

Sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas

Contenido

Sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas	96
Circuitos equivalentes accidentales	100
Procedimiento de diseño	103
Cálculo de los potenciales máximos de paso y de contacto	115
Puesta a tierra de la malla de alambre que rodea el terreno de una subestación eléctrica	118

Sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas

Basado en la guía de la IEEE para la seguridad en una subestación de corriente alterna puesta a tierra IEEE Std 80-2000

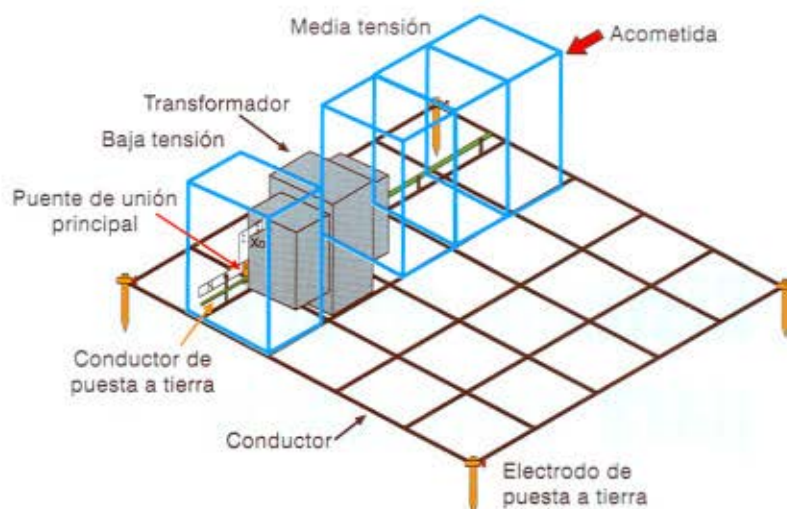


Fig. 79 Malla de puesta a tierra en una subestación eléctrica

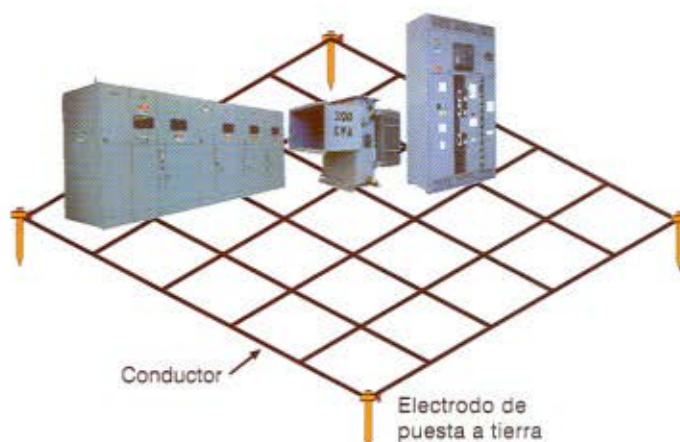


Fig. 80 Malla de puesta a tierra en una subestación eléctrica

En la puesta a tierra de una subestación eléctrica tipo interior o abierta, se deberá de realizar primero un diseño de la malla de tierra, basado en la guía de la IEEE para la seguridad en una subestación de corriente alterna puesta a tierra IEEE Std 80-2000, debido a que cuando ocurre una falla a tierra en los devanados de media tensión o alta tensión, la corriente de falla a tierra al tomar su trayectoria de retorno a su lugar de origen por el terreno natural provocará una tensión de paso y tensión de contacto que puede ser peligrosa para el ser humano y los animales.

En la figura 79 se ilustra una malla de tierra compuesta por una cuadrícula formada por conductores de cobre, electrodos de puesta a tierra, derivaciones con conductor de cobre para la puesta a tierra de los

gabinetes de media tensión en 2 puntos mínimo, puesta a tierra de la envolvente del transformador, puesta a tierra del conductor neutro.

Una subestación eléctrica es un conjunto de equipos eléctricos, cuya función principal es la transformación de voltajes, la conexión y desconexión de circuitos eléctricos.

Los equipos eléctricos principales de una subestación eléctricas son:

- ☐ Transformadores de potencia o distribución.
- ☐ Interruptores de potencia.
- ☐ Cuchillas desconectadoras o de paso.
- ☐ Apartarrayos.
- ☐ Transformadores de corriente.
- ☐ Transformadores de potencial.
- ☐ Equipo de medición por parte del suministrador.
- ☐ Fusibles.
- ☐ Resistencias o reactancias de puesta a tierra.

El sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas tiene como finalidad:

- Proveer los medios adecuados para transportar las corrientes eléctricas dentro de la tierra (terreno natural), bajo condiciones normales y de falla, sin exceder los límites de operación del equipo sin afectar la continuidad del servicio.
- Asegurar que las personas en la vecindad de industrias puestas a tierra no estén expuestas a peligros de descarga eléctrica crítica.

