frac{\rho}{8b} + \frac{\rho}{8\pi h} \left(1 + \frac{7}{24} + \frac{r^2}{4h^2} \right)$$

PLACA VERTICAL



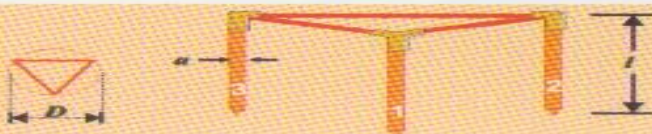
Tiene la misma resistencia de un disco con igual área

ELECTRODOS EN LÍNEA RECTA



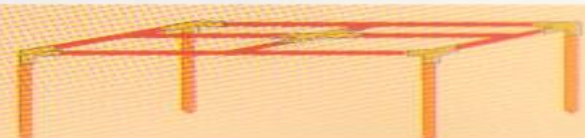
$$R = \frac{\rho}{n} \left(0,404 + \frac{0,16}{S} \ln 0,655n \right)$$

TRIÁNGULO (5 m de lado)



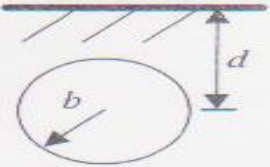
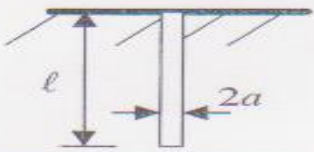
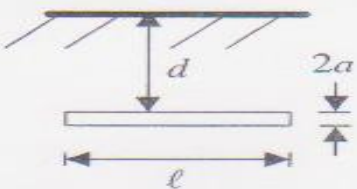
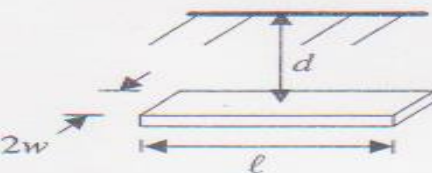
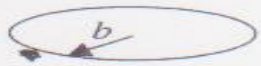
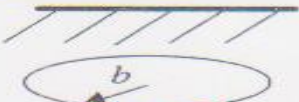
$$R = \frac{\rho}{6\pi l} \left(\ln \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 + \frac{2l}{D \sin \frac{\pi}{3}} \right)$$

ELECTRODO EN CADA ESQUINA

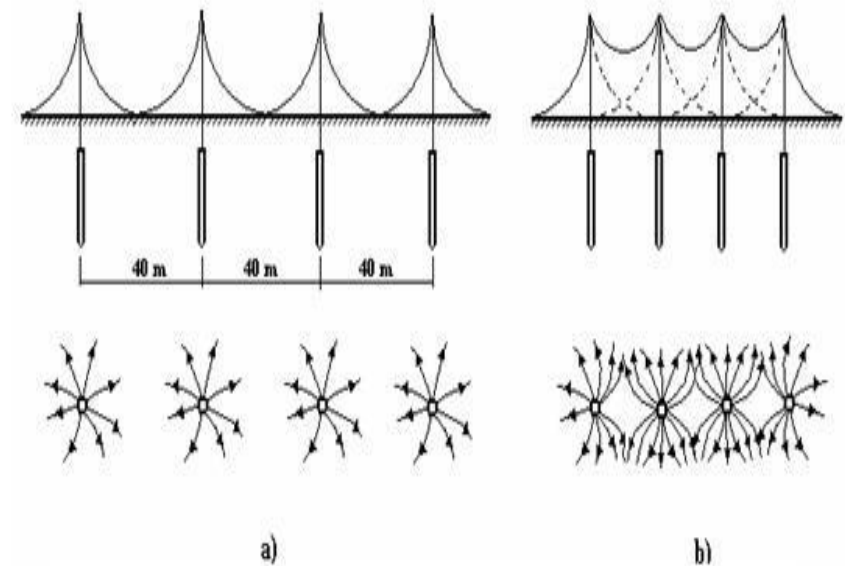
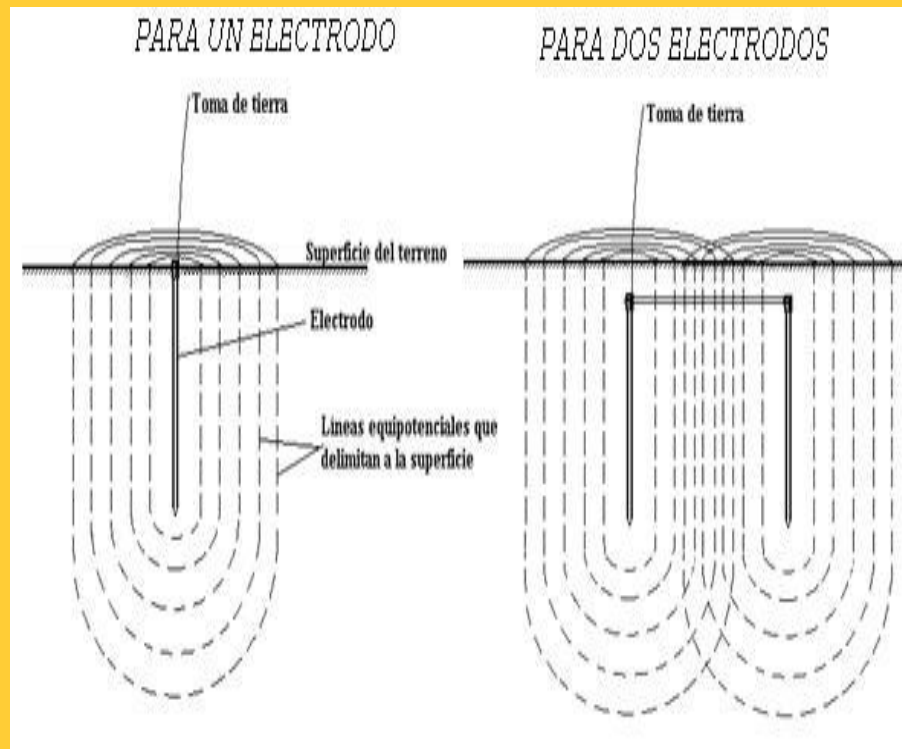


A = Área total
l = Longitud total del conductor

$$R = 0,443 \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{l}$$

Electrodo	Descripción	Resistencia de tierra
	Semiesfera enterrada a ras de suelo	$R_t = \frac{\rho}{2\pi b}$
	Esfera enterrada a profundidad determinada	$R_t = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{2d} \right)$ $d \gg b$
	Pica hincada verticalmente en el terreno	$R_t = \frac{\rho}{2\pi \ell} \ln \left(\frac{2\ell}{a} \right)$ $\ell \gg a$
	Conductor enterrado horizontalmente a profundidad determinada	$R_t = \frac{\rho}{2\pi \ell} \left[\ln \left(\frac{\ell}{a} \right) + \ln \left(\frac{\ell}{2d} \right) \right]$ $d \geq 6a$
	Placa enterrada horizontalmente a profundidad determinada	$R_t = \frac{\rho}{2\pi \ell} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{w} \right) + \ln \left(\frac{\ell}{2d} \right) \right]$ $d \geq 3w$
	Anillo enterrado profundamente	$R_t = \frac{\rho}{4\pi^2 b} \ln \frac{8b}{a}$
	Disco delgado enterrado profundamente	$R_t = \frac{\rho}{8b}$
	Disco enterrado cerca de la superficie	$R_t = \frac{\rho}{4b}$

Superficies equipotenciales

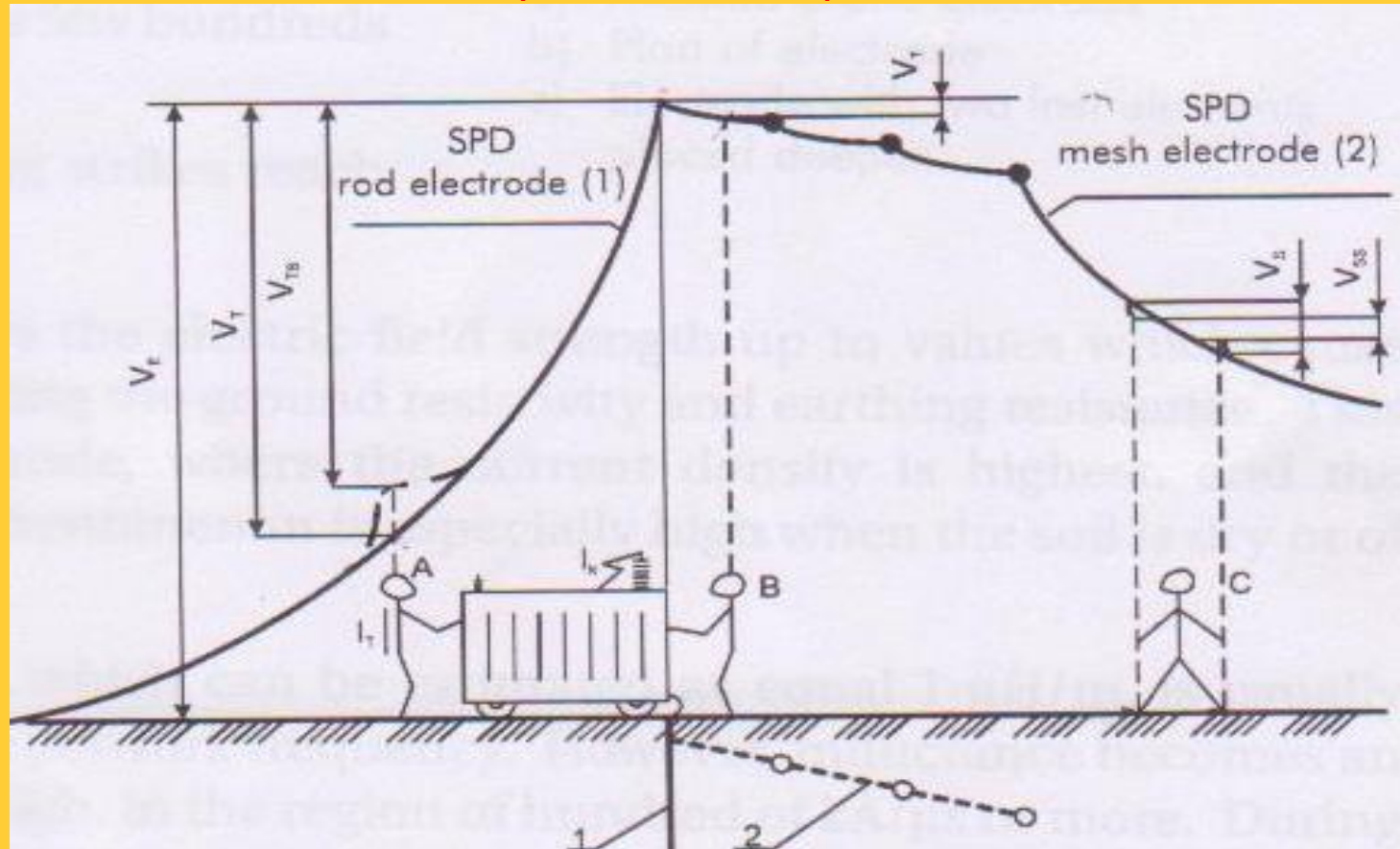


a) Electrodos a una separación tal que no existe superposición de las áreas de resistencia.

b) Influencia mutua entre electrodos cuando se encuentran cercanos.

Diferencia entre malla y barra

Observe el elevado potencial en el punto cercano a la barra



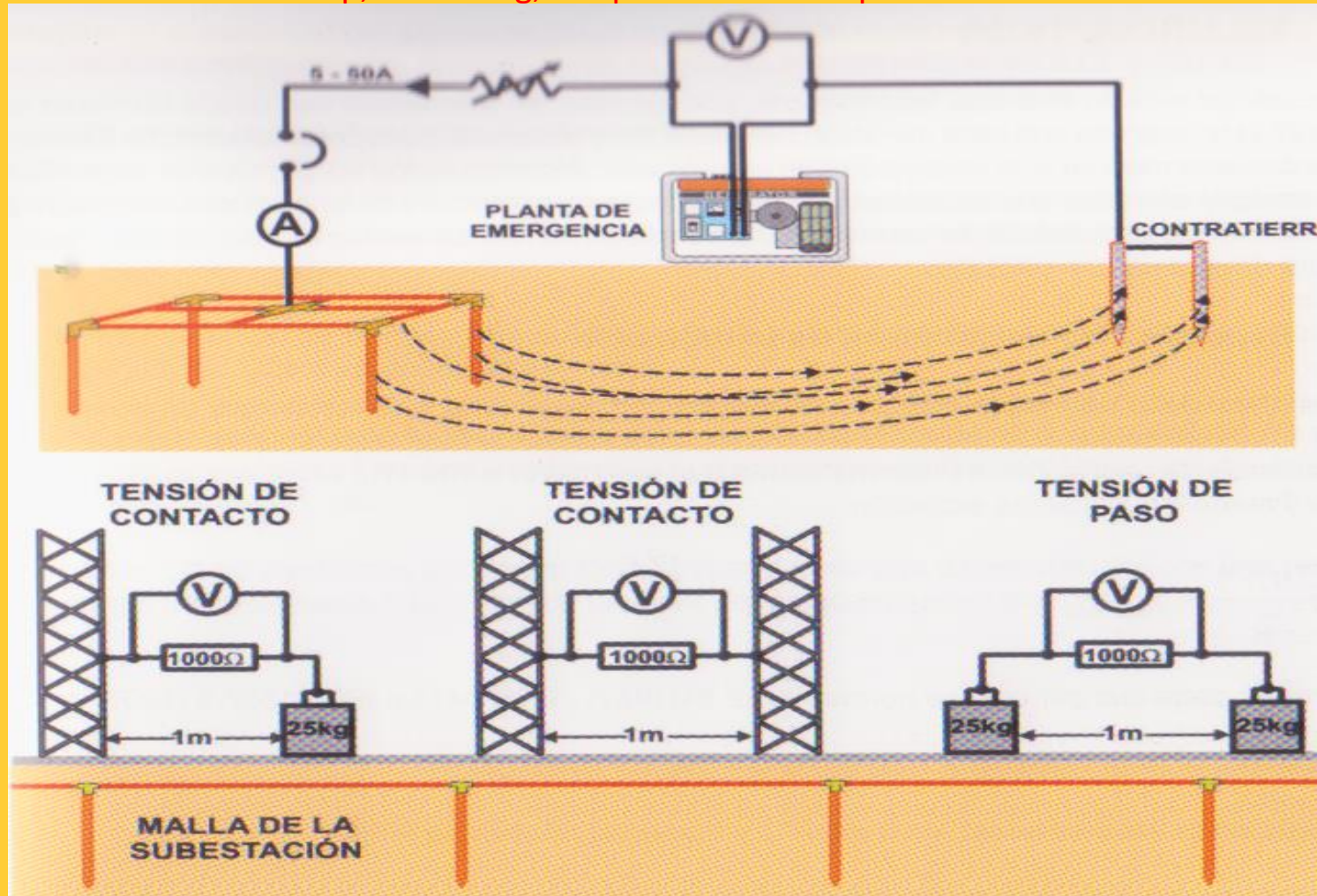
Barra

Malla



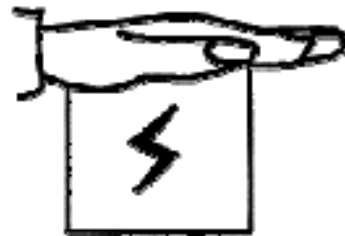
Montajes para medición de potenciales de paso y contacto.

, la corriente I inyectada debe ser el 1% de la calculada de diseño, Típico 5-50 amp, en 0.2 seg, R representa el cuerpo humano



Efectos De La Corriente En El Cuerpo Humano.

Cosquilleo



0.5 mA

Contracción Muscular



10 mA

Paro Respiratorio



30 mA

Fibrilación Ventricular



75 mA

Tiempos de Exposición:

De 5s a 10s.

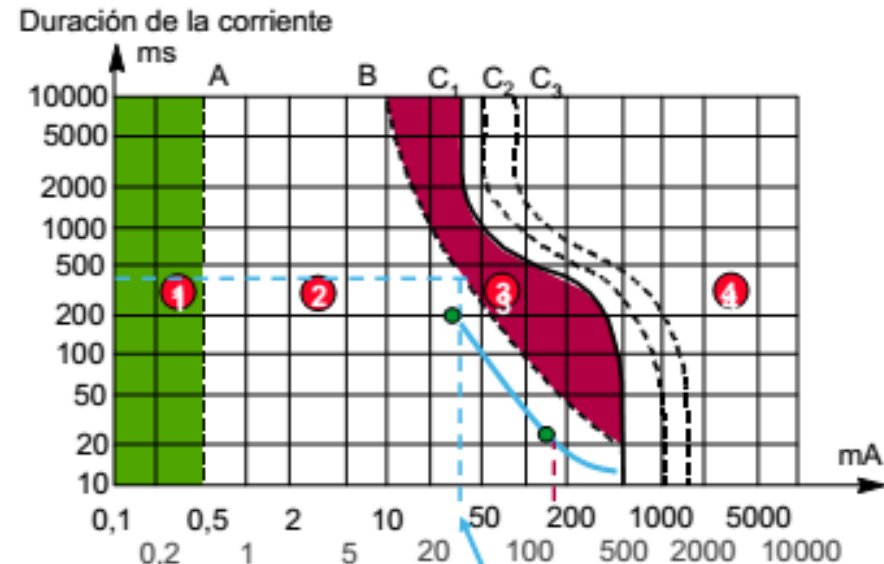
IEC 60479-1

Efectos de la corriente en el cuerpo humano.

- Curva C1 de la norma IEC 60479-1

- Define los límites que no se deben superar en corriente / tiempo de duración

- 1 imperceptible
- 2 perceptible
- 3 efectos reversibles : contracción muscular
- 4 posibles efectos irreversibles
 - C1: sinfibrilación cardíaca
 - C2: 5% de probabilidad defibrilación
 - C3: 50% de probabilidad defibrilación



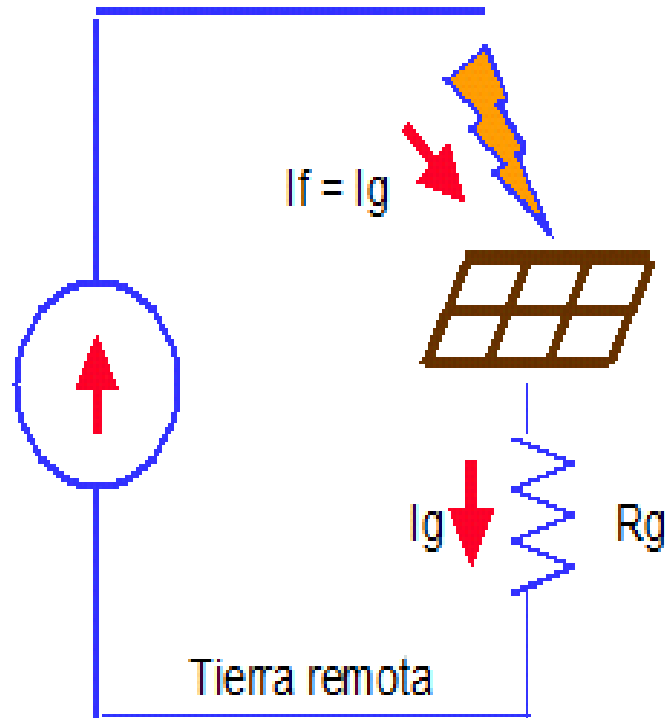
IEC 60479-1

- **Voltaje de paso:** Es el voltaje del electrodo que puede ser puenteada por una persona al caminar en las zonas próximas a la toma de tierra. Con la resistencia del cuerpo y contacto de los pies, se obtiene el voltaje de contacto, inferior al potencial entre el electrodo y el punto donde se encuentra la persona.
- Una persona al moverse en una dirección perpendicular a las líneas equipotenciales, aparecerá entre sus pies el voltaje V_p .
- **$V_p = 0.16 \rho I / hL$.**
 - Donde:
 - L es la longitud total del electrodo horizontal en metros.
 - h es la profundidad de la toma de tierra en m.
 - ρ es la resistividad superficial del terreno en $\Omega - m$.
 - I es la corriente de falla en A.

Voltaje de contacto: Cuando una persona se pone en contacto con alguna parte aterrada de la instalación al momento de ocurrir una falla a tierra, aparecerá una diferencia de voltaje entre sus manos y pies debido a la corriente de falla que circula por el sistema de puesta a tierra. Este voltaje corresponde a un punto sobre la curva de potencial del electrodo de tierra. El V_c se calcula aplicando:

- **$V_c = 0.7\rho I/L$**
- **Donde:**
- **ρ es la resistividad superficial del terreno en $\Omega - m$.**
- **I es la corriente de falla en A.**
- **L es la longitud total del electrodo horizontal en m.**

IMPORTANCIA DE CONECTAR AL SISTEMA



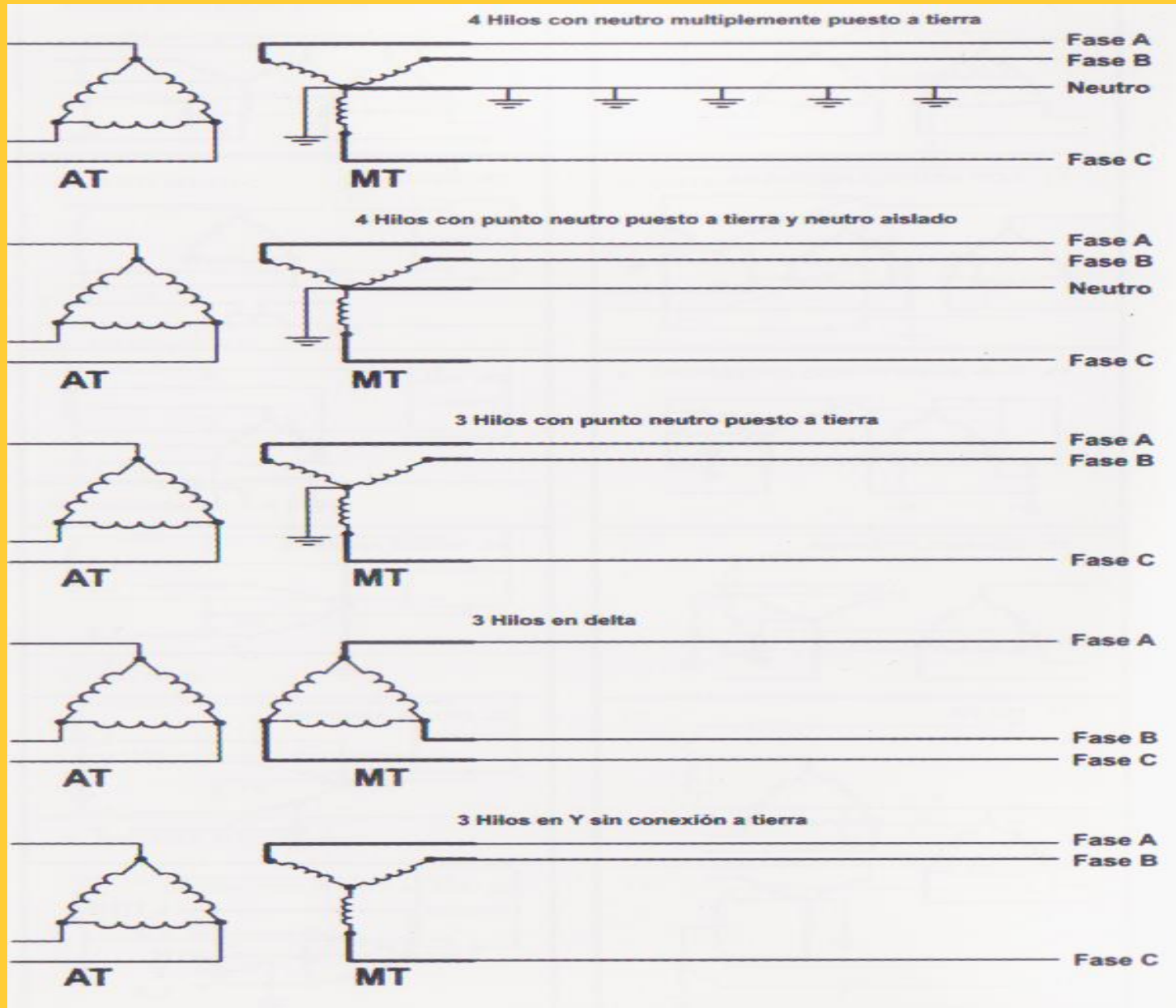
$$GPR = R_g I_g; I_g = I_f$$

a) Sin retorno metálico

Si la subestación es alimentada por una línea aérea, sin hilo de guarda, es importante tener una resistencia a tierra baja, ya que toda la corriente de falla a tierra tiene que retornar por el terreno, ocasionando una elevación del potencial de tierra dado por $R_g I_f$

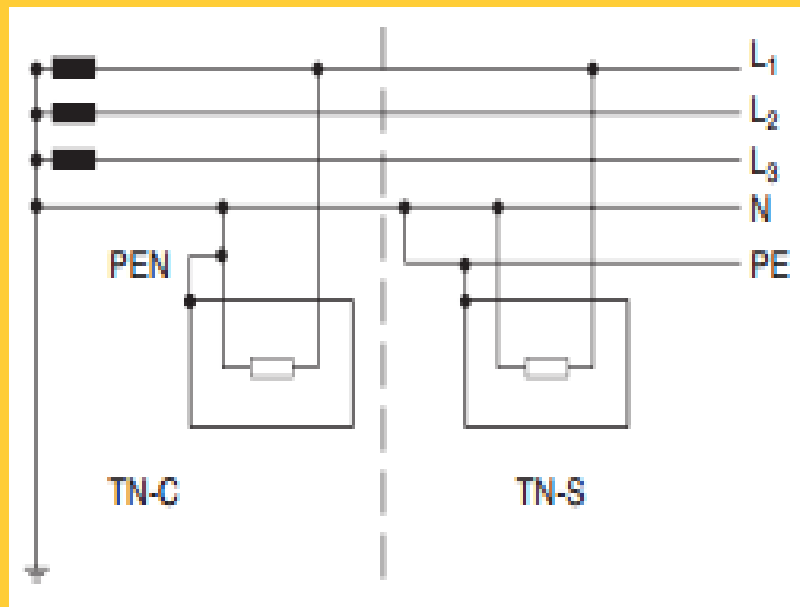


Tipos de sistemas de distribución

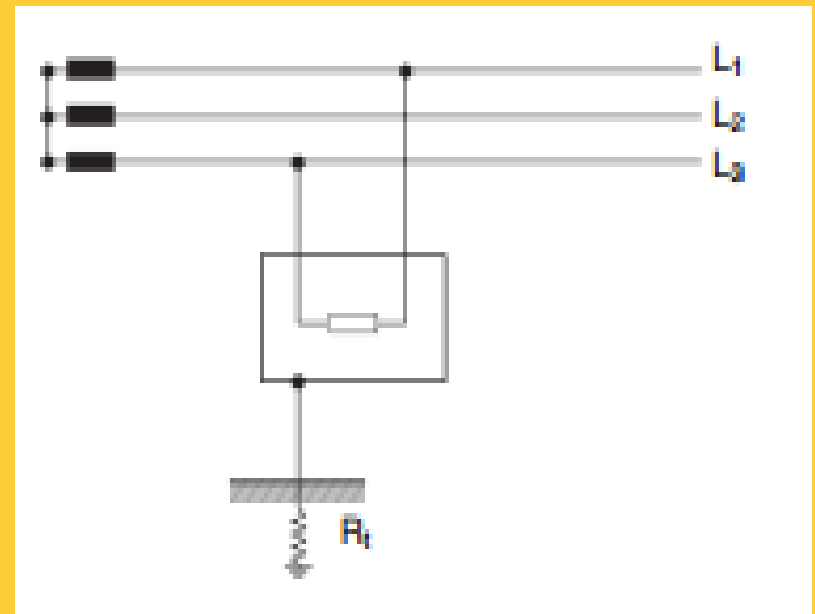


Conexiones y términos para sistema TN-C-S e IT

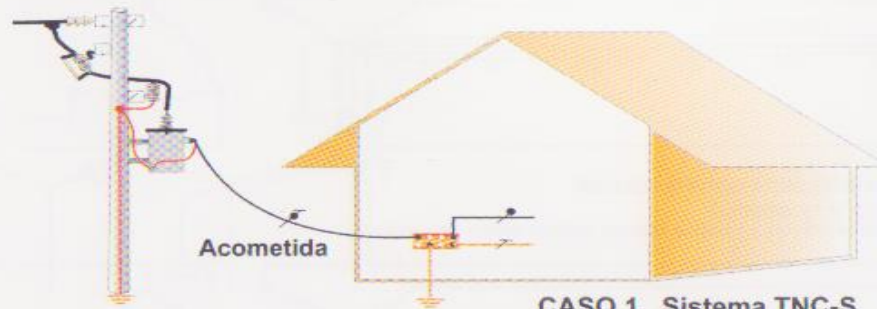
TN-C-S: el conductor de protección y el neutro están combinados parcialmente en un único conductor PEN y separados parcialmente PE + N, combina TNC y TNS



Los sistemas IT, no tienen piezas conectadas a tierra, las carcasas poseen una tierra independiente



Ejemplos



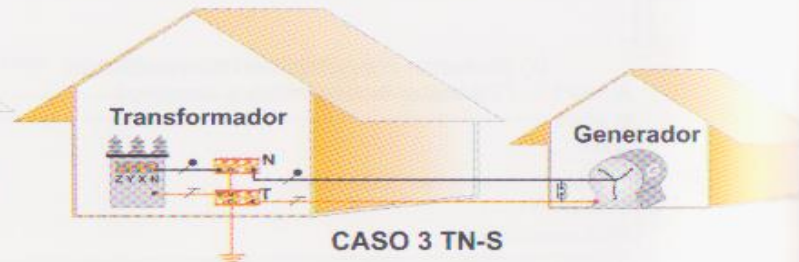
S: separado N y T
C: conjunto N=T
I: Aislado o alta Z

CASO 1. Sistema TNC-S

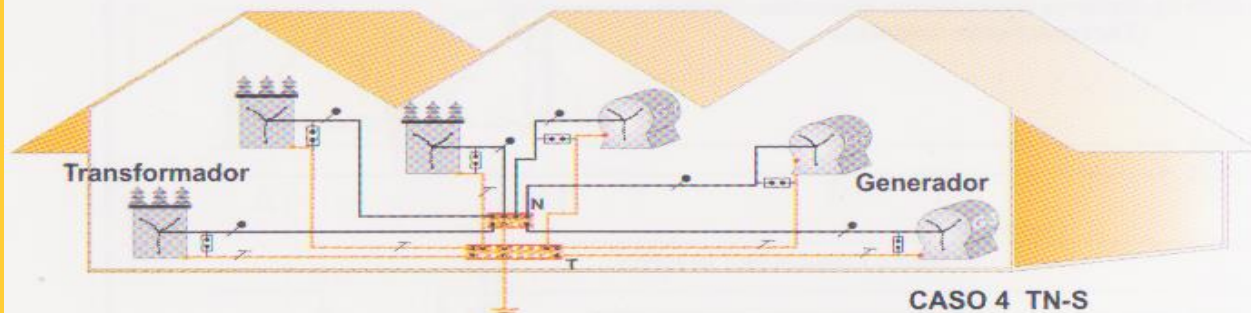
Primera letra conexión del N del trafo a tierra T o Aislado I
Segunda letra conexión de las partes metálicas de la instalación



CASO 2 TN-S

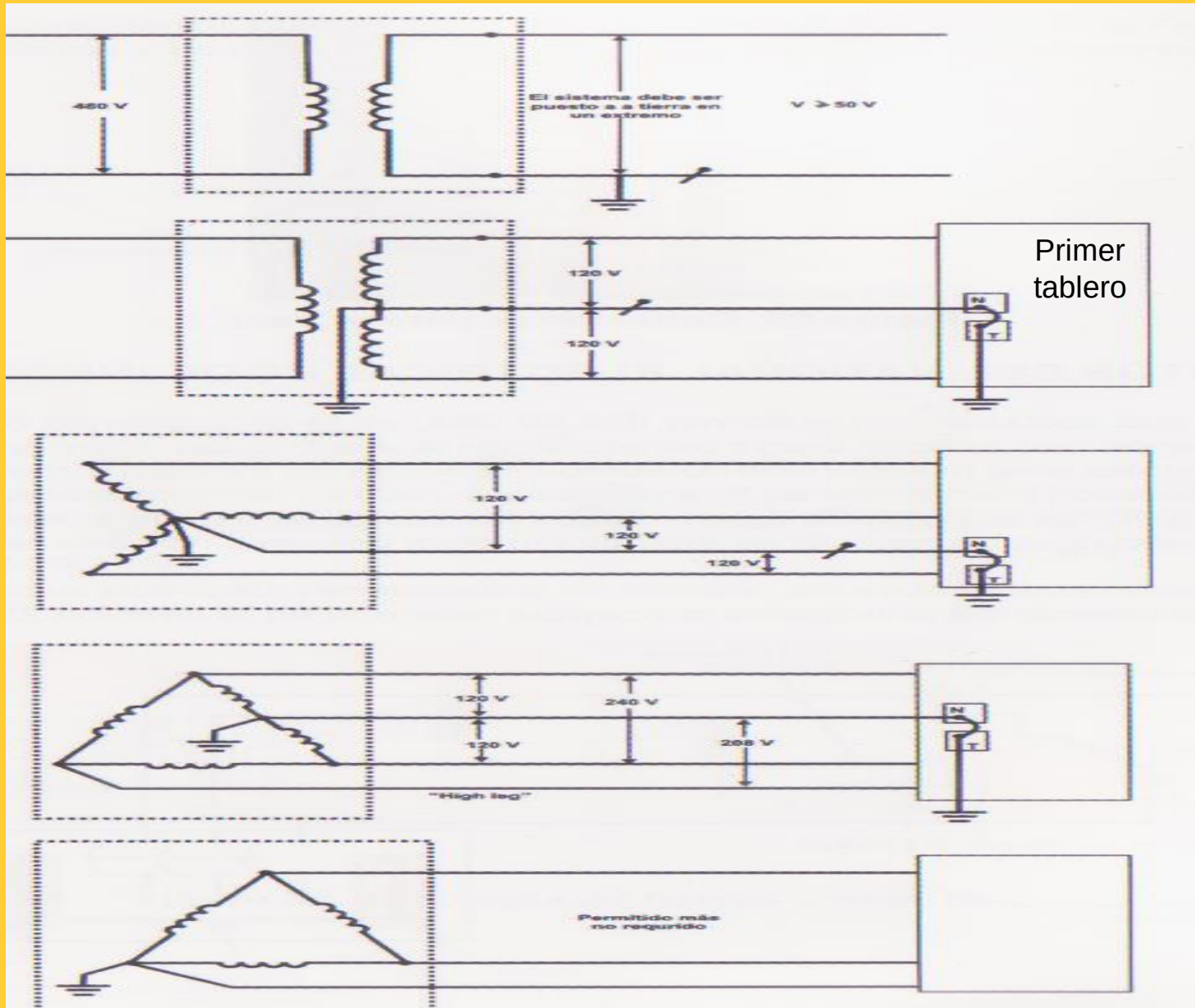


CASO 3 TN-S

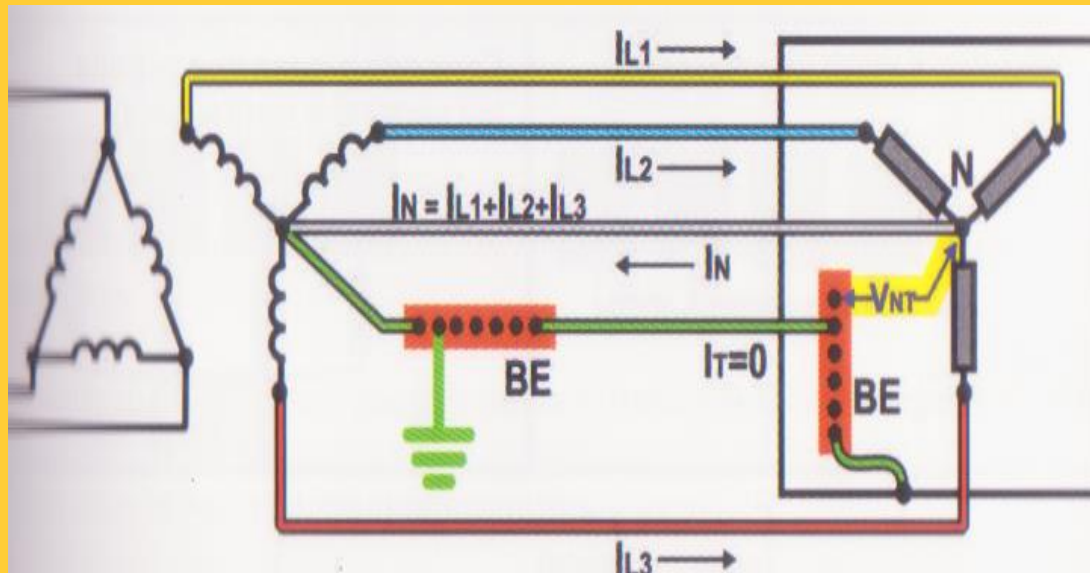
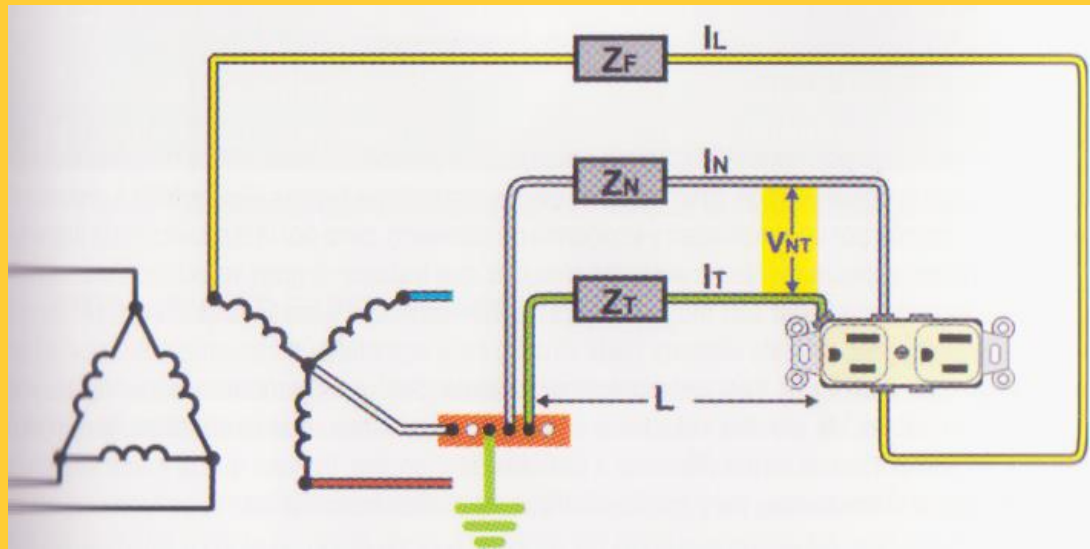


