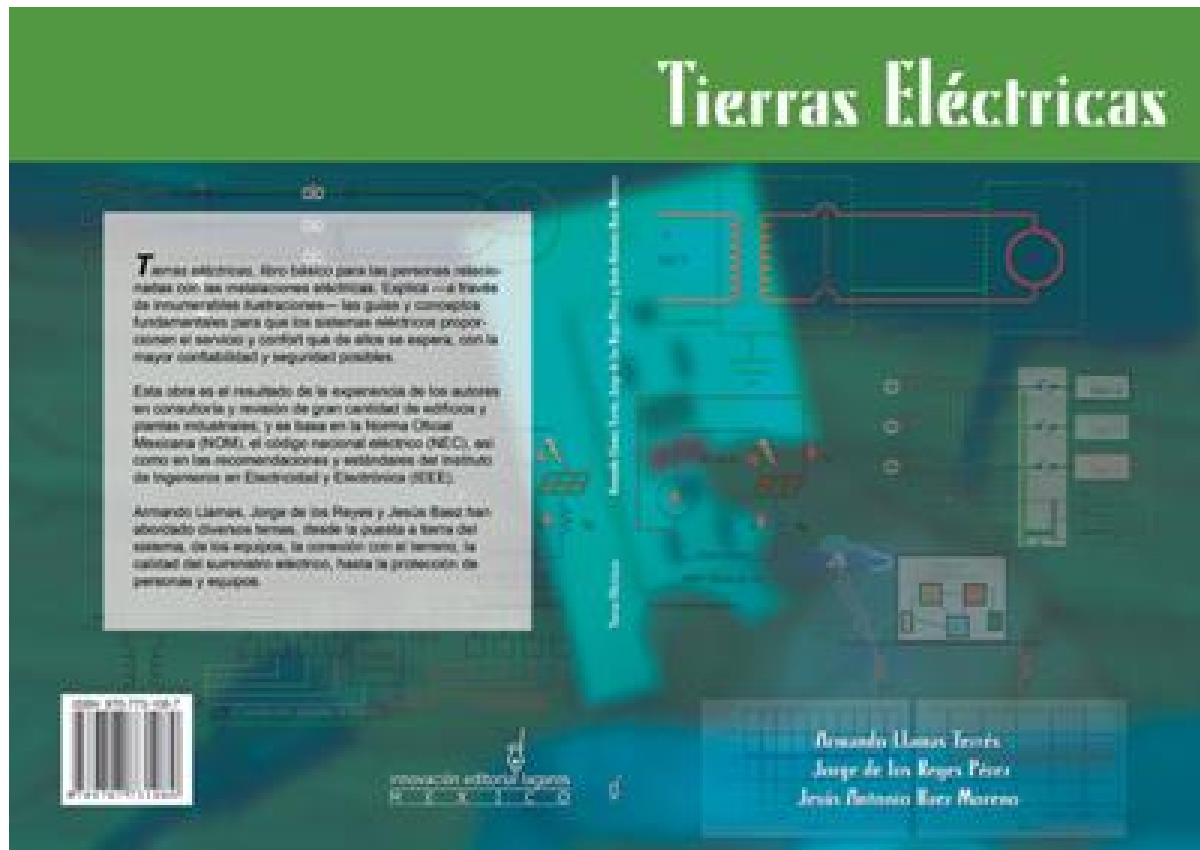


Libro de texto

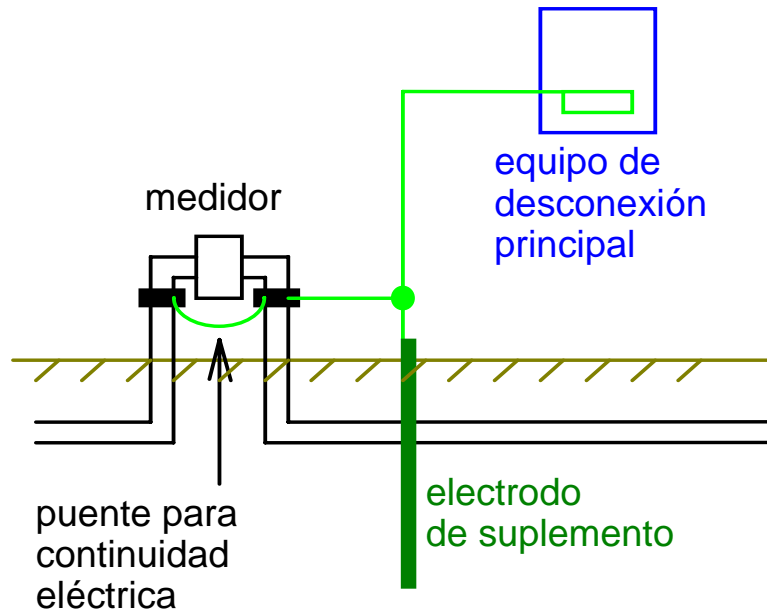


Tierras eléctricas, Armando Llamas, Jorge de los Reyes, Jesús Baez, Innovación Editorial Lagares, Monterrey, 2005.

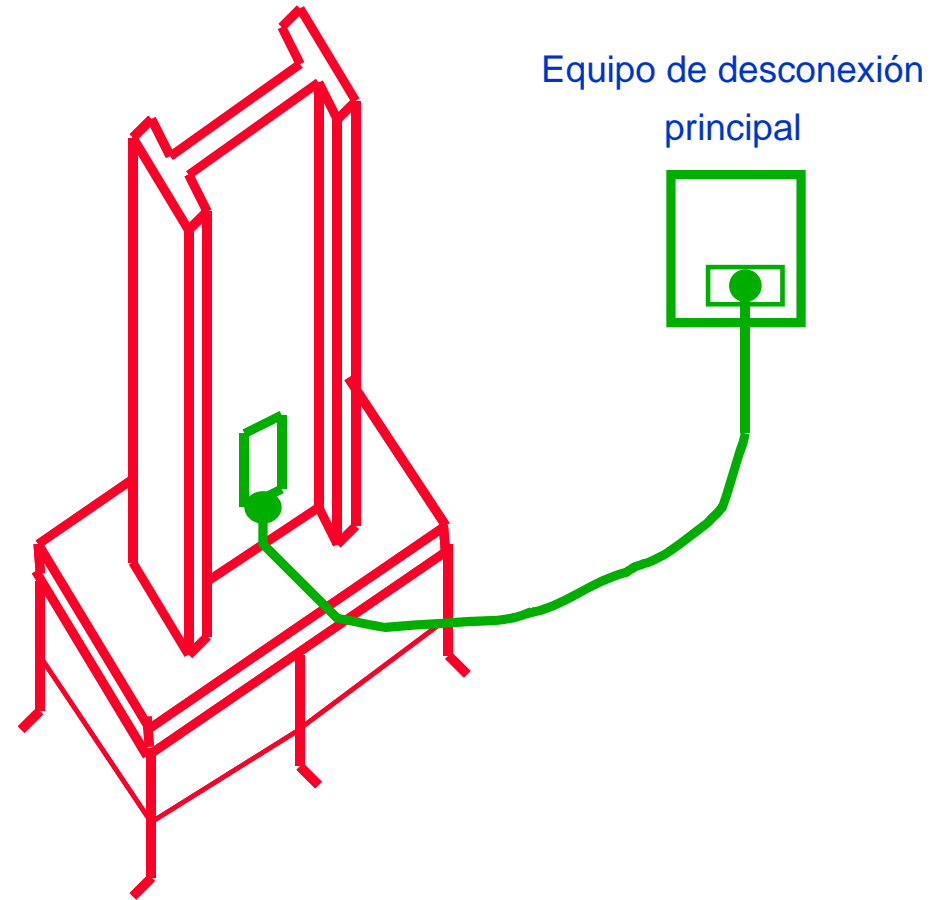
Contenido

- **Electrodos naturales**
- **Electrodos fabricados**
- **Resistencia de los electrodos**
- **Medición de resistencia**
- **Riesgos de electrocución en una subestación**