La práctica de la puesta a tierra segura se esfuerza para controlar la interacción de dos sistemas de puesta a tierra:

- La tierra intencional consiste en los electrodos enterrados a la misma profundidad de la superficie de la tierra.
- Una tierra accidental, es cuando una persona está expuesta temporalmente a un gradiente de potencial en la vecindad de una industria puesta a tierra.

La mayoría de las personas asumen que cualquier objeto puesto a tierra puede tocarse sin sufrir daño alguno.

Si el sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica tiene una resistencia a tierra baja, no garantiza que sea segura.

Cuando la corriente de falla de fase a tierra entra a la tierra, causará que se presente potencial de paso a tierra elevados.

Si el suministro se realiza con un conductor con cubierta protectora, y esta cubierta es utilizada como trayectoria de retorno de una parte de la corriente de falla a tierra directamente a la fuente de origen; proveerá una trayectoria de baja impedancia en paralelo a la trayectoria de retorno del circuito, por lo que el potencial a tierra será mucho menor.

La corriente de falla a tierra que entra a la tierra (terreno natural) deberá de analizarse.

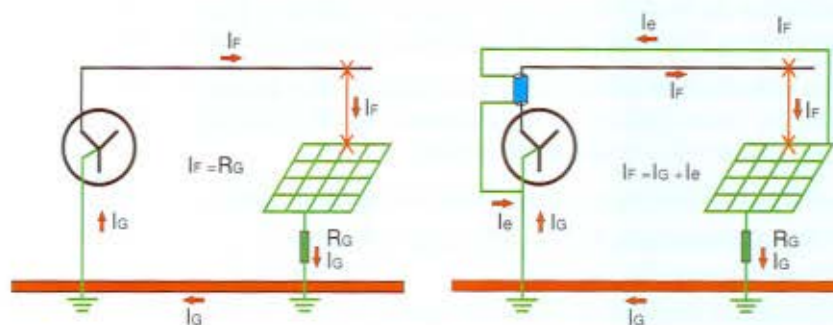
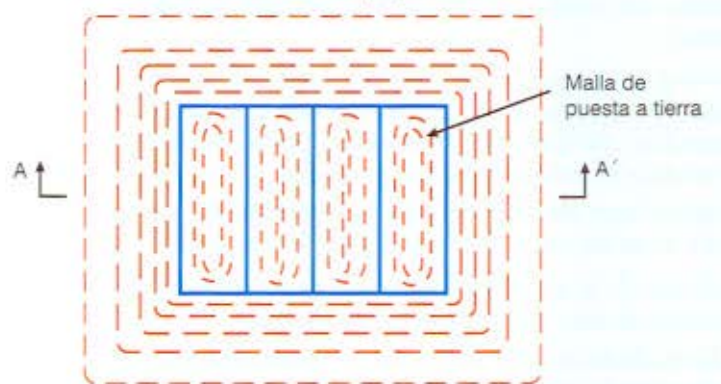


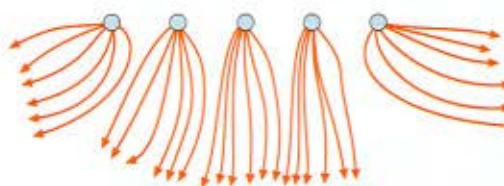
Fig. 81 Falla a tierra en una subestación eléctrica

Durante condiciones de falla a tierra, la corriente que circula por la tierra (terreno natural) producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de la subestación eléctrica.

Diagrama de planta de un sistema de puesta a tierra mostrando la líneas equipotenciales



Nivel de piso



Corriente fluyendo por la tierra (terreno natural)



Potencial en la tierra sobre la superficie durante una falla de cortocircuito.

Fig. 82 Gradientes de potencial en una malla de tierra

Los efectos que produce la corriente eléctrica que pasa a través del cuerpo humano dependen de la duración, magnitud y frecuencia. La consecuencia más peligrosa es cuando el corazón esté expuesto a la condición de fibrilación ventricular.

Es muy significativo que los dispositivos de protección contra sobrecorriente liberen la falla a tierra lo más rápido que sea posible por las siguientes razones:

- La posibilidad que una persona esté expuesta a una descarga eléctrica se reduce significativamente, en contraste a cuando las corrientes de falla a tierra que persisten o duran horas, trayendo como consecuencia el posible inicio de un incendio.
- Se reduce la posibilidad de daño o muerte de una persona si se reduce la duración de la corriente, que fluirá por el cuerpo humano.

La magnitud y la duración de la corriente eléctrica que pase a través del cuerpo humano a 50 o 60 Hz deberán ser menores a la corriente que pudiera producir fibrilación ventricular del corazón.