CASO 4 TN-S

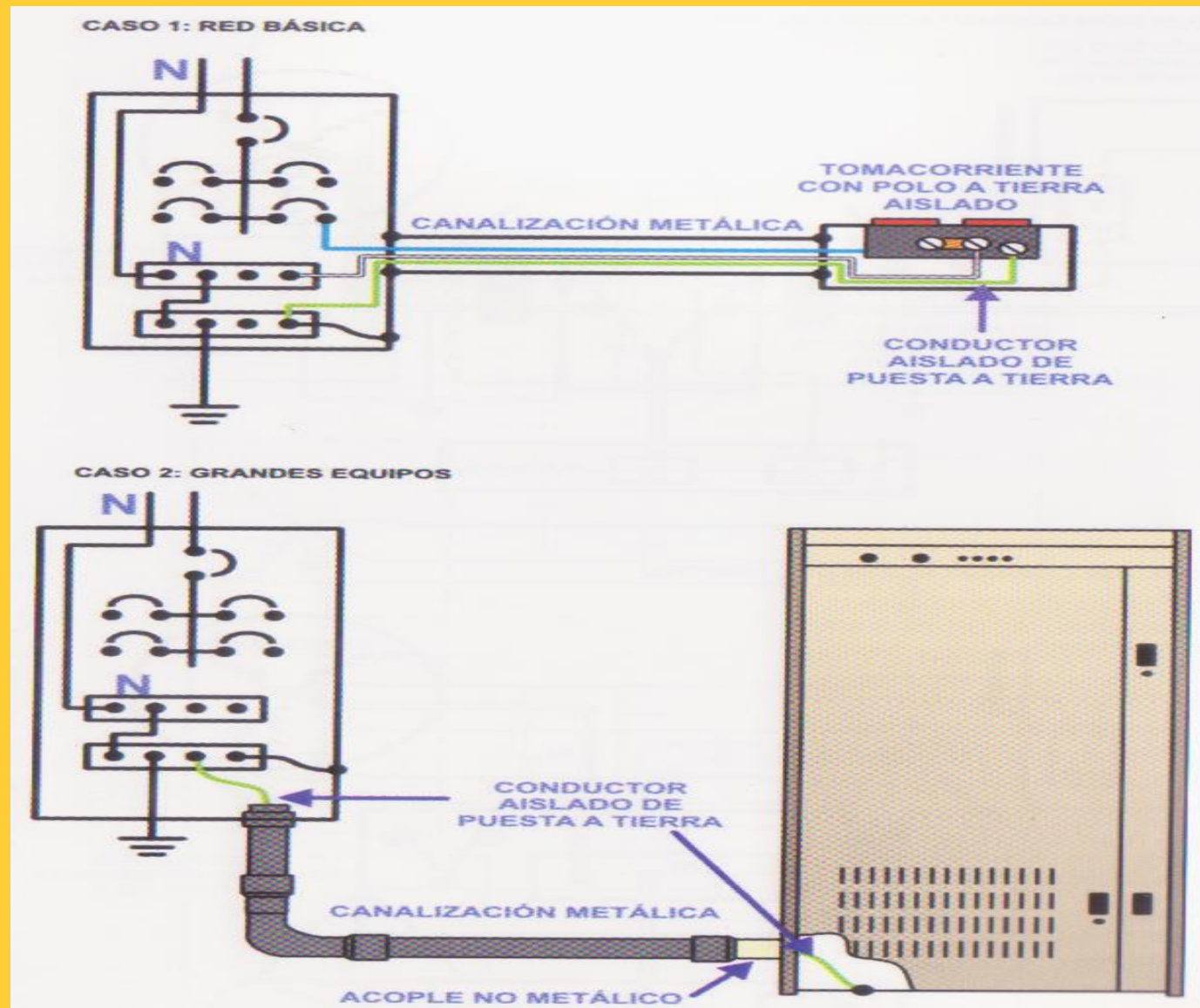
Sistemas que deben ponerse a tierra según NEC



Tensión a tierra en cargas monofásicas y trifásicas



Conexión para equipos sensibles



Tomas polarizados, aislados, GFCI



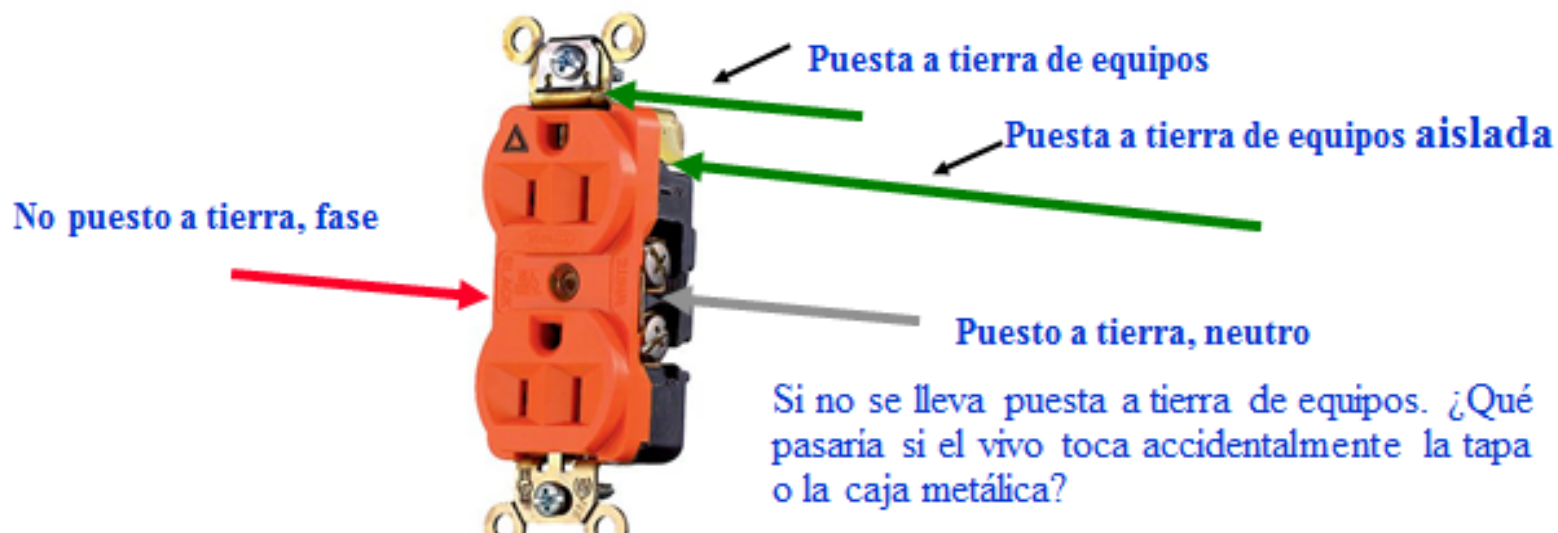
Ejemplo de alambrado toma aislado, caja metálica

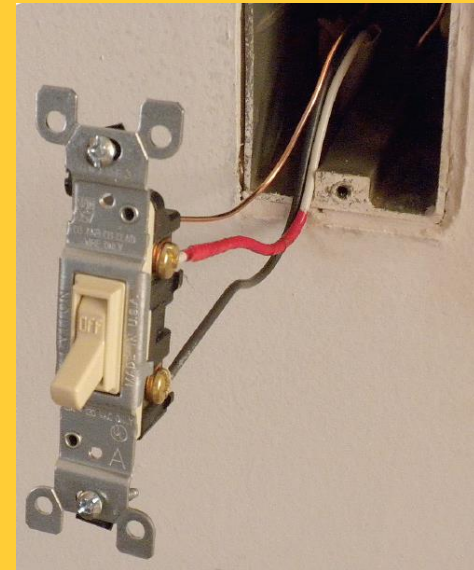
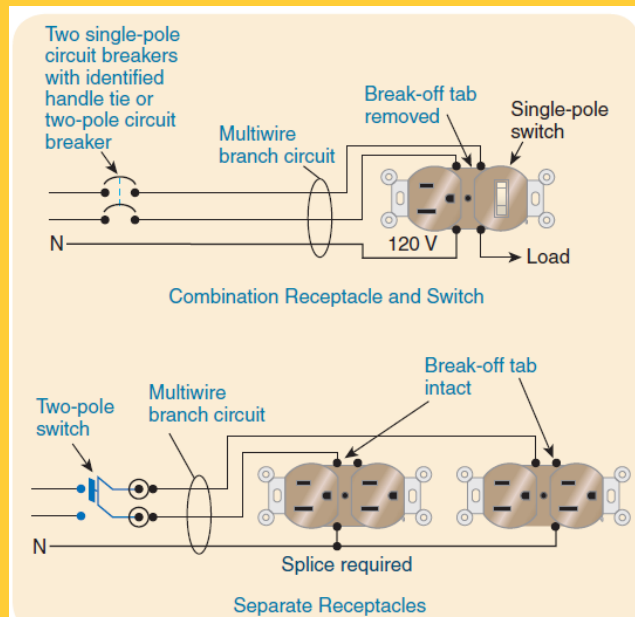
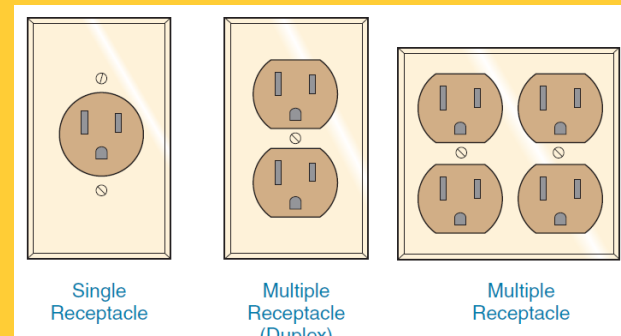
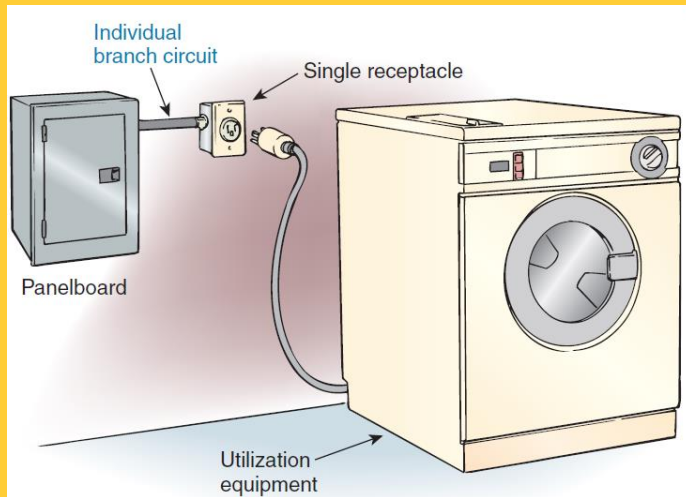
Se está alambrando un receptáculo de tierra aislada cuya caja es metálica y la canalización es plástica. ¿Cuántos conductores deben llegar al receptáculo? Enumérelolos con sus respectivos nombres.

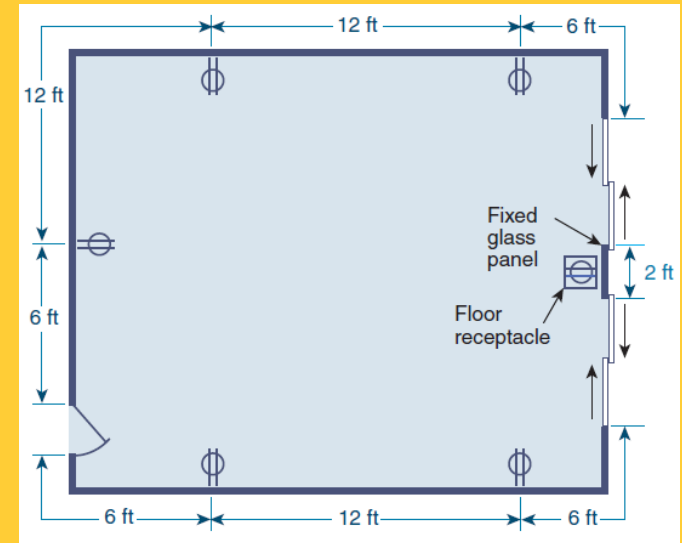
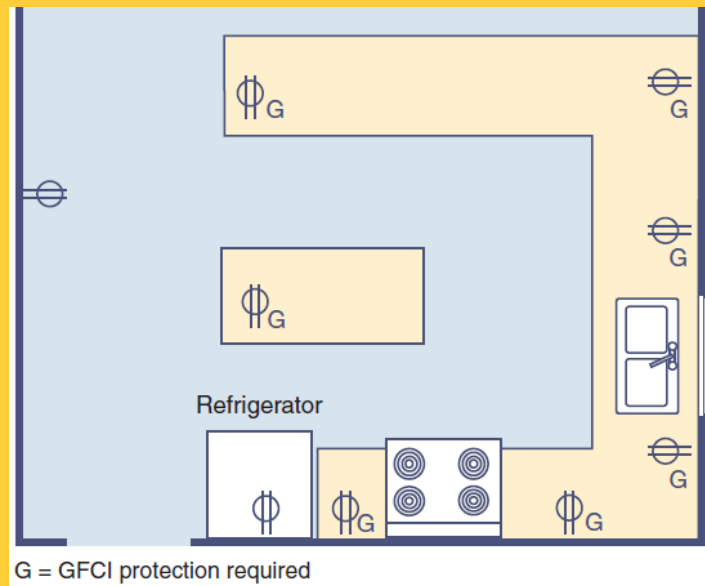
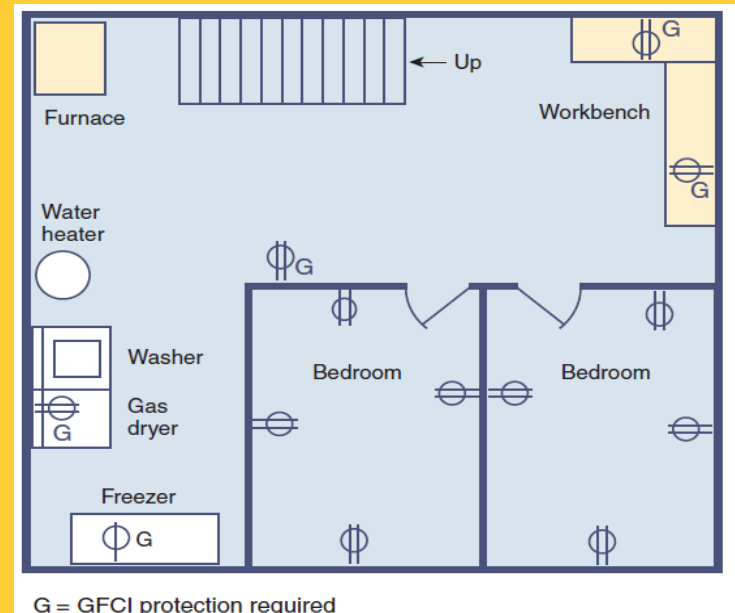
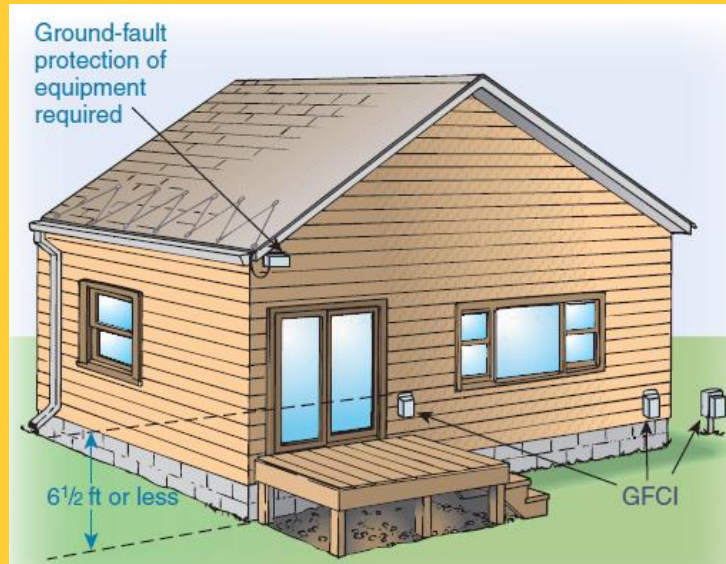
- **SOLUCIÓN:**

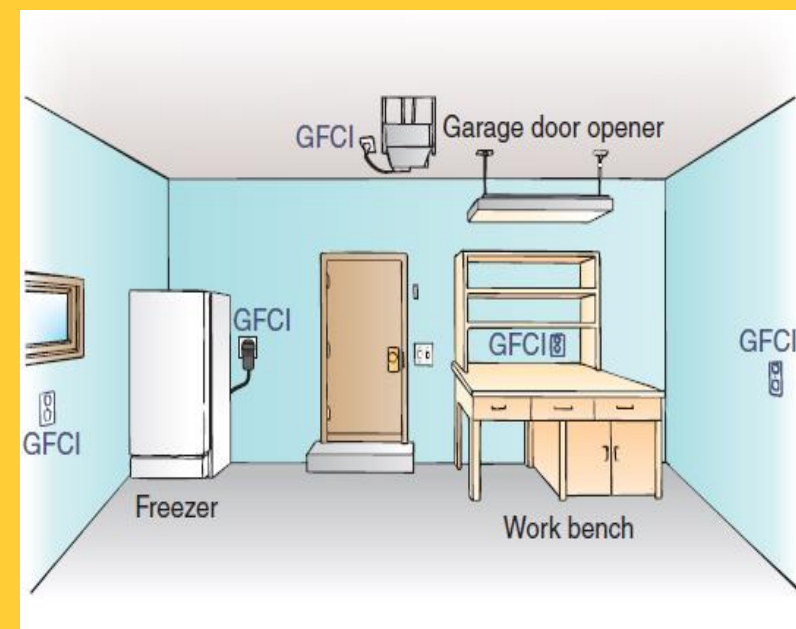
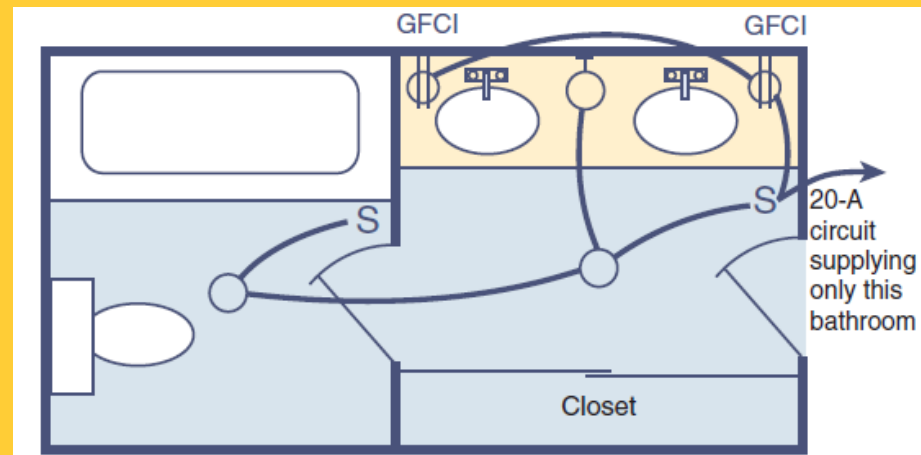
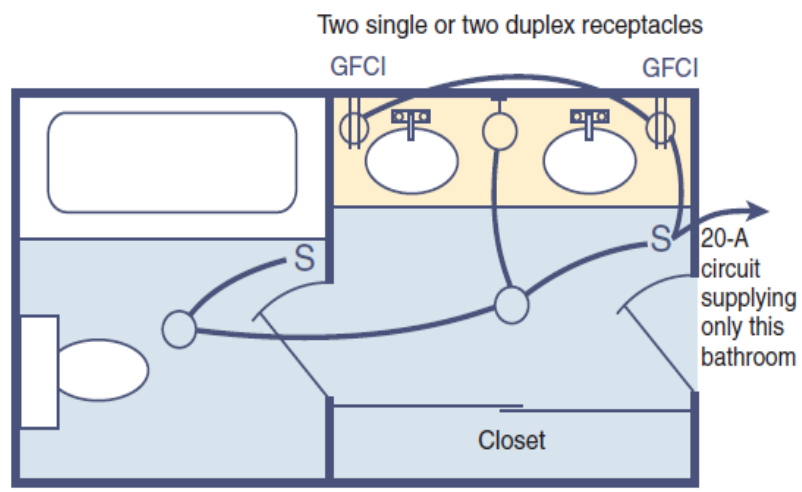
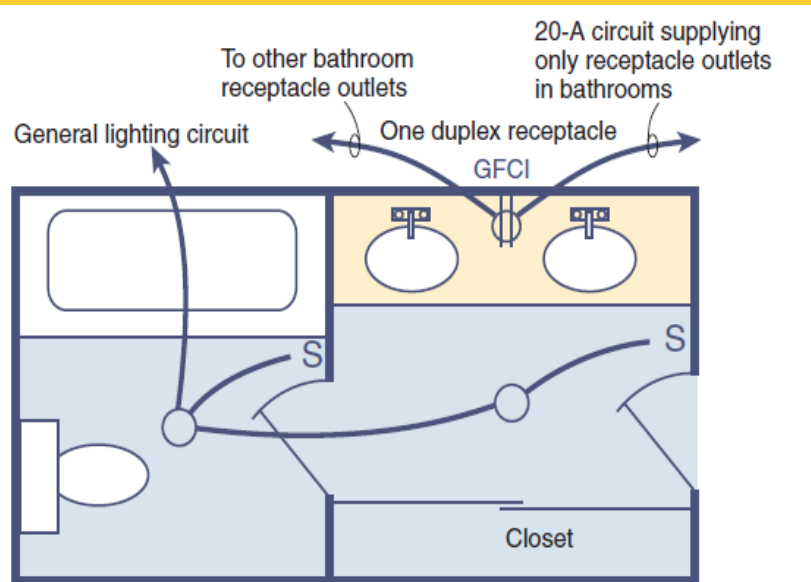
Cuatro conductores:

1. No puesto a tierra, fase.
2. Puesto a tierra, neutro.
3. Tierra aislada y
4. Tierra.

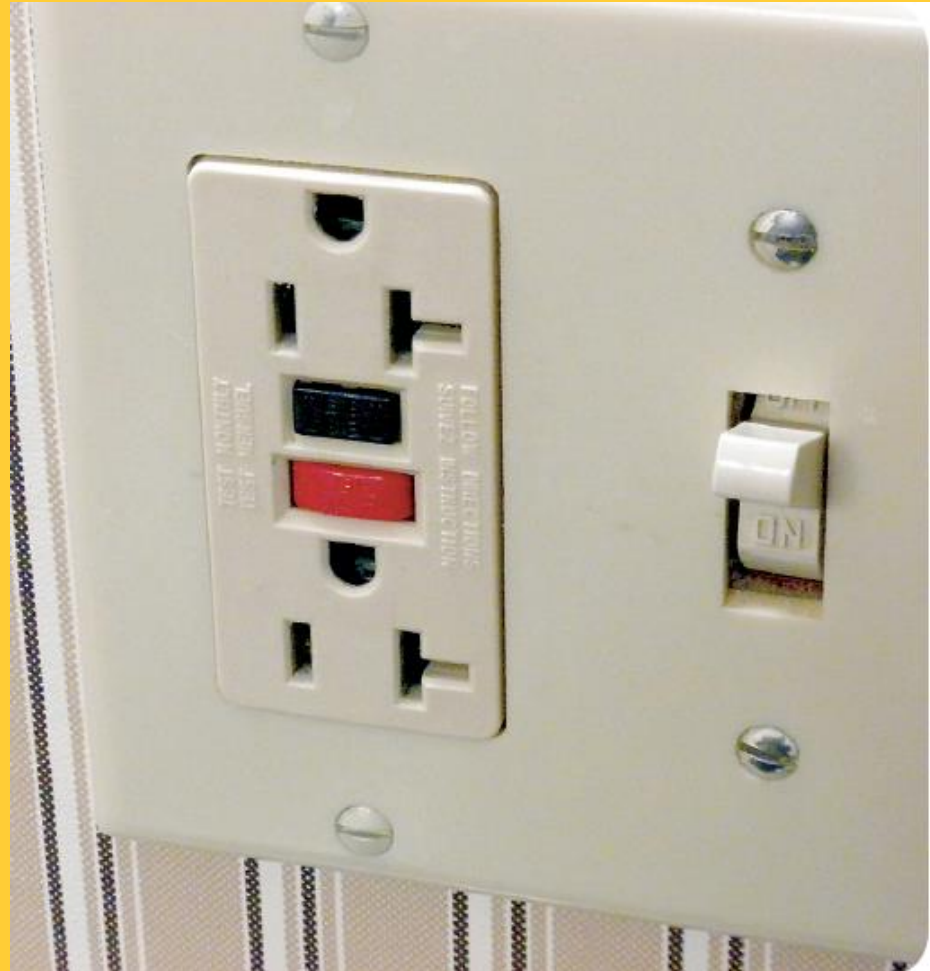




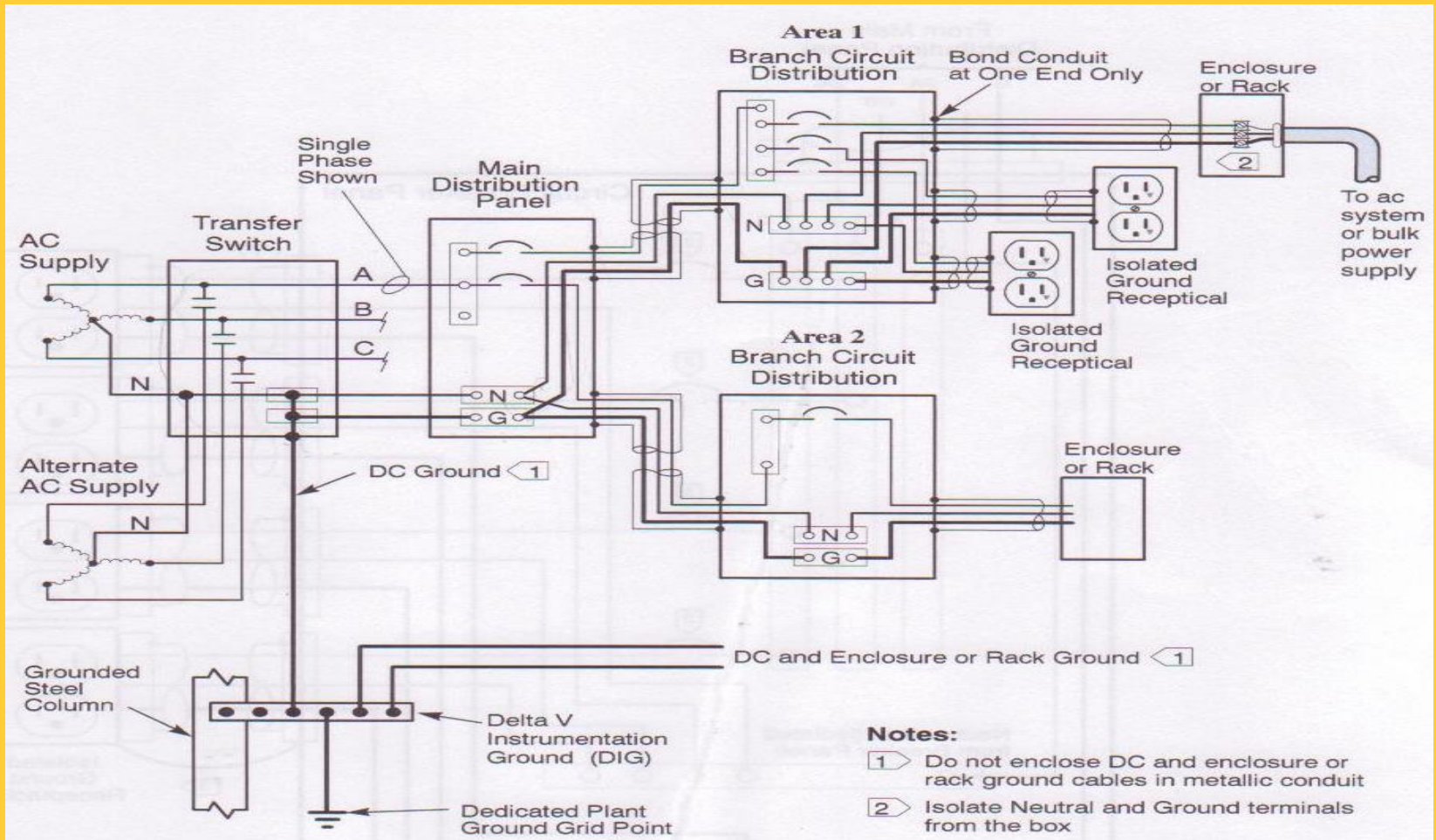




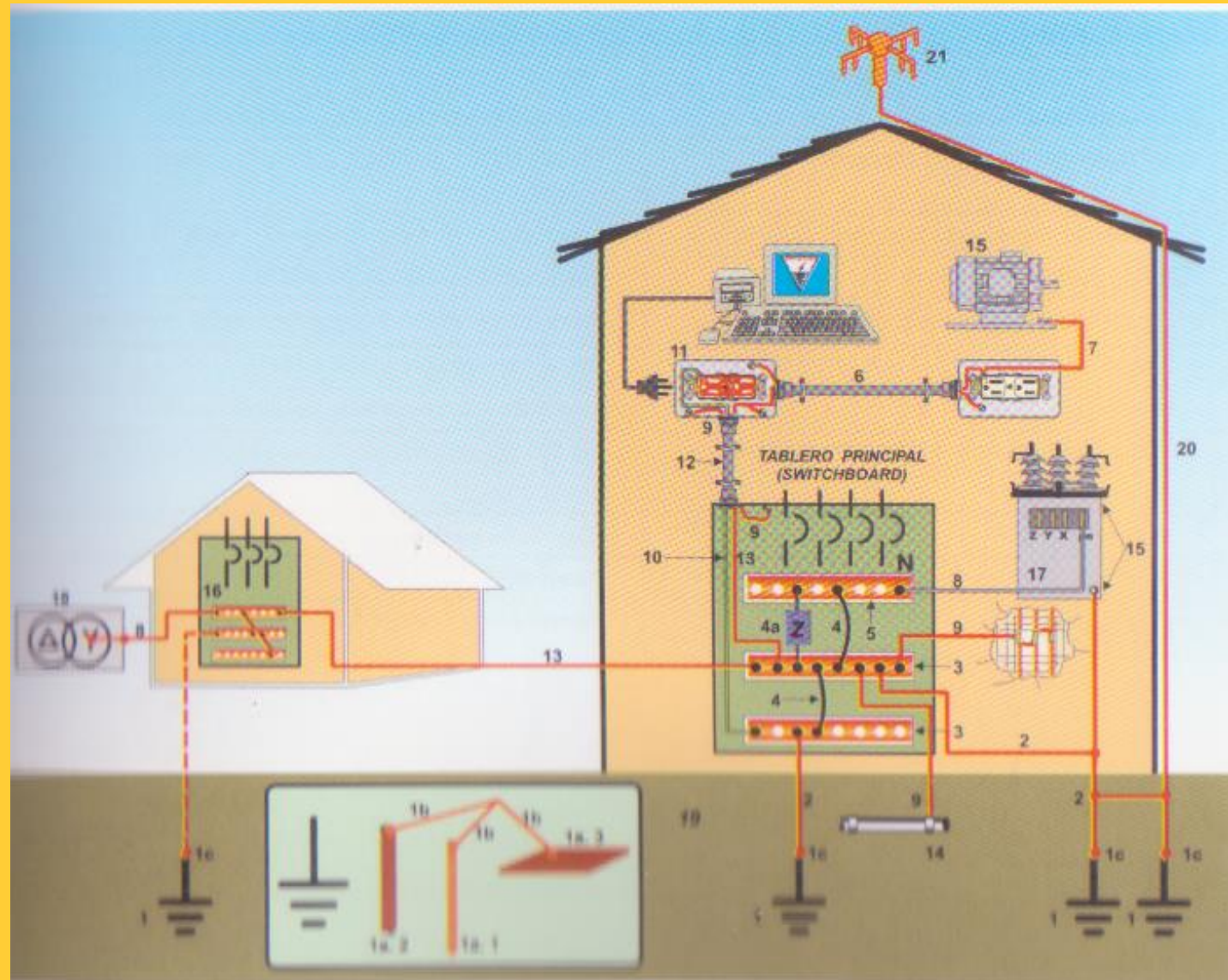
Protección e Interruptor y toma con GFCI