Electrodos naturales, NEC 250-81



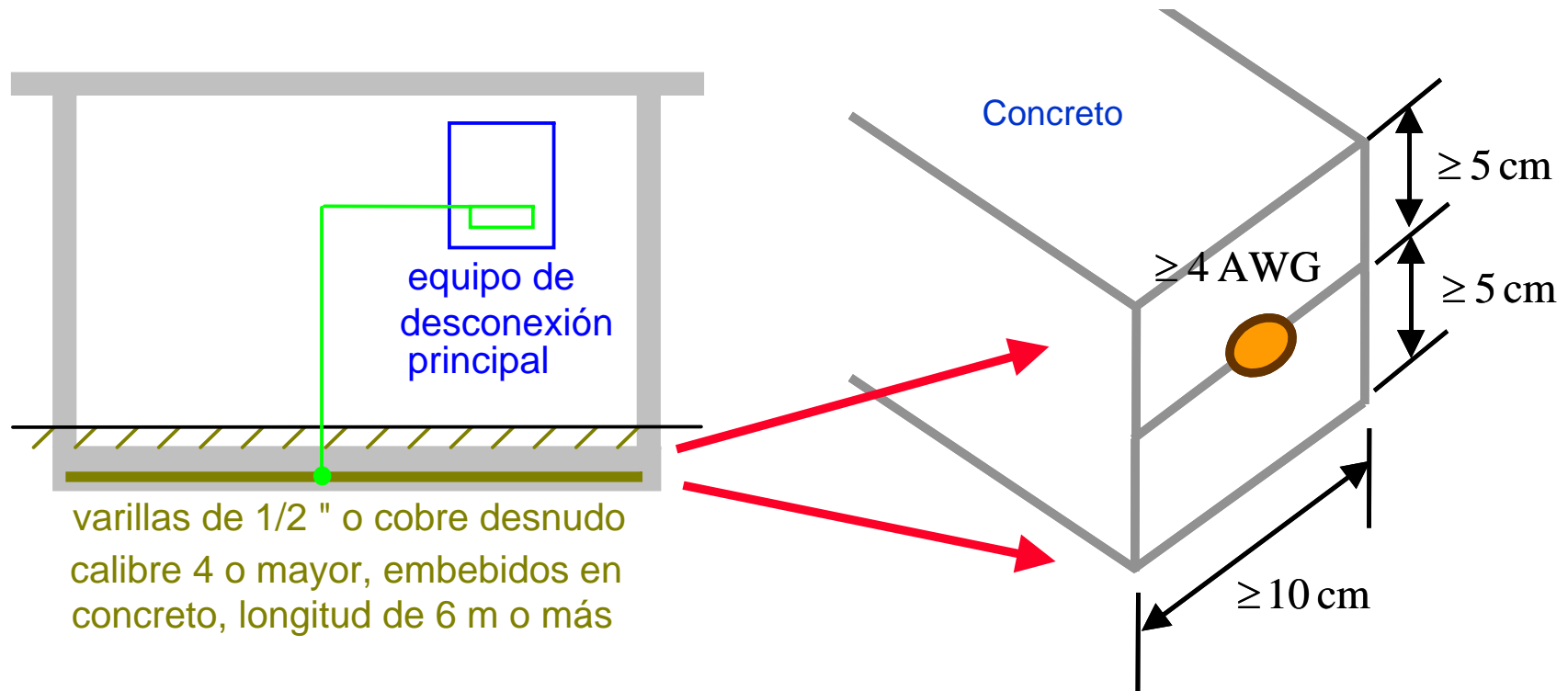
la tubería de agua debe estar por lo menos 3 m en contacto con la tierra



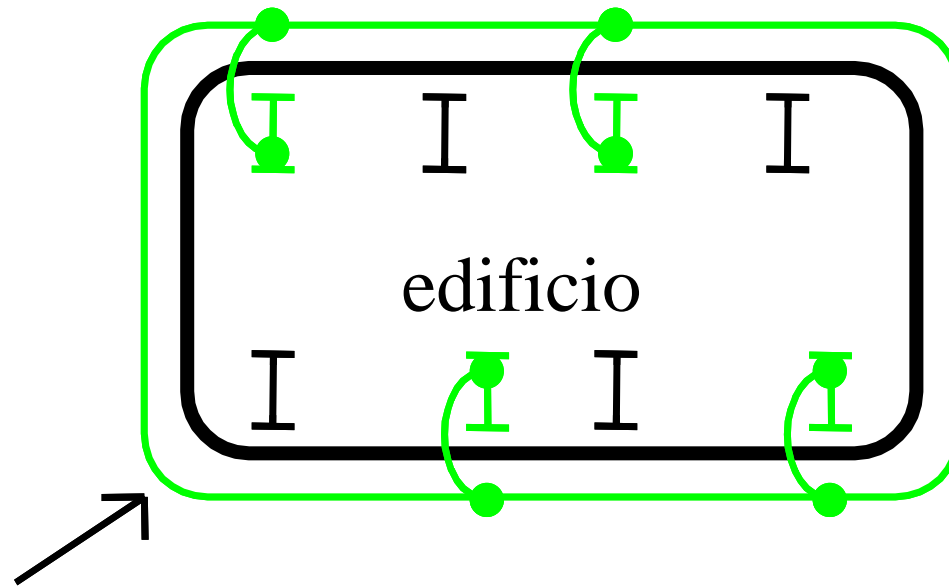
TUBERÍA METÁLICA PARA AGUA

ESTRUCTURA DEL EDIFICIO

NEC 250-81 – Varillas de refuerzo



NEC 250 -81: Anillo de tierra eléctrica



cobre desnudo calibre 2 o mayor
enterrado 2.5 pies o más

Ejemplo 1

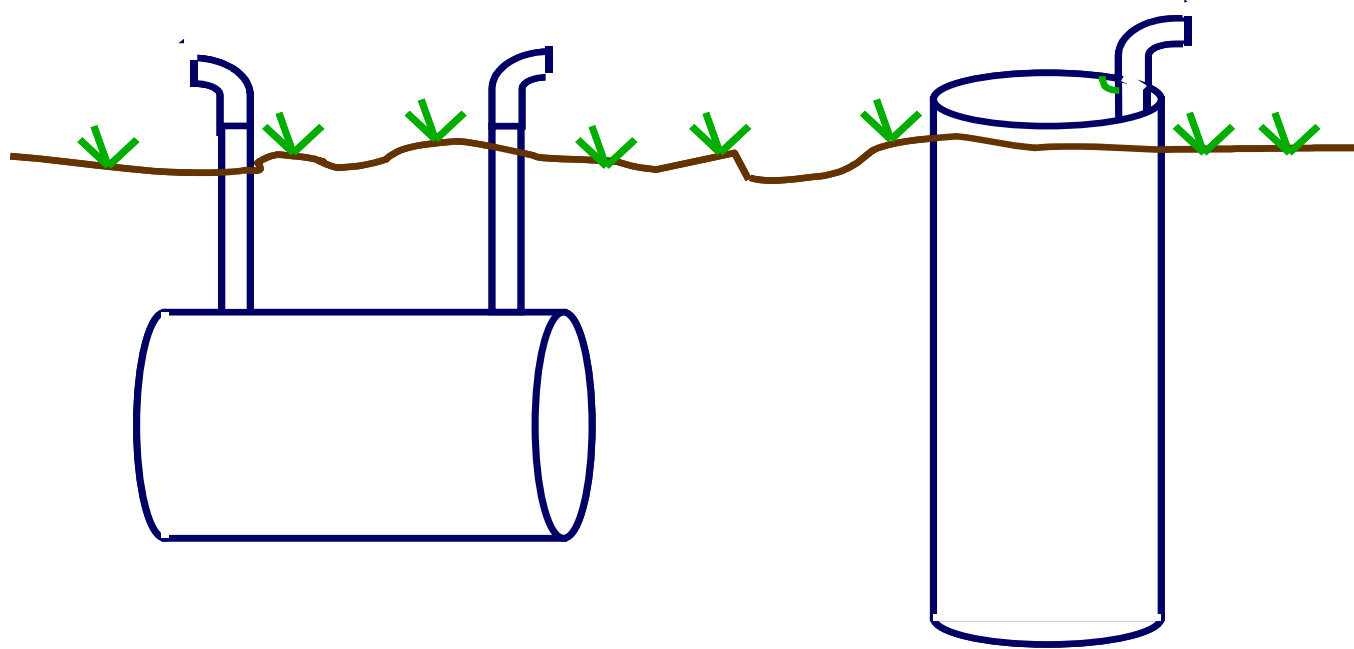
- Un electricista es llamado para supervisar y hacer recomendaciones sobre la instalación eléctrica en un edificio del cual sólo existen las excavaciones de los cimientos. ¿Tiene el electricista la obligación de informar sobre el aprovechamiento de los electrodos naturales tales como varillas de refuerzo de las zapatas y las columnas de la construcción?
- SOLUCIÓN: Sí, de acuerdo con la sección 250-81, los electrodos naturales (varillas de refuerzo, estructura metálica del edificio y tubería para el agua) deben formar parte del sistema de electrodos cuando estén disponibles. Además, el electricista podría proponer que aprovechando que se realizan excavaciones, se realice una a una profundidad de al menos 76 cm. en la periferia del edificio y se ponga un cable desnudo calibre 2 ó más grueso para formar así un anillo de tierra.