Basados en los estudios de Dalziel y Lee se asume que el 99.5% de las personas pueden estar seguras sin fibrilación ventricular aplicando la siguiente fórmula:

Para personas de 50 Kg de peso

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{ec. 1}$$

para $t_s = 1$ seg , resulta un valor de corriente de 116 mA

para $t_s = 0.1$ seg , resulta un valor de corriente de 367 mA

Para personas de 70 Kg de peso

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{ec. 2}$$

Para el diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica, se asume que la resistencia en serie con el cuerpo humano es:

- A) La resistencia de contacto de mano a pie es igual a cero.
- B) Las resistencias del zapato y guante es igual a cero.

Circuitos equivalentes accidentales

Circuito de una persona tocando una envolvente o estructura puesta a tierra

Potencial de toque a una estructura puesta a tierra

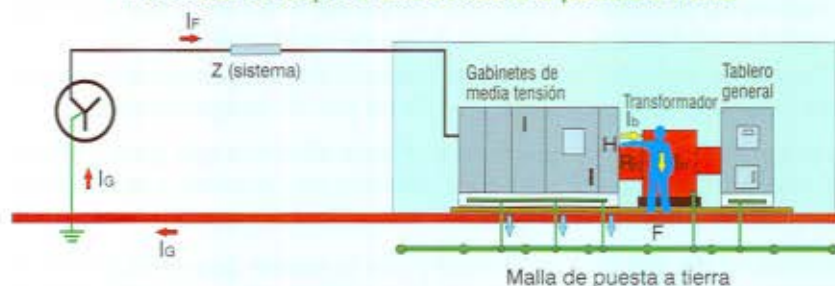


Fig. 83 Potencial de toque

La corriente tolerable por el cuerpo humano, está definida por las ecuaciones 1 y 2, se utiliza para definir la tensión total tolerable cuando ocurre una falla de cortocircuito a tierra.

La corriente que circulará por el cuerpo humano I_b es igual a la corriente tolerable por el cuerpo humano I_b .

La figura 83 muestra un circuito eléctrico, cuando ocurre una falla a tierra, la corriente de falla I_F circulará por el sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica y por la persona que se encuentra tocando en ese momento un gabinete puesto a tierra.

Varias impedancias están involucradas en el circuito. En la figura 84, el punto H es un punto del sistema que tiene el mismo potencial que la malla de puesta a tierra, dentro de la cual la corriente de falla a tierra circulará.

Diagrama de impedancias del potencial de toque

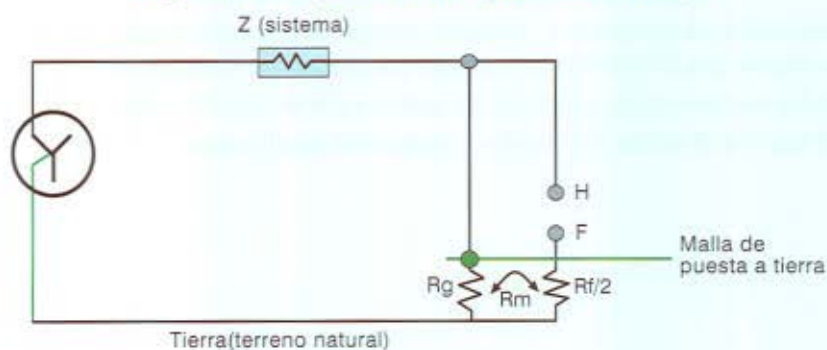


Fig. 84 Diagrama de impedancias del potencial de toque

El punto F es un área pequeña sobre la superficie de la tierra que está en contacto a través de los dos pies de la persona.

La corriente I_b circulará del punto H a través del cuerpo de la persona a tierra por el punto F.

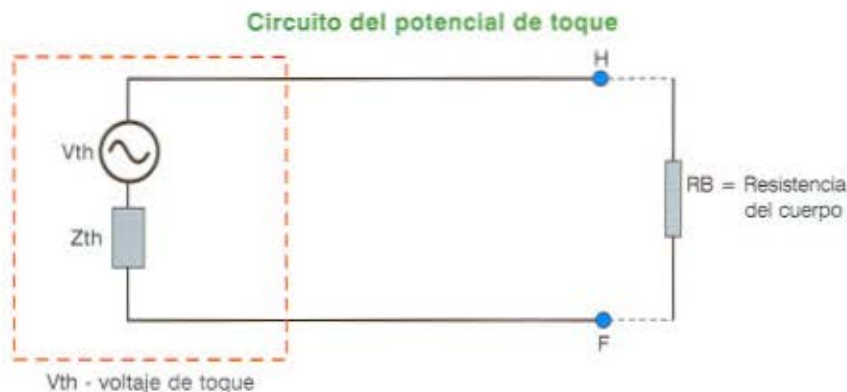


Fig. 85 Circuito del potencial de toque

El voltaje de Thevenin V_{th} es el voltaje entre los puntos H Y F cuando la persona no está presente.

La impedancia Z_{th} es la impedancia vista de los puntos H y F con las fuentes de voltaje en cortocircuito.