Distribución de tierras en tablero AC

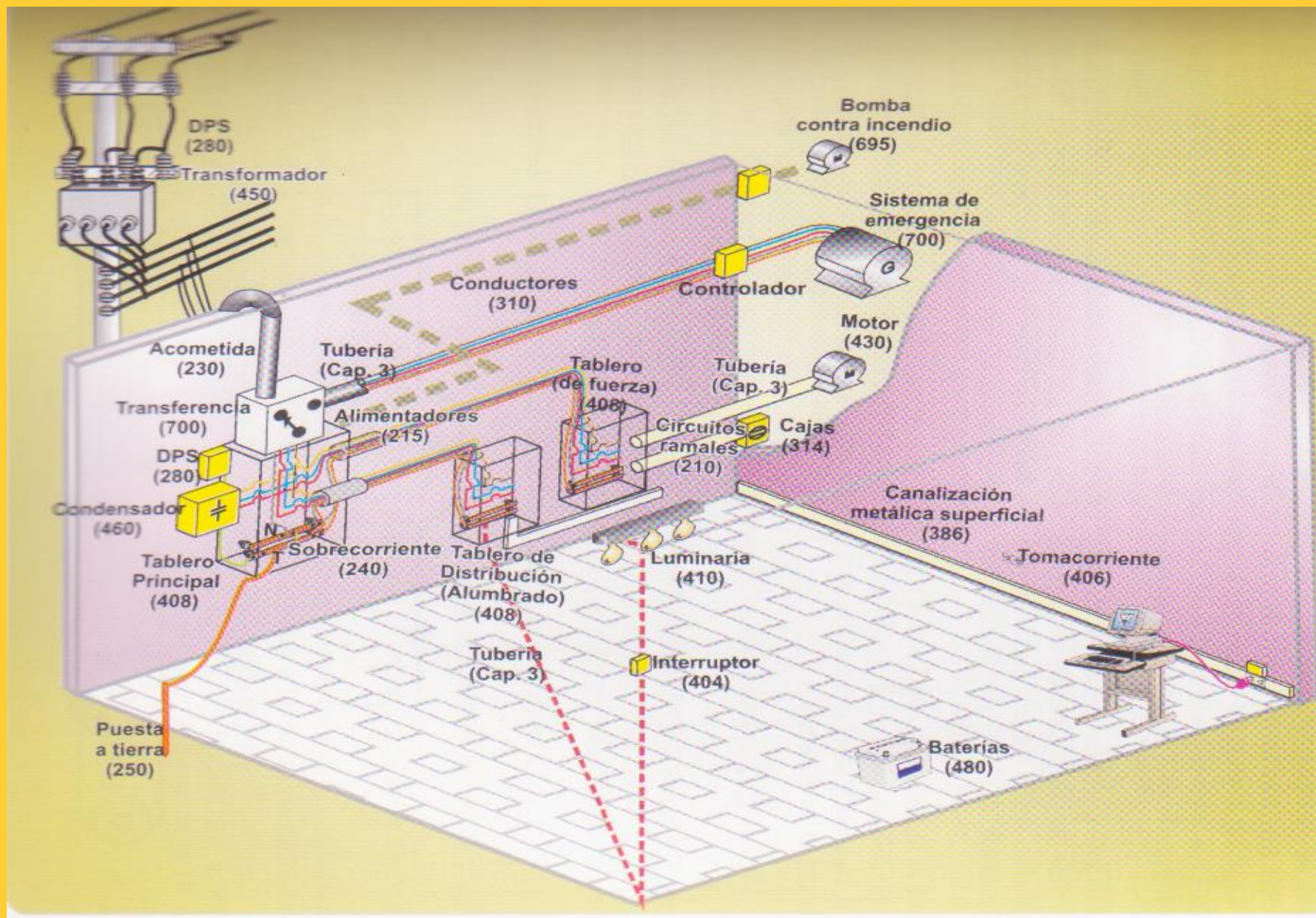


Polararizaciones sección 250 NEC

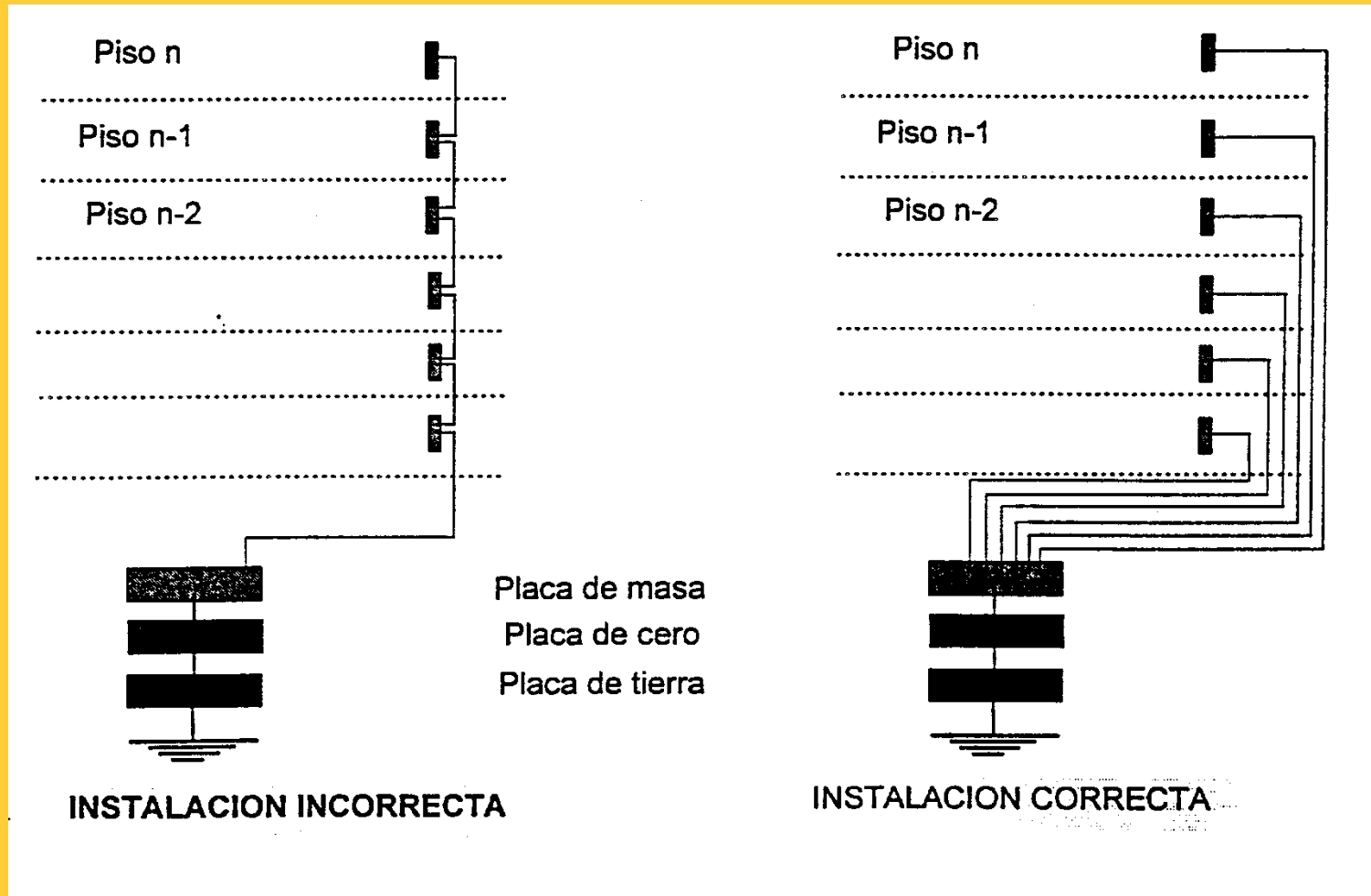


Sistemas de tierra

Red de tierra de acuerdo al NEC



Sistema de tierra en edificios de varios niveles

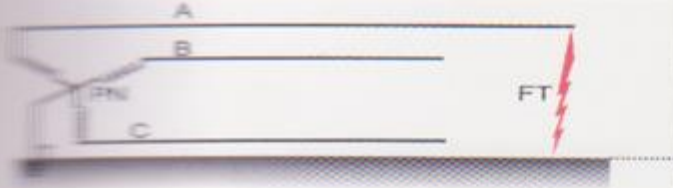
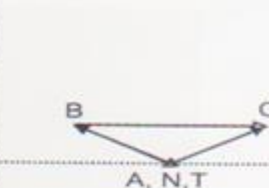
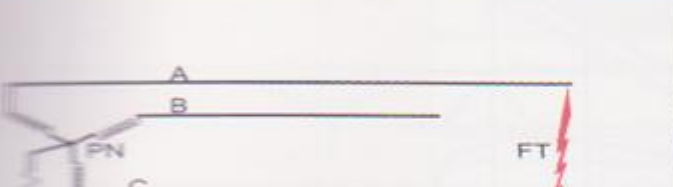
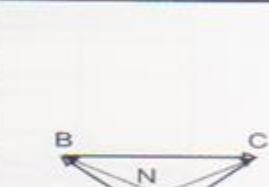
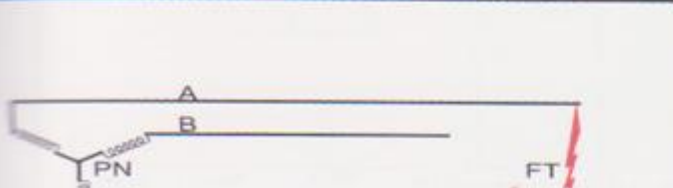
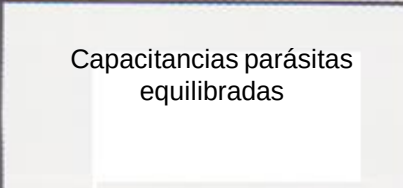
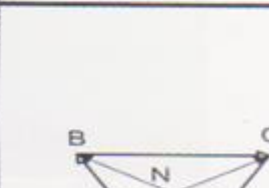


Efectos de una falla a tierra en un sistema de potencia

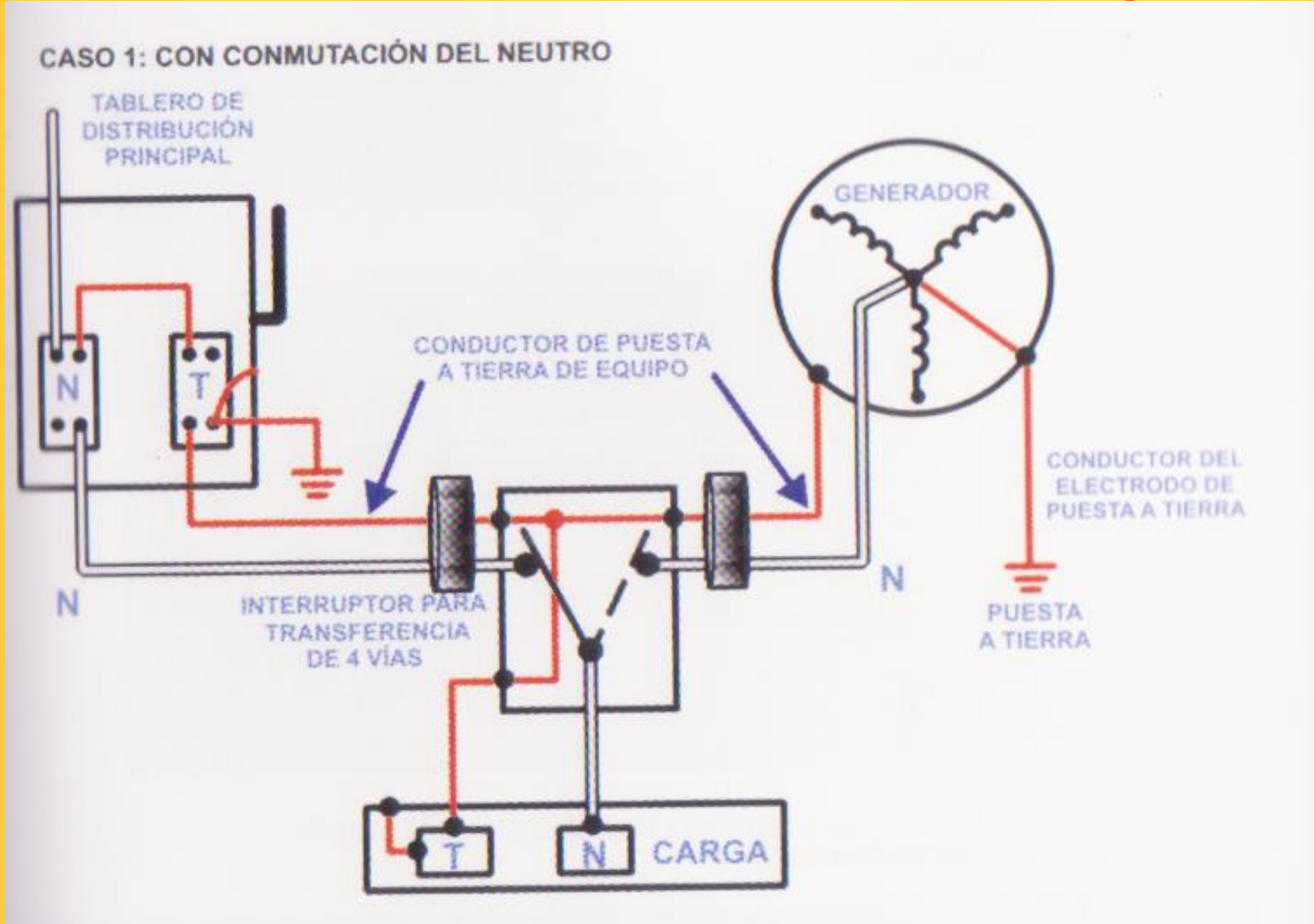
Tipo de conexión

V Normal

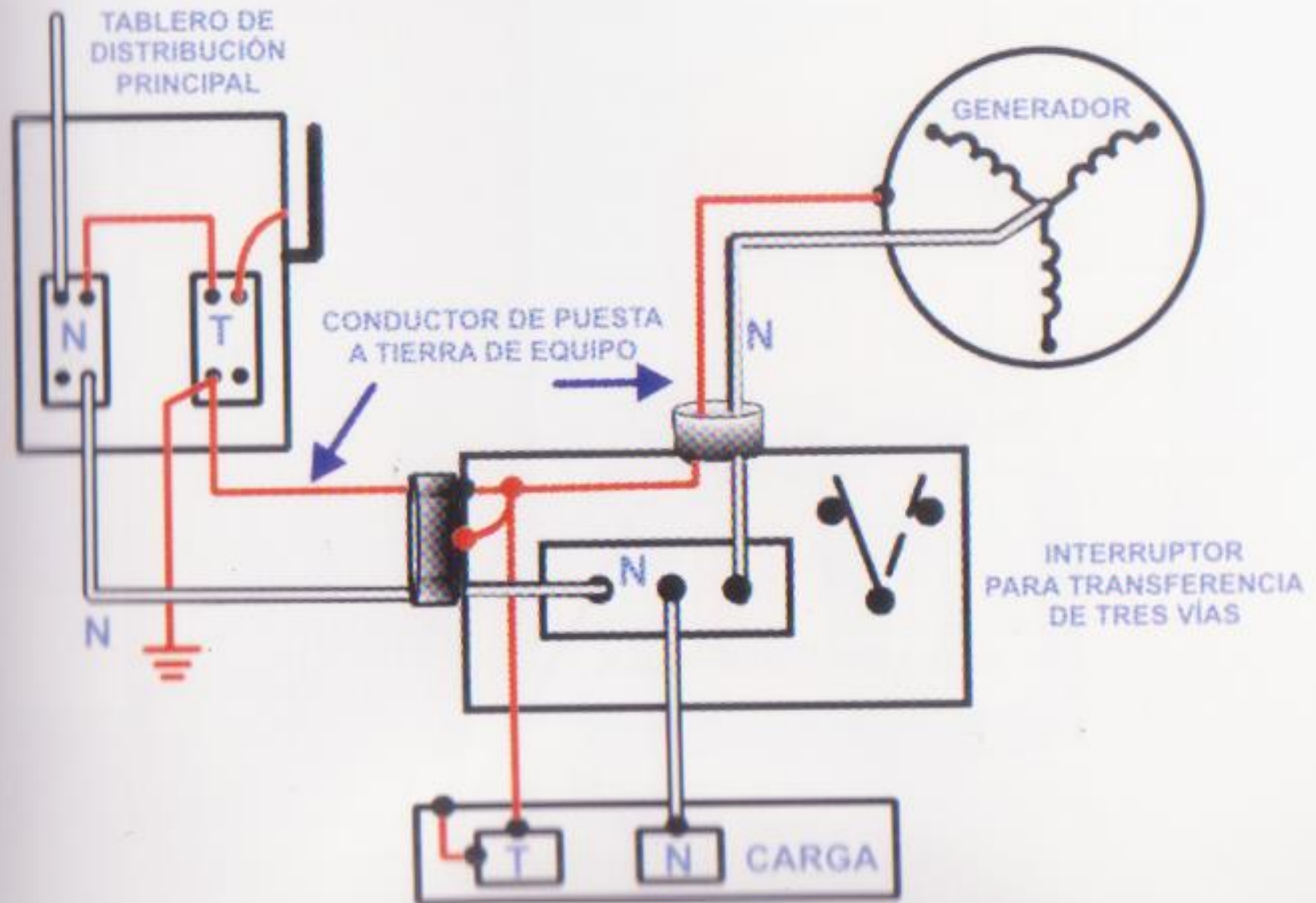
V en Falla

		
		
	Capacitancias parásitas equilibradas 	

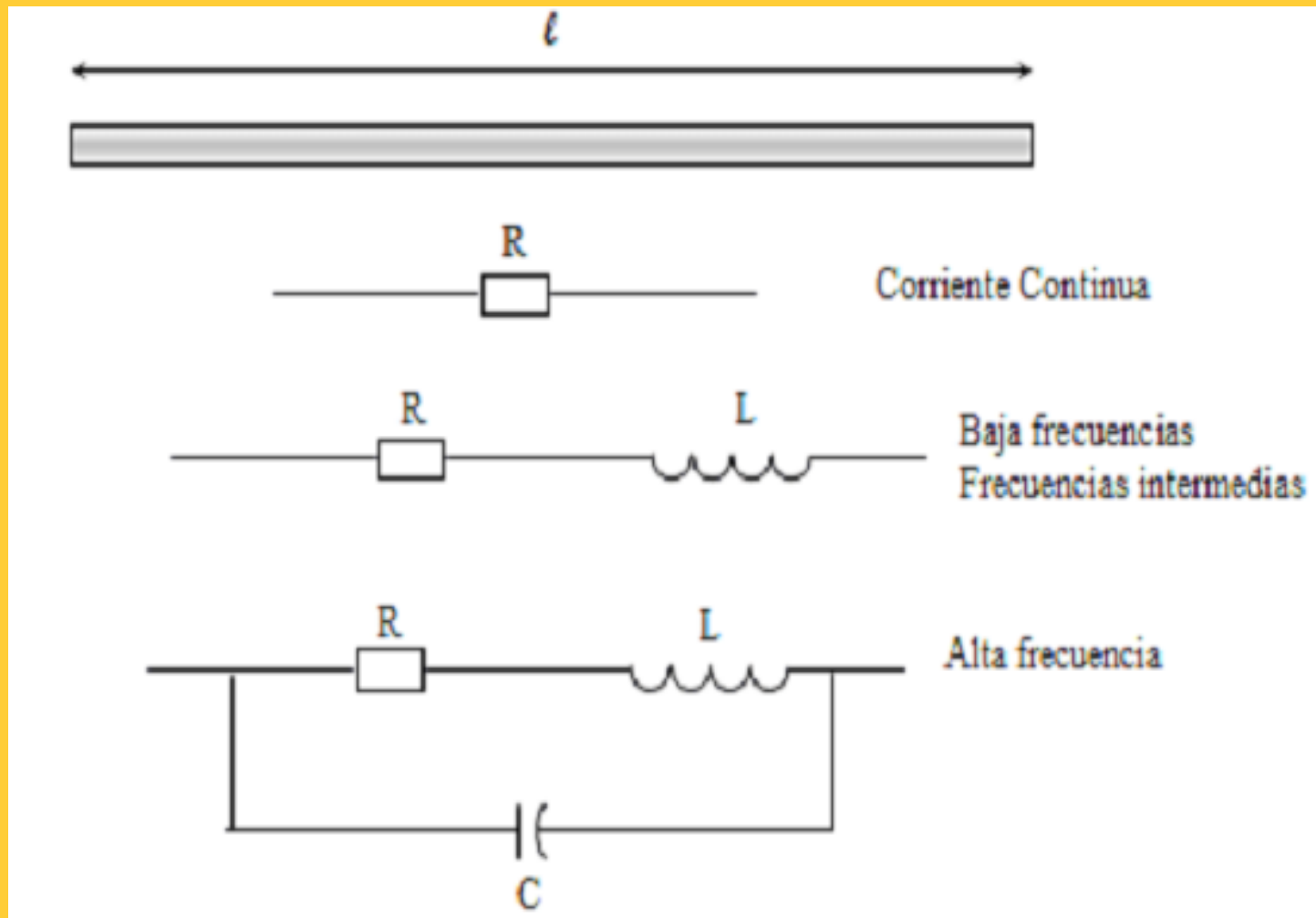
Conmutación del neutro en sistemas de emergencia

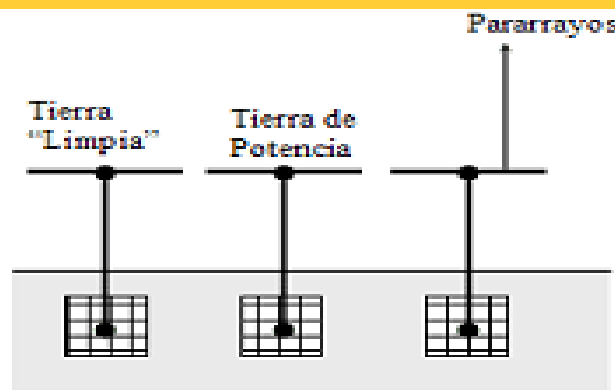


CASO 2: SIN CONMUTACIÓN DEL NEUTRO

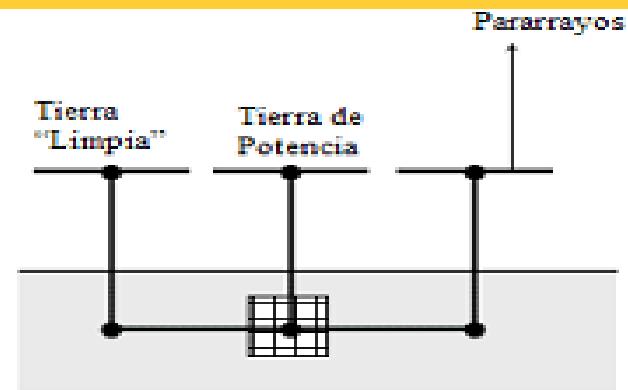


Comportamiento de la R a diferentes frecuencias

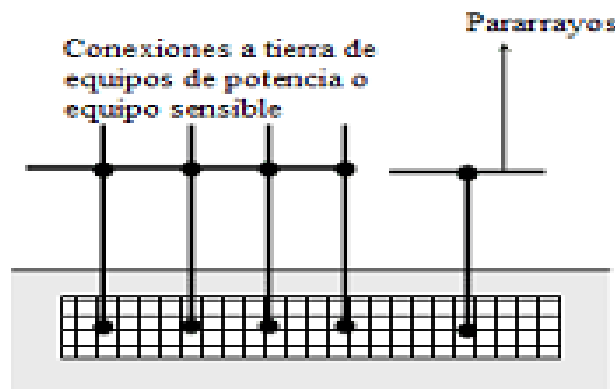




(a)



(b)



(c)

Diferentes conceptos para la Conexión al Terreno

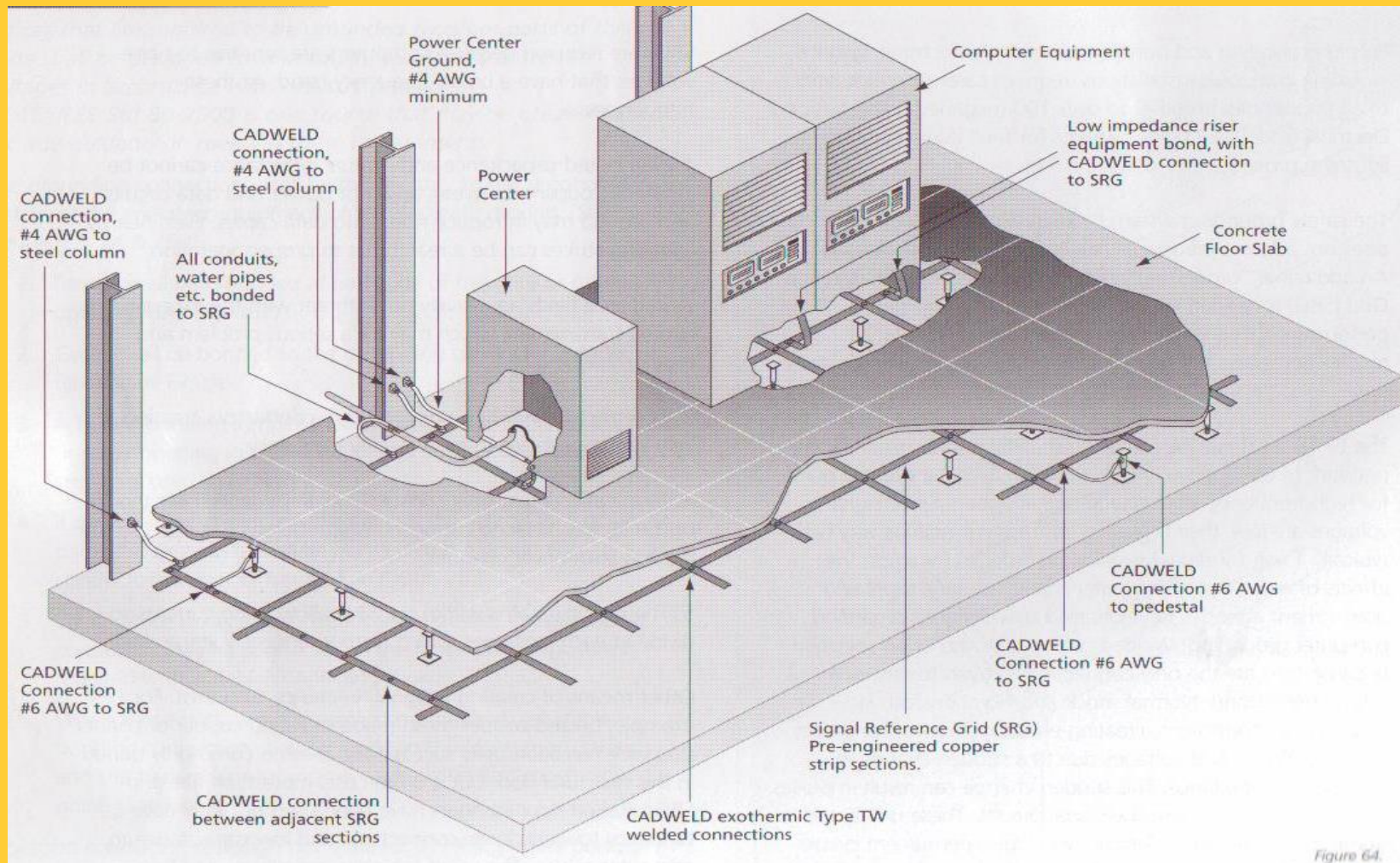
(a) Conexiones aisladas no recomendadas

(b) Conexión en un solo punto para bajas frecuencias

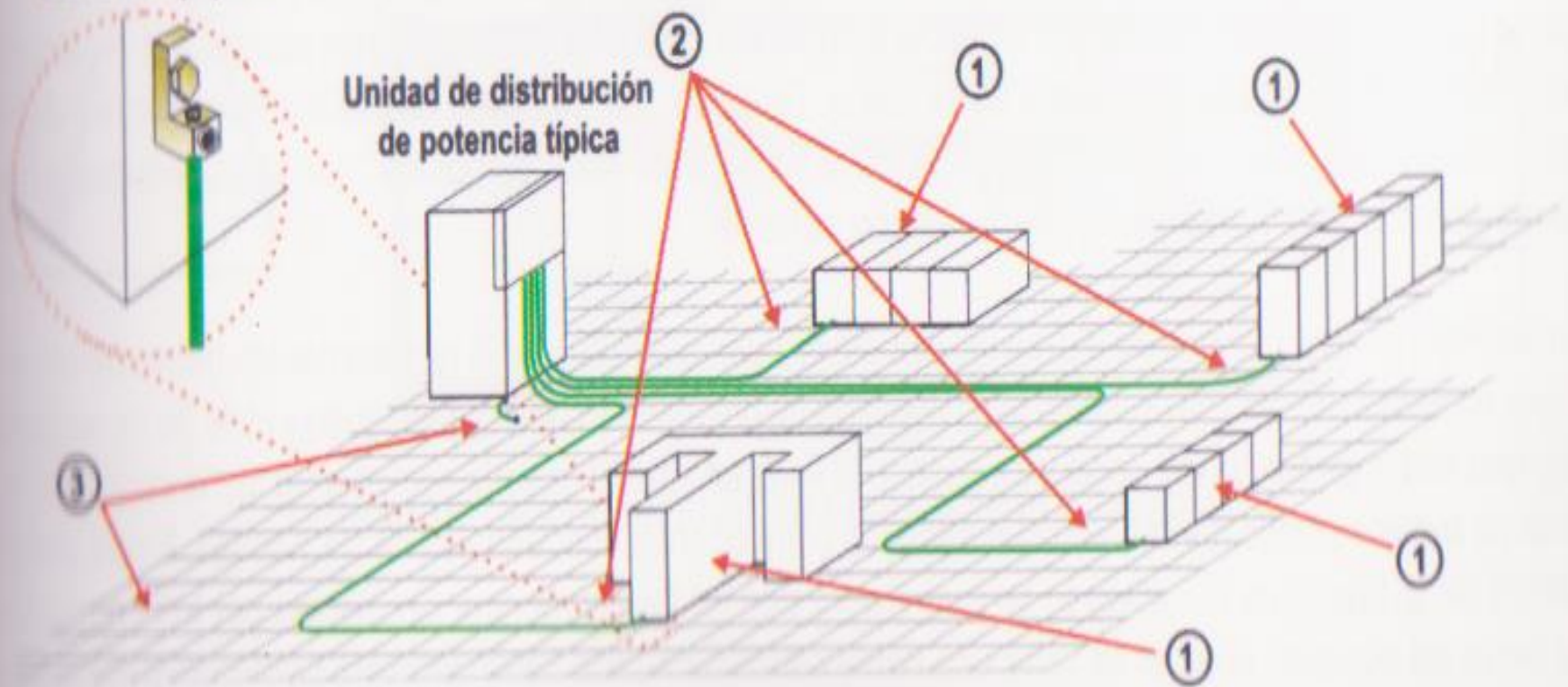
(c) Conexión a un solo sistema distribuido de conexión al terreno.