Electrodos fabricados , 250-83

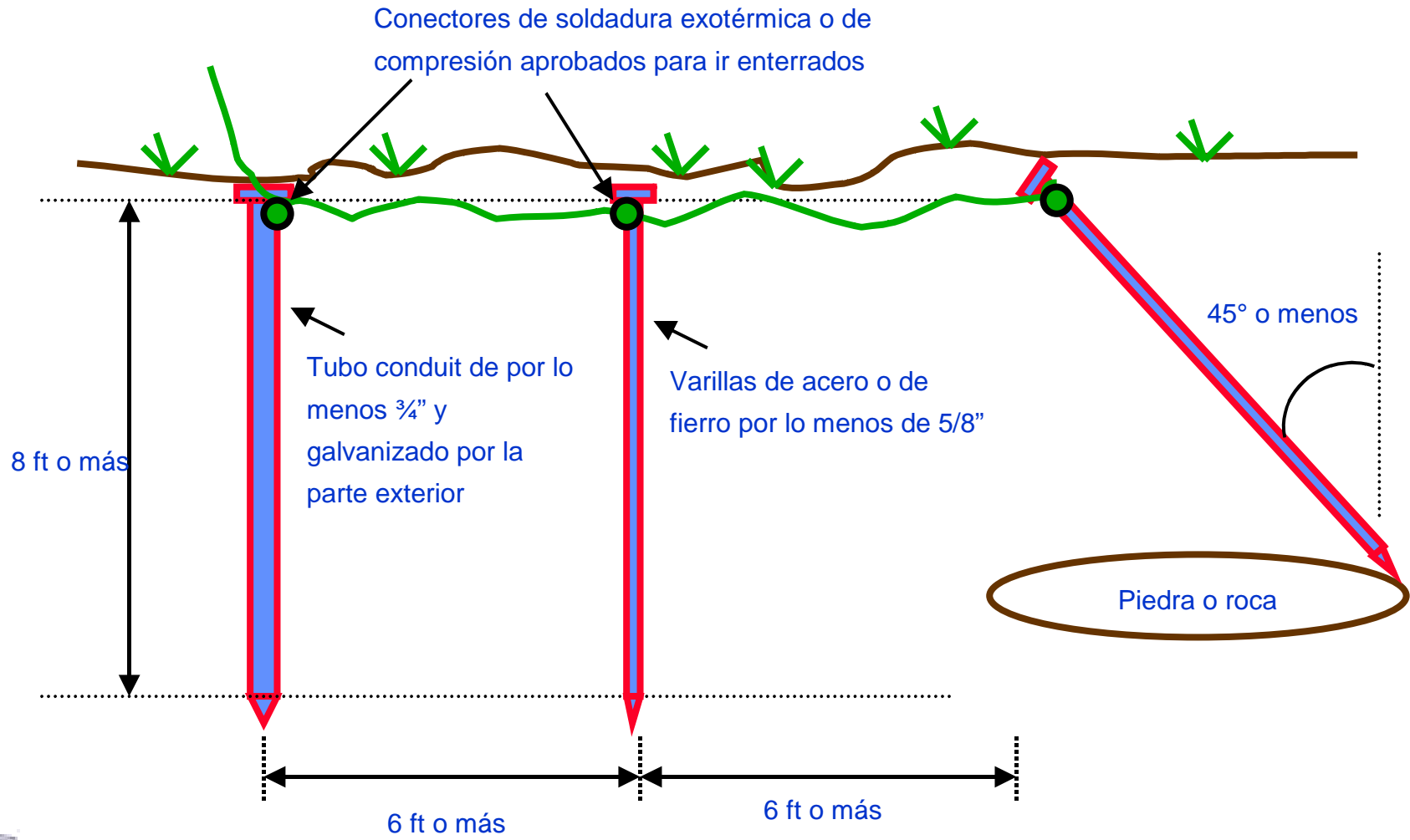
CUANDO NO estén disponibles los electrodos naturales o se requiera un electrodo de suplemento se debe aplicar lo siguiente:

1. **La tubería metálica de gas enterrada NO se debe utilizar como electrodo.**
2. Se pueden emplear sistemas locales, como tanques metálicos o tubos metálicos enterrados. Las paredes metálicas de un pozo y la tubería metálica de agua del mismo pertenecen a esta clasificación.
3. **Electrodos de tubo y de varilla.**
4. **Electrodos de placa.**
5. NO se deben utilizar electrodos de aluminio.

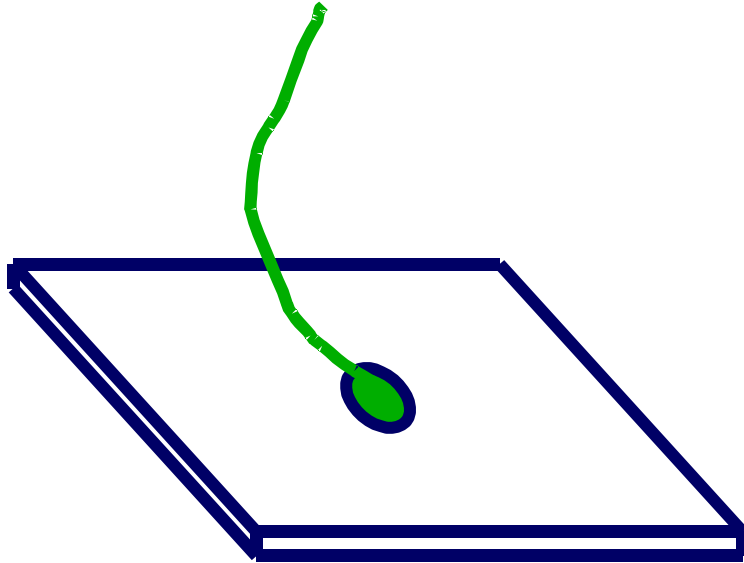
Tanque metálico y tubería metálica enterrada



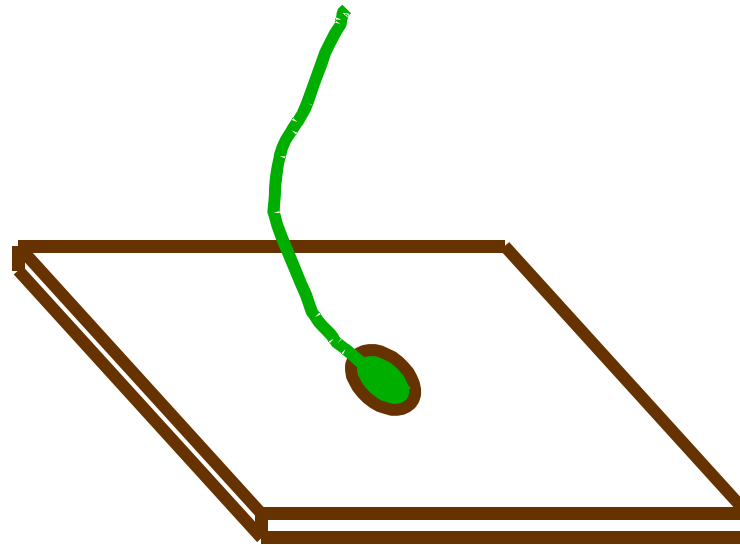
Tubos o varillas como electrodos



Electrodos de placa



Al menos de 2 ft² y de ¼”
(6.35 mm) de espesor si es
de acero



Al menos de 2 ft² y de 1/16 “ (1.52 mm)
de espesor si es de material no ferroso
(cobre)

Electrodos de aluminio

La sección 250-83 prohíbe el uso de electrodos de aluminio



Al paso del tiempo la corrosión vuelve quebradizos los hilos del conductor de aluminio en contacto con el terreno.

Se pueden emplear conductores de aluminio; pero sin hacer contacto con el terreno.

NOM 250-83, 250-80 y 250-86

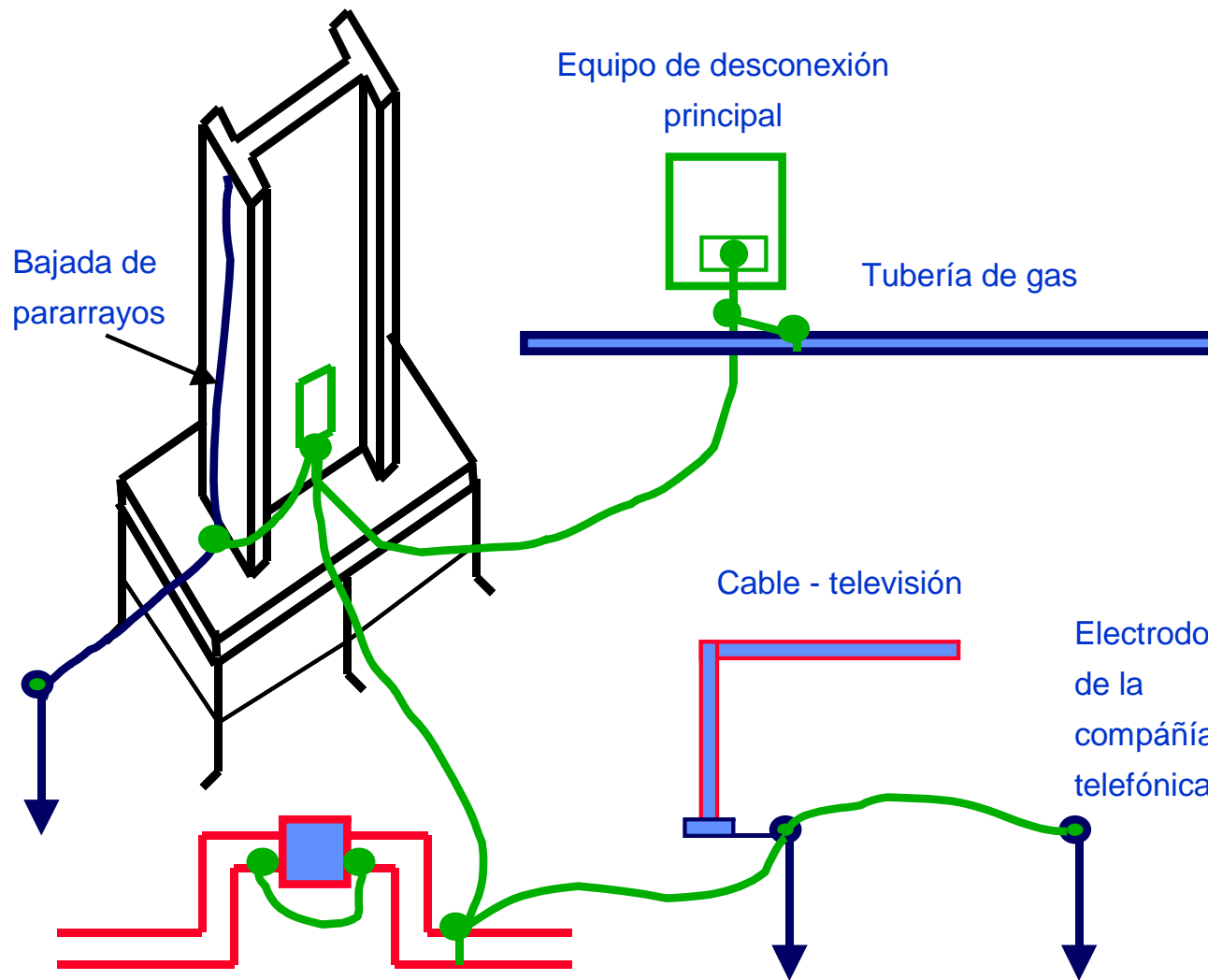
- La tubería metálica de gas enterrada NO se debe utilizar como electrodo (250-83).
- Es imperativa la unión entre el sistema de electrodos y todas las tuberías y ductos metálicos (250-80):
 - la tubería metálica para el agua,
 - la cañería si es metálica,
 - la tubería del aire comprimido
 - los ductos metálicos
 - la tubería metálica de gas
 - los electrodos del sistema pararrayos
- Los electrodos del sistema pararrayos no cuentan como electrodos del sistema eléctrico; pero es conveniente unir los dos sistemas de electrodos (250-86).