La corriente I_b a través del cuerpo humano que está en contacto con los puntos H y F es:

$$I_b = \frac{V_{th}}{Z_{th} + R_b} \quad \text{ec. 3}$$

R_b - Resistencia del cuerpo humano en Ohms

$$Z_{th} = \frac{R_f}{2} \quad \text{ec. 4}$$

R_f - resistencia de un pie en Ohms

La resistencia a tierra en Ohms de un disco metálico de radio b (mts) sobre una superficie de tierra homogénea ρ (Ohms-metro) está dada por la fórmula de **Laurent**:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad \text{ec. 5}$$

Tradicionalmente, un disco metálico representando un pie toma una placa circular de radio de 0,08 mts, por lo que:

La impedancia equivalente para un circuito de voltaje de toque es:

$$Z_{th} = 1,5 \rho \quad \text{ec. 6}$$

La tensión de toque total permisible que tolera el cuerpo humano es:

$$E_{\text{toque}} = I_b (R_b + 1,5 \rho) \quad \text{ec. 7}$$

Circuito de una persona caminando dentro de una subestación eléctrica

Potencial de paso dentro de una subestación eléctrica

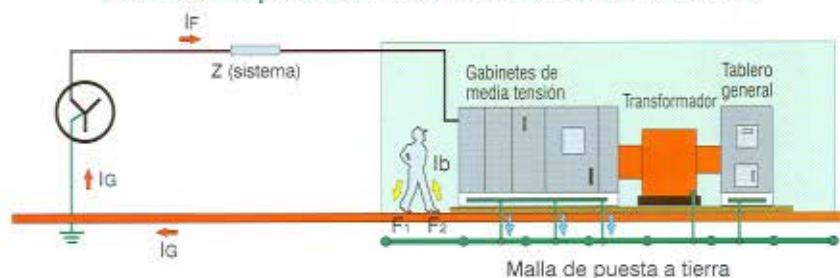


Fig. 86 Potencial de paso

La figura 86 muestra un circuito eléctrico cuando ocurre una falla a tierra, la corriente de falla I_f circulará por el sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica.

La corriente I_b circulará por uno de los pies F_1 de la persona al otro pie F_2 .

Los puntos F_1 y F_2 son áreas sobre la superficie de la tierra que están en contacto con los dos pies, respectivamente.

13

Circuito del potencial de paso

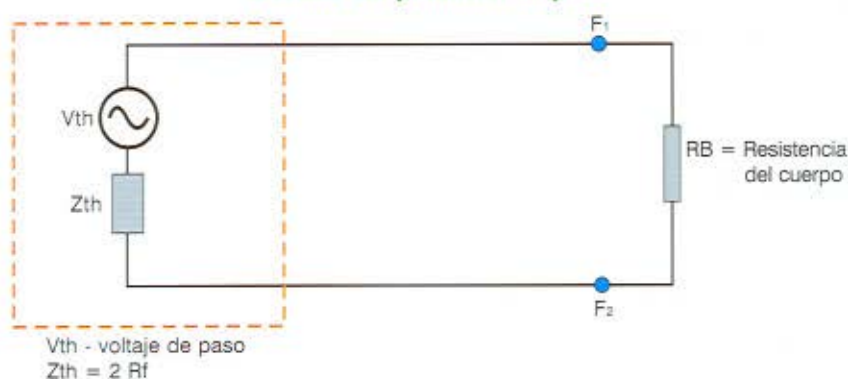


Fig. 87 Circuito del potencial de paso

En la figura 87 se observa el teorema de Thevenin representando los dos puntos F_1 y F_2 , el voltaje V_{th} es el voltaje entre las terminales F_1 y F_2 cuando la persona no está presente.

La impedancia de Thevenin Z_{th} es la impedancia del sistema vista por las terminales F_1 y F_2 con las fuentes de voltaje cortocircuitadas.

La corriente I_b a través del cuerpo humano está dada por la ecuación No. 3.

El voltaje de paso está dado por:

$$Z_{th} = 2R_f \text{ ec. 8}$$

R_f – resistencia de un pie en Ohms.

La impedancia equivalente para un circuito de voltaje de paso

$$Z_{th} = 6,0 \rho \text{ ec. 9}$$

El voltaje de paso total permisible tolerable por el cuerpo humano es

$$E_{\text{paso}} = I_B (R_B + 6,0 \rho) \text{ ec. 10}$$

Procedimiento de diseño

Con los potenciales de paso y de contacto tolerables por el cuerpo humano, se puede iniciar el diseño y la construcción del sistema de puesta a tierra para una subestación eléctrica, utilizando el siguiente procedimiento paso a paso:

- A) Investigación de las características del terreno, la resistividad eléctrica.
- B) Calcular la máxima corriente de falla a tierra.
- C) Diseño preliminar del sistema de puesta a tierra.
- D) Cálculo de la resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra.
- E) Cálculo del máximo potencial de malla.
- F) Cálculo de los potenciales de paso en la periferia.
- G) Cálculo de los voltajes de paso y de contacto en el sistema de puesta a tierra.
- H) Investigación de los potenciales de transferencia y puntos especiales de peligro.
- I) Corrección o afirmación del diseño preliminar.
- J) Construcción del sistema de puesta a tierra.
- K) Medición en campo de la resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra.