Recomendado para Compatibilidad Electromagnética

Redes de tierra en centros de cómputo



Conductor de puesta a tierra de equipos

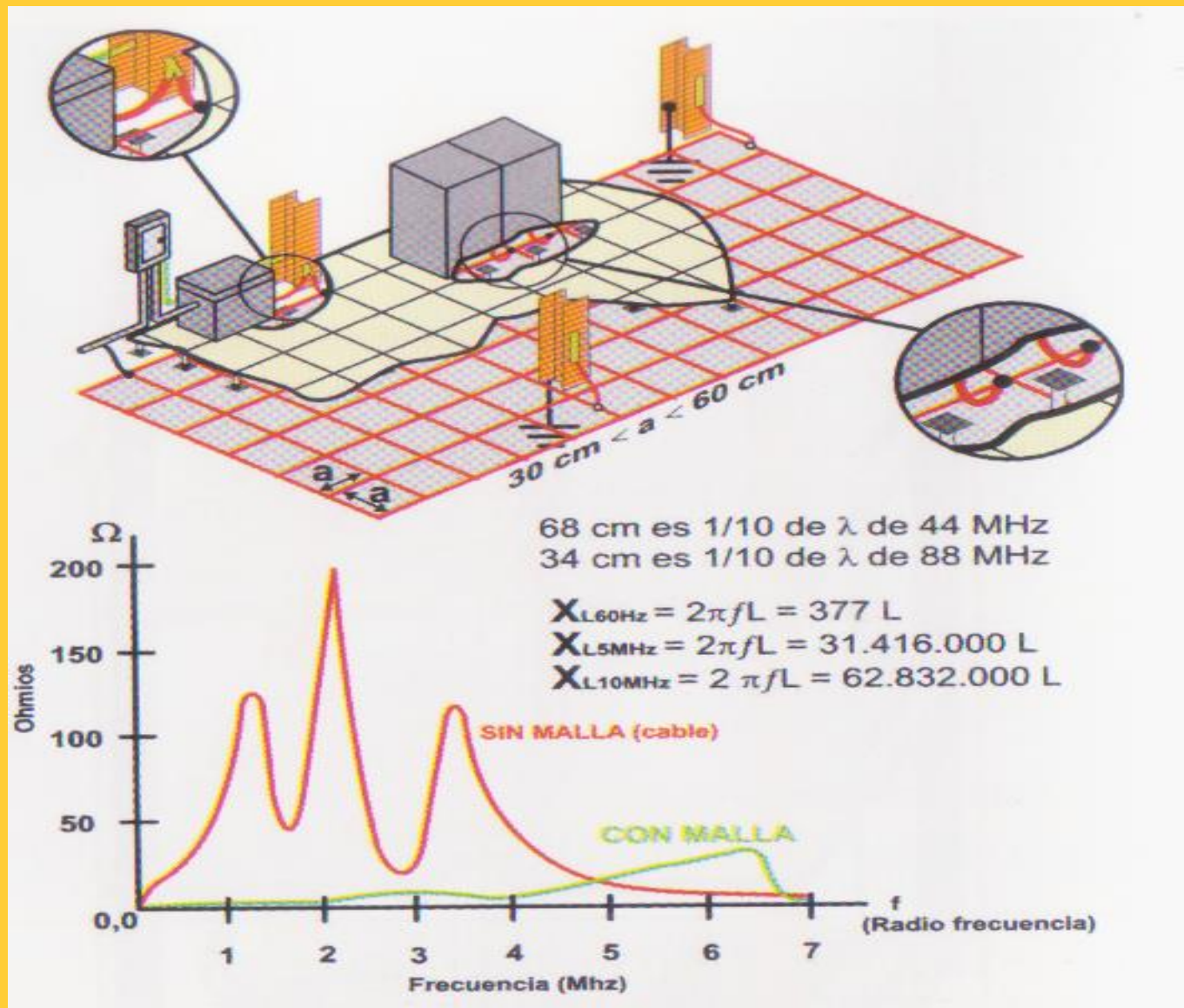


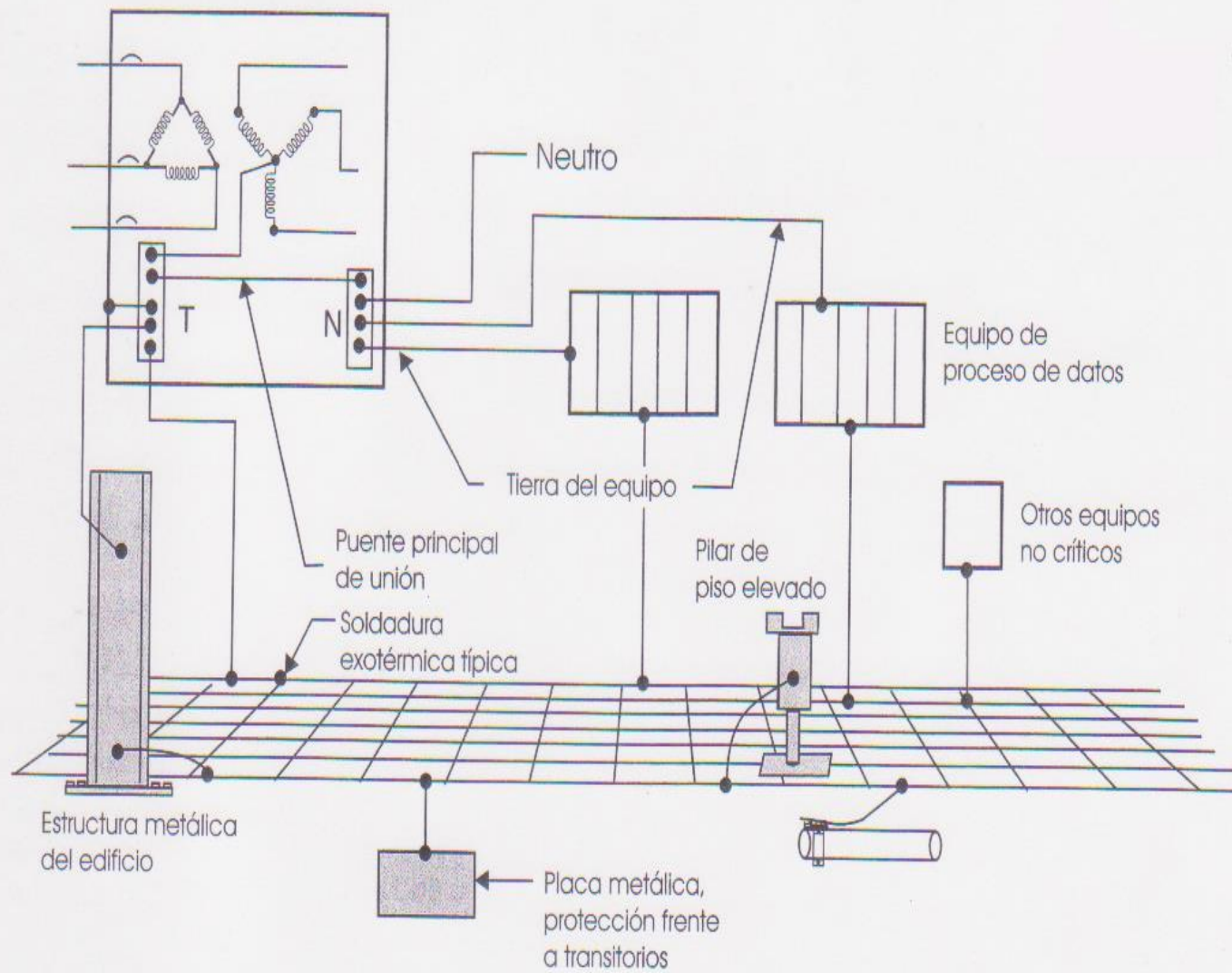
① Equipos electrónicos

② Conductor de puesta a tierra de equipos

③ Malla de alta frecuencia

Malla en alta frecuencia

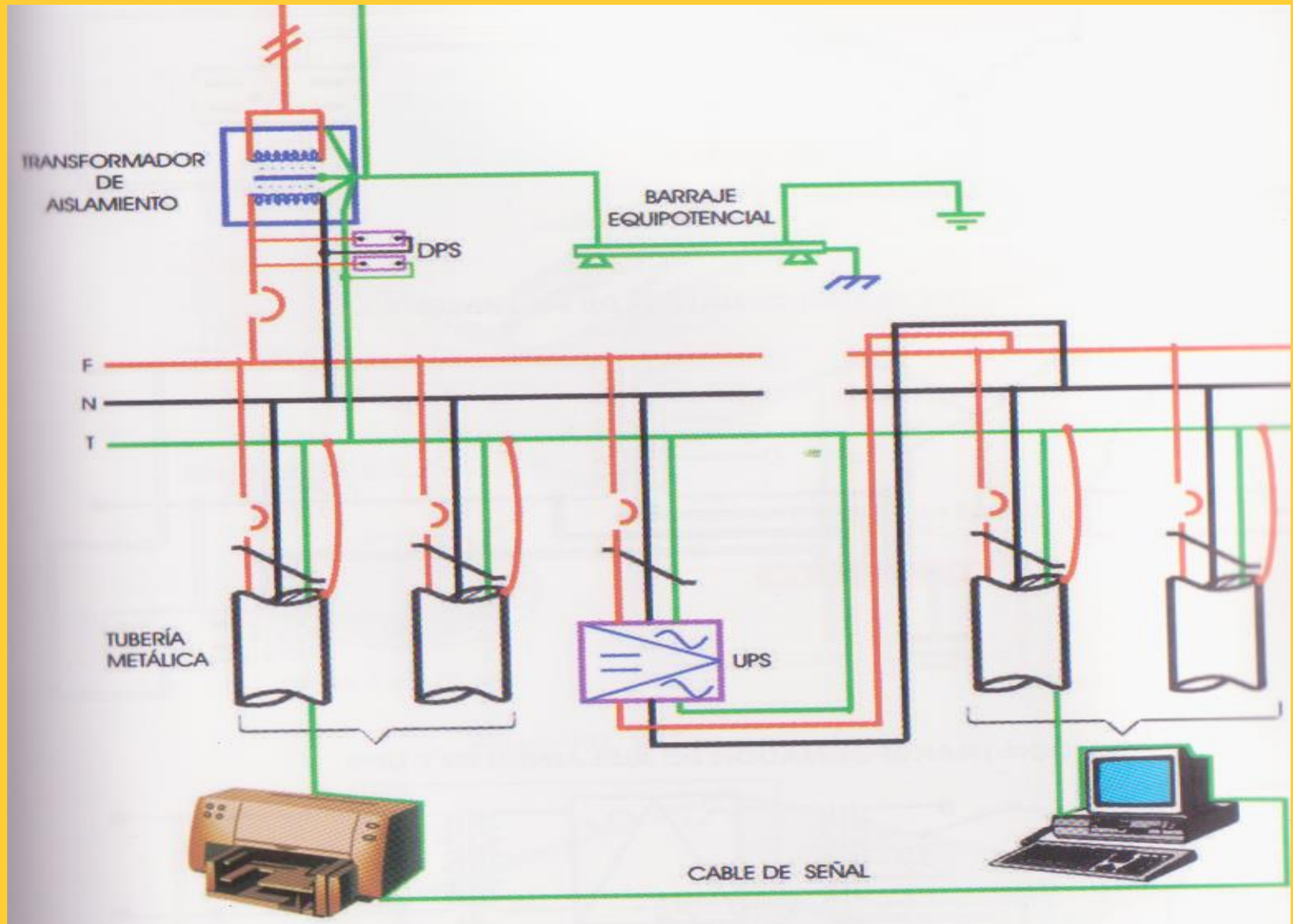




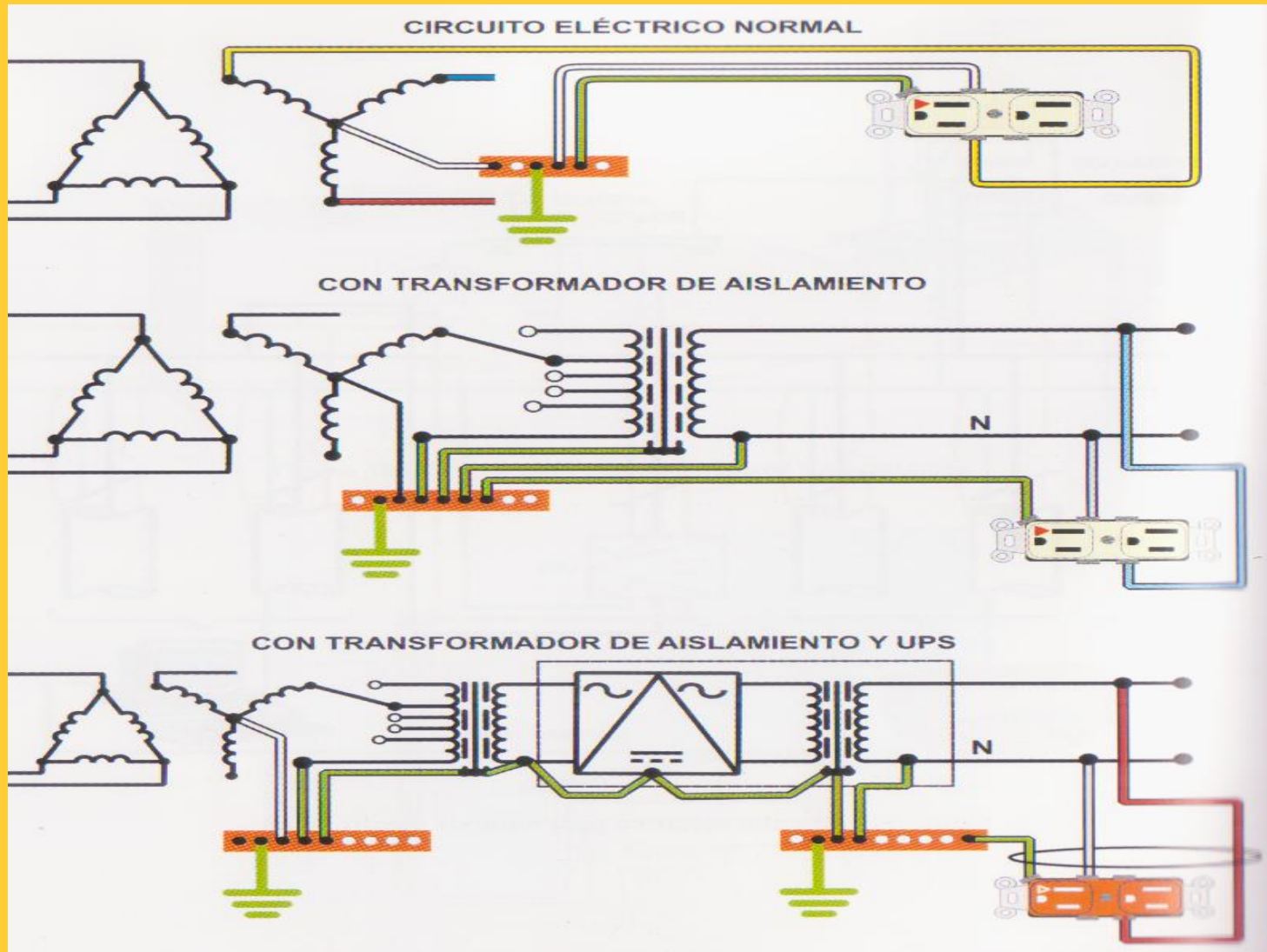
Detalle de malla



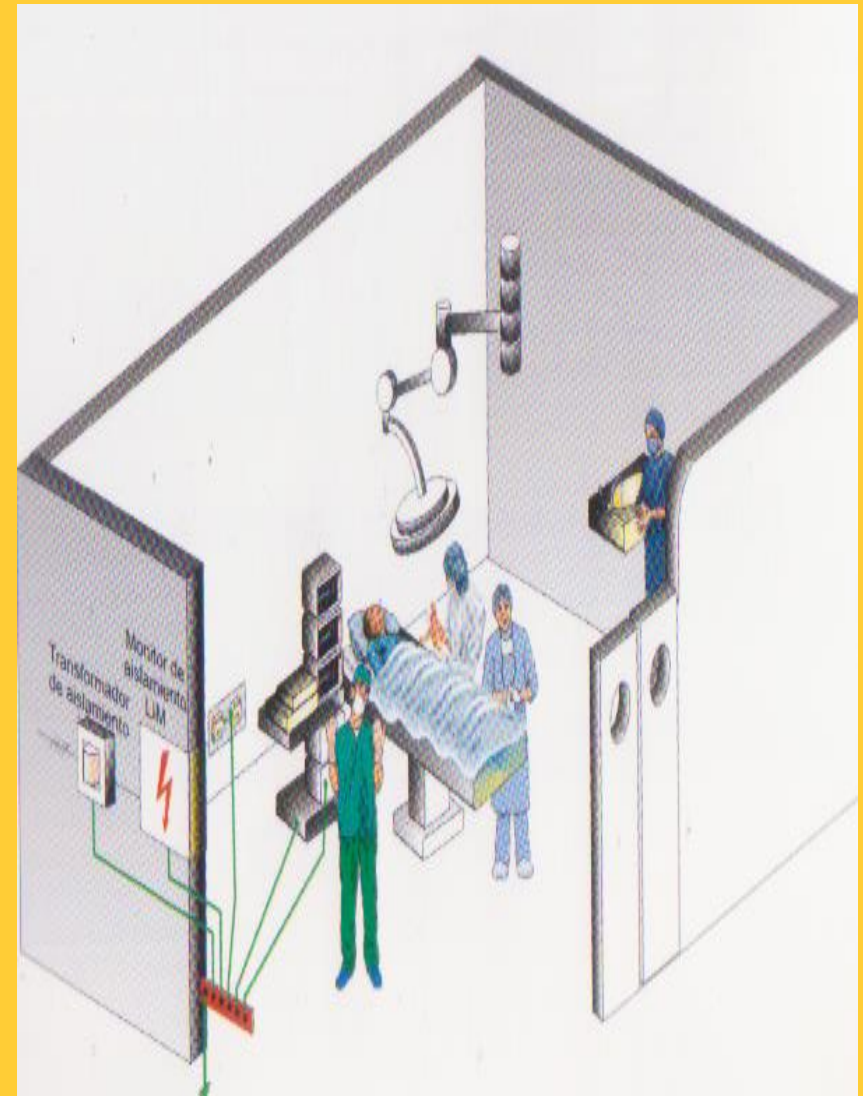
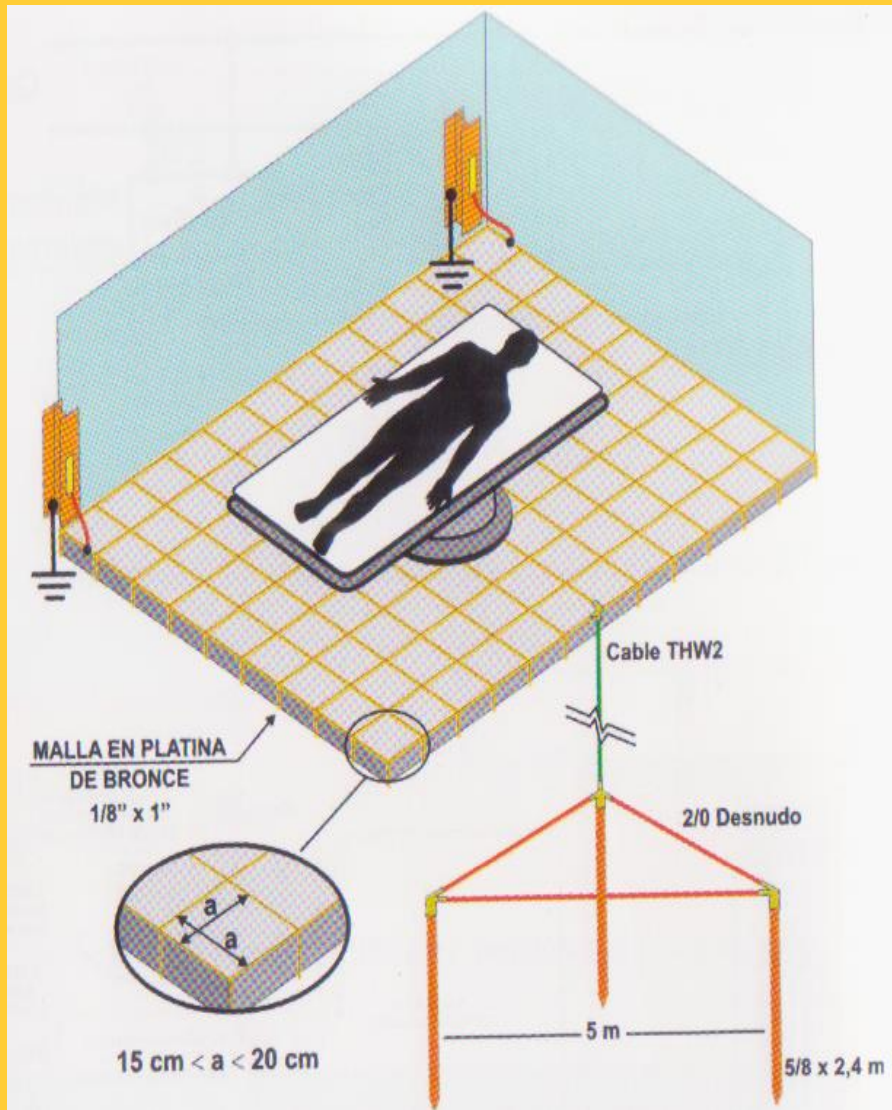
Circuito eléctrico para equipos electrónicos

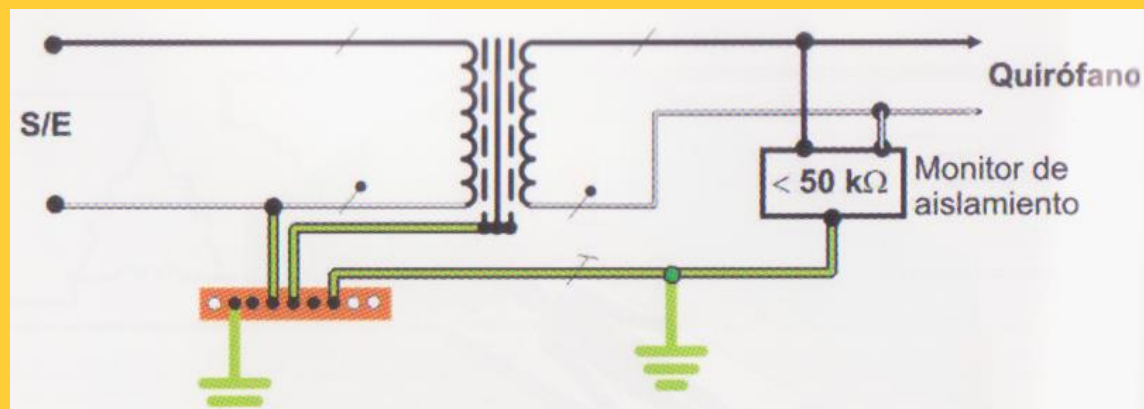
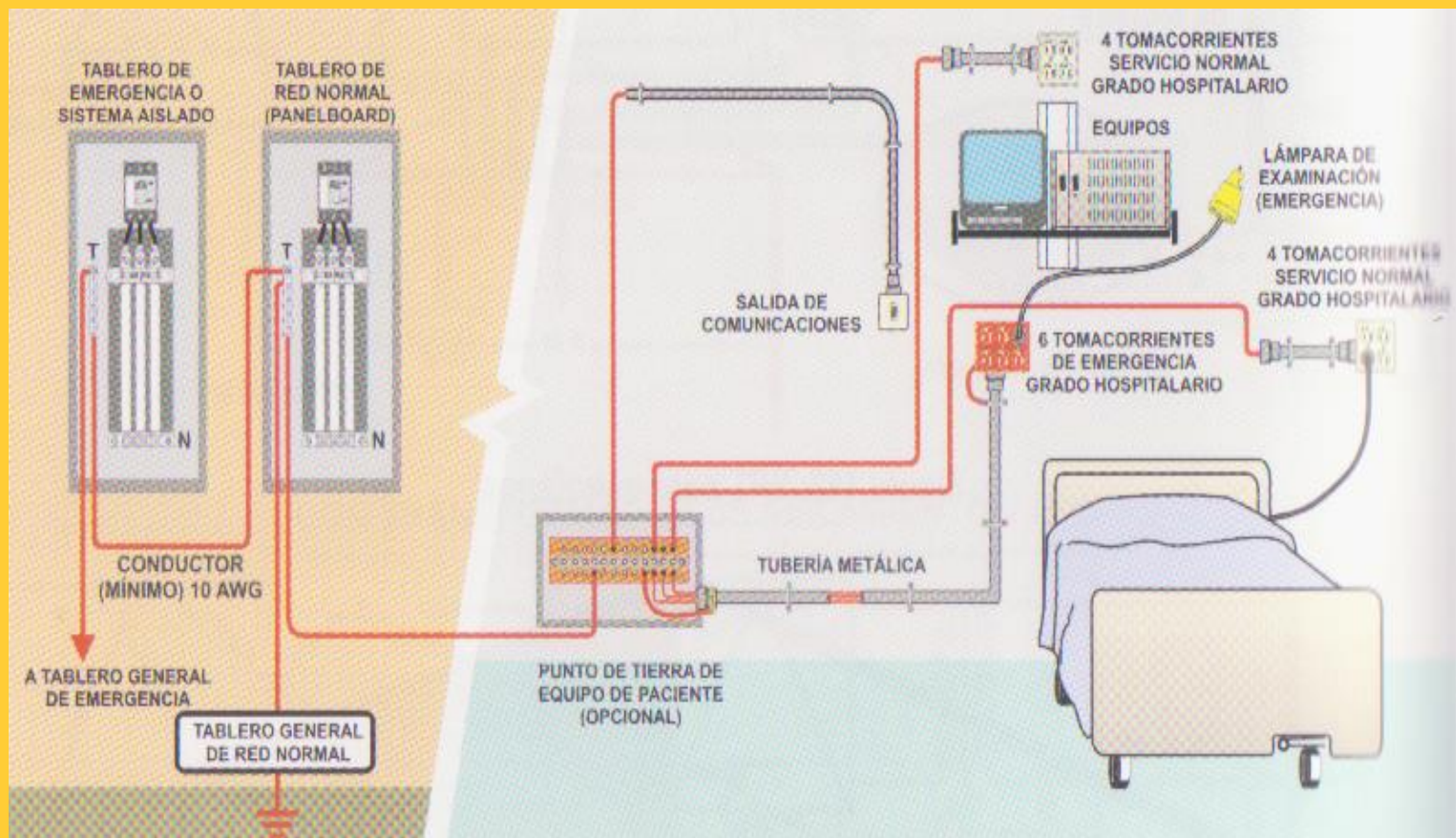


Cableado para equipos electrónicos



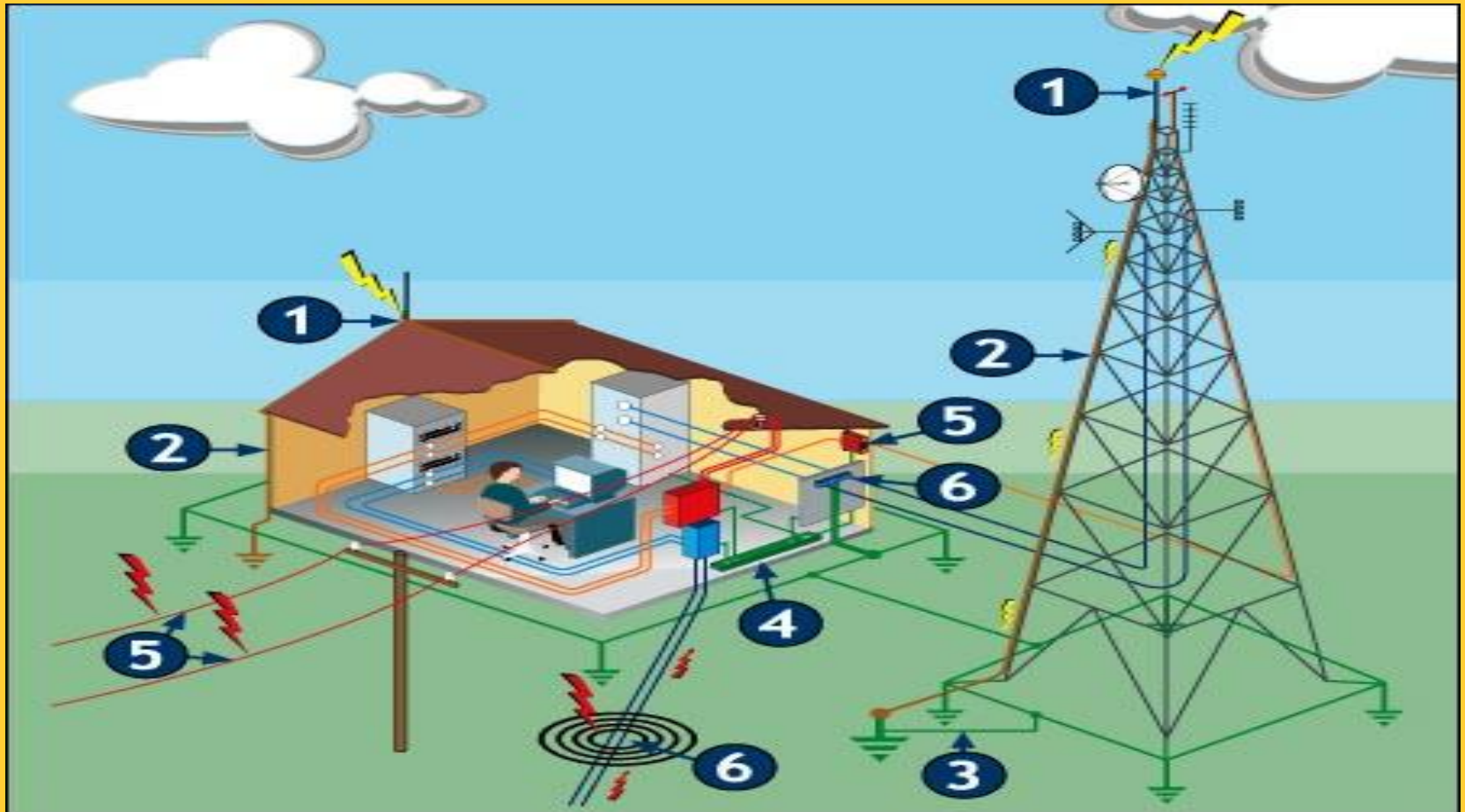
SPT para quirófanos

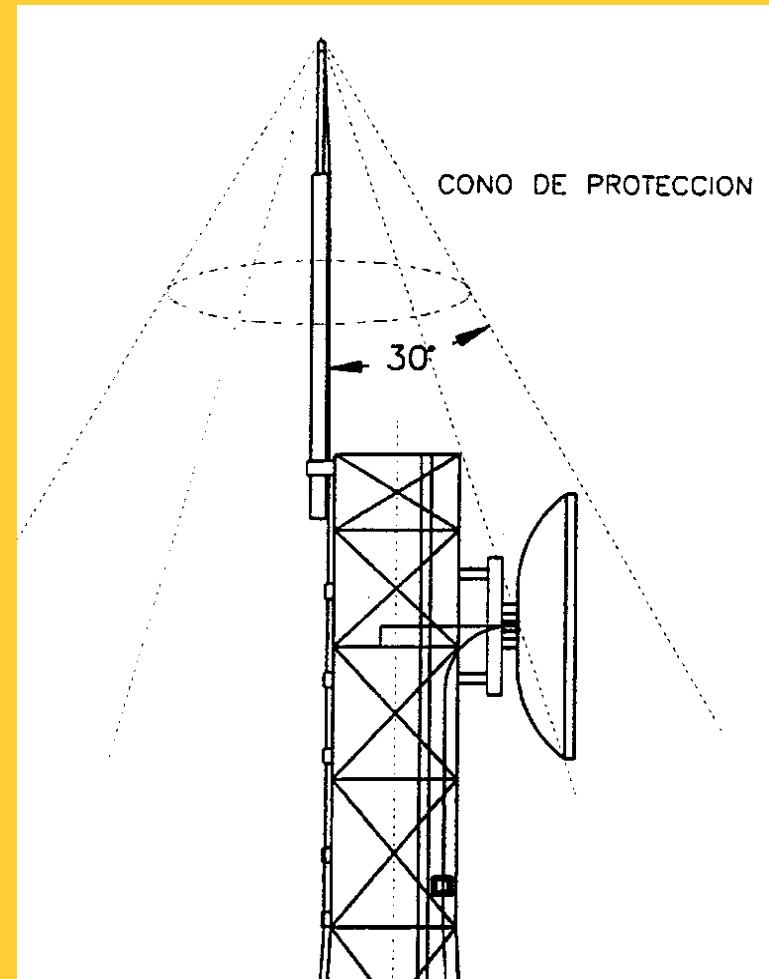
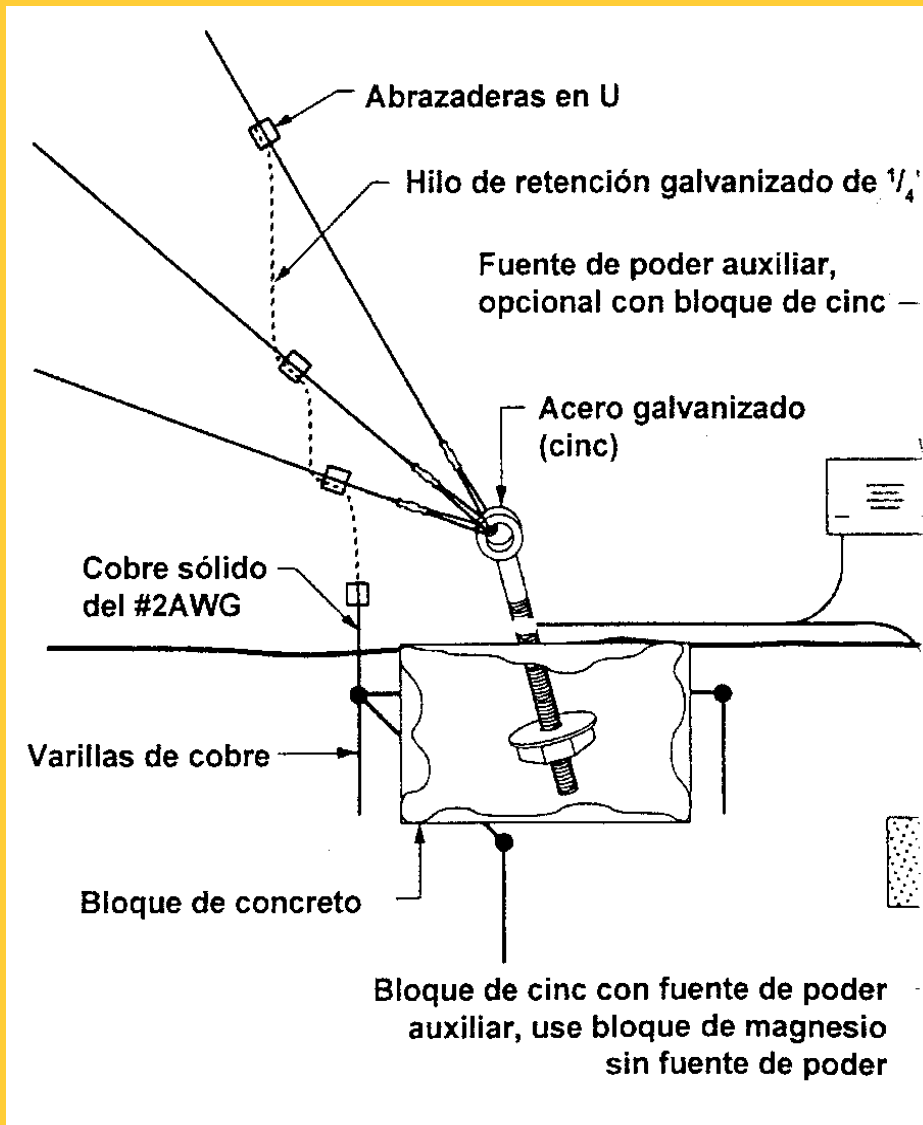




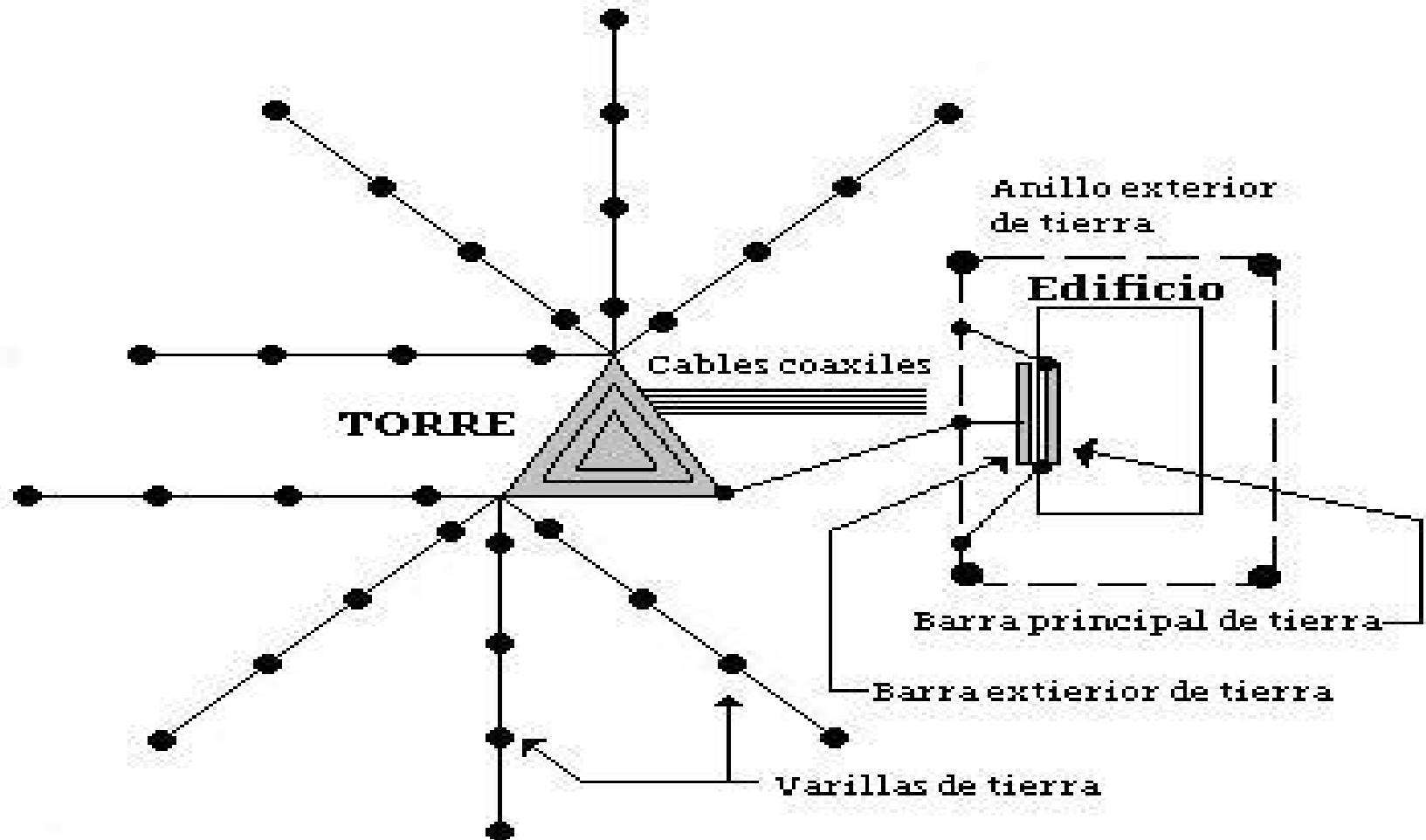
**SPT en UCI
y aislados**

Sistemas de tierra en sitios de comunicaciones





Radiales p/descarga pararrayo



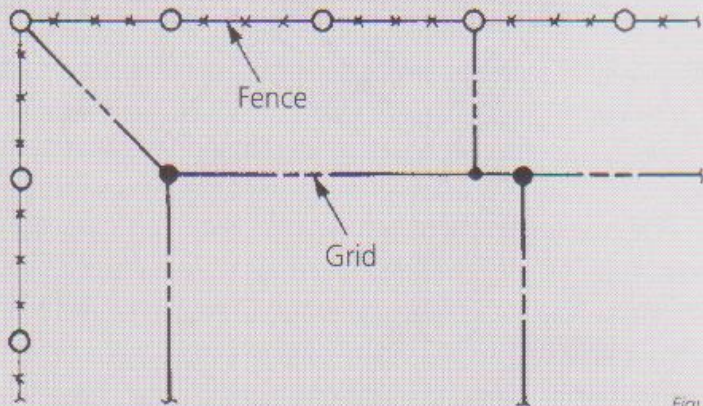


Figure 73.

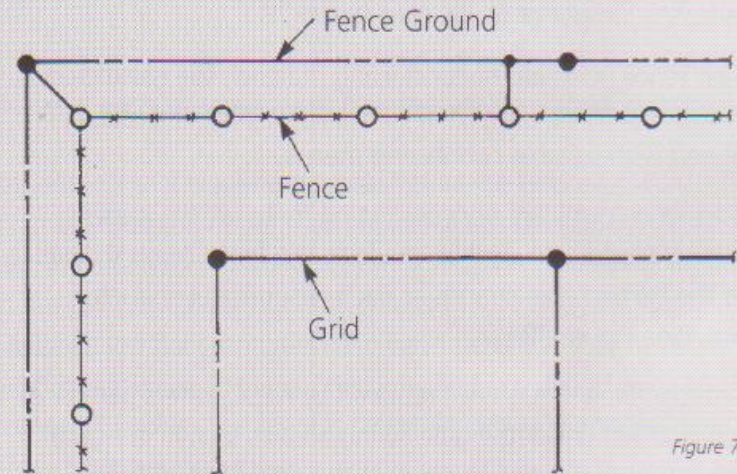


Figure 74.

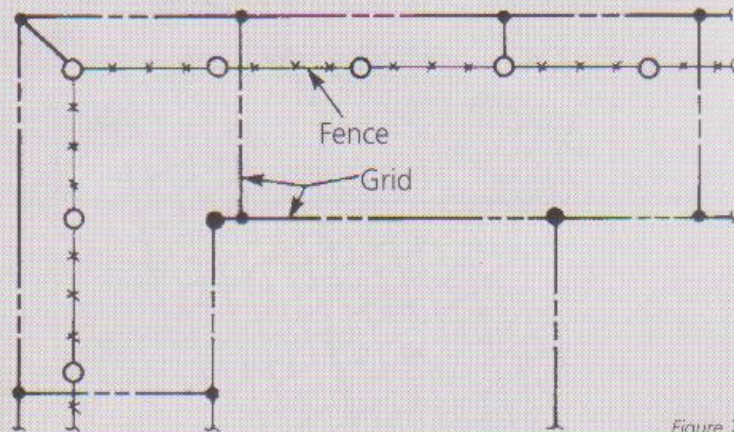


Figure 75.