Para evitar arqueos

Ejemplo 2

- Realice el diagrama de conexiones de un sistema de electrodos que emplee al menos dos electrodos fabricados o naturales. Indique la unión con los electrodos de otros dos sistemas de electrodos y la unión a tuberías metálicas.
- A continuación se presenta el diagrama solicitado. El sistema de electrodos consta de dos electrodos naturales, **la estructura metálica** y **la tubería para el agua**. El sistema de electrodos se une al **electrodo del pararrayos** y al **electrodo del sistema de televisión cable**. La **tubería para gas** se une también; pero el sistema de electrodos del sistema eléctrico está formado exclusivamente por los dos electrodos naturales

Unión del sistema de electrodos con otros electrodos y con tuberías metálicas



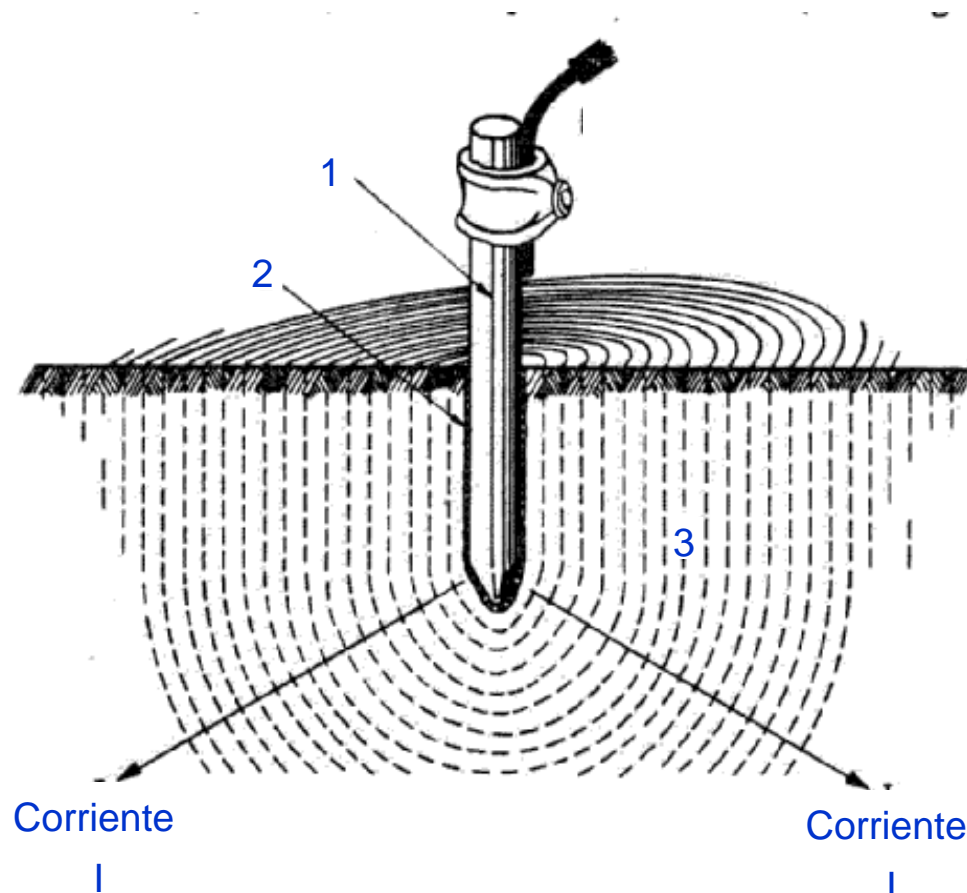
Centro de Estudios de Energía -all

Ejemplo 3

- En un taller en donde fabrican gabinetes metálicos se realizó una excavación de 0.5 m x 0.5 m x 1.0 m de profundidad, y aprovechando la disponibilidad de la placa de acero se instaló una placa de acero de $\frac{1}{4}$ " de espesor y de 45 cm x 45 cm. La conexión se hizo con soldadura exotérmica y un cable desnudo 4/0. ¿La instalación califica como un electrodo apropiado?
- Sí. La instalación corresponde a un electrodo fabricado del tipo placa 250-83d y satisface las condiciones mínimas de dimensiones.

Componentes de la resistencia de un electrodo

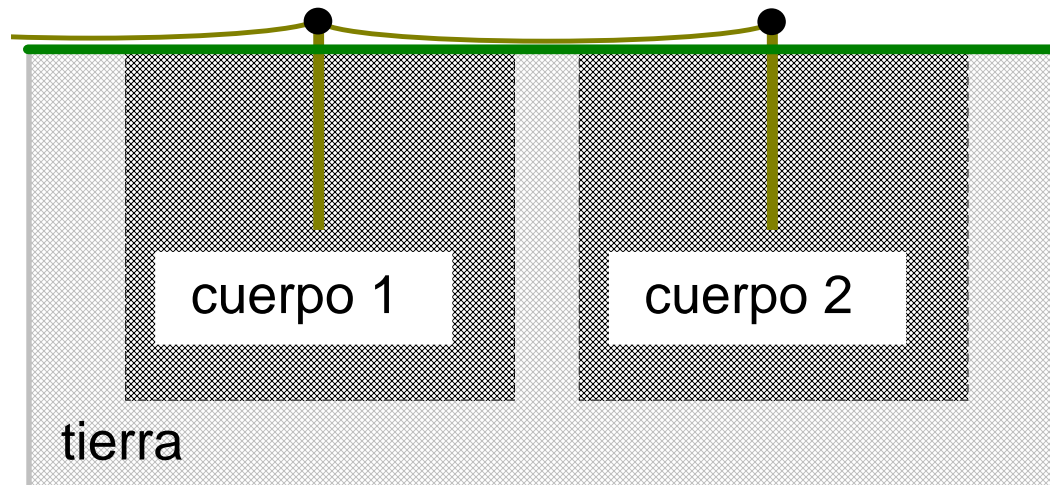
1. Resistencia del electrodo (metal).
2. Resistencia de contacto entre el electrodo y el terreno.
3. Resistencia del terreno (resistencia del cuerpo de tierra).



Resistencia de los electrodos

LA RESISTENCIA de los electrodos fabricados debe ser menor a 25Ω , y en caso de que la resistencia sea mayor hay que agregar otro electrodo en paralelo a una distancia de por lo menos 1.8 m (250-84).

Nota: La efectividad de poner en paralelo varillas de más de 8 ft se mejora si se separan más de 8 ft



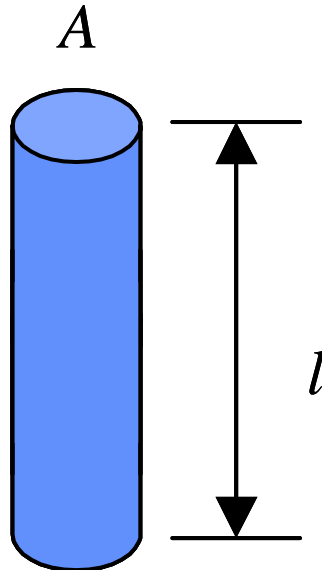
Además de agregar electrodos en paralelo, otras maneras de disminuir la resistencia son:

1. Aumentar la longitud del electrodo.
2. Disminuir la resistividad del terreno alrededor del electrodo.

Ejemplo 4

- Se instalan dos electrodos tipo varilla de tres metros de longitud separados seis metros entre sí y se unen empleando soldadura exotérmica. Un segundo grupo de ingenieros de la misma compañía llega a revisar la instalación y mide la resistencia de los dos electrodos en paralelo. La resistencia medida es del orden de 30Ω , por lo que indican en su reporte que se deben instalar más electrodos en paralelo hasta lograr 25Ω . Quienes instalaron los dos electrodos en paralelo argumentan que no es necesario. ¿Qué grupo tiene la razón?
- SOLUCIÓN: La sección 250-84 indica que en el caso de instalar un electrodo fabricado es necesario agregar otro electrodo separado al menos 1.8 m. El primer grupo ya instaló dos electrodos separados seis metros entre sí, independientemente del valor de resistencia medido ya satisfacen los requerimientos de la sección 250-84, por lo que el grupo que instaló tiene la razón.