Efecto de la resistividad del suelo

La investigación del lugar donde se va a instalar una subestación eléctrica es de suma importancia para la determinación de la composición del suelo. En la siguiente tabla se indica los valores de resistividad que se pueden obtener de un terreno homogéneo.

Tabla 1

Tipo de terreno	Resistividad en Ohms-metro
Suelo orgánico mojado	10
Suelo húmedo	100
Suelo seco	1000
Cama de roca	10 000



Equipo de medición

Debido a que los terrenos no tienen un suelo uniforme es necesario realizar mediciones de la resistividad real del terreno, con instrumentos de medición adecuados y calibrados, utilizando uno de los siguientes métodos:

- 1.- Método de Wenner o de los cuatro puntos.
- 2.- Método de Schlumberger-Palmer.

La resistividad puede variar en las diferentes épocas del año. Si el terreno tiene mucha humedad y sales disueltas la resistividad disminuirá.

Al incrementarse la temperatura del terreno decrecerá la resistividad y si disminuye la temperatura como en el Polo Norte, se incrementará la resistividad.

Las mediciones se deberán de realizar en varios puntos del terreno, con diferentes espaciamientos de los electrodos de prueba, para conseguir las variaciones que tiene la resistividad con la profundidad.

Éstas se deben realizar trazando una línea recta en la parte central del terreno, otras trazando líneas diagonales en el terreno.



Medición de un terreno

Vista de planta del terreno con los ejes de medición para la resistividad del terreno

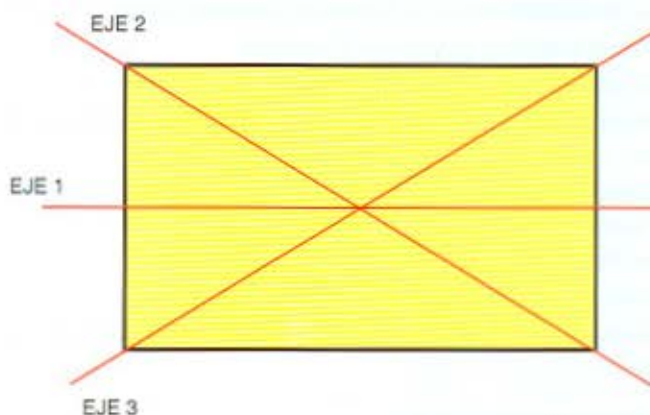


Fig. 88 Trazo de ejes para medición de resistividad del terreno

Es mucho mejor realizar las mediciones cuando el terreno se encuentra limpio, sin tener ninguna construcción del sistema de puesta a tierra o cimentaciones de los equipos.

Interpretación de las mediciones de la resistividad del terreno

De las mediciones obtenidas se tendrá un modelo de la composición del terreno en el que se instalará la malla de puesta a tierra. El modelo obtenido será una aproximación del terreno real.

Si se obtuvo un terreno de composición uniforme, la resistividad del terreno será:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_n}{n} \quad \text{ec. 11}$$

$\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_n$ = son la mediciones realizadas en diferentes puntos del terreno, Ohms-metro

n = número de mediciones realizadas.

El ingeniero deberá de interpretar adecuadamente los resultados obtenidos para el diseño de la malla de puesta a tierra.

Si se obtuvo un terreno de composición no uniforme, el factor de reflexión será:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \text{ ec. 12}$$

ρ_1 = la resistividad de la capa superior.

ρ_2 = la resistividad de la capa inferior.

Determinación de la máxima corriente de falla en el sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica

- Se deberá de determinar cuál de los diferentes tipos de falla a tierra producirá la corriente más alta de falla a tierra, que circulará entre la malla de tierra y la tierra (terreno natural) que la rodea.
- Determinar, el factor de división de corriente S_f para las fallas a tierra seleccionadas y establecer los valores correspondientes a la corriente simétrica en la malla I_g .
- Para cada falla, determinar el valor de decremento D_f basado en el tiempo de duración t_f .
- Seleccionar el valor más alto del producto $D_f \times I_g$.

Tipos de fallas a tierra

Diferentes fallas a tierra pueden ocurrir en un sistema eléctrico, por lo que se puede dificultar determinar el tipo y el lugar en que ocurre la falla de más alto valor, porque no se aplican reglas sencillas.

En los siguientes esquemas se muestran las fallas que pueden ocurrir.