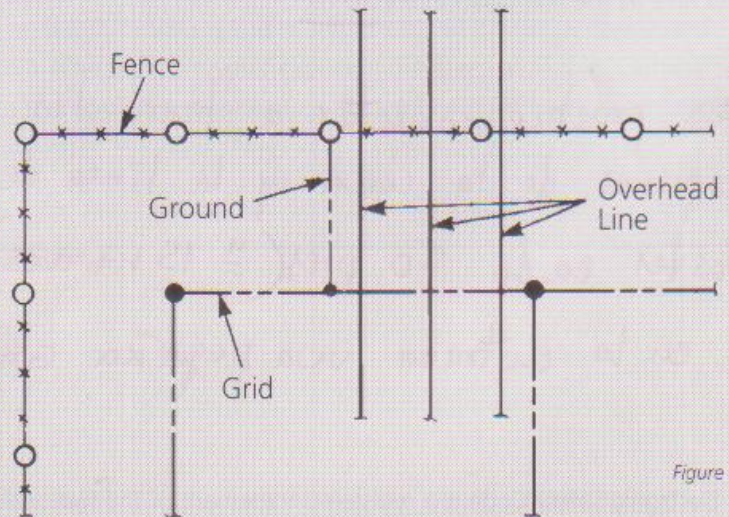
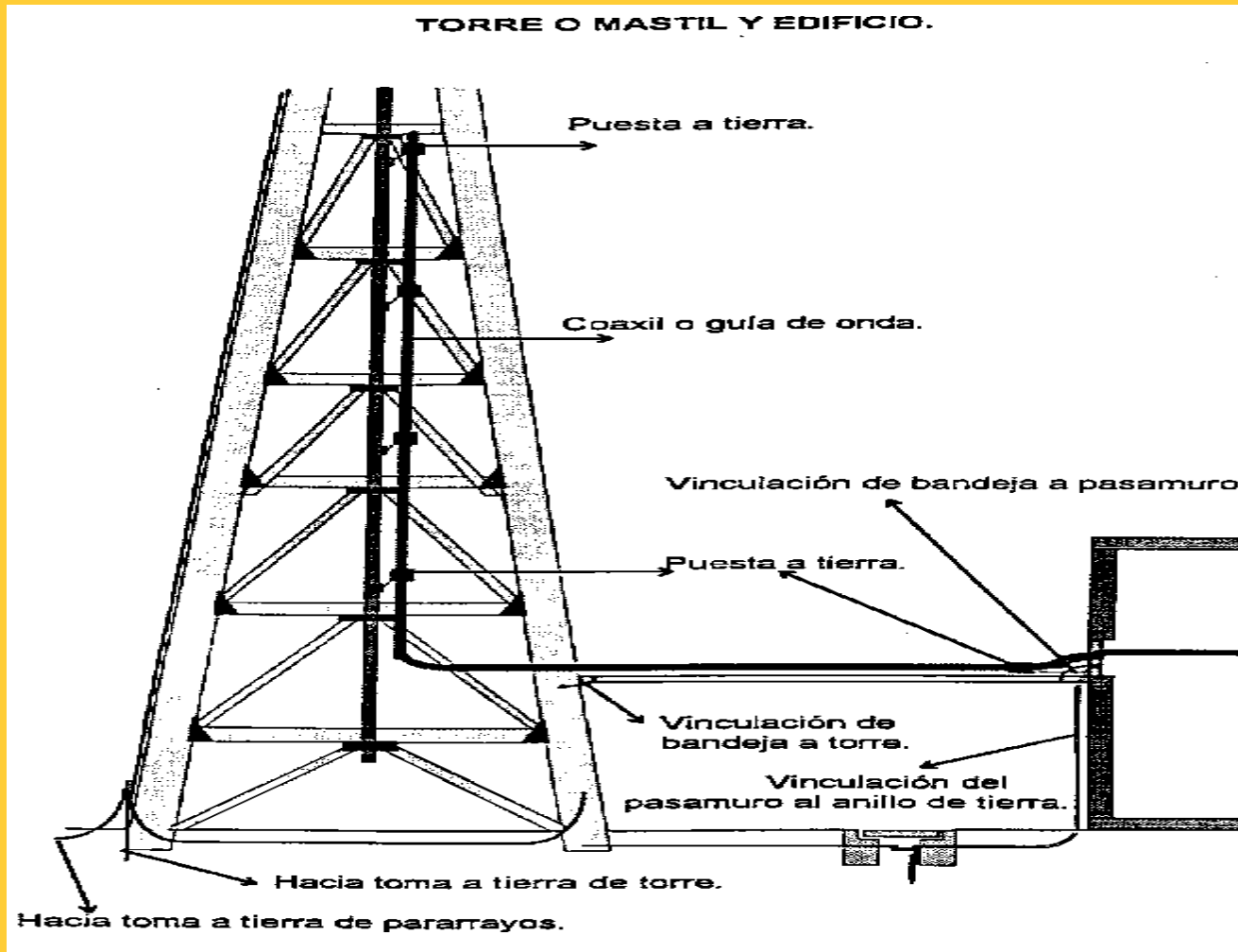


Figure 76.

IEEE Std 80-2000, Polarización de cercas

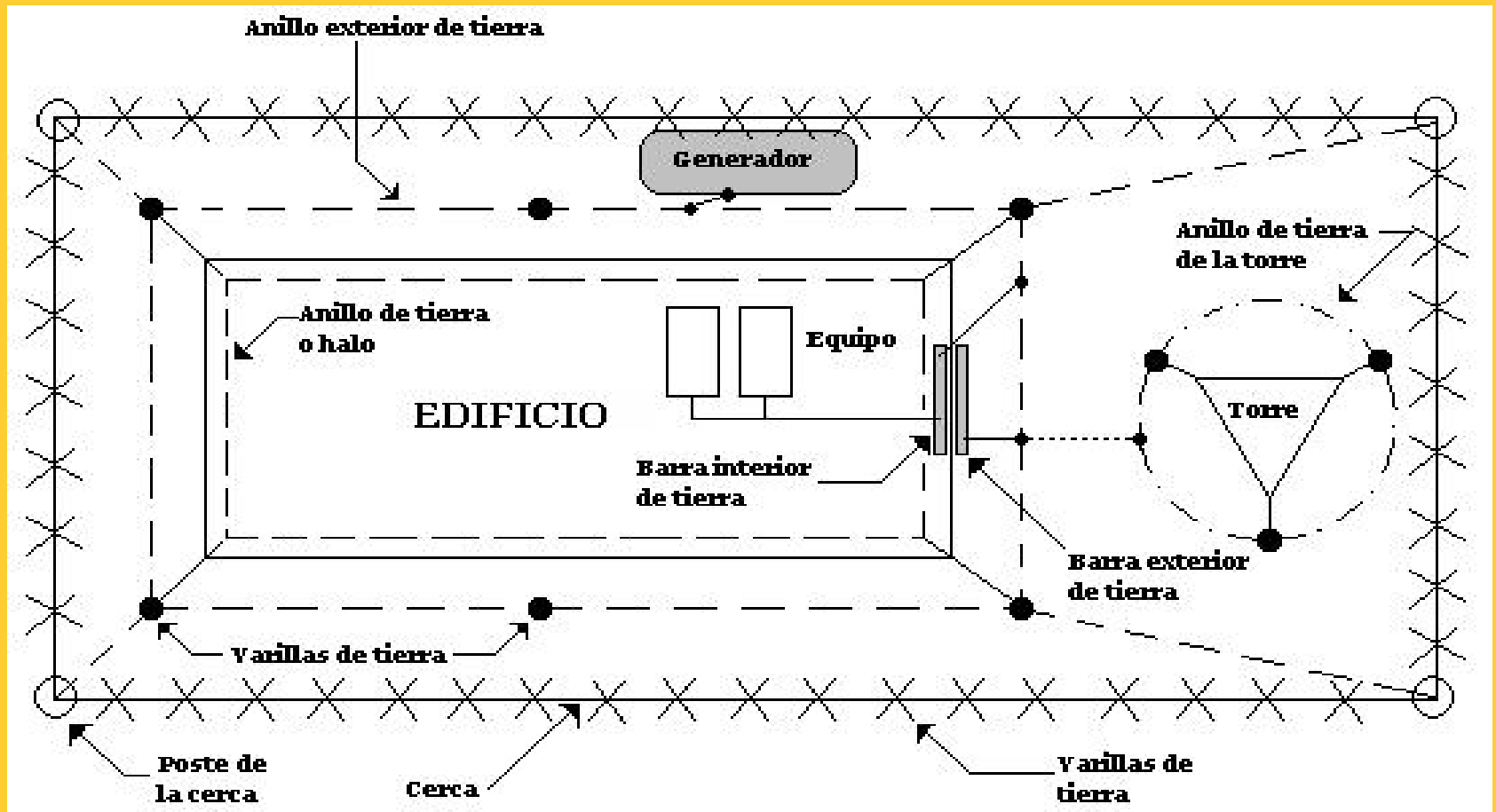
Conexiones a tierra



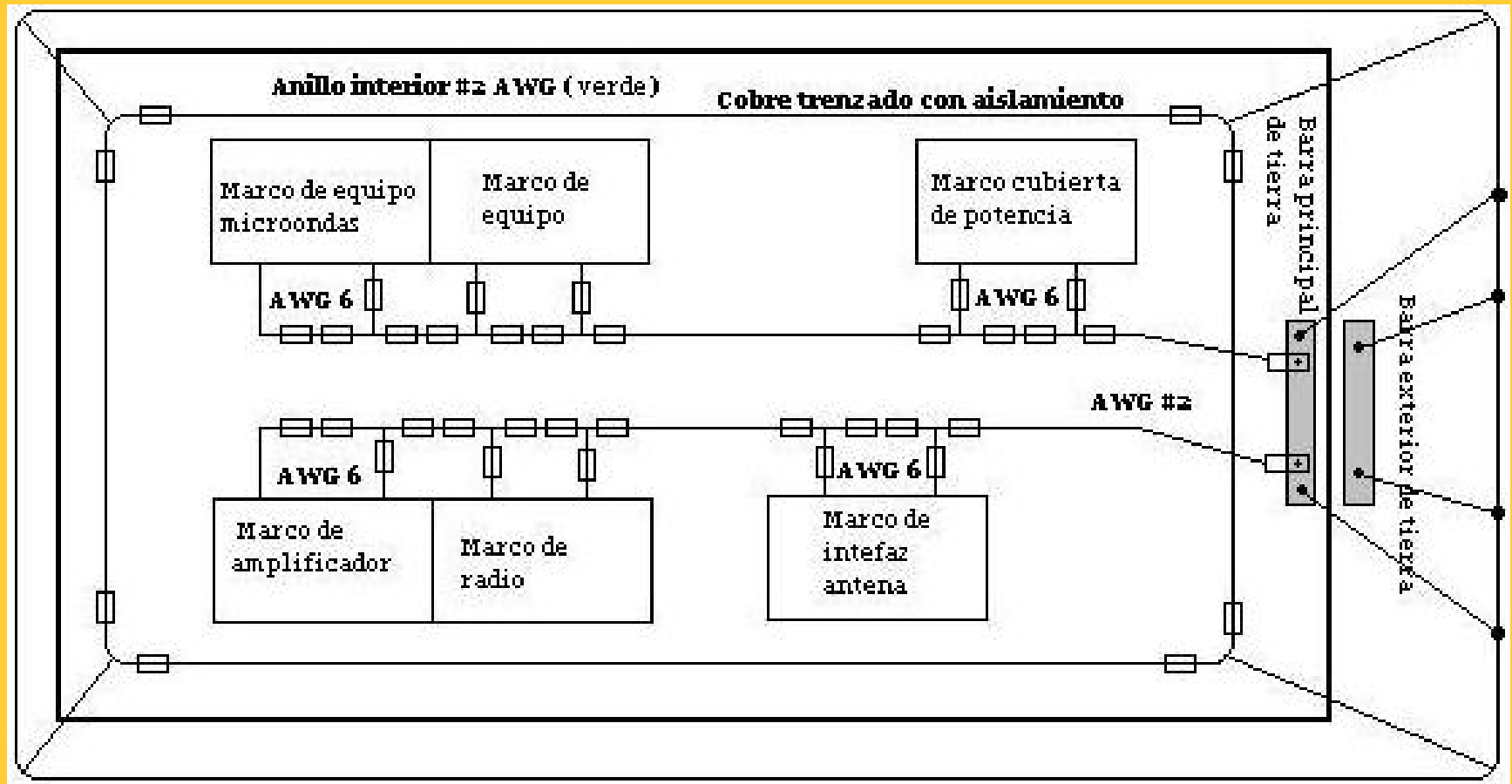
Si bien se ha estipulado como condición mínima, la conexión de los descensos en dos lugares, este criterio varía de acuerdo a la altura de la estructura a saber:

Altura	Cantidad de Kits
< 50 m	2
$> 50 \leq 75$ m	3
$> 50 \leq 100$ m	4
$> 50 \leq 125$ m	5
$> 50 > 125$ m	1 kit c/20m

Sistemas de tierra en sitio de comunicación



Sistema de tierra en interior de Caseta de equipos o Shelter



Barra equipotencial y zonas de conexión

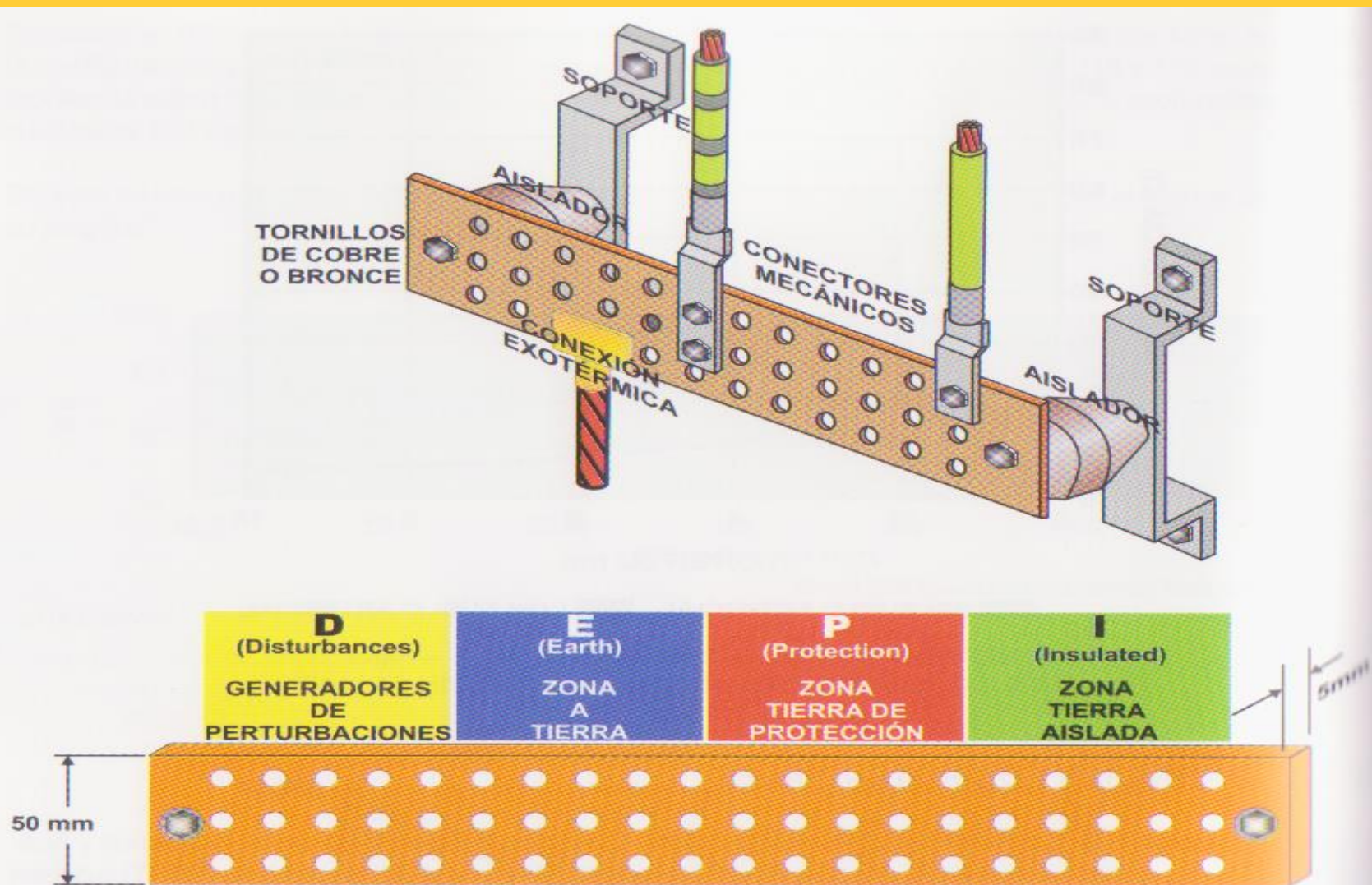
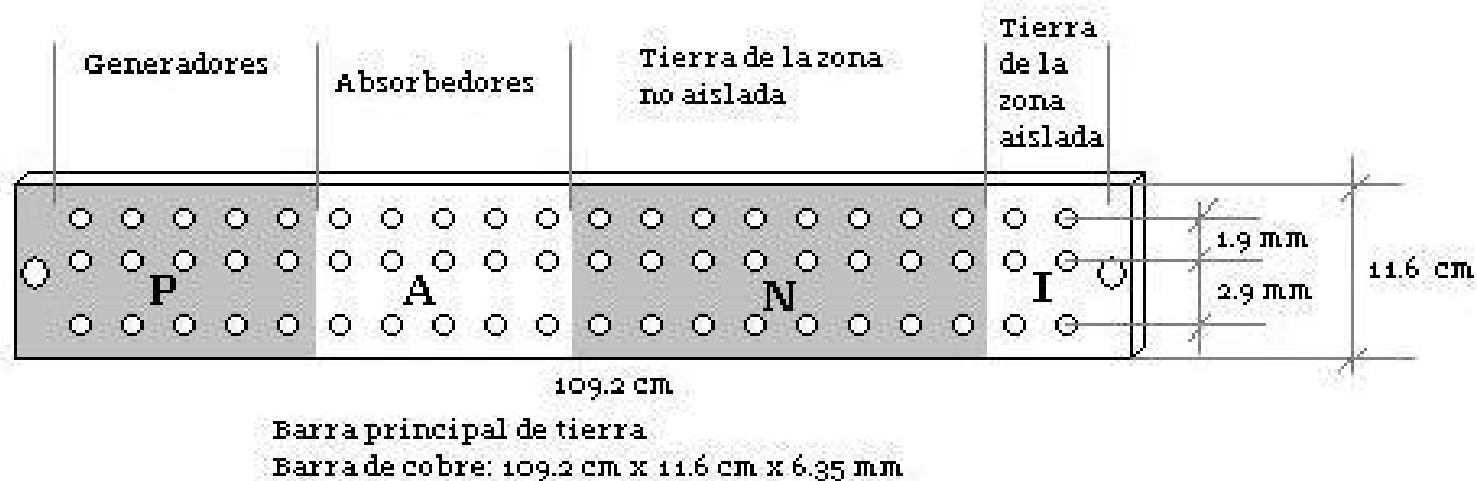
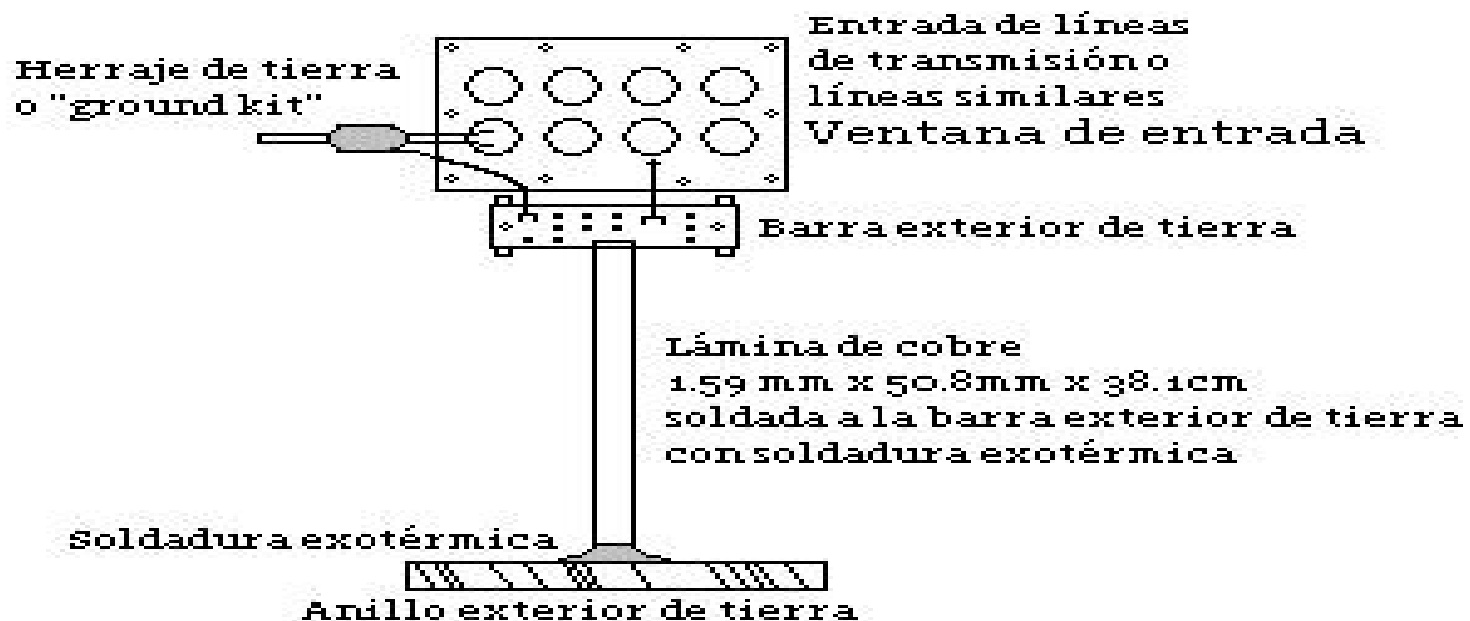
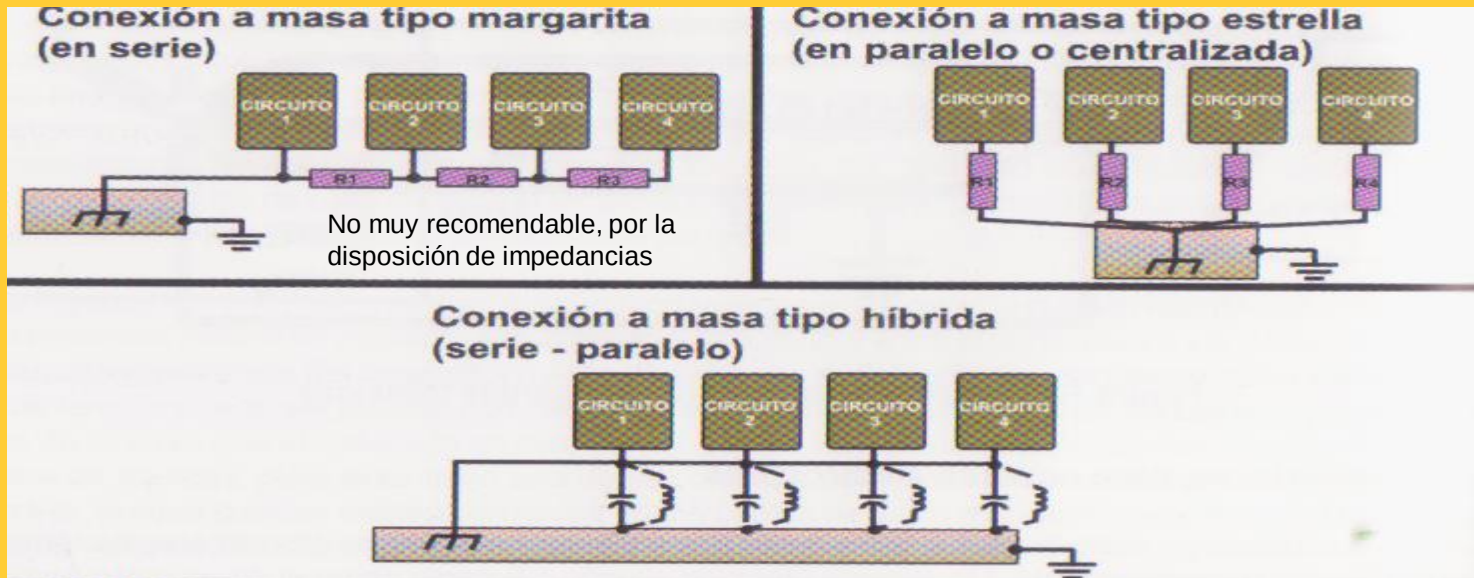


Figura 120. Barra equipotencial y zonas de conexión



Conexiones a masa y tierra para disminuir la inductancia por metro



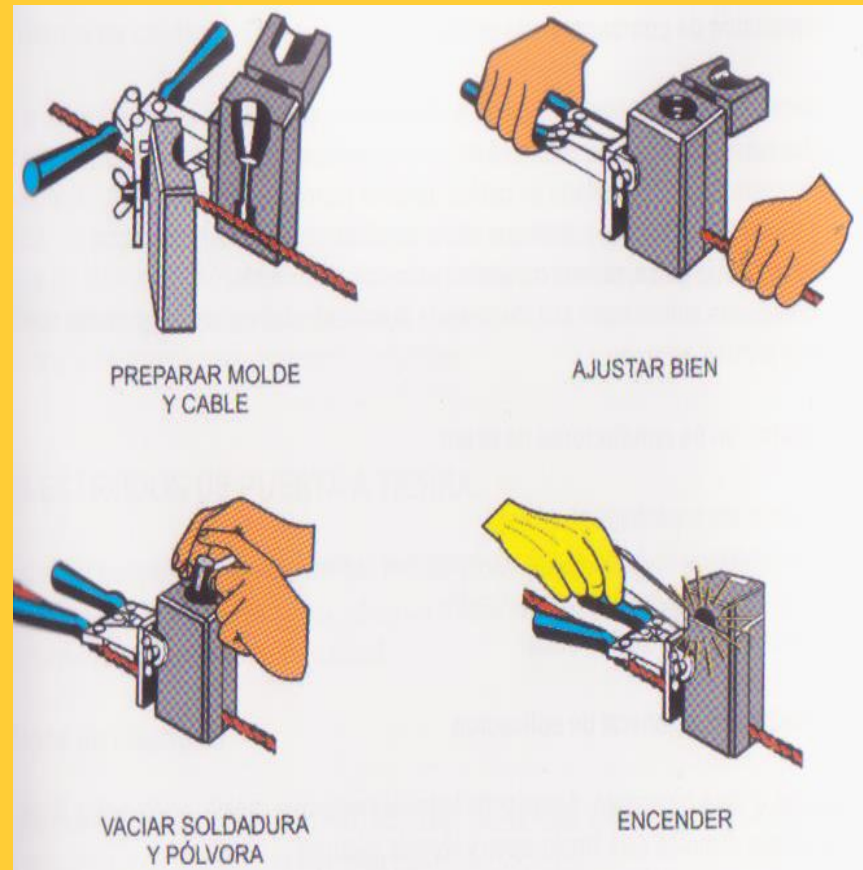
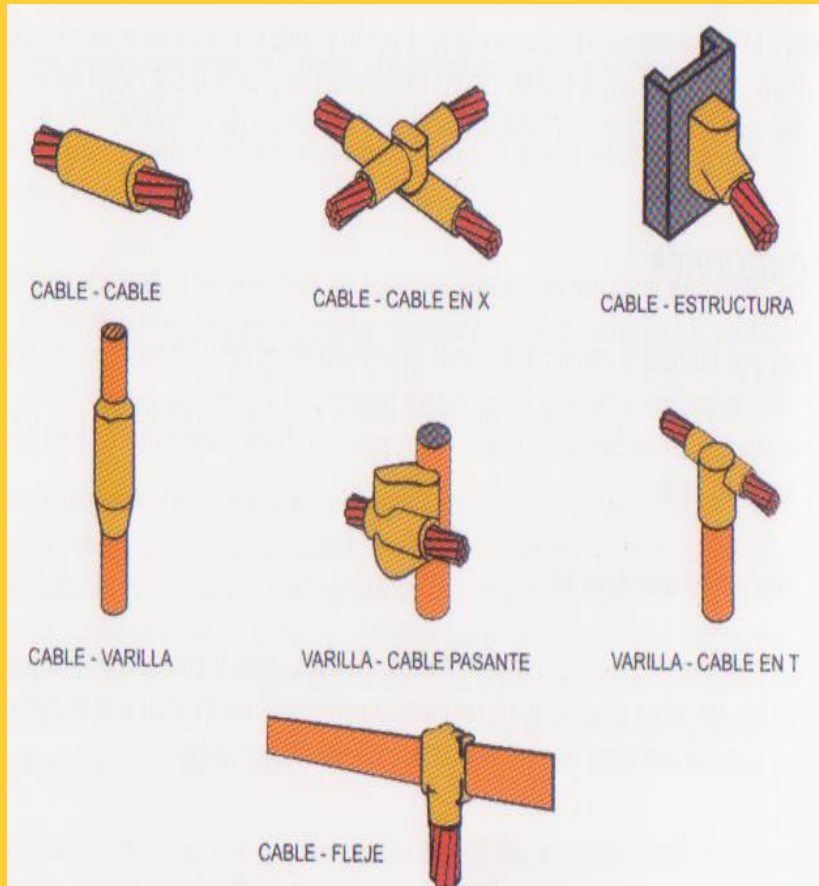
Bueno en bajas frecuencias pero no recomendable en alta por lo largo del cableado

Busca que la masa sea un barraje equipotencial a bajas frecuencias, pero masas distribuidas a altas frecuencias

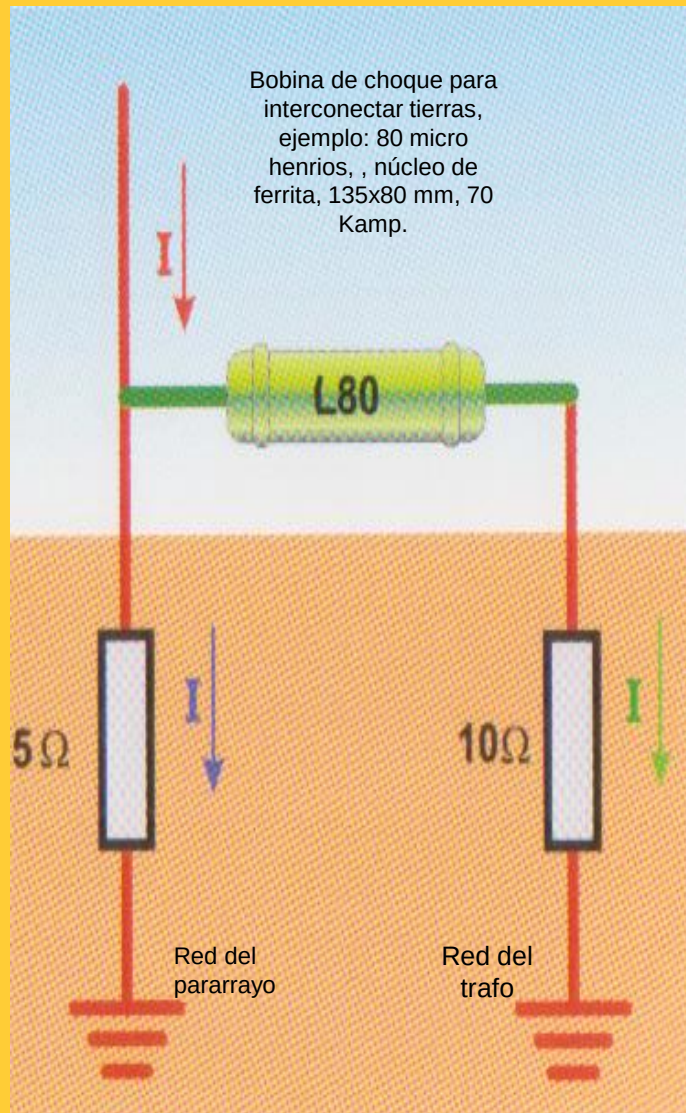


La disposición de los cables en las bandejas también es importante

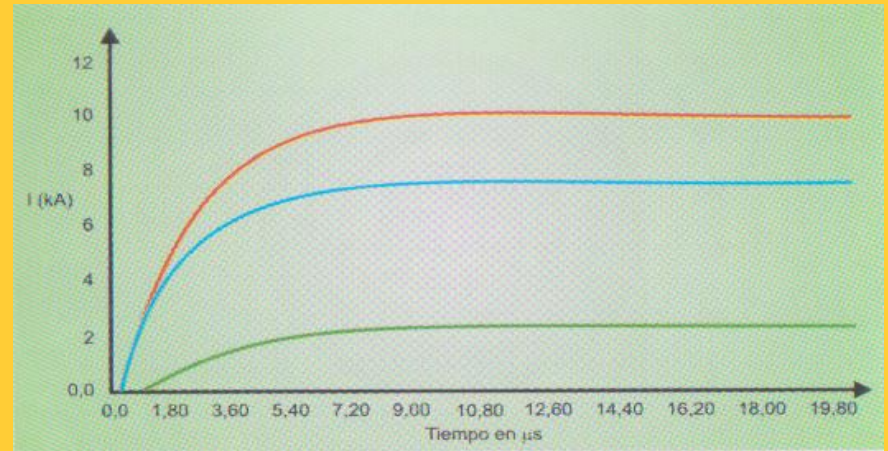
Conexiones exotérmicas



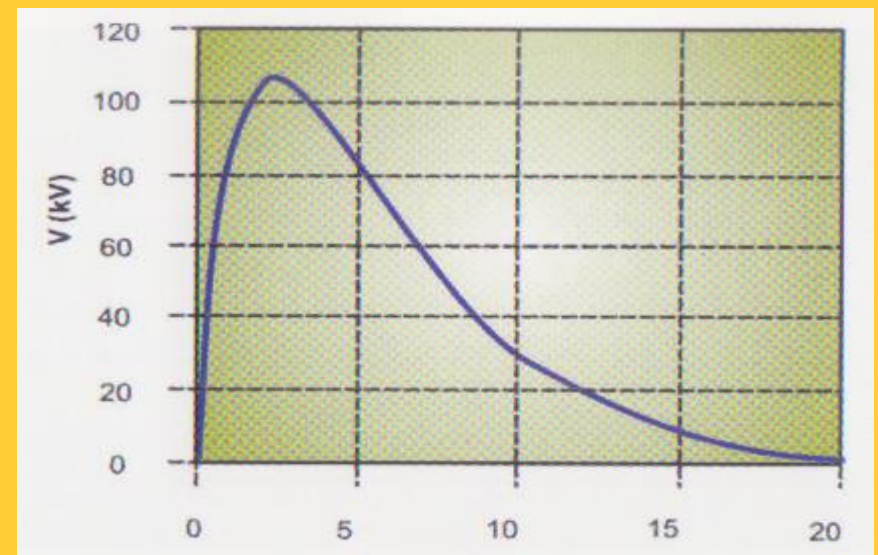
Soluciones en alta frecuencia



Interconexión de tierras



Respuesta aprox., del circuito de la figura



Diferencia de potencial en extremos de la bobina

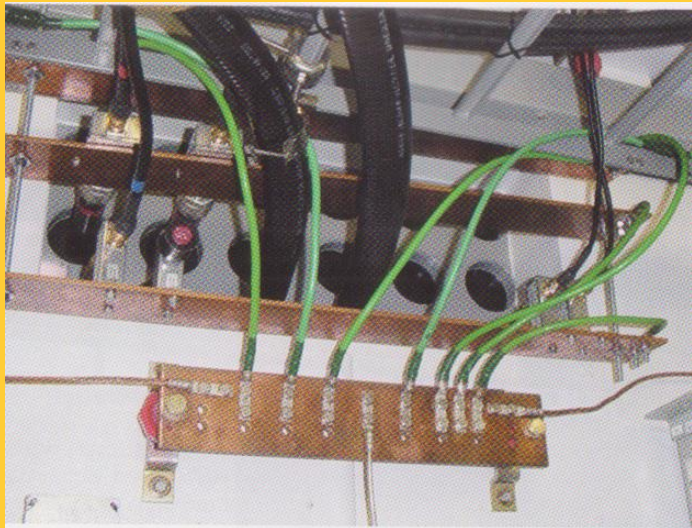


Figura 130. Uso del barraje equipotencial

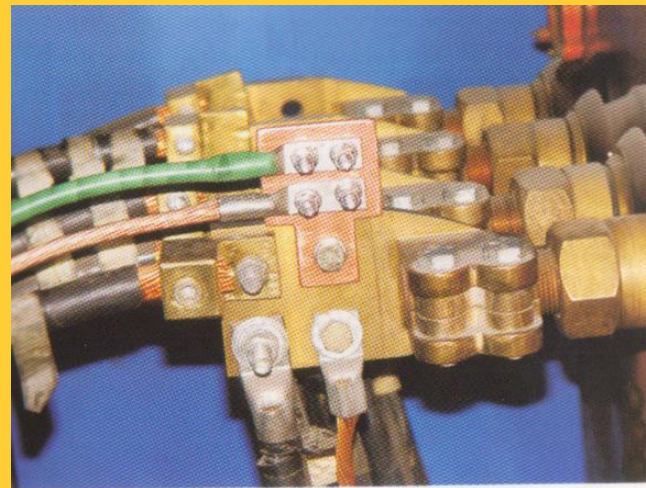


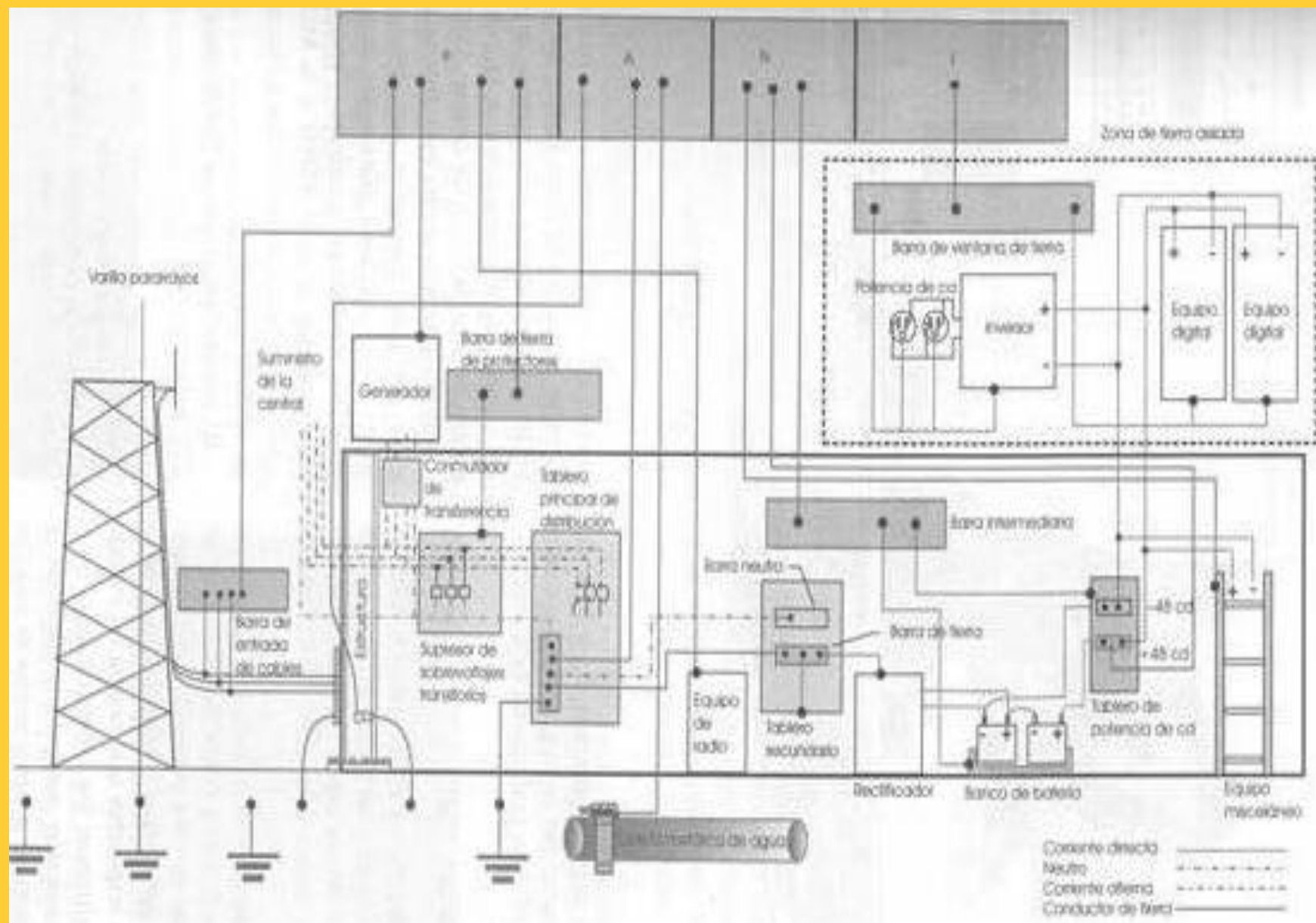
Figura 132. Conductor aislado y conductor de protección