RESISTENCIA de un elemento con sección transversal uniforme

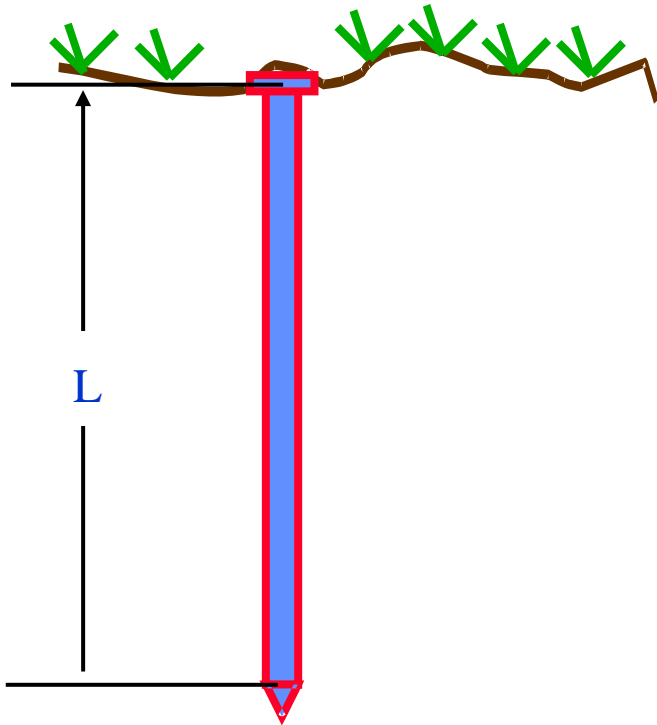


$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ , } \Omega$$

ρ es la resistividad en $\Omega \text{ m}$,
 l es la longitud en m y
 A es el área en m^2

ρ cu, 20°C, estirado en frío = 1.77 E-8 $\Omega \text{ m}$
 ρ típica de terreno = 100 $\Omega \text{ m}$
La relación es de 5.5 E9

Resistencia de un electrodo tipo varilla



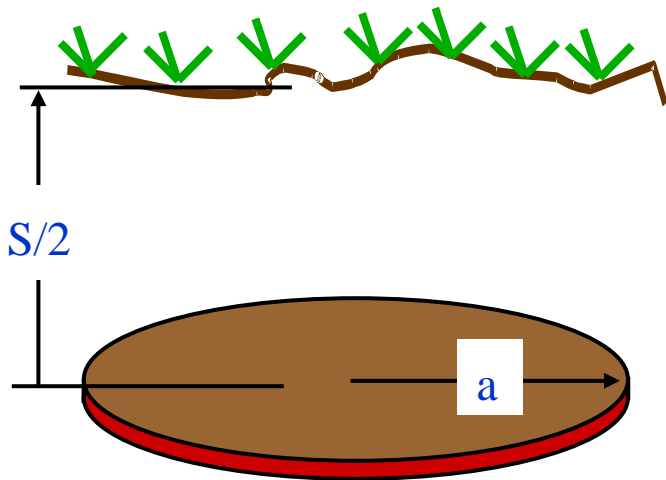
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{a} \right) - 1 \right)$$

ρ es la resistividad en $\Omega \text{ m}$,

L es la longitud en m y

a es el radio de la varilla en m

Resistencia de un electrodo formado por una placa redonda



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

ρ es la resistividad en $\Omega \text{ m}$,
 $s/2$ es la profundidad en m y
 a es el radio de la placa en m

Ejemplo 5

- Un electrodo del tipo fabricado de uso común en México es la varilla de **tres metros y 5/8 de pulgada de diámetro**. Encuentre una expresión para la resistencia del electrodo en función de la resistividad en Ω m.

- Sustituyendo en

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{a} \right) - 1 \right)$$

- y dado que 5/8" son 0.0159 m tenemos:

$$R = \frac{\rho}{2.9820}, \Omega$$

Ejemplo 6

- En un hospital de la localidad se instalaron electrodos de tubo conduit de 1" de diámetro y seis metros de longitud (tramos de tres metros unidos con coples roscados sin teflón). La resistencia medida en cada electrodo fue de 6 Ω . Encuentre la resistividad del terreno.

- SOLUCIÓN: De

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{a} \right) - 1 \right)$$

- se despeja la resistividad y el resultado es **34.56** Ω m

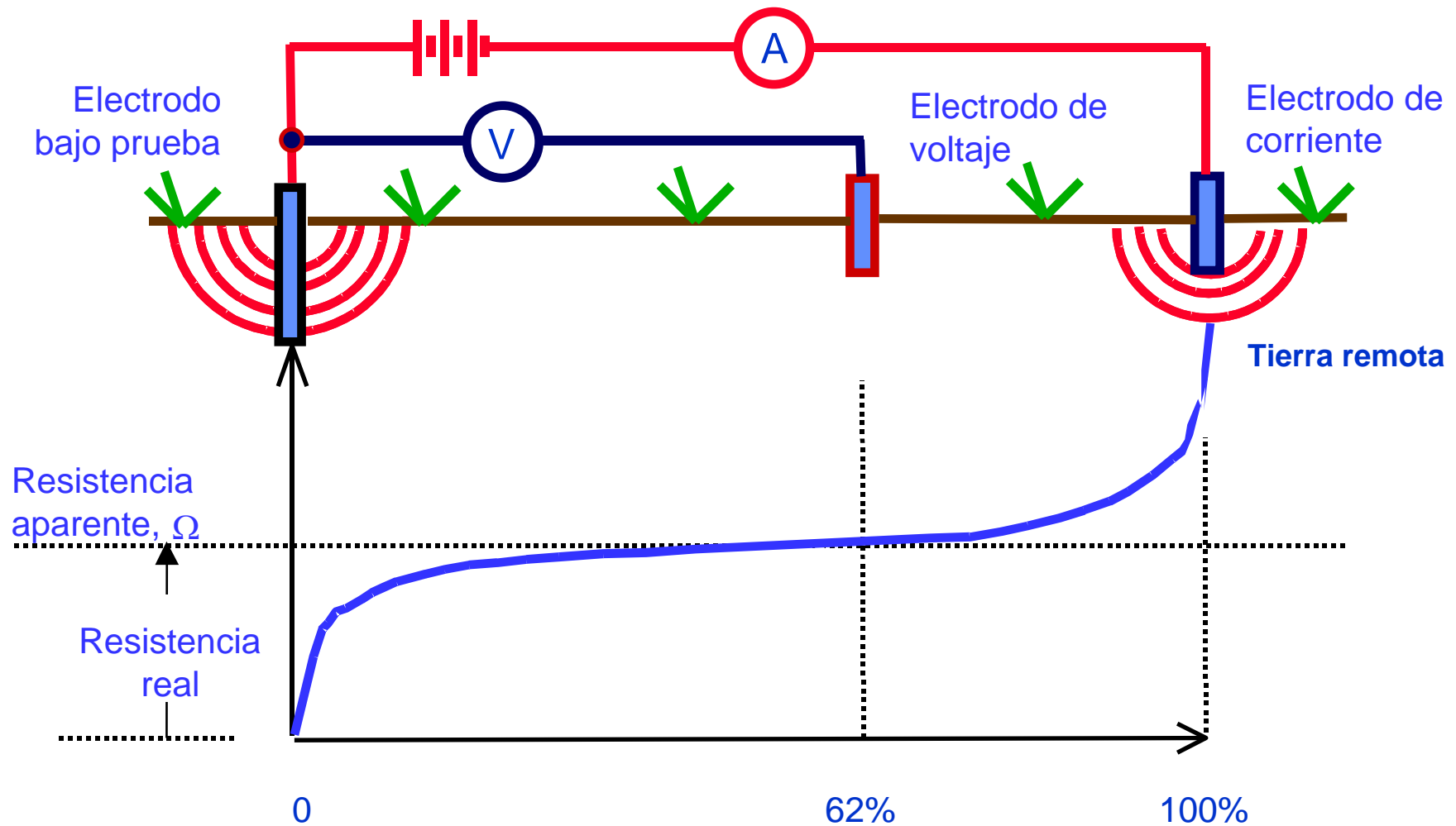
Ejemplo 7

- Un electrodo redondo de placa acero se instaló horizontalmente en el fondo de una excavación de un metro. El diámetro de la placa es un metro y de $\frac{1}{4}$ " de espesor. La resistividad del terreno es $100 \Omega \text{ m}$. Calcule la resistencia del electrodo.
- El radio del electrodo, a , es 0.5 m. El doble de la profundidad es $s = 2 \text{ m}$, sustituyendo en