Falla local dentro de una subestación, el sistema está puesto a tierra

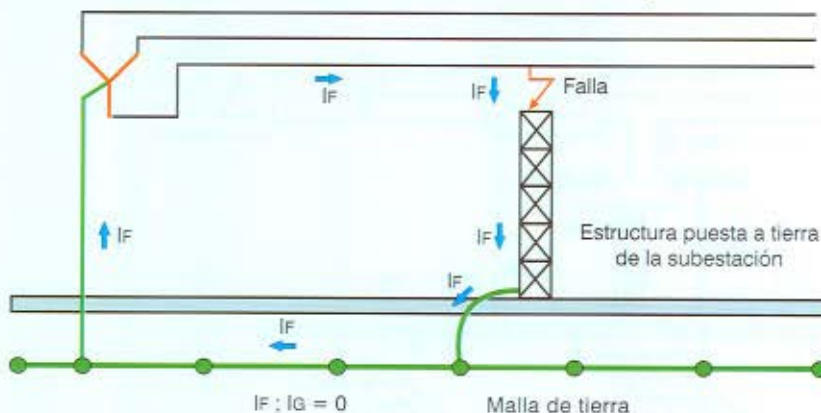
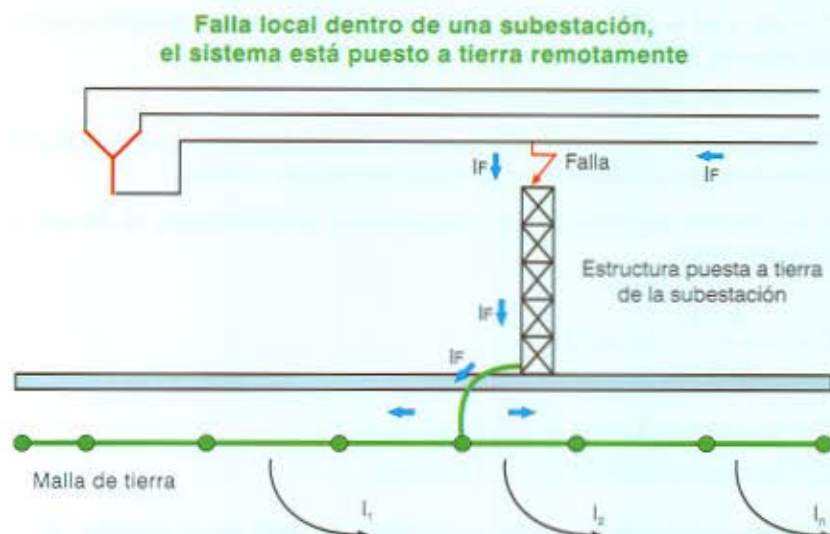


Fig. 89 Falla a tierra dentro de una subestación eléctrica

Fig. 90 Falla a tierra dentro de una subestación eléctrica el sistema no está puesto a tierra



Falla local dentro de una subestación, el sistema está puesto a tierra y otras partes remotas están puestas a tierra

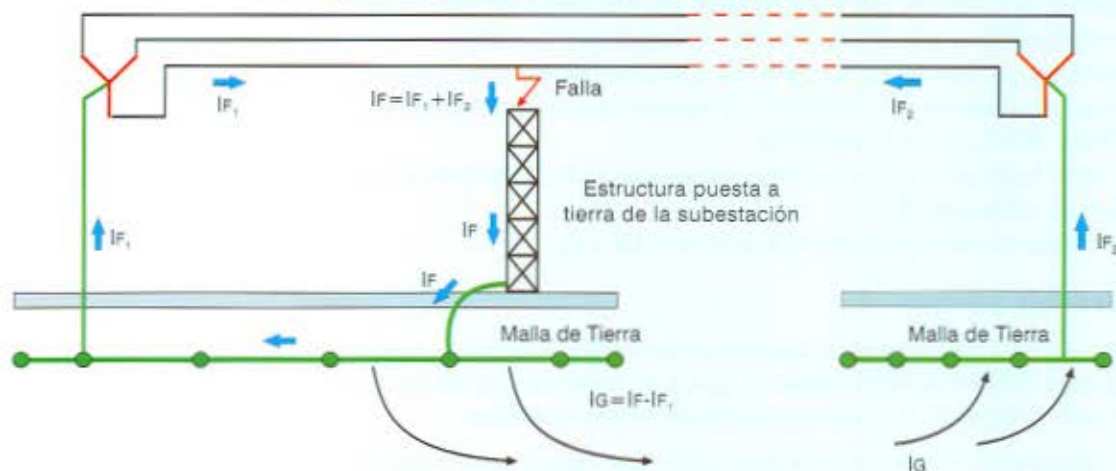


Fig. 91 Falla a tierra dentro de una subestación eléctrica con el sistema puesto a tierra

División de la corriente para una falla en el lado de alta de una subestación de distribución