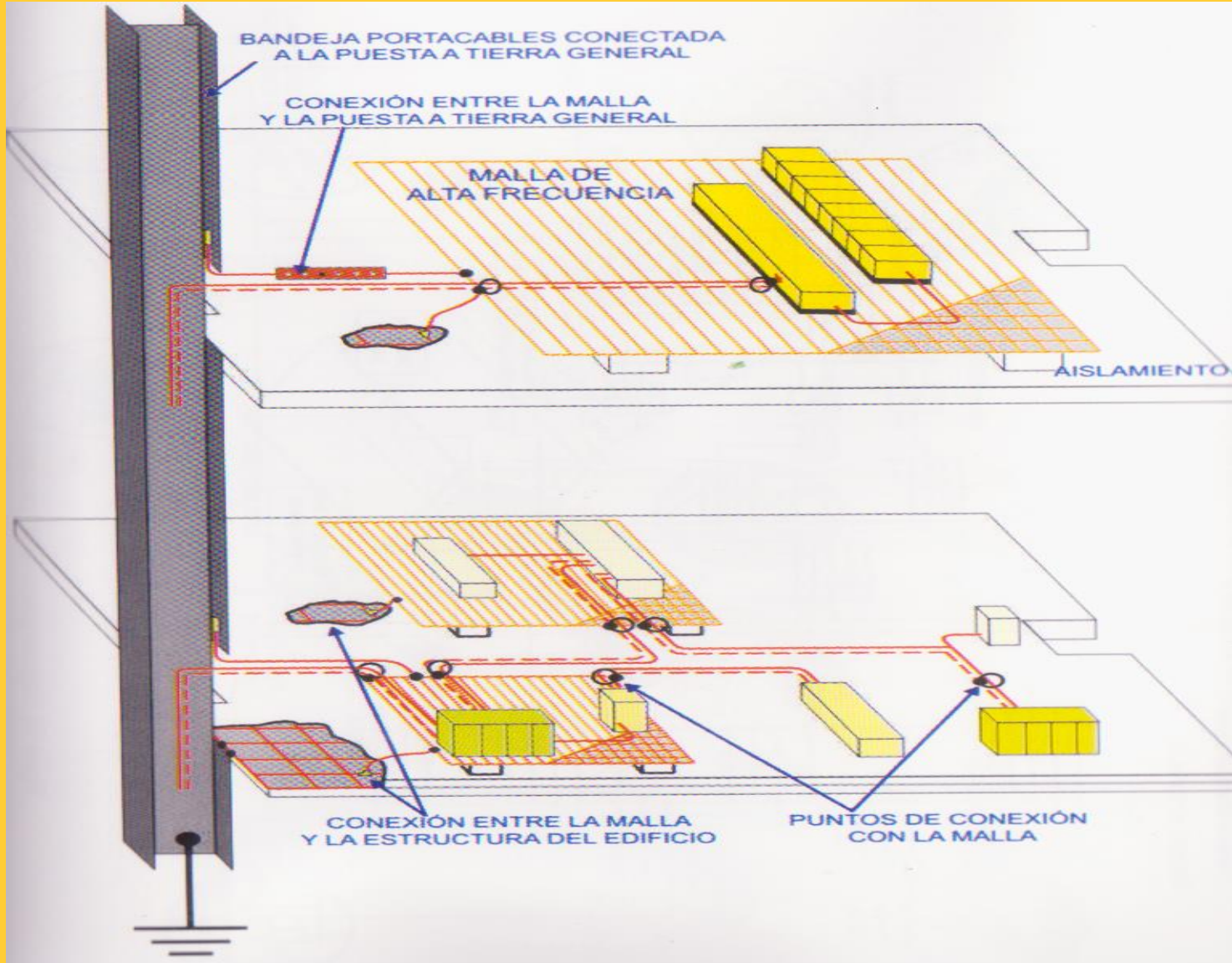
Figura 131. Puente equipotencial

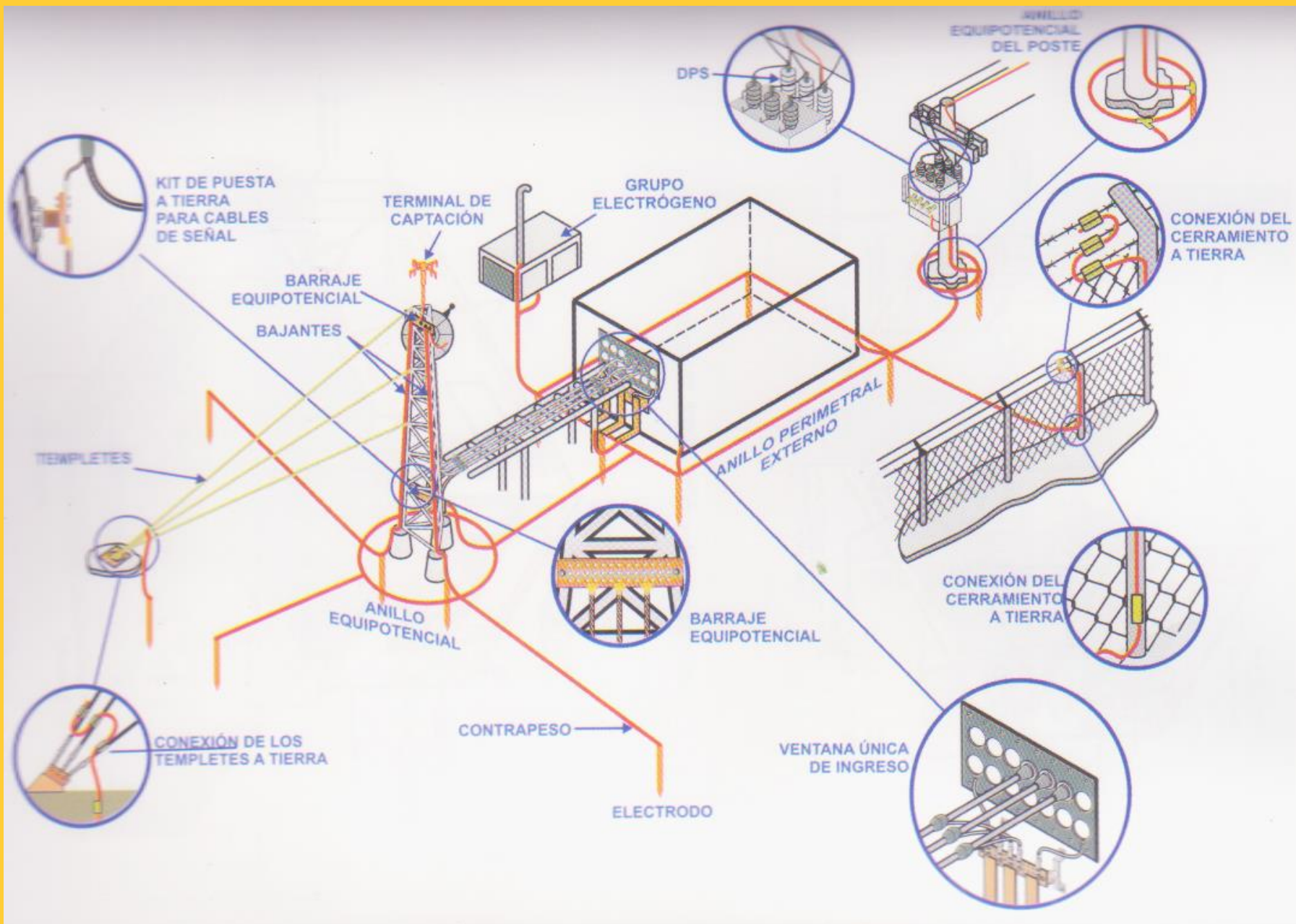


Figura 133. Filtro en modo común

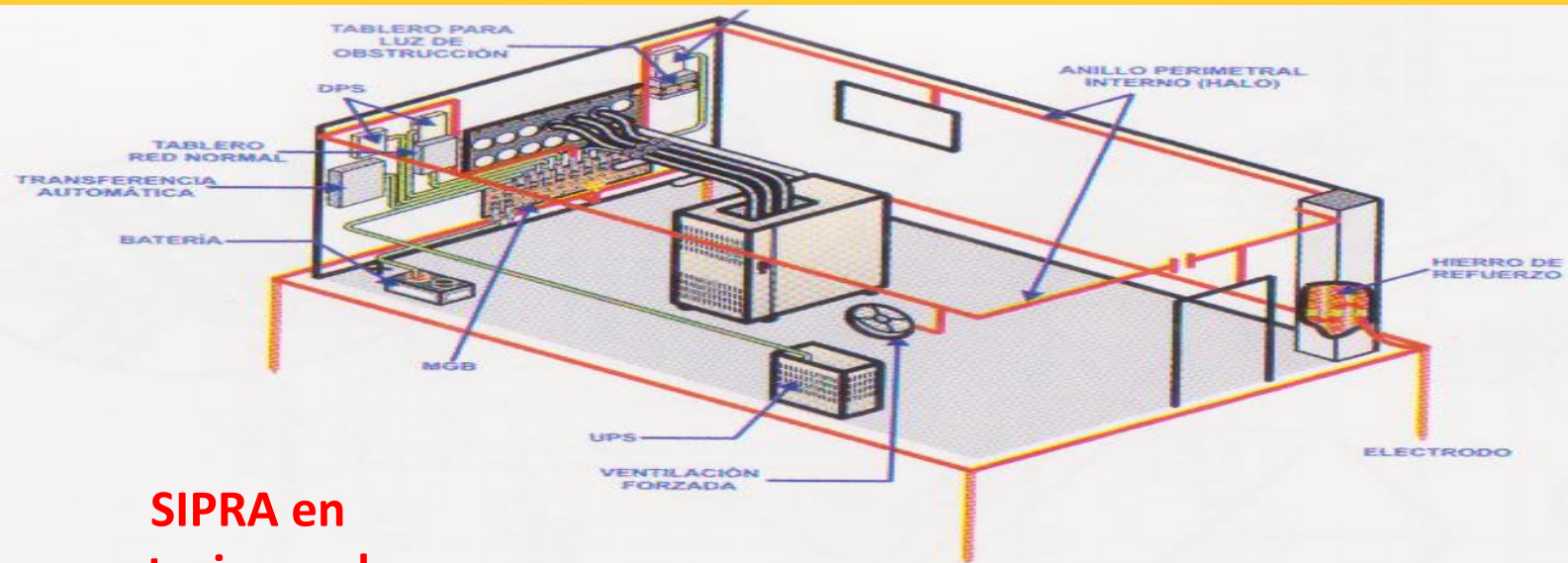


SPT en una central de comunicaciones

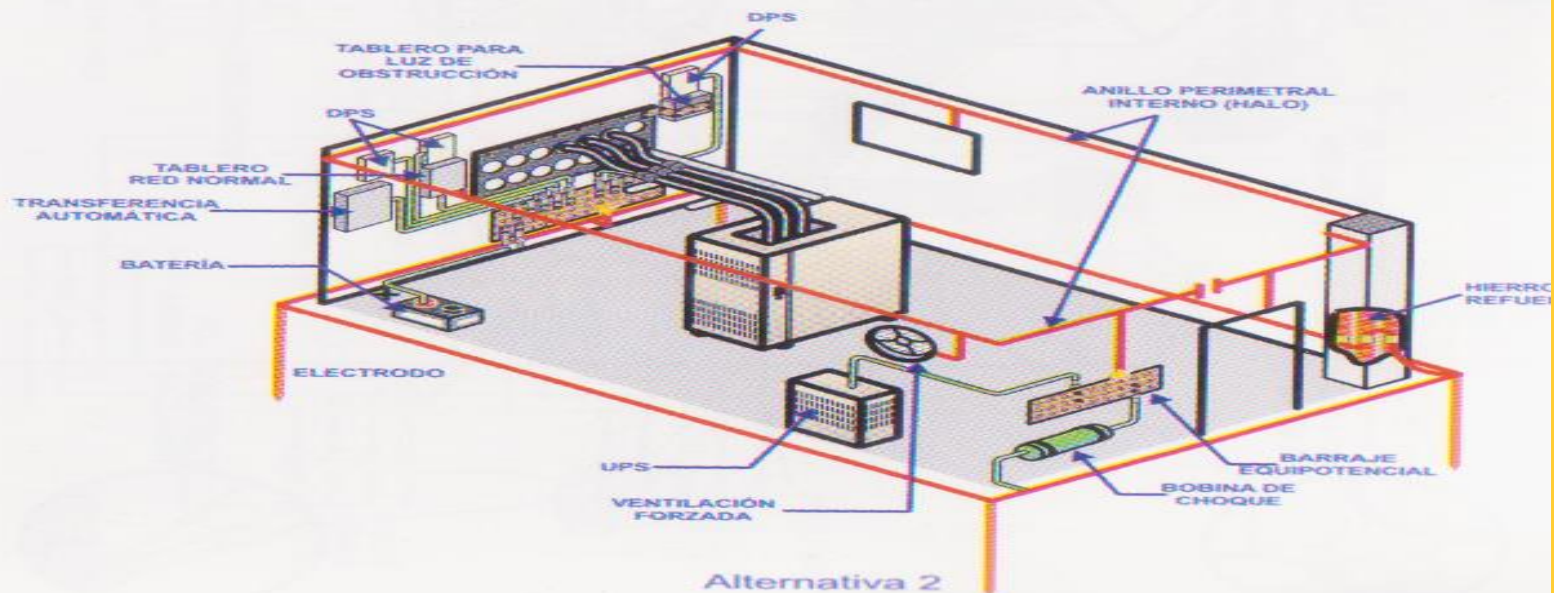




SIPRA en estaciones de telecomunicaciones

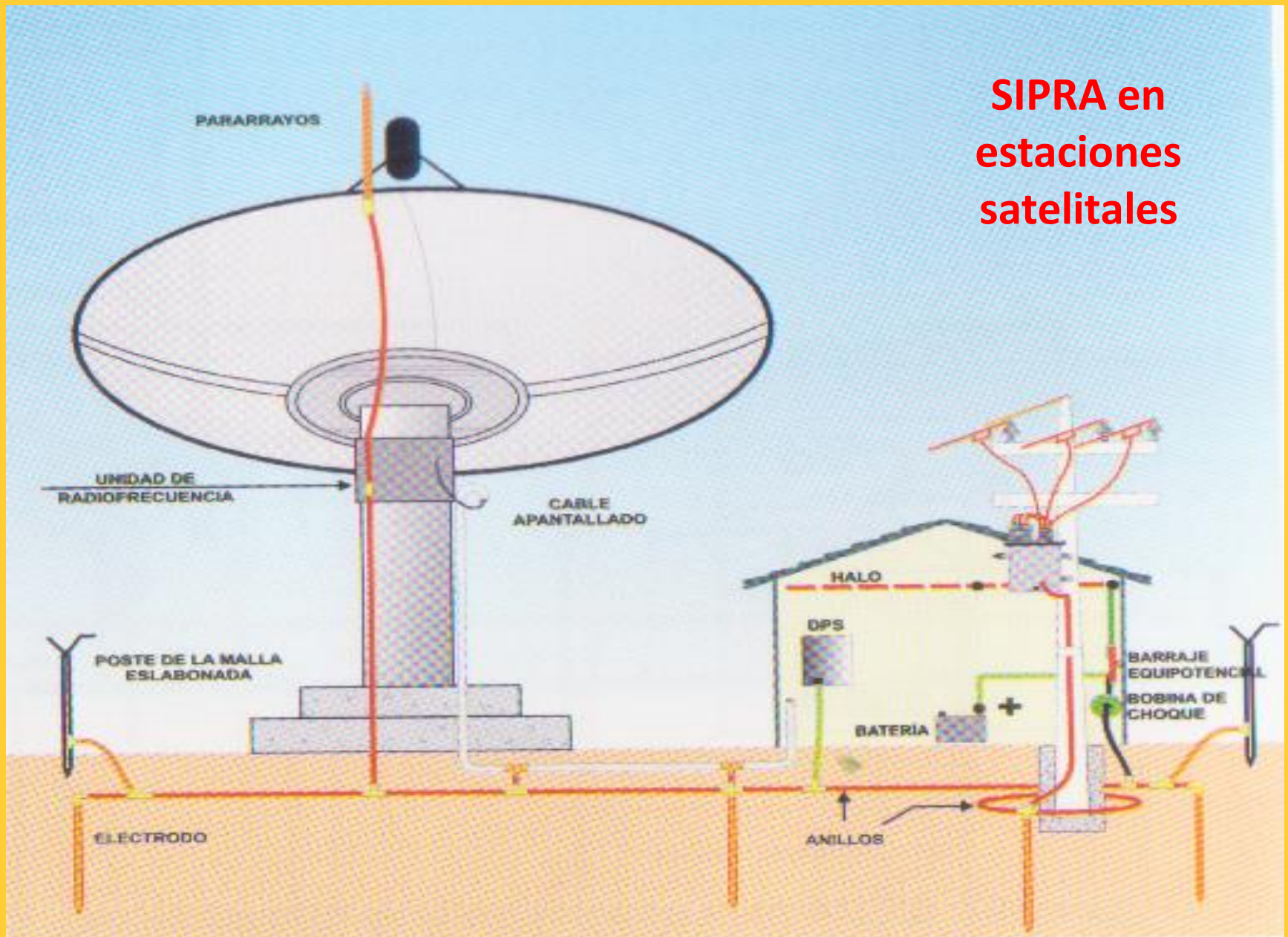


Alternativa 1



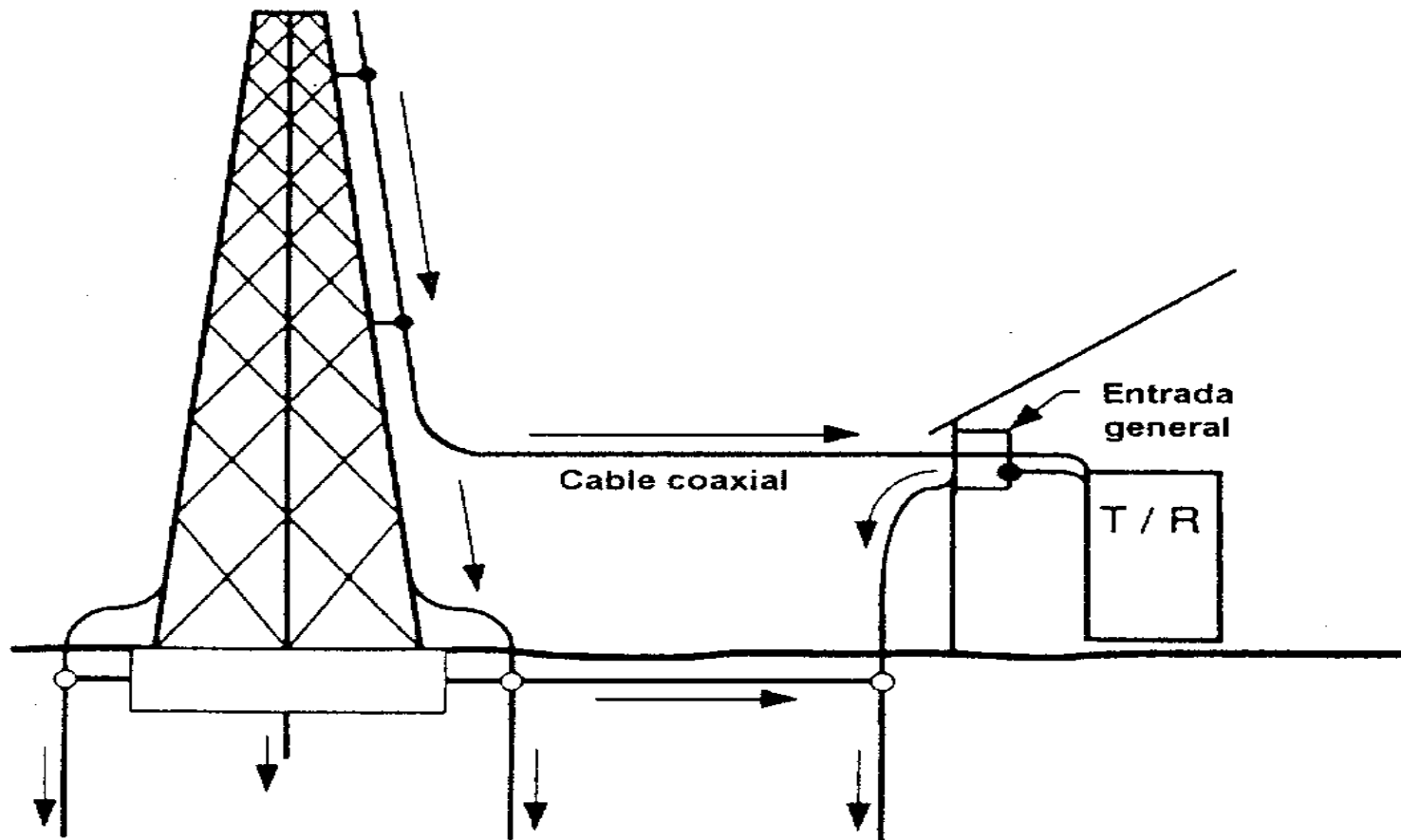
Alternativa 2

SIPRA en estaciones satelitales



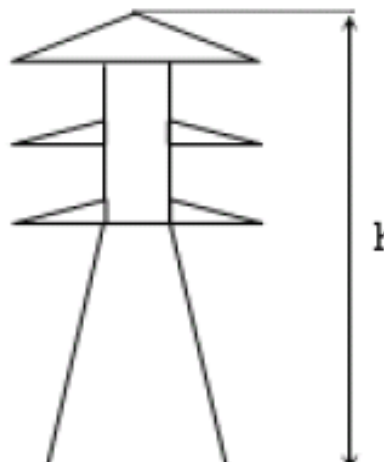
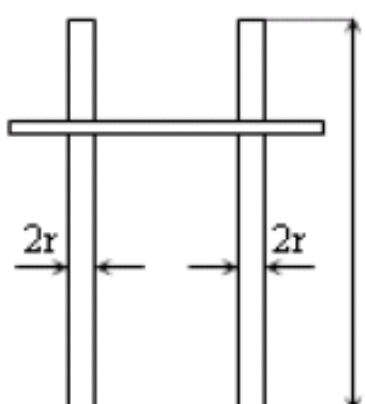
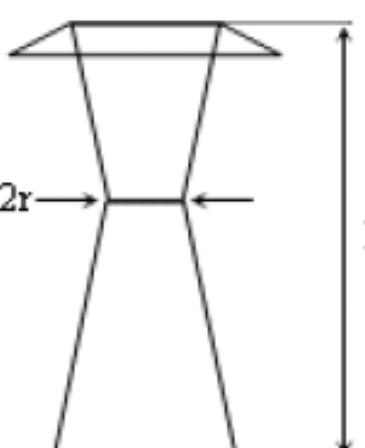
SPE en terrazas de edificios





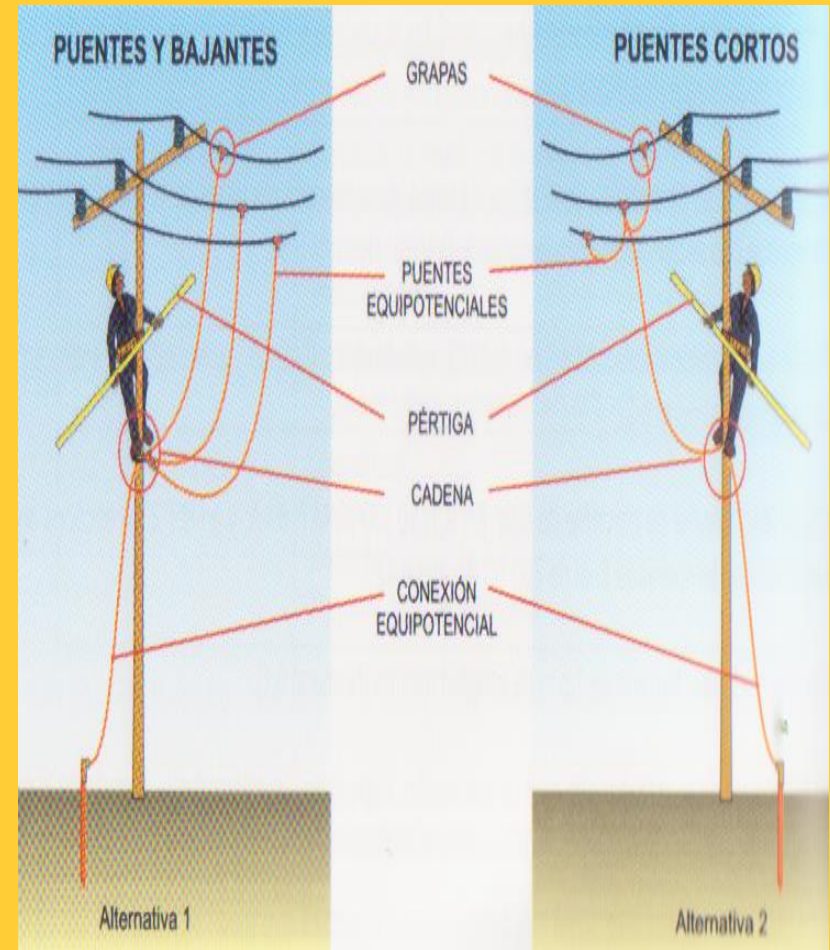
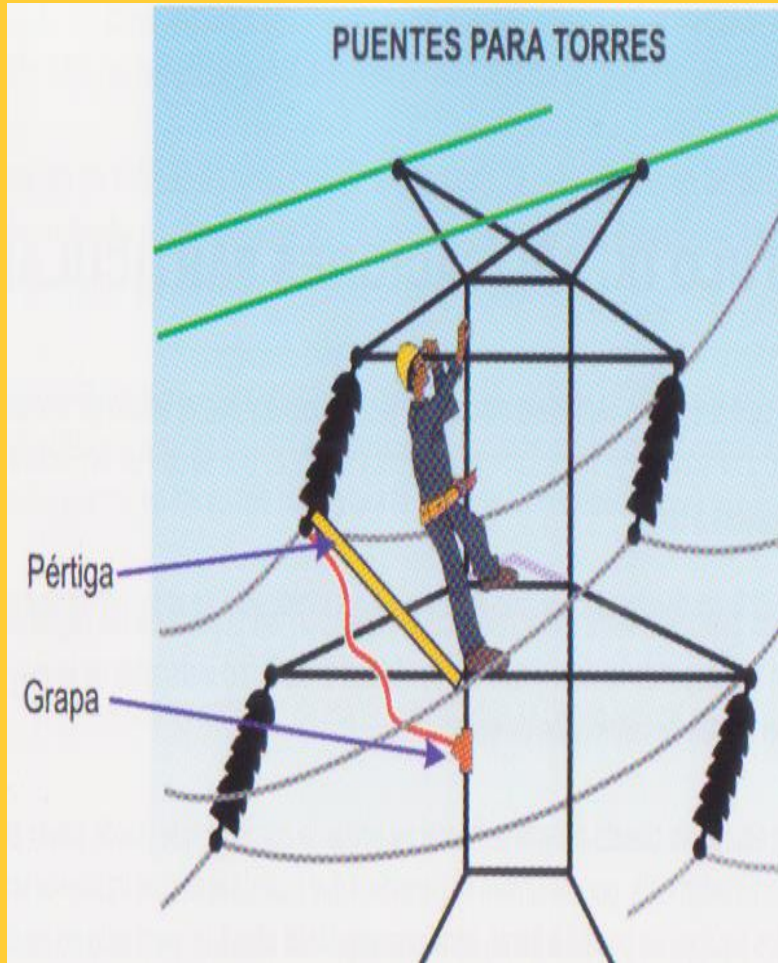
Este diagrama muestra la conexión a tierra correcta del equipo. Si los cables coaxiales entran desde arriba al equipo, conecten a tierra de arriba. Si entran desde abajo, conecten a tierra de abajo.

Cálculo aproximado de Z características

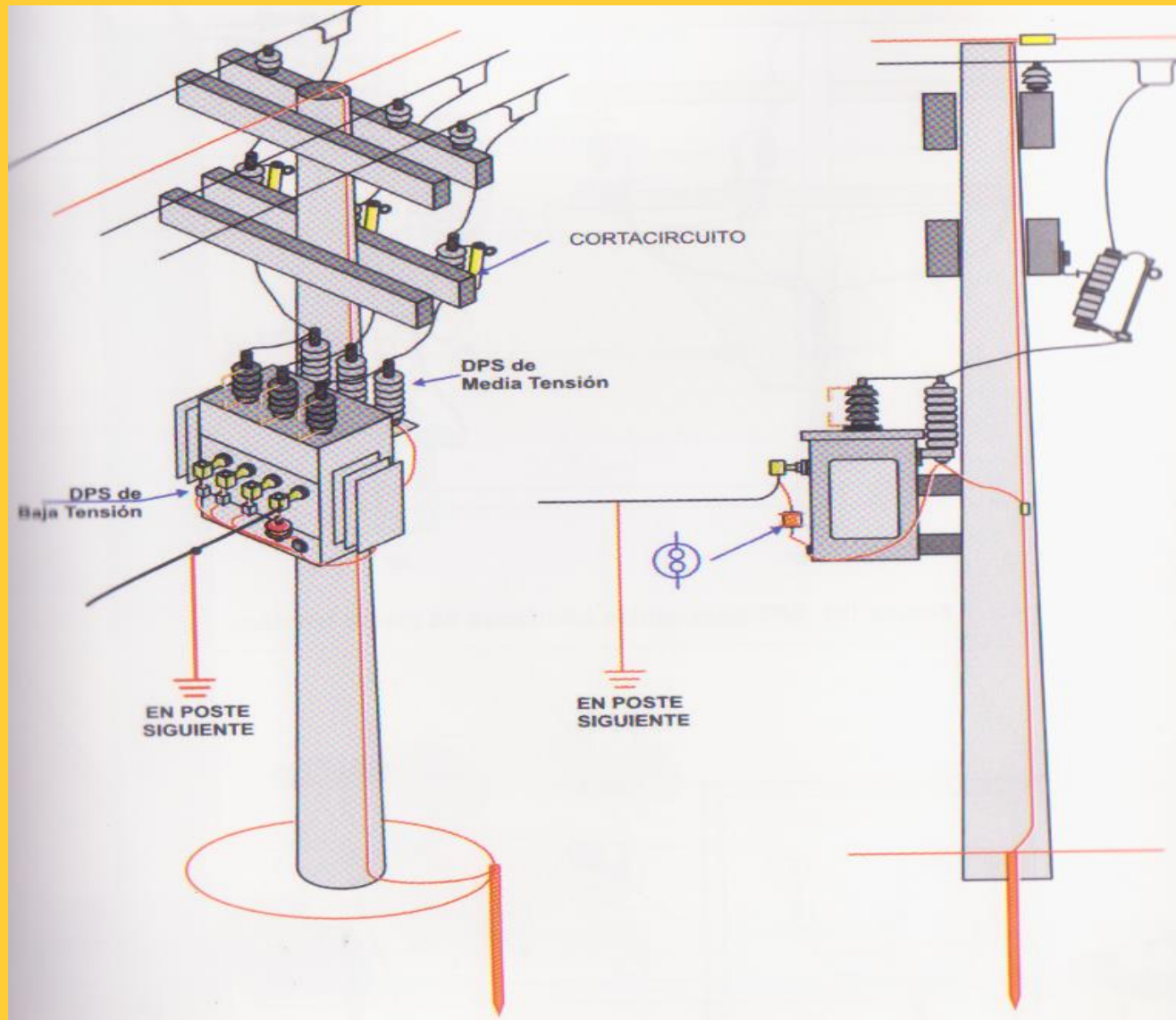
 Diagram of a single vertical rod antenna. The height is labeled h and the radius is labeled $2r$ at the base.	 Diagram of a two-rod antenna with a horizontal cross-arm. The height is labeled h, the cross-arm width is labeled b, and the rod radius is labeled $2r$.	 Diagram of a conical antenna. The height is labeled h and the base radius is labeled $2r$.
$Z_r = 30 \ln \left(\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right)$	$Z_T = \frac{(Z_p + Z_m)}{2}$ $Z_p = 60 \ln \left(\frac{h}{r} \right) + \frac{90 \cdot r}{h} - 60$ $Z_m = Z_p = 60 \ln \left(\frac{h}{b} \right) + \frac{90 \cdot r}{b} - 60$	$Z_r = 60 \ln \left(\frac{2\sqrt{2} \cdot h}{r} \right) - 60$

τ_T : tiempo de tránsito desde el tope hasta la base de la torre $h/300$ en μs

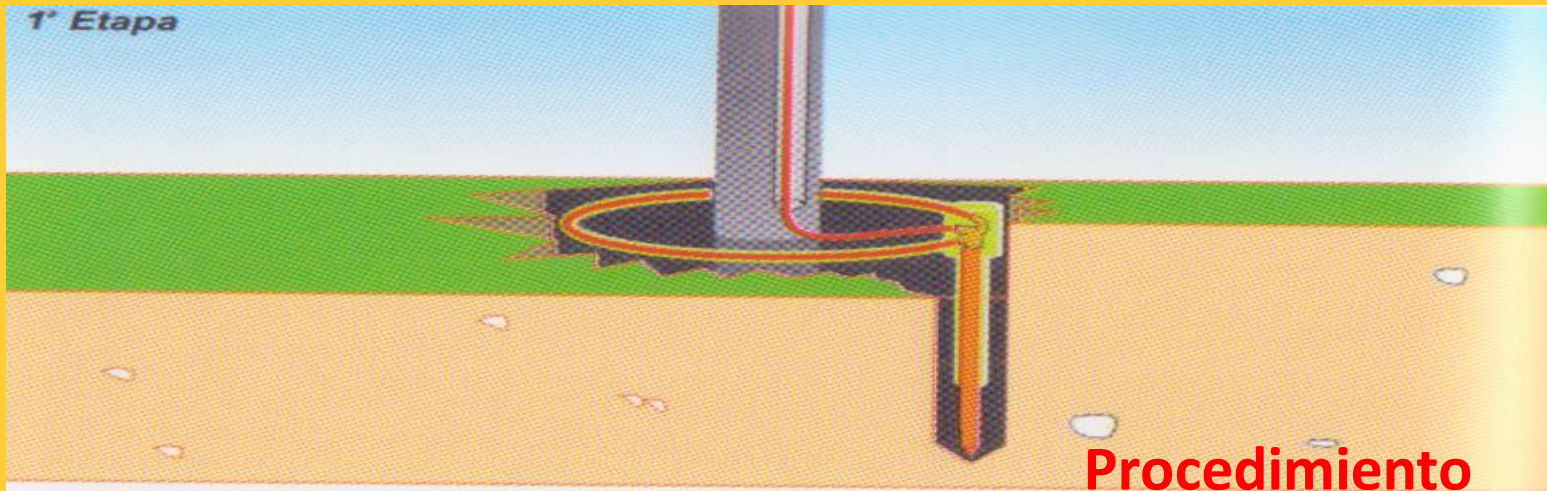
Puesta a tierra de seguridad en redes de alta y media tensión