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

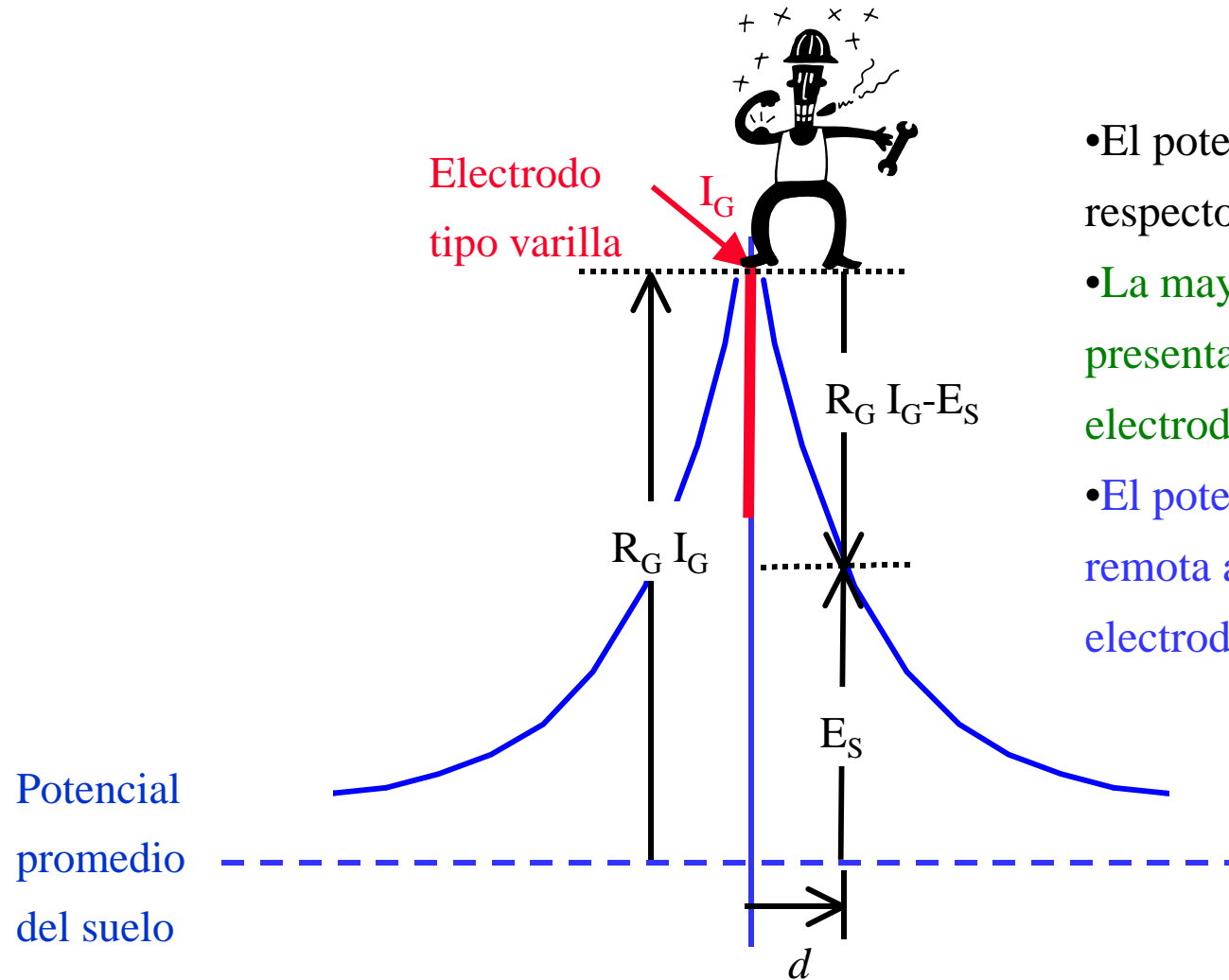
Se obtiene $R = 28.85 \Omega$.

Medición de Resistencia



Tierra remota es el punto más allá del cual ya no se obtiene reducción apreciable en la impedancia del electrodo o de la red de tierras. Es cualquier punto del suelo lo suficientemente alejado del electrodo para no formar parte del cuerpo de tierra

Corriente en un electrodo



- El potencial del electrodo respecto a tierra remota es $R_G I_G$
- La mayor parte del potencial se presenta a poca distancia del electrodo.
- El potencial respecto a tierra remota a una distancia d del electrodo es E_s .

Ejemplo 8

- Considere un electrodo con resistencia de 25Ω y que una falla hace que el electrodo conduzca 300 A.
- A) ¿Cuál es el potencial del terreno en el mismo sitio que el electrodo respecto a tierra remota?
- B) Suponiendo que a 50 cm del electrodo el potencial del suelo en relación a tierra remota es de 2000 V. ¿Cuál es el potencial que experimentaría una persona con un pie sobre el electrodo y el otro a 50 cm?

SOLUCIÓN:

- A) El voltaje del electrodo respecto a tierra remota es $R_G I_G = 7500 \text{ V}$.
- B) E_S a una distancia del electrodo $d = 50 \text{ cm}$ es 2000, V;
 $R_G I_G - E_S = 5500 \text{ V}$.

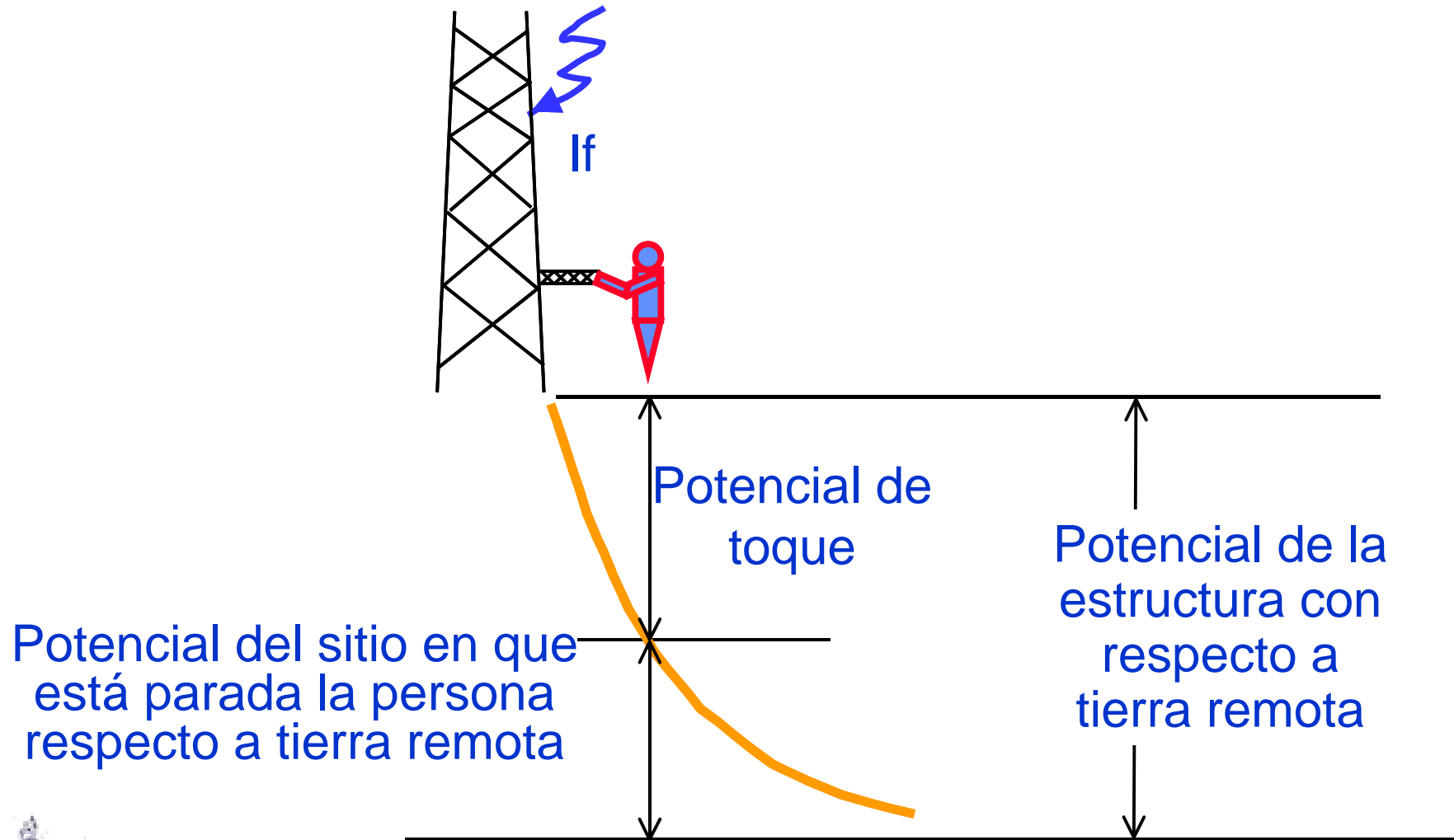
Ejemplo 9

- Considere un sistema de electrodos con resistencia de 0.5Ω y que una falla hace que el grupo de electrodos lleve al suelo 2800 A .
- A) ¿Cuál es el potencial del terreno en el mismo sitio que el electrodo respecto a tierra remota?
- B) Suponiendo que a 50 cm del electrodo el potencial del suelo en relación a tierra remota es de 700 V . ¿Cuál es el potencial que experimentaría una persona con un pie sobre el electrodo y el otro a 50 cm ?