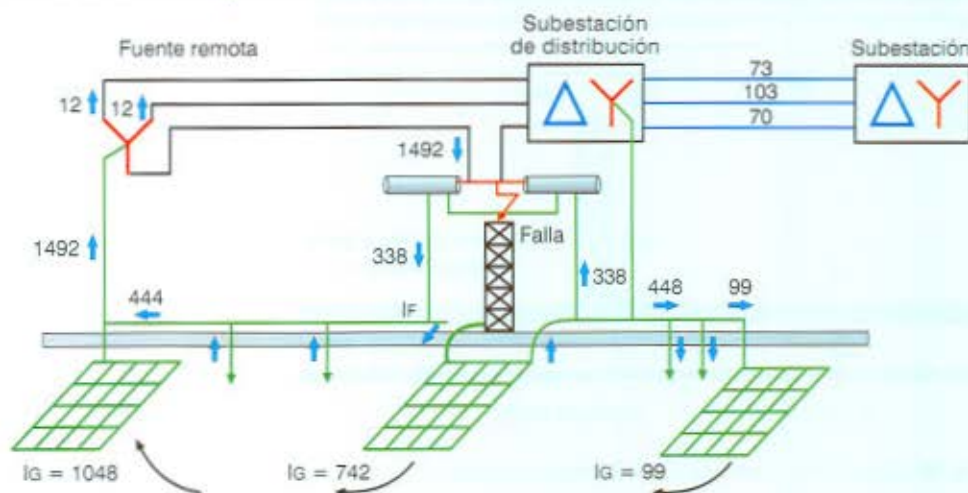


Fig. 92 División de corrientes de falla a tierra

La recomendación por razones prácticas, es que el cálculo se deberá de realizar para una falla de fase a tierra y para una falla de dos fases a tierra.

Para calcular la corriente de secuencia cero para una falla de **fase a tierra** se deberá de utilizar la siguiente fórmula:

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad \text{ec. 13}$$

Para calcular la corriente de secuencia cero para una falla de **dos fases a tierra** se deberá de utilizar la siguiente fórmula:

$$I_0 = \frac{E(X_2)}{X_1(X_0 + X_2) + (X_2 + X_0)} \quad \text{ec. 14}$$

I_0 - Corriente rms simétrica de secuencia cero en Amperes

E - Tensión de fase a neutro en el punto de falla en Volts

X_1 - Reactancia equivalente de secuencia positiva en el punto de falla (Ohms)

X_2 - Reactancia equivalente de secuencia negativa en el punto de falla (Ohms)

X_0 - Reactancia equivalente de secuencia cero en el punto de falla (Ohms)

En la mayoría de los casos es suficiente calcular la corriente máxima en la malla de puesta a tierra de la subestación I_G , despreciando la resistencia del sistema, la resistencia a tierra de la subestación y la resistencia de la falla.

El error que se introduce es pequeño, por lo que no se afecta la seguridad del sistema de puesta a tierra de la subestación.

La corriente simétrica de malla es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que circula entre la malla de puesta a tierra y el terreno que la rodea, y está dada por:

$$I_g = S_f \times I_f \quad \text{ec. 15}$$

I_g - Corriente rms simétrica de malla, en Amperes

S_f - Factor de división de corriente, en Amperes

I_f - Valor de la corriente rms simétrica de falla a tierra, en Amperes

El factor de división de la corriente de falla es el factor que representa el inverso del valor de la corriente de falla simétrica a una parte de la corriente que circula entre la malla de puesta a tierra y el terreno que la rodea, y está dado por:

$$S_f = \frac{I_g}{3 I_0} \quad \text{ec. 16}$$

$$I_f = 3 I_0$$

S_f - Factor de división de corriente en Amperes

I_g - Corriente simétrica rms de malla en Amperes

I_0 - Corriente rms simétrica de secuencia cero en Amperes

La corriente máxima de malla se define por:

$$I_G = D_f \times I_0 \quad \text{ec.17}$$

I_G - Corriente máxima de malla en Amperes

D_f - Factor de decremento para un tiempo de duración de la falla t_f , en segundos

I_0 - Corriente simétrica rms en la malla en Amperes.

En el diseño de la malla de puesta a tierra se deberá de considerar la corriente asimétrica; es por eso que el factor de decremento toma en cuenta el efecto de desplazamiento de la componente de corriente directa.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} [1 - e^{-2t_f/T_a}]} \quad \text{ec.4}$$

t_f - Tiempo de duración de la falla en segundos

T_a - Constante de tiempo subtransitoria en segundos

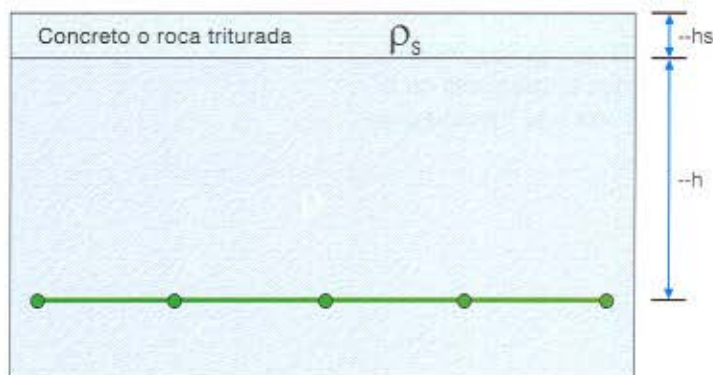
Resistividad de la capa superficial (ρ_s)