Para el caso de transformadores

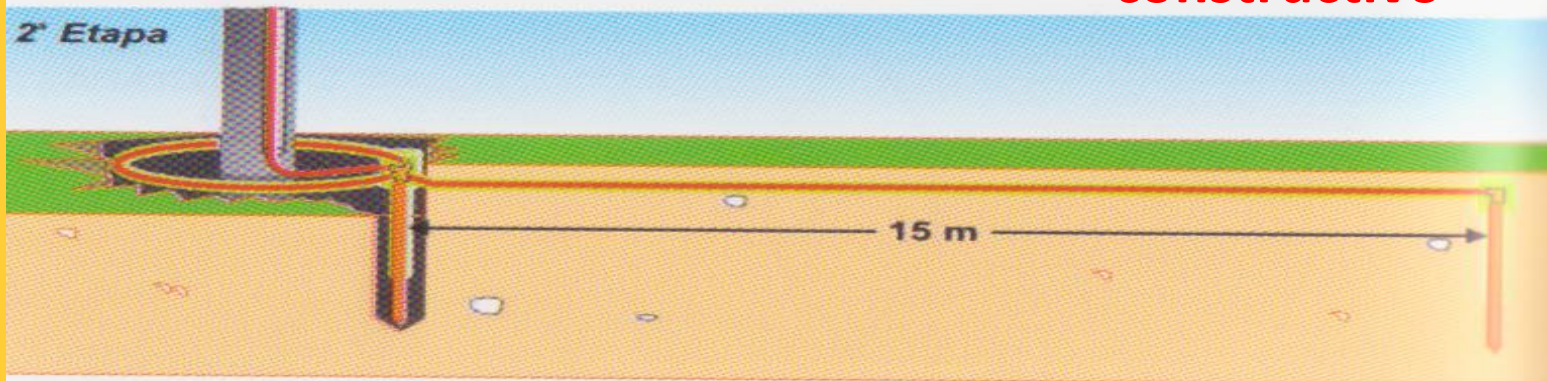


1ª Etapa

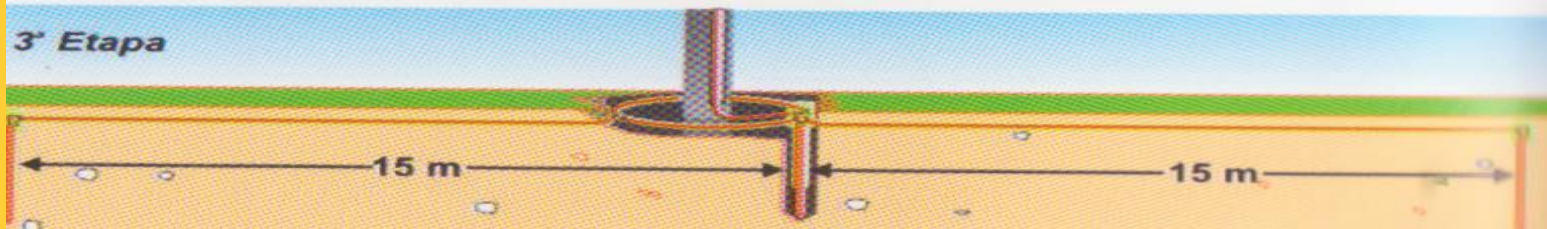


Procedimiento
constructivo

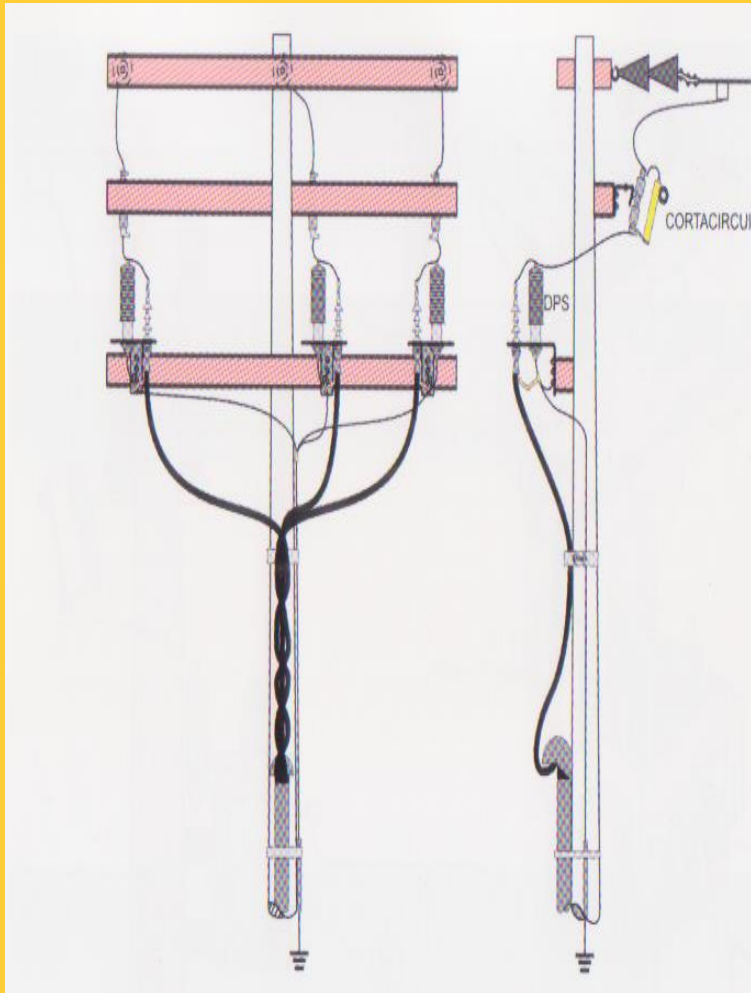
2ª Etapa



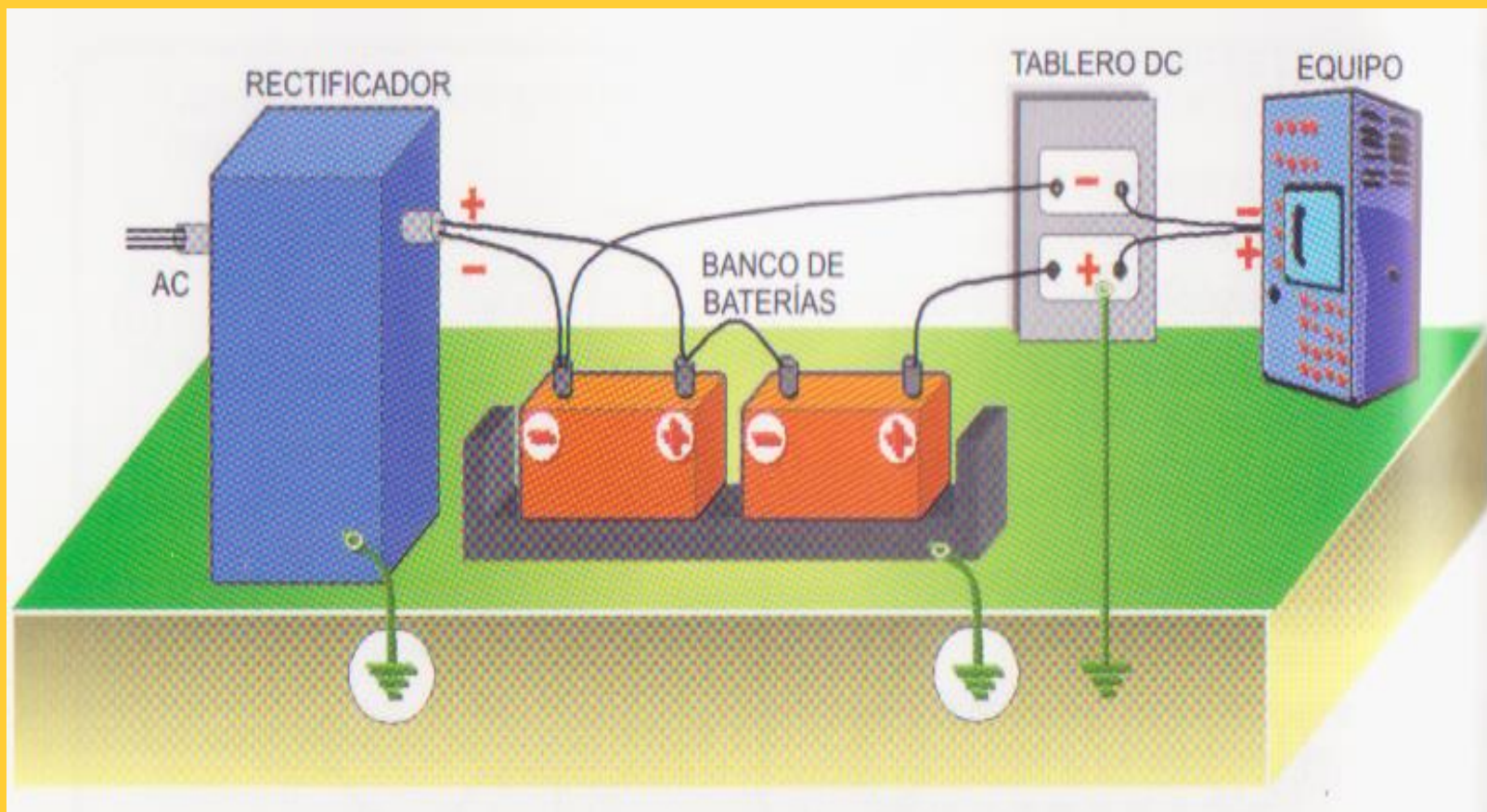
3ª Etapa



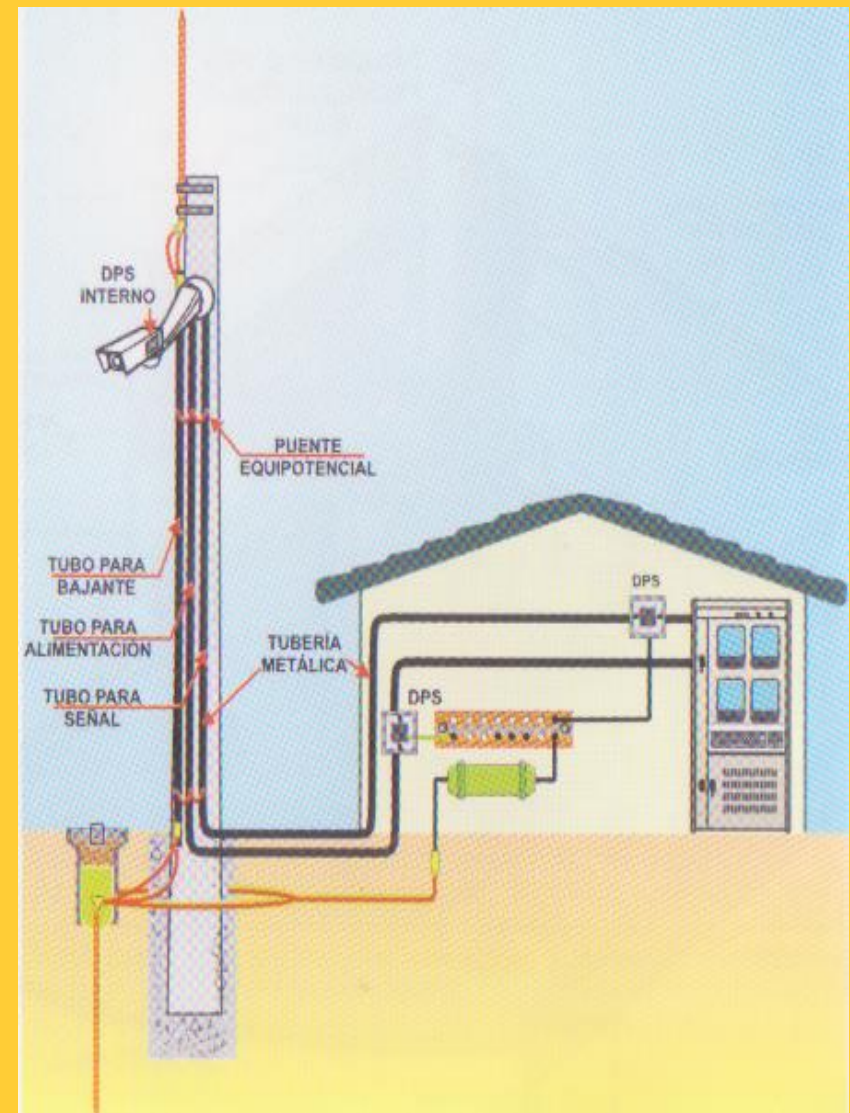
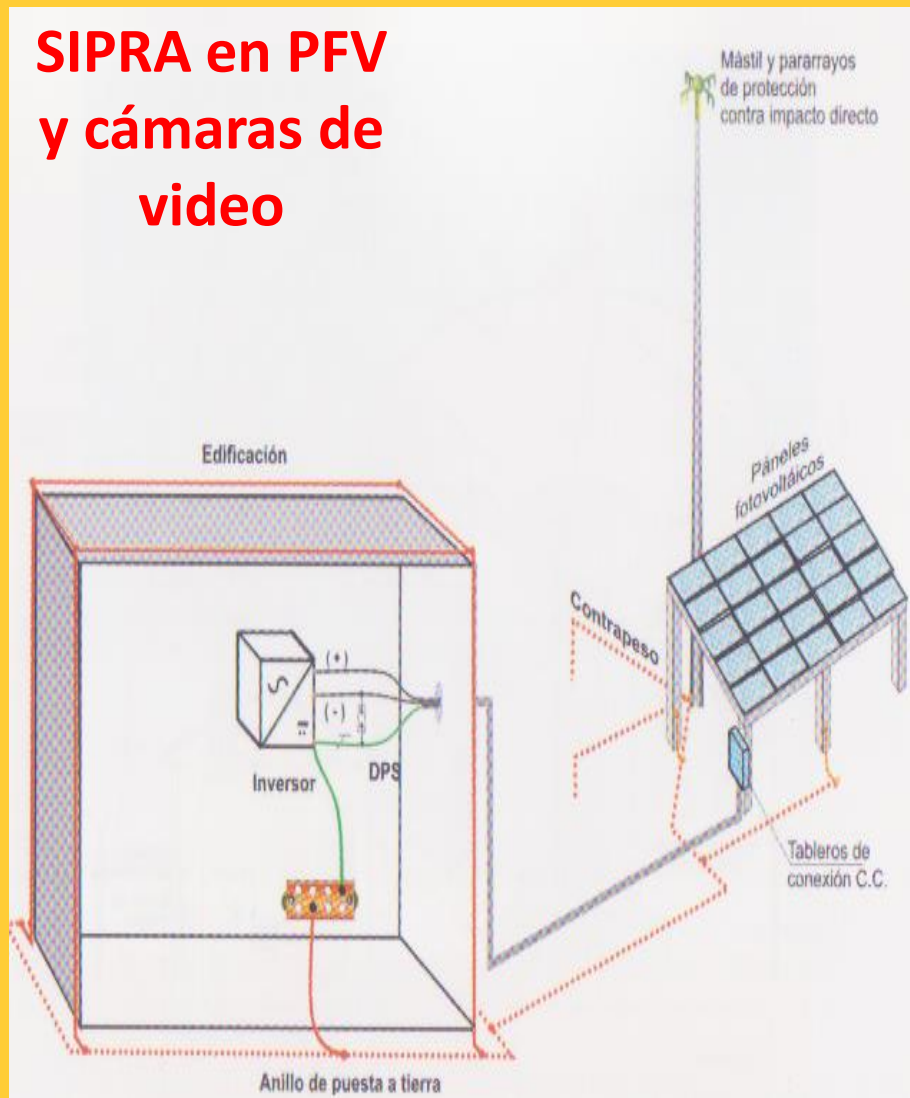
SPT para cables blindados, y cable subterráneo