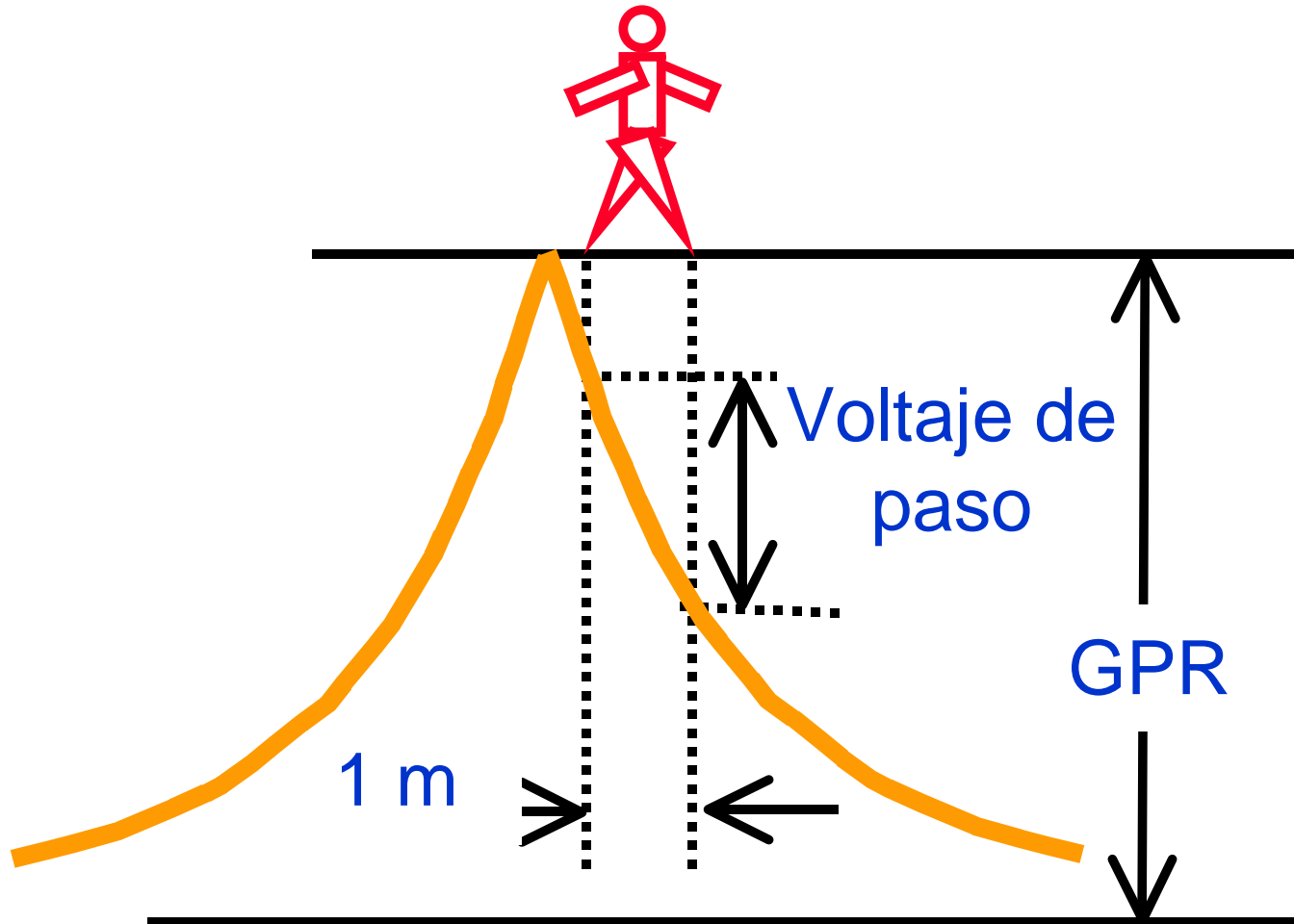
SOLUCIÓN:

- A) El voltaje del electrodo con respecto a tierra remota es $R_G I_G = 1400 \text{ V}$.
- B) E_S a una distancia del electrodo $d = 50 \text{ cm}$ es 700 V ;
 $R_G I_G - E_S = 700 \text{ V}$.