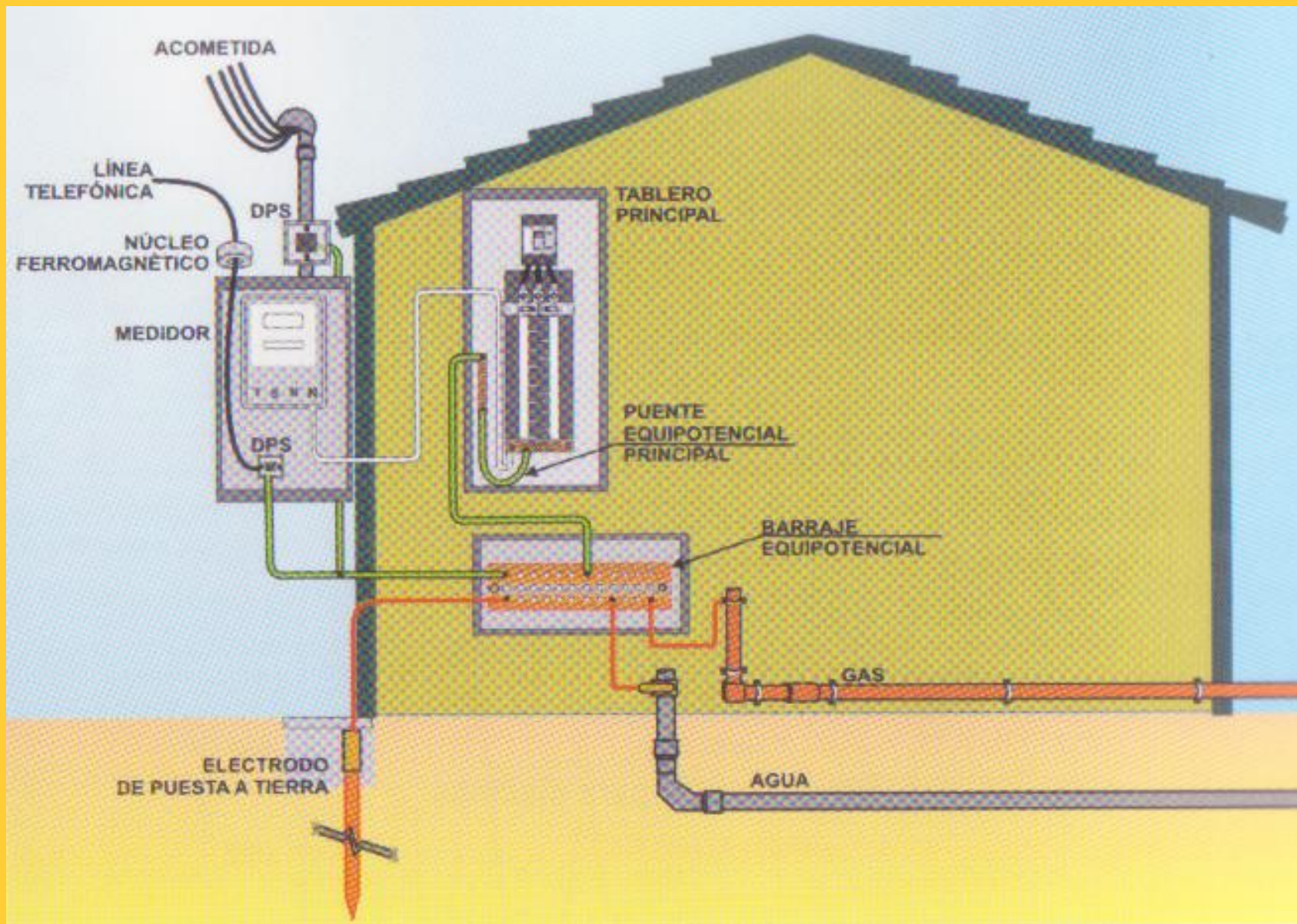
Puesta a tierra en corriente continua



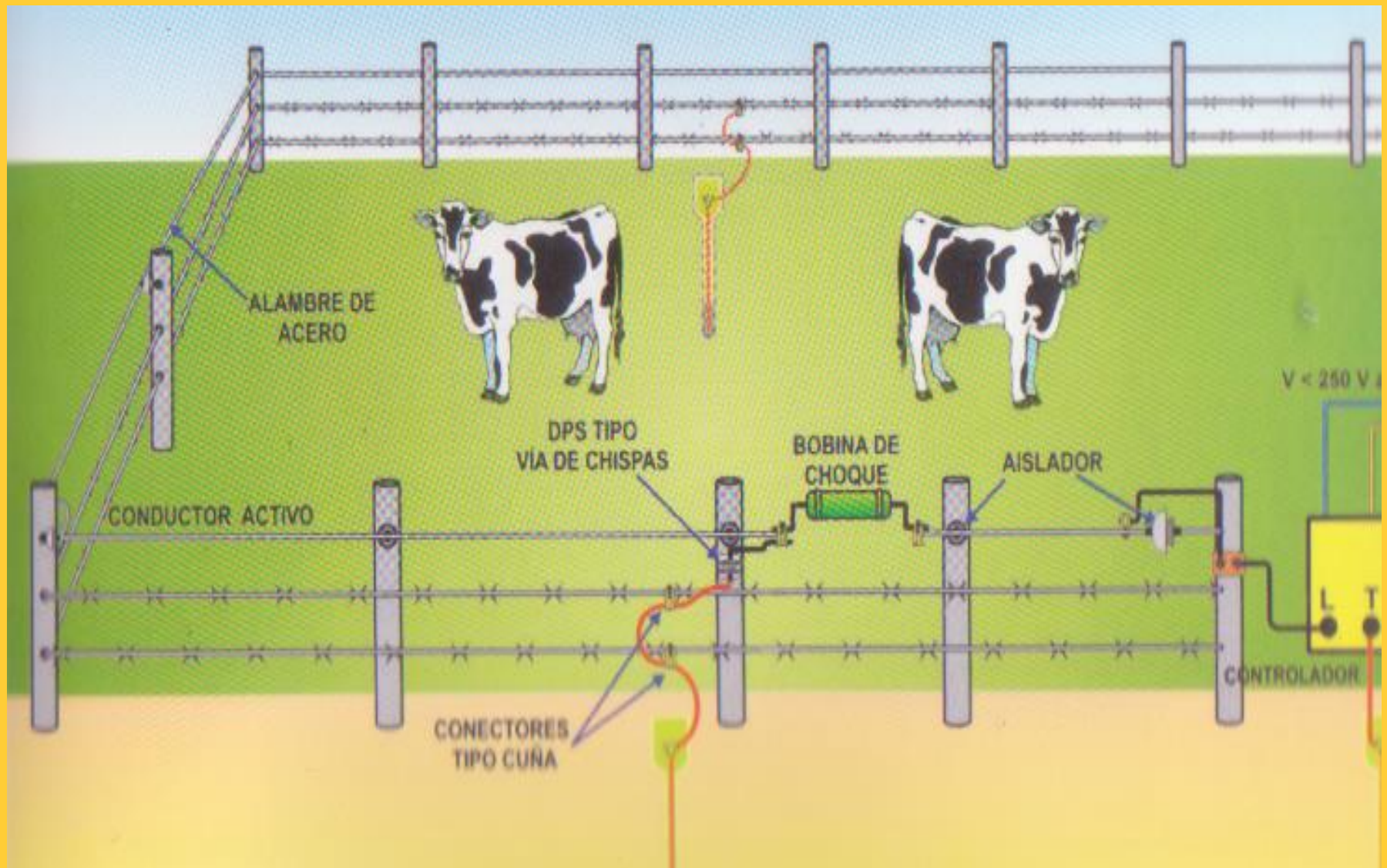
SIPRA en PFV y cámaras de video



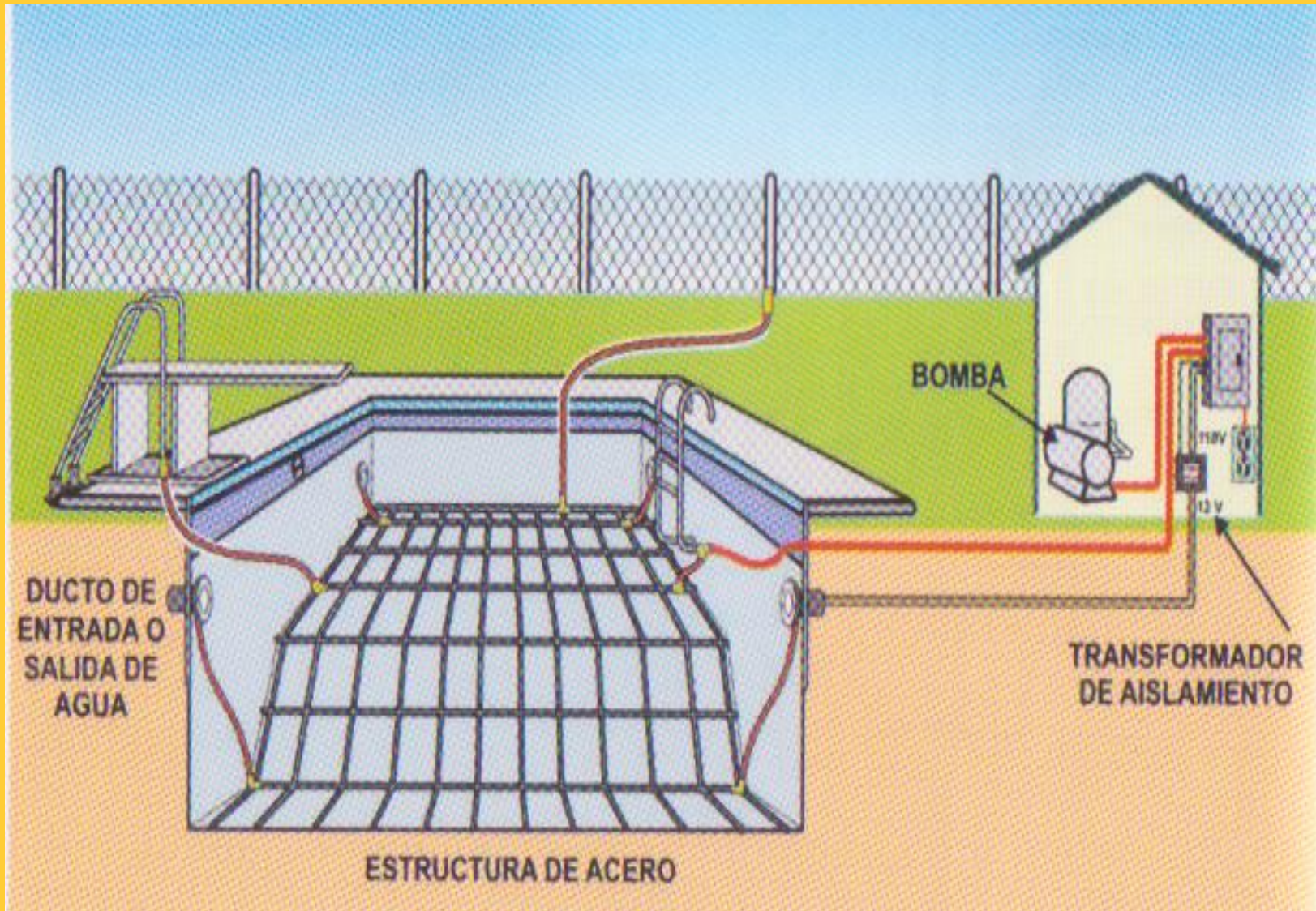
SPT para medidores de energía



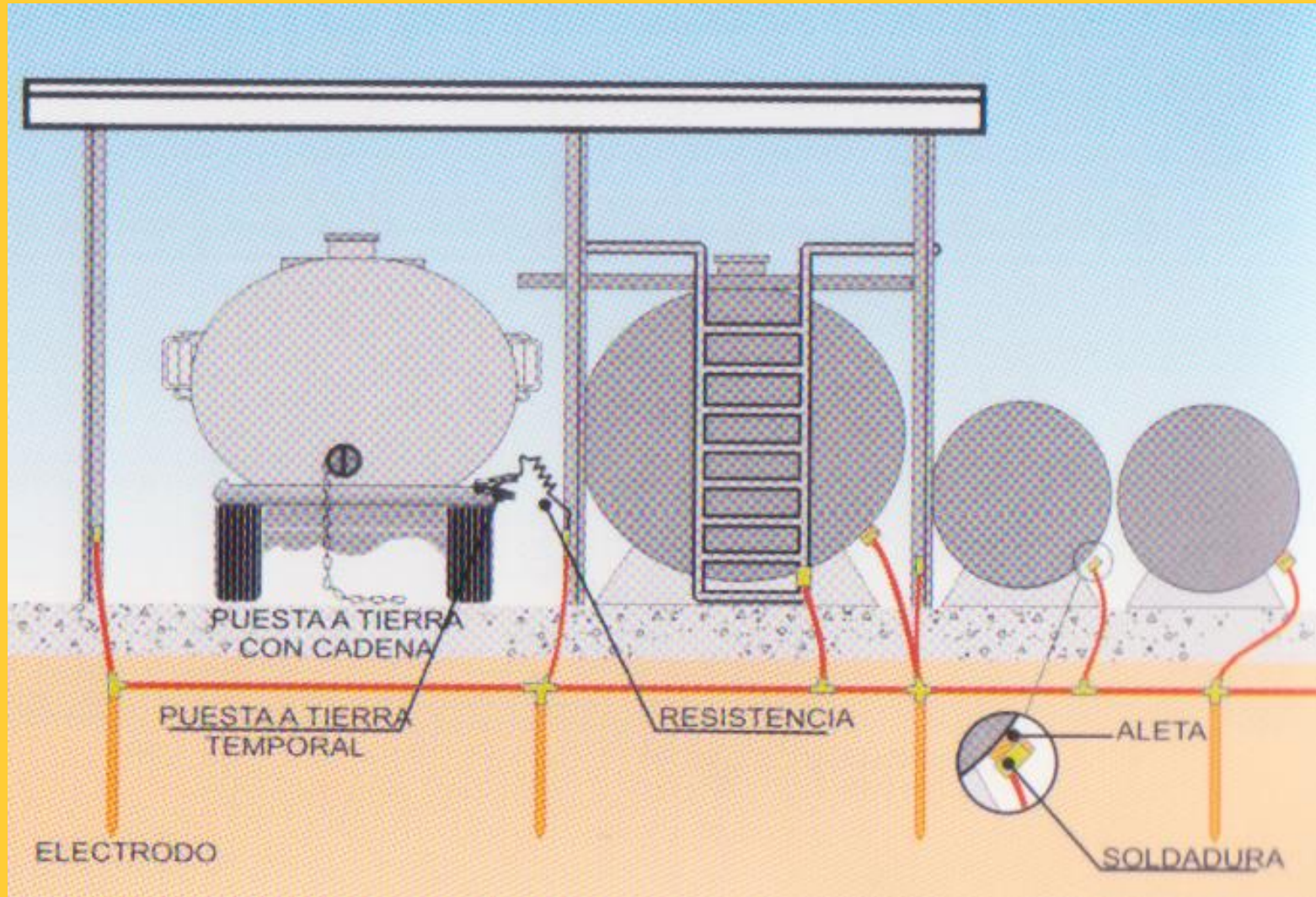
SPT para cercas electrificadas



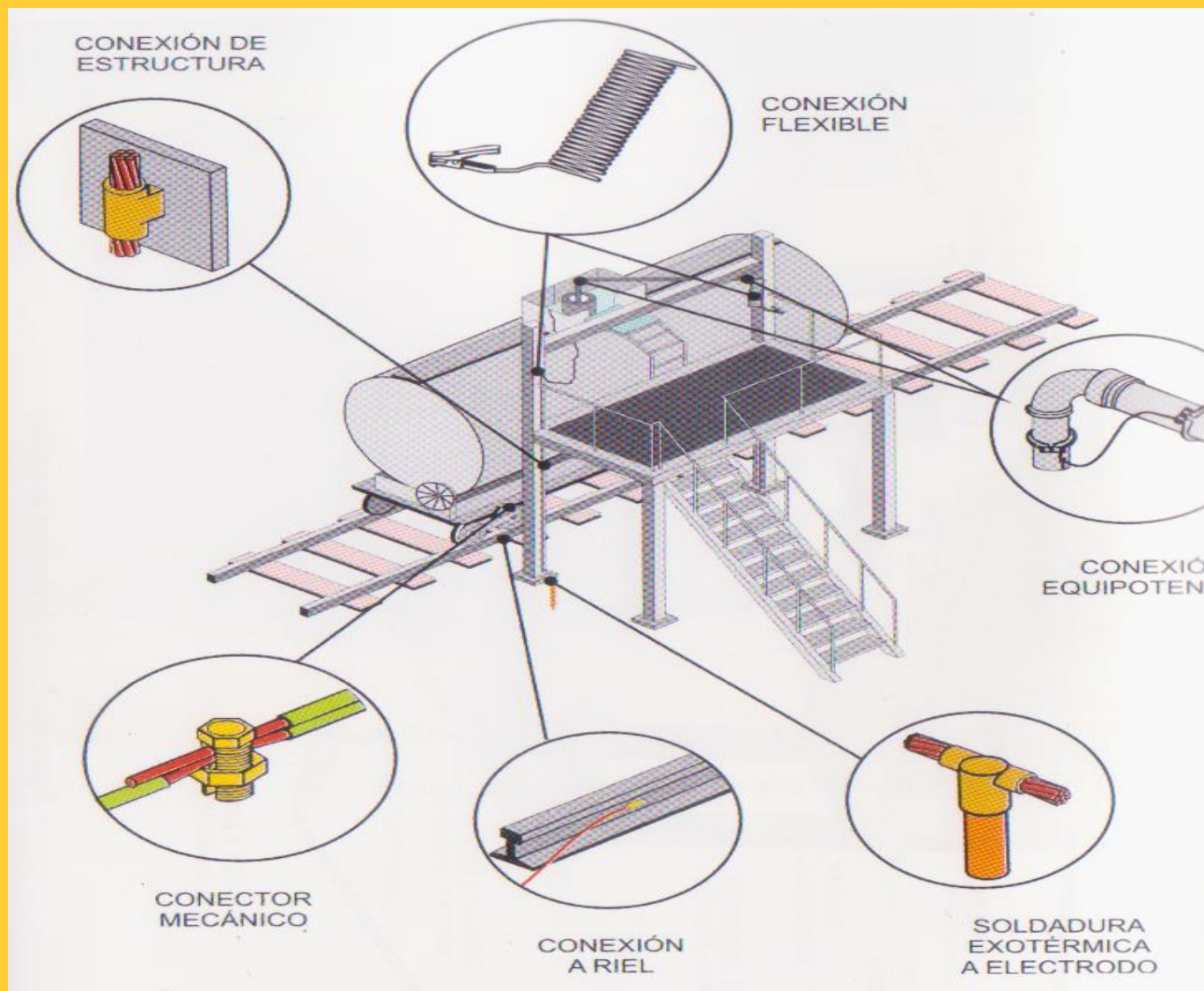
SPT para piscinas



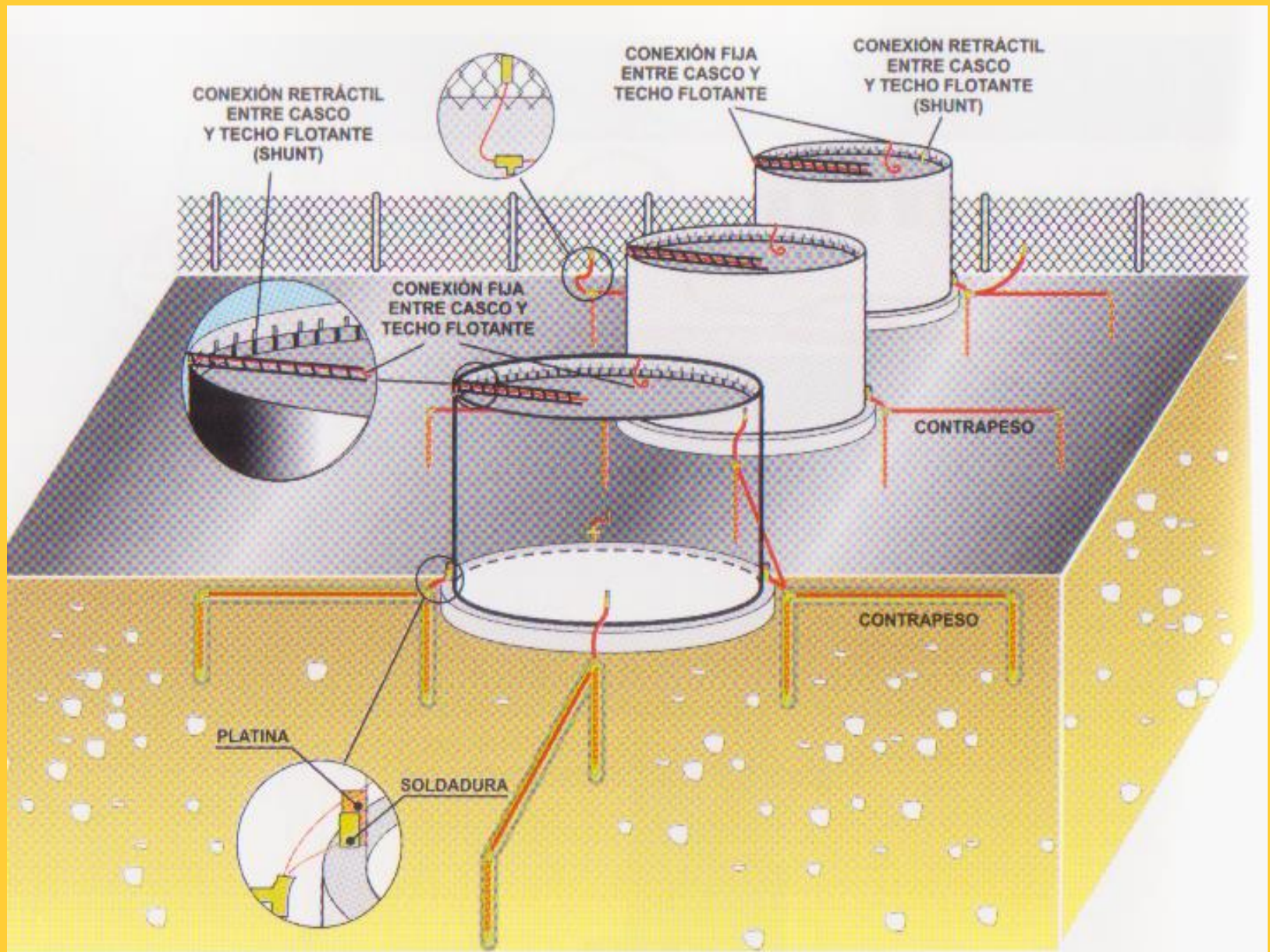
SPT en descargas de combustible



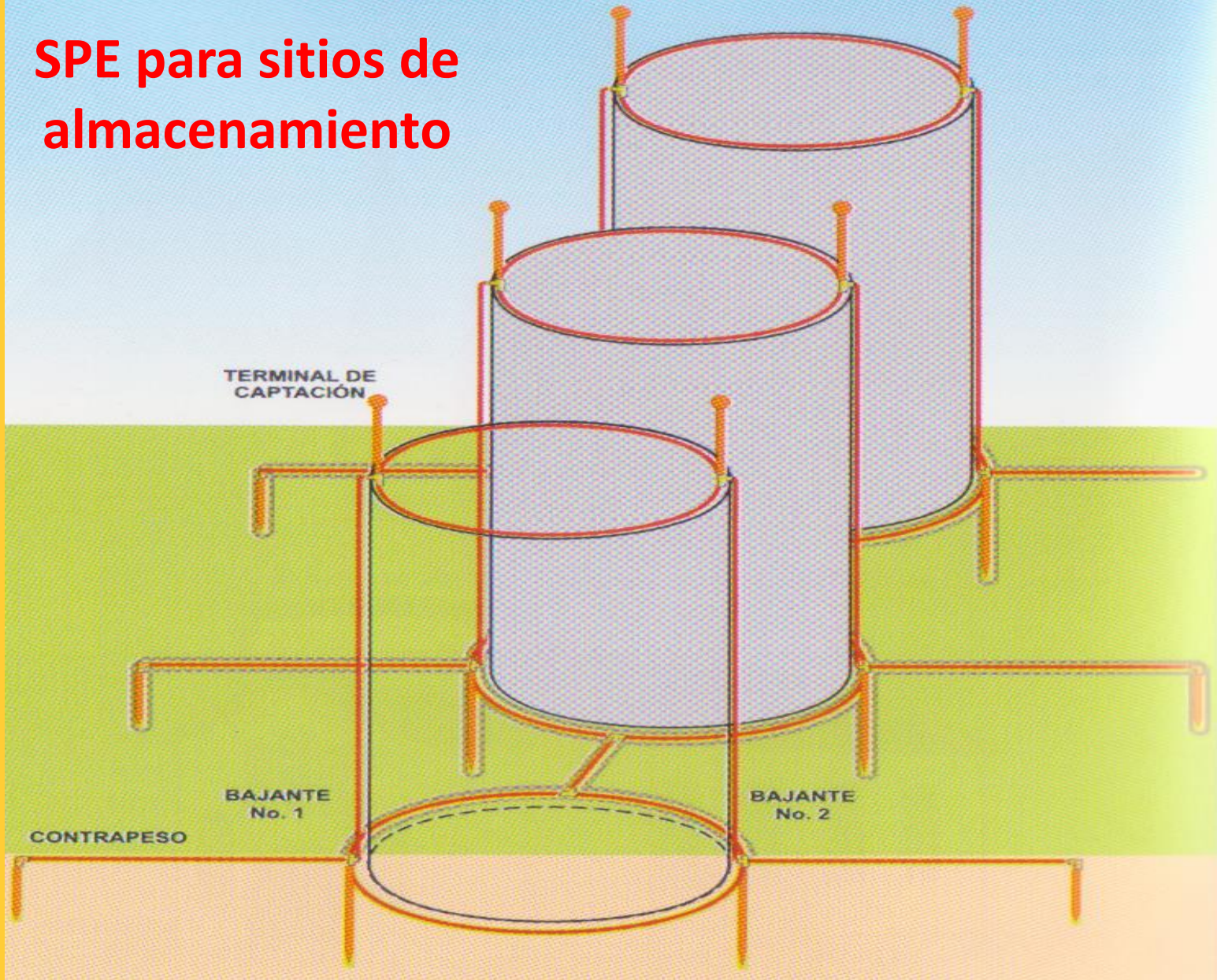
Conexiones equipotenciales



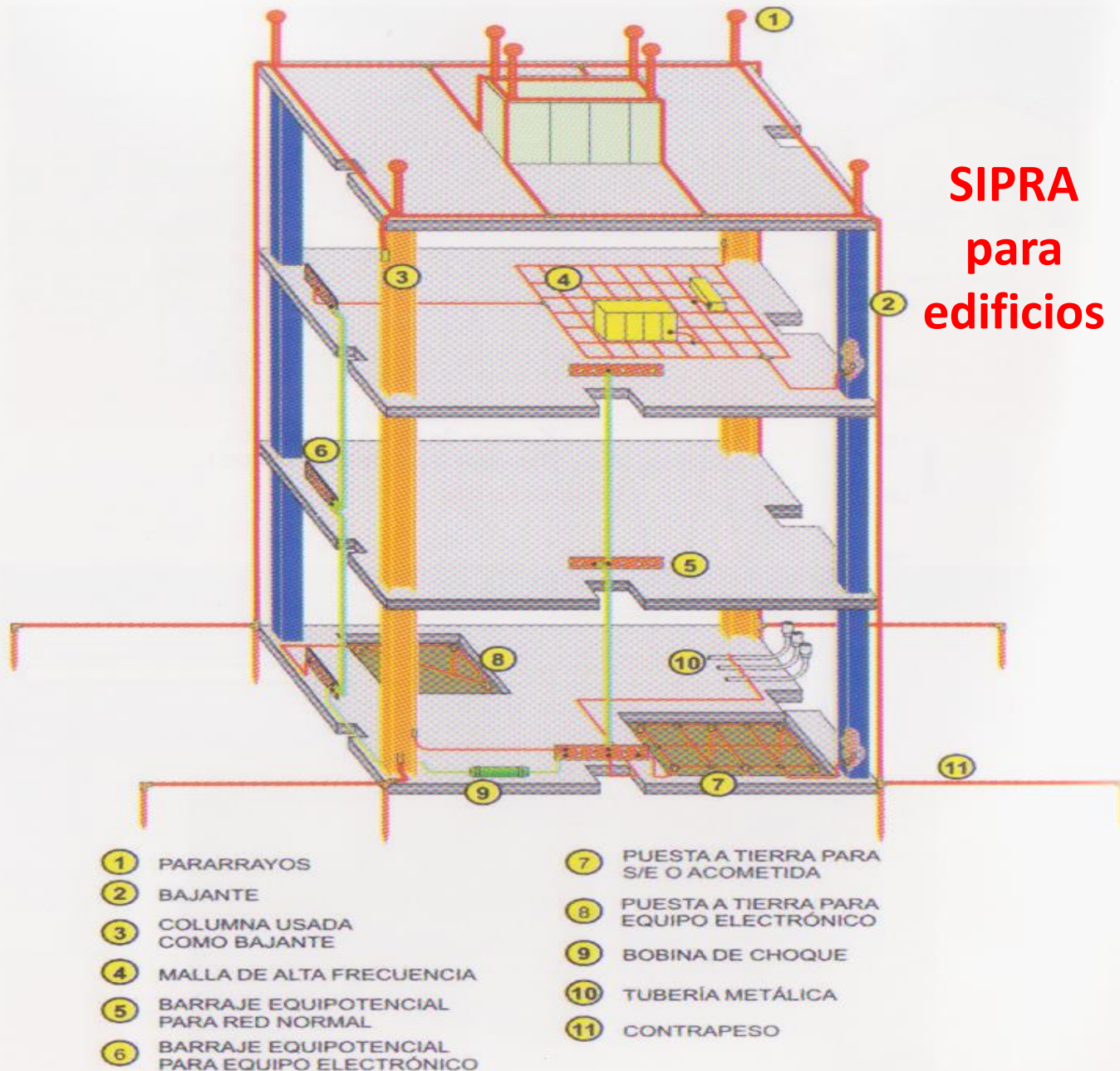
SIPRA para tanques de techo flotante



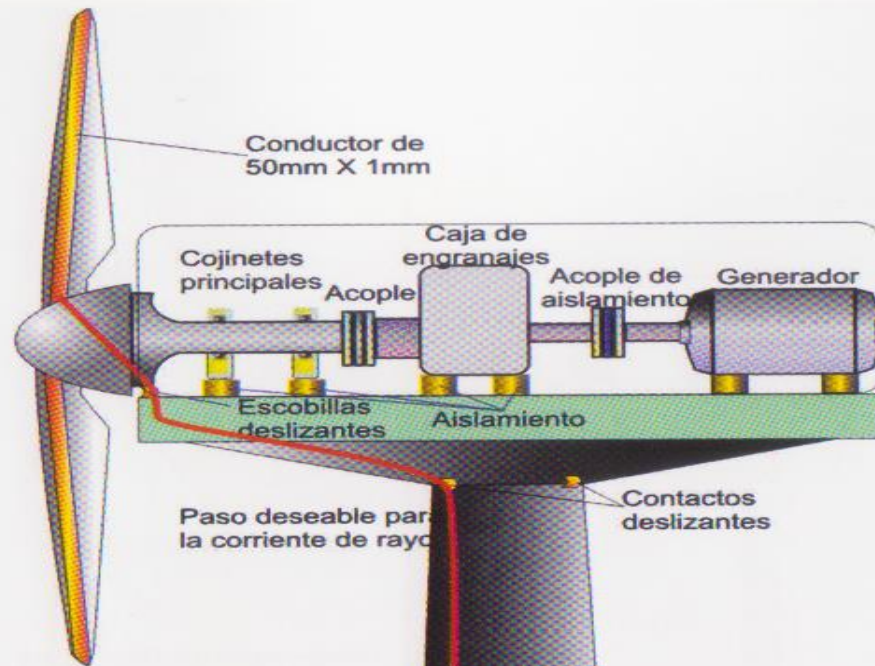
SPE para sitios de almacenamiento



SIPRA para edificios



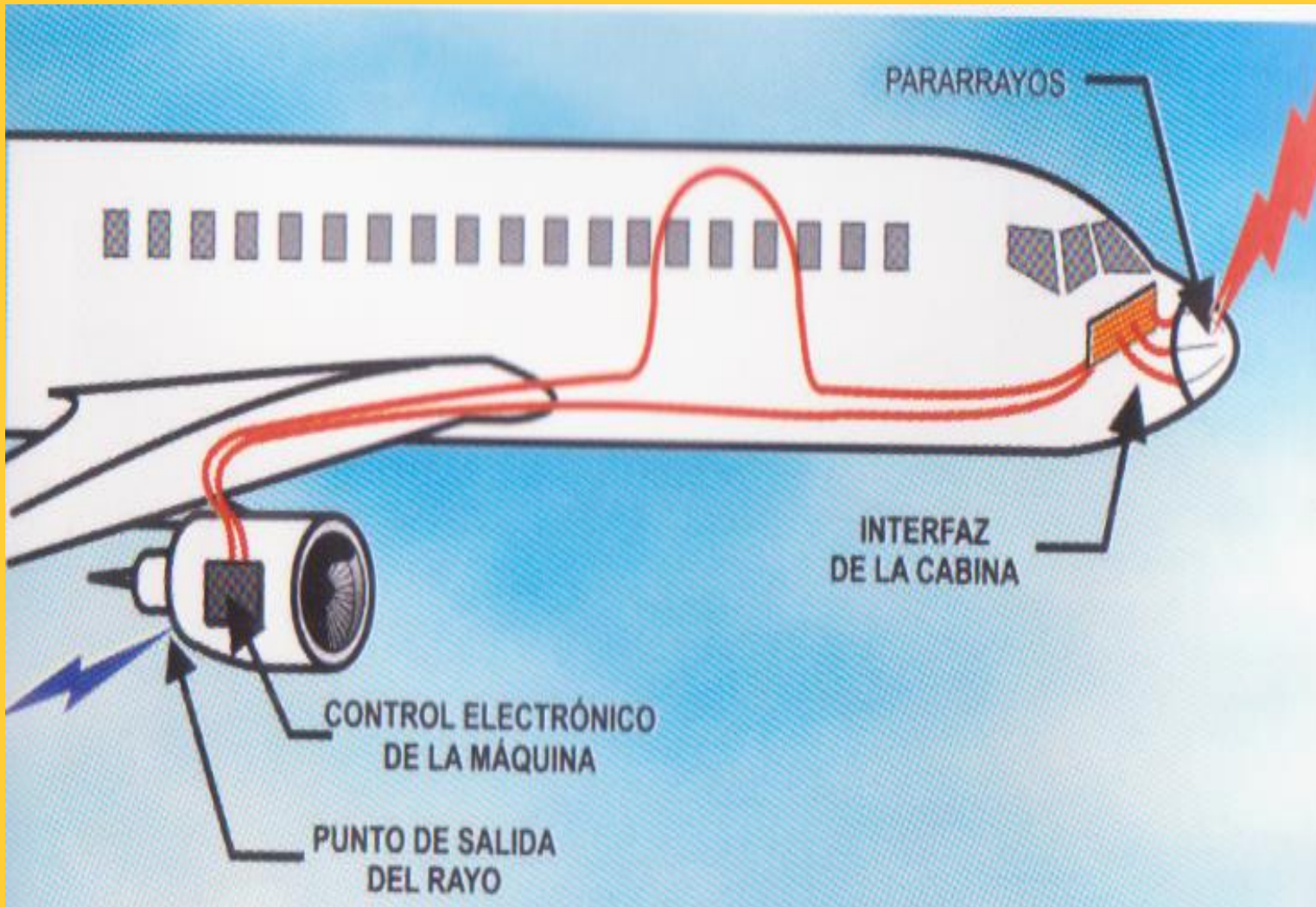




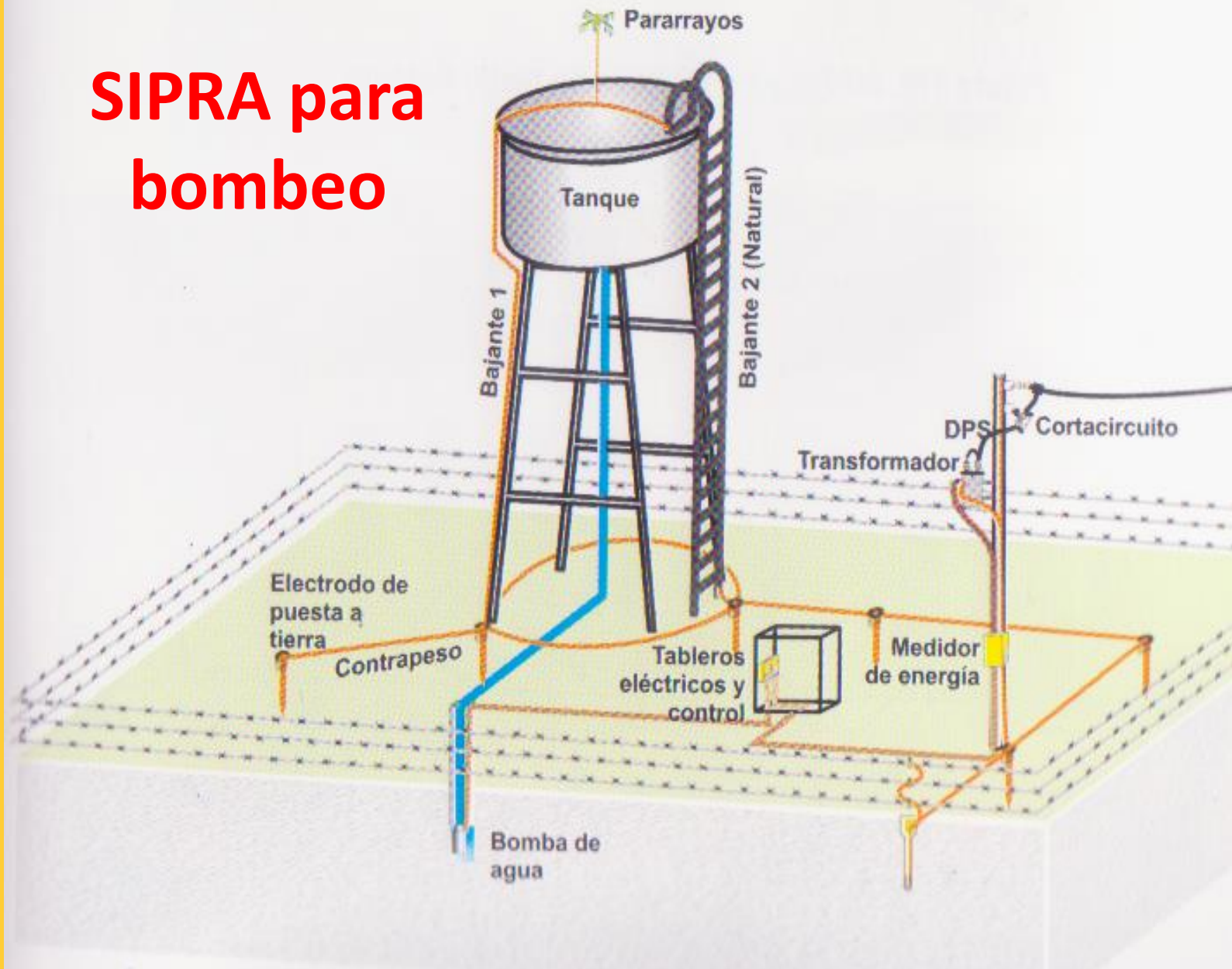
SIPRA para generadores eólicos



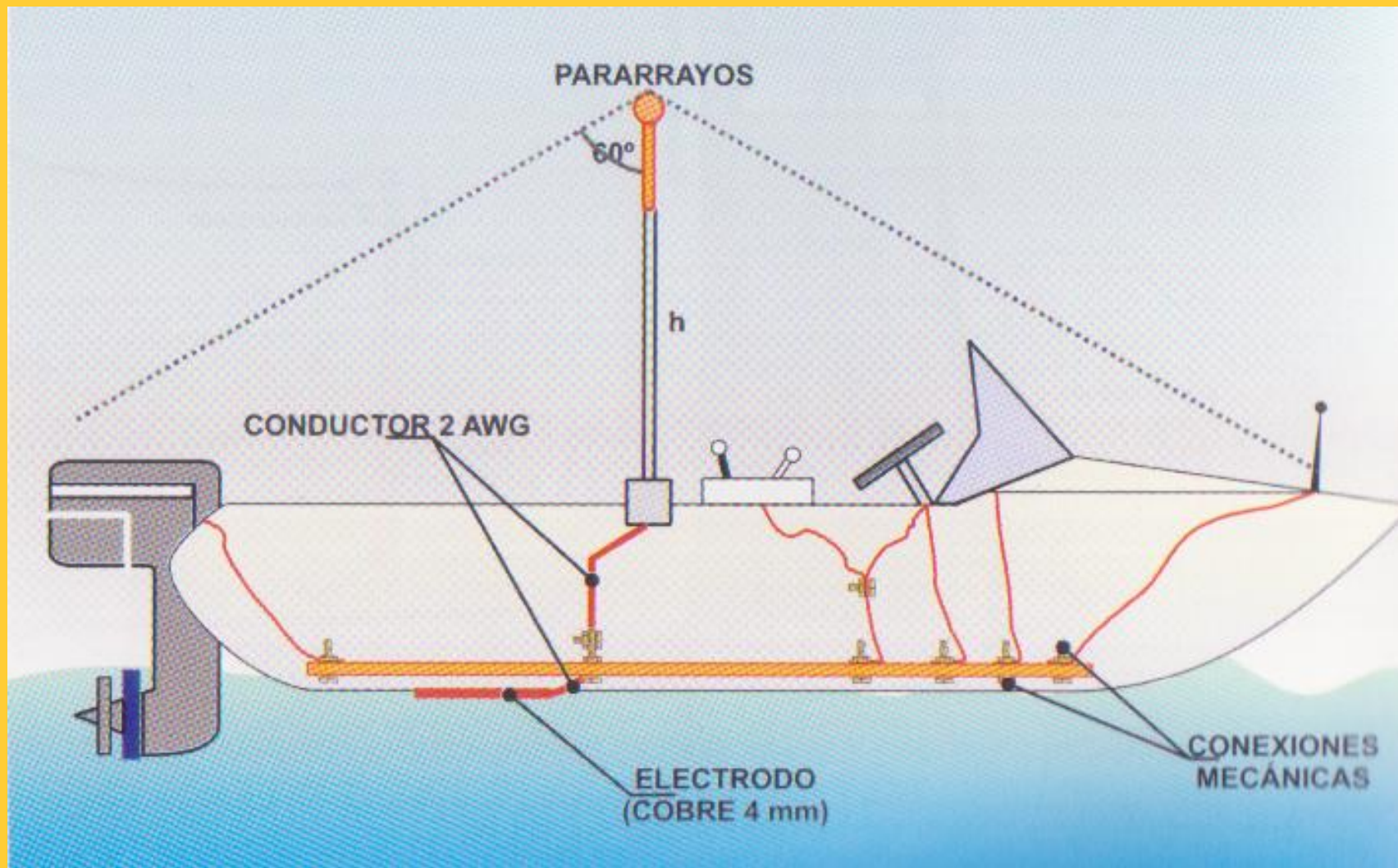
SIPRA para aviones



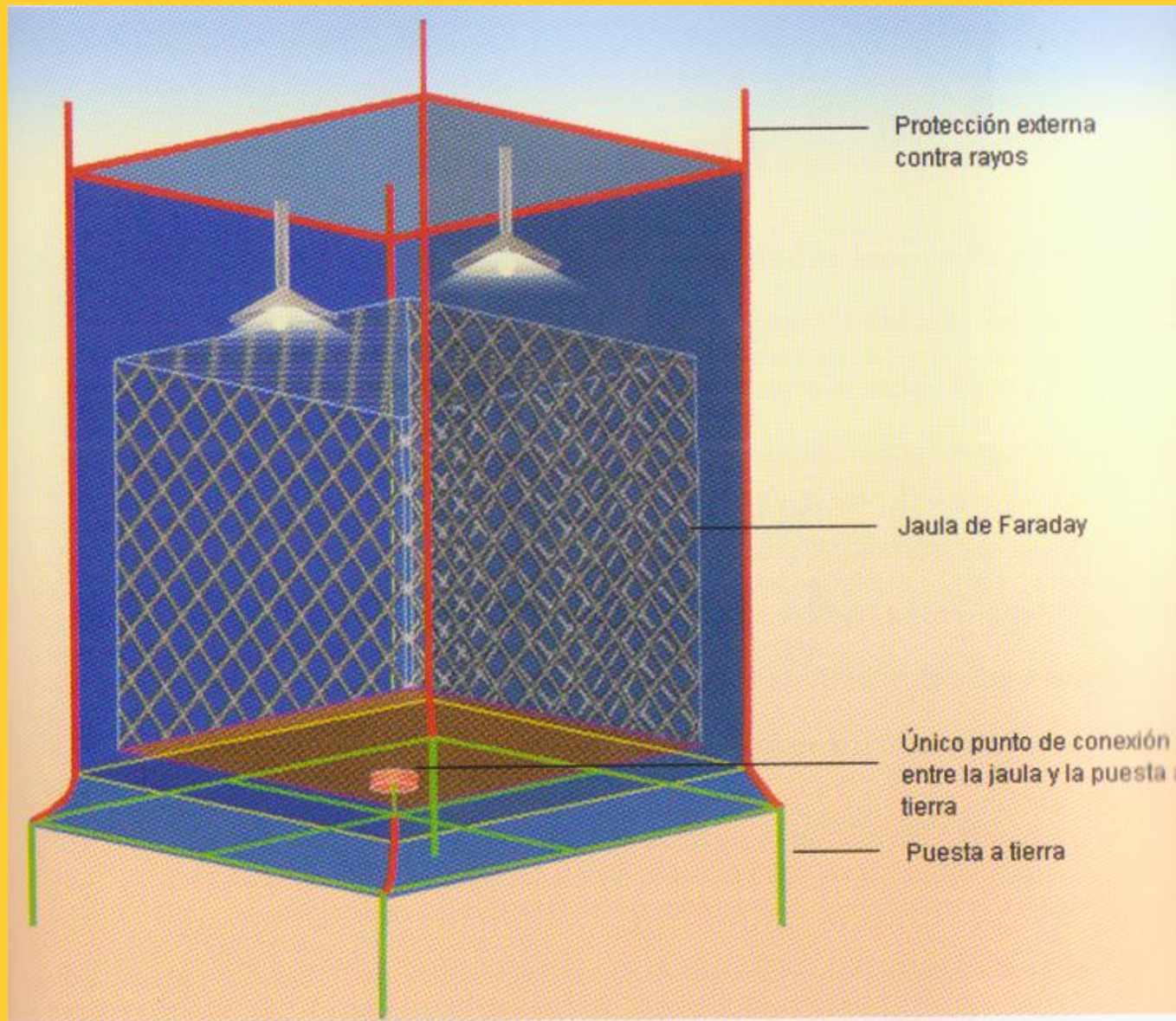
SIPRA para bombeo



SIPRA para botes



Laboratorio de alta tensión





MATERIAL COMPLEMENTARIO NO SUJETO A EVALUACIÓN

Clases de Toroidales

- Clase AC

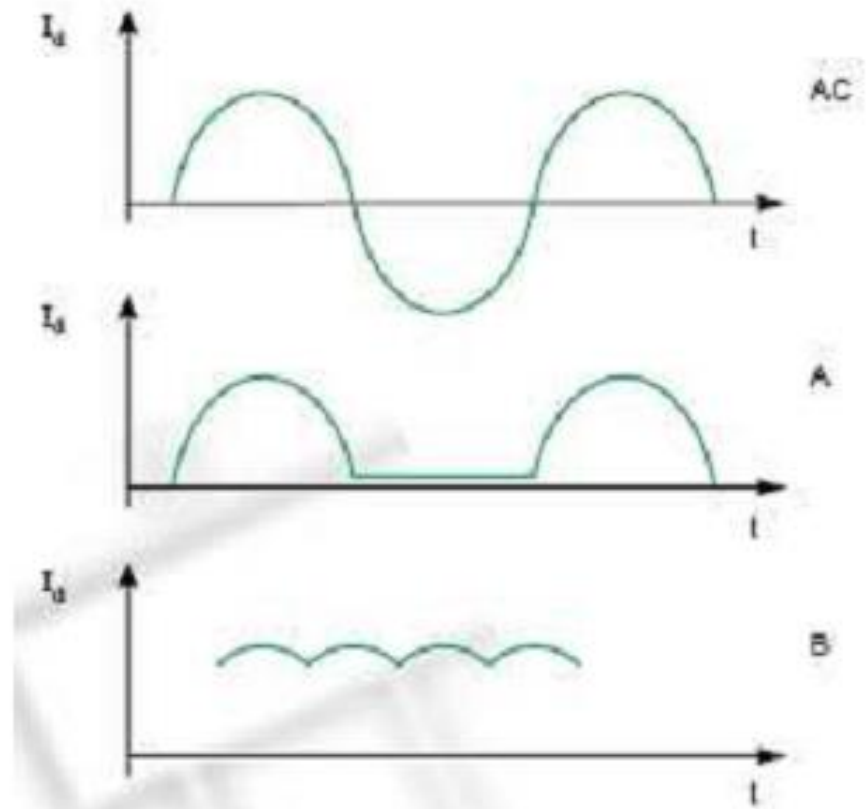
- Corrientes Alternas Senoidales

- Clase A

- Corriente alternas senoidales, continuas pulsantes.

- Clase B

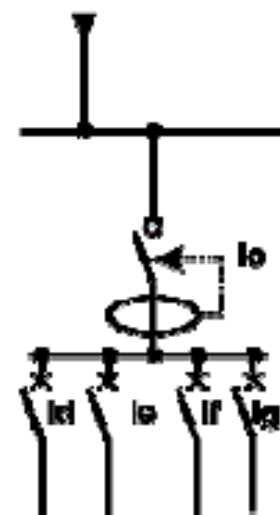
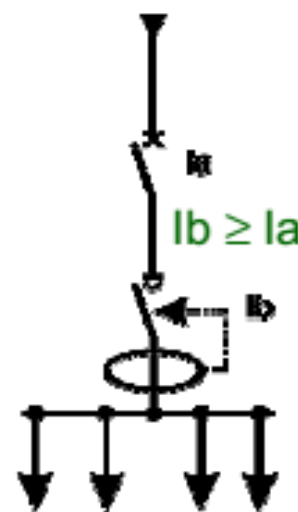
- Corriente alternas senoidales, continuas pulsantes, fuentes rectificadas.



● Número de Polos

- Deberá ser igual al número de conductores activos involucrados (Fase R, S, T y N)
- En sistema mono ó bifásico = Protección BIPOLAR
- En sistema trifásico
 - c/ neutro distribuido = Protección TETRAPOLAR
 - s/neutro distribuido = Protección TRIPOLAR

● Corriente Nominal

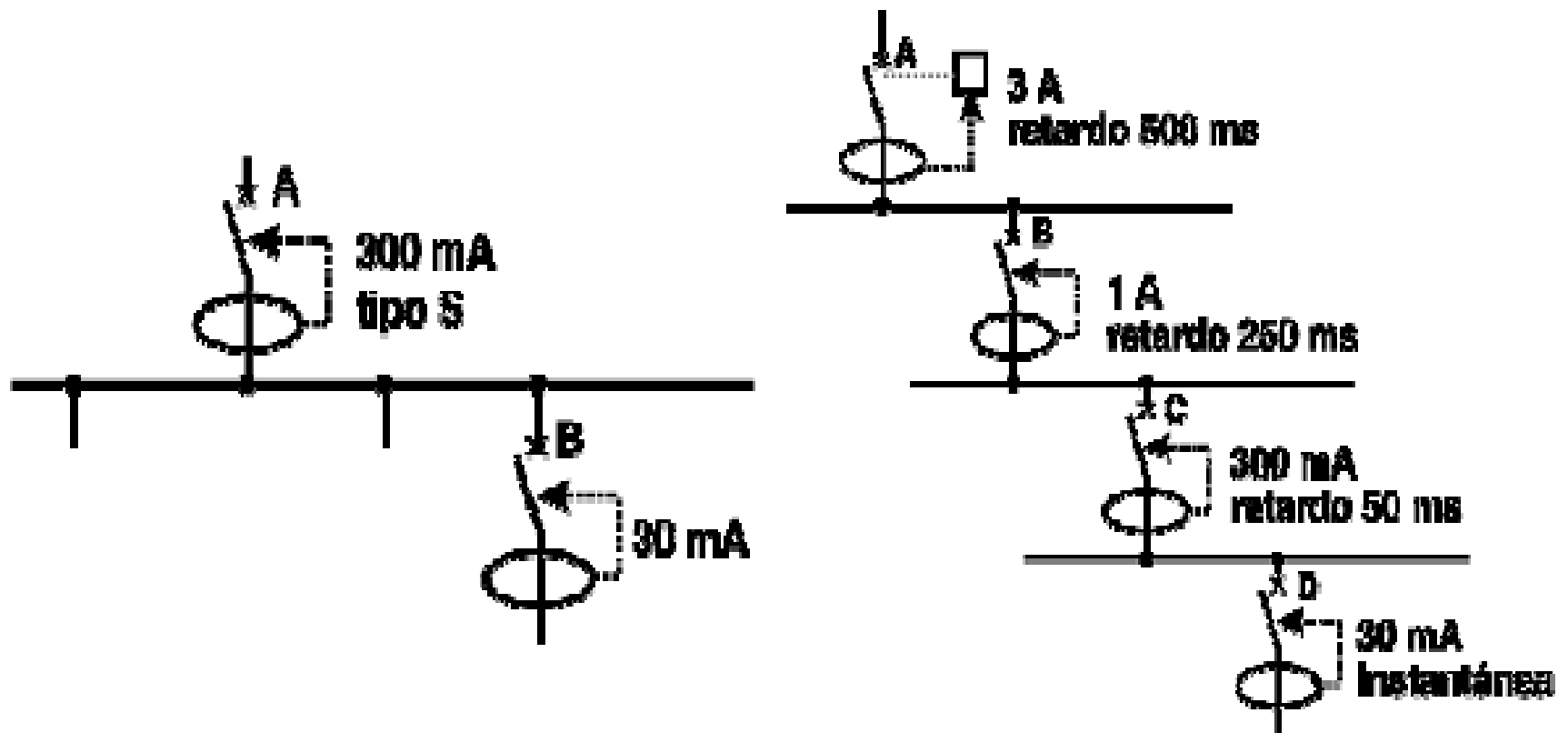


$$I_c \geq K(I_d + I_e + I_f + I_g)$$

K = factor de simultaneidad

● Selectividad Vertical

- Los valores de $I_{\Delta n}$ y del t de retardo son función del nivel de selectividad.



- Número de receptores por diferencial:

- Evaluar la I_{ftotal} de las cargas alimentadas, se debe cumplir :

$$I_{fuga}(t) \leq \frac{I \Delta n}{2}$$

- En caso contrario se debe subdividir los circuitos.

- Corrientes de fuga Típicas

- PC: 1,5 a 2 mA.
- Fotocopiadora: 0.5 a 1.5 mA.
- Telefax: 0.5 a 1 mA.
- Impresoras <1 mA

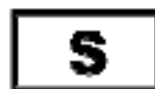
Simbolos

- Umbral de Disparo
- Protección contra disparos intempestivos
- Funcionamiento a bajas temperaturas
- Aparato selectivo
- Interruptor Diferencial

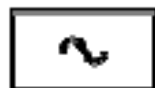
$I\Delta n$



-25 C



Clase AC



Clase A



Clase A "si"



Tecnología superinmunizada

● Coordinación con fusibles en MT

- Para que los fusibles no se vean afectados (es decir, no se dañen):
 - Todas las partes de la curva del fusible deben estar situadas a la derecha de la curva CB con un factor de 1,35 o más (esto es, cuando en el momento T, la curva CB pasa por un punto correspondiente a 100 A, la curva del fusible en ese mismo momento T debe pasar por un punto correspondiente a 135 A o más, y así sucesivamente...); por otro lado, todas las partes de la curva del fusible deben estar por encima de la curva CB con un factor de 2 o más (es decir, cuando a un nivel de corriente I la curva CB pasa por un punto correspondiente a 1,5 segundos, la curva del fusible al mismo nivel de corriente I debe pasar por un punto correspondiente a 3 segundos o más, etc.).
 - Los factores 1,35 y 2 se basan en las tolerancias de fabricación máximas estándar para fusibles de MT e interruptores automáticos de BT.

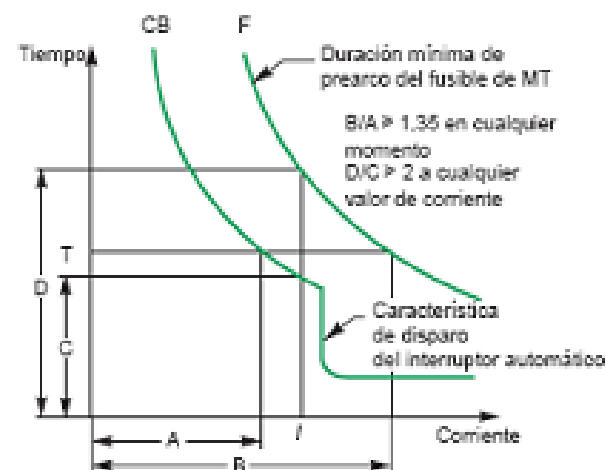


Fig. B18: Selectividad entre el funcionamiento de fusibles MT y el disparo de interruptores automáticos de BT para la protección de transformadores.



Fig. B19: Funcionamiento de fusibles MT y disparo de interruptor automático de BT.