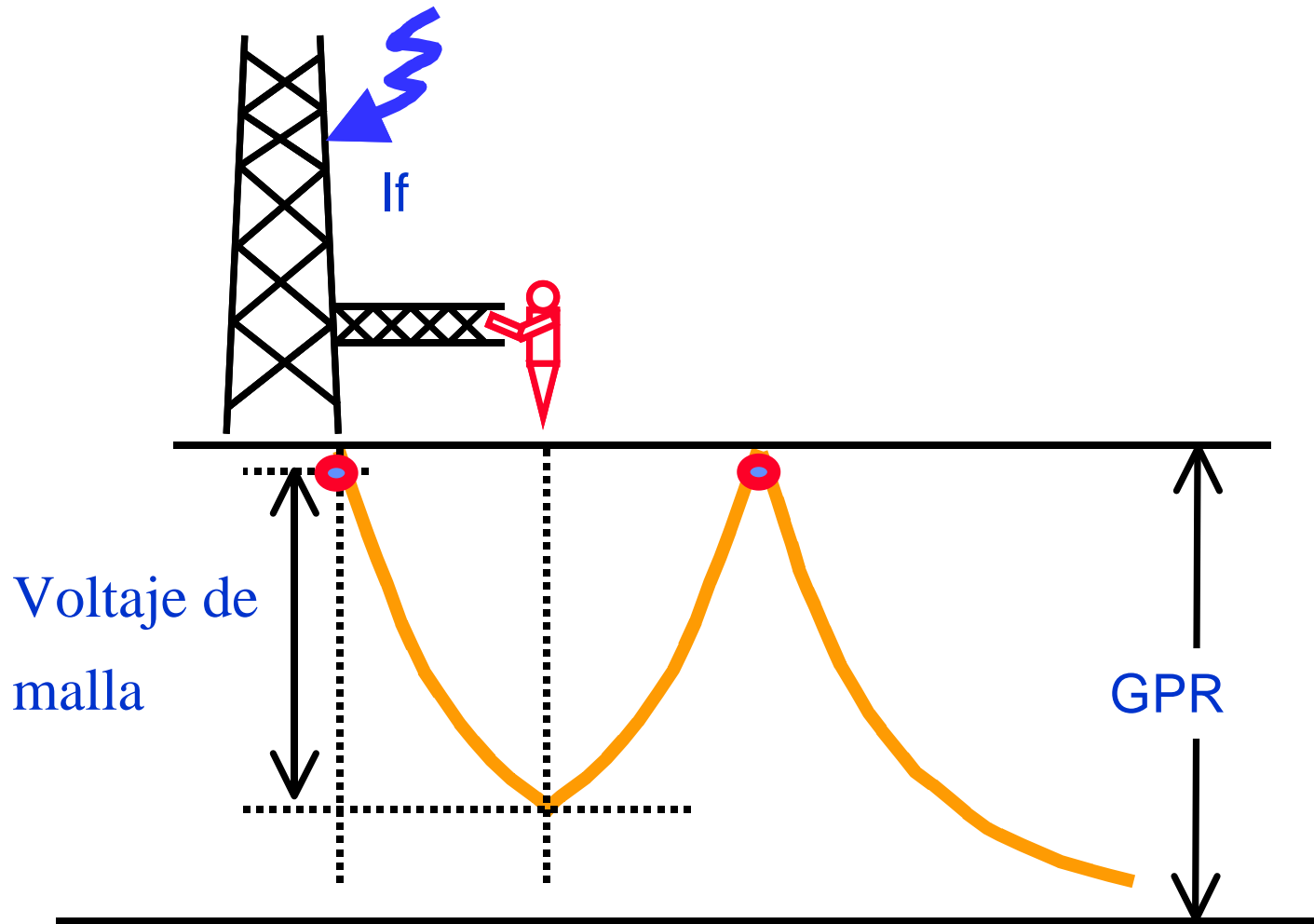
Voltaje de toque



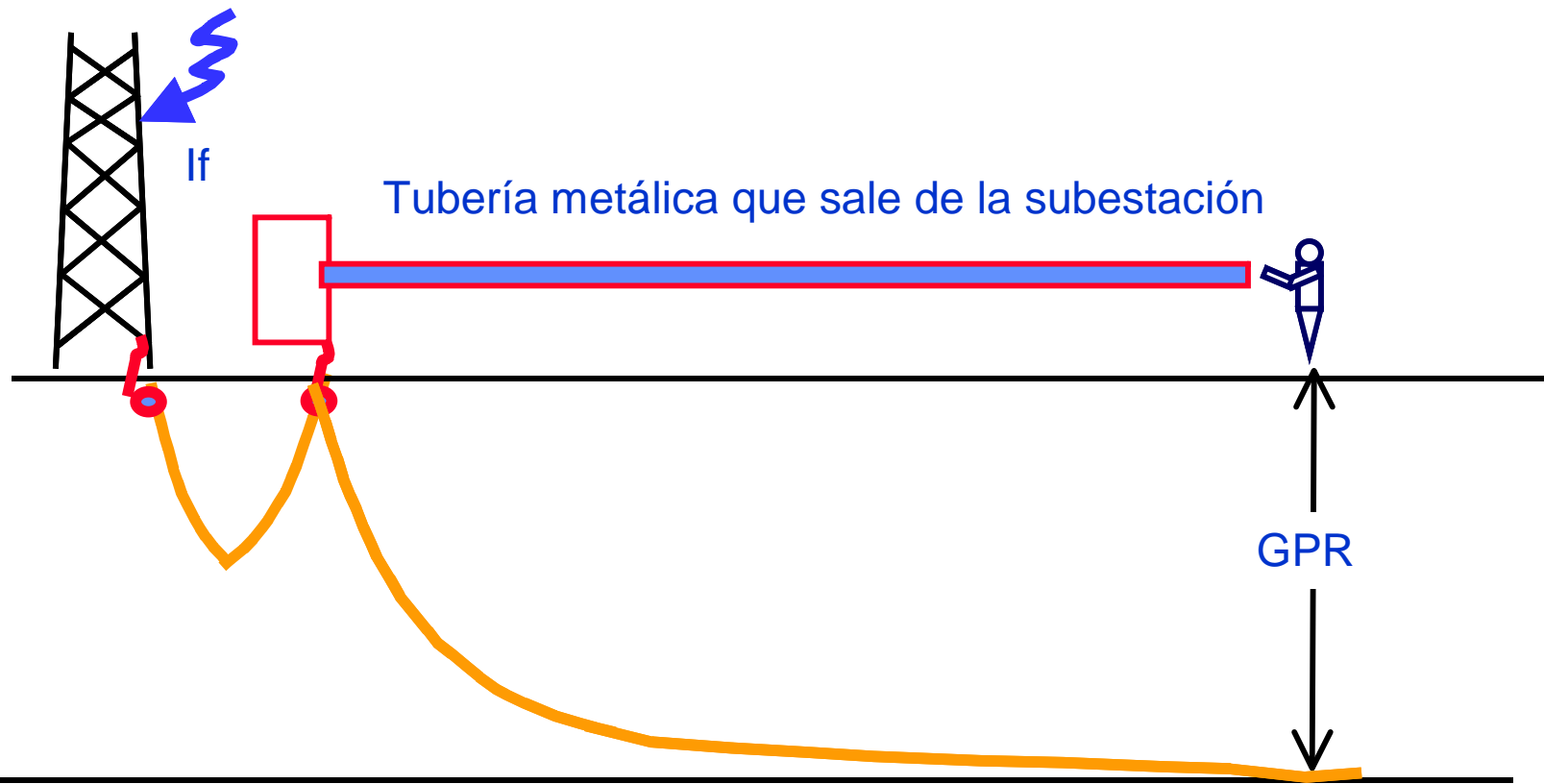
Voltaje de paso



Voltaje de malla



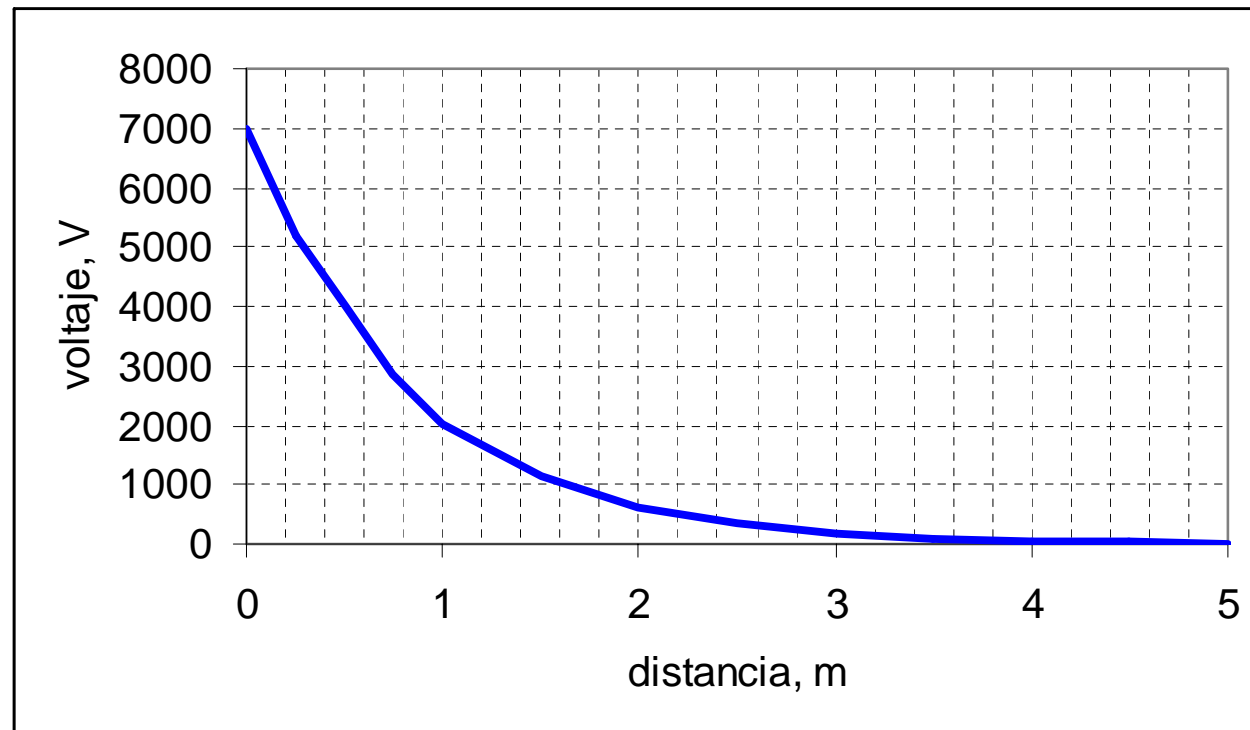
Voltaje transferido



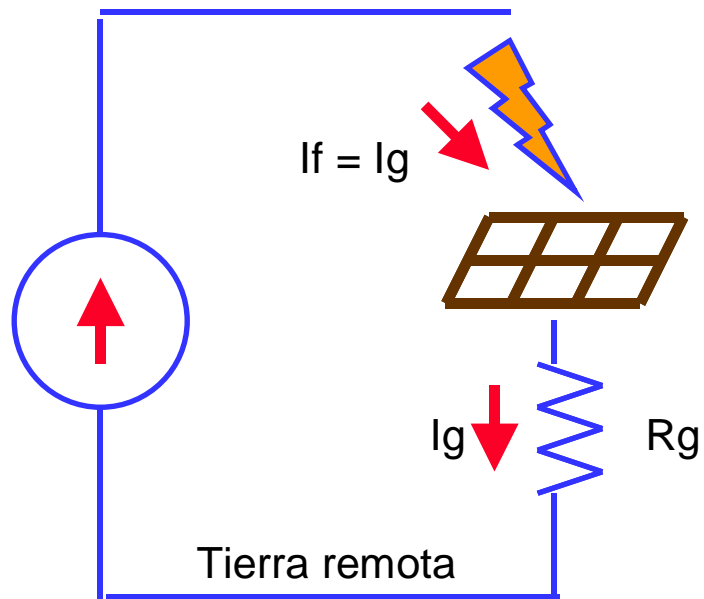
Ejemplo 10

- En relación al perfil del voltaje en el terreno mostrado en la Figura. ¿Cuál es la elevación de potencial en el terreno, GPR? Si la resistencia del electrodo es 35Ω . ¿Cuál es el valor de la corriente?

SOLUCIÓN: 7 000 V; 200 A.



Sin retorno metálico



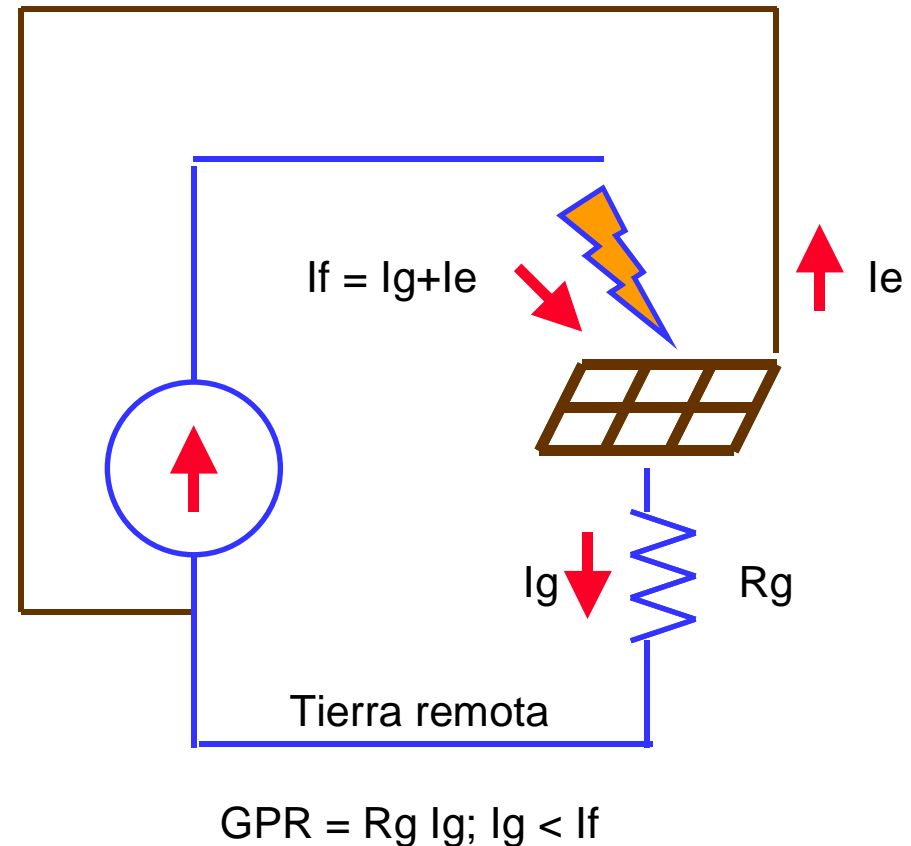
$$GPR = R_g I_g; I_g = I_f$$

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 $R_g I_f$

Con retorno metálico

Si la subestación es alimentada por una línea aérea con hilos de guarda, con un hilo neutro o se alimenta con cable subterráneo y ambos extremos del blindaje están puestos a tierra, entonces la subestación cuenta con retorno metálico y la corriente de falla a tierra se divide, la mayor parte se va por el retorno metálico y el resto se va por el terreno, la corriente por el sistema de electrodos es menor que la corriente de falla y la elevación de potencial del terreno es menor



b) Con retorno metálico