VALORES DE D_f

Duración de la Falla T_f		Factor de Decremento D_f			
Segundos	Ciclos a 60 HZ	$X/R=10$	$X/R=20$	$X/R=30$	$X/R=40$
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Referencia: Tabla 10 - IEEE Std 80-2000

Capa superficial y capa profunda del terreno de la subestación



El material de la capa superficial ayuda a limitar la corriente en el cuerpo humano por la adición de la resistencia a la resistencia equivalente del cuerpo humano.

La reducción de la corriente depende de los valores relativos de las resistividades del suelo y del material de la superficie.

Fig. 93 Resistividad del suelo

El factor de reflexión es:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \text{ ec. 19}$$

ρ_s = La resistividad de la capa superior puede ser concreto o roca triturada Ohms-metro

ρ = La resistividad del terreno Ohms-metro.

h_s = Espesor de la capa superficial concreto o roca triturada en metros.

h = Profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra.

El valor de C_s puede calcularse por:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2 h_s + 0,09} \text{ ec. 20}$$

La ecuación anterior es empírica, los valores obtenidos de C_s están dentro del 5% de los valores obtenidos con el método analítico.

Potencial de paso tolerable

El potencial de paso tolerable se calcula por:

$$E_{\text{paso}} = I_B (R_B + 2R_f) \text{ ec. 21}$$

Para una persona de 50 Kg.

$$E_{\text{paso}} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ ec. 22}$$

Para una persona de 70 Kg.

$$E_{\text{paso}} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ ec. 23}$$

Potencial de contacto tolerable

El potencial de contacto tolerable se calcula por:

$$E_{\text{contacto}} = I_B \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) \text{ ec. 24}$$

Para una persona de 50 Kg.

$$E_{\text{contacto}} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ ec. 25}$$

Para una persona de 70 Kg.

$$E_{\text{contacto}} = (1000 + 1,5 C_s \rho_s) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ ec. 26}$$

E paso – es el potencial de paso en Volts

E contacto – es el potencial de contacto en Volts.

Cs – es determinado por curvas.

ρ_s – es la resistividad del material de la superficie en Ohms-metro

t_s – es la duración de la corriente de descarga eléctrica en segundos.

Cs – es igual a 1 cuando no existe capa superficial en la subestación y $\rho_s = \rho$

Cuando se tiene contacto metal con metal de mano a mano, y de mano a pie, resulta una resistividad **$\rho_s = 0$** , por lo que la resistencia total del circuito accidental es igual a la resistencia del cuerpo **R_b** .

El voltaje de toque de metal a metal es:

Para una persona de 50 Kg.

$$E_{\text{contacto de metal a metal}} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ ec. 27}$$

Para una persona de 70 Kg.

$$E_{\text{contacto de metal a metal}} = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ ec. 28}$$

Selección de conductores y conexiones

Cada elemento del sistema de puesta a tierra de la subestación eléctrica:

- Conductores de malla
- Conexiones
- Conexiones a los equipos
- Electrodo de puesta a tierra
 - ☐ Deberán ser diseñados para una larga duración de vida.
 - ☐ Deberán tener la capacidad suficiente de conductividad y no contribuir substancialmente a diferencias de potencial.
 - ☐ Deberán ser resistentes a la fusión y al deterioro mecánico bajo las condiciones de duración y magnitud de la falla.
 - ☐ Deberán ser seguros y robustos mecánicamente.
 - ☐ Deberán mantener su función cuando estén expuestos a la corrosión y al daño físico.

Material

El cobre es el material más utilizado para la puesta a tierra.

Los conductores de cobre tienen la ventaja que son resistentes a la corrosión cuando se encuentran enterrados en la tierra.

El aluminio es el material menos utilizado para las mallas de puesta a tierra, en algunos suelos el mismo se puede corroer; al corroerse el aluminio pasa a ser un material no conductivo.

Las corrientes alternas causan una gradual corrosión y pueden ocasionar problemas.

Tamaño nominal del conductor de la malla de puesta a tierra

La alta temperatura en un tiempo corto en el conductor de puesta a tierra de la malla de puesta a tierra de la subestación o el tamaño nominal del conductor requerido está en función de la corriente del conductor.

Cálculo de la sección transversal del conductor de la malla de puesta a tierra

$$I = A \text{ mm}^2 \sqrt{\left(\frac{\text{TCAP} \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \text{ ec. 29}$$

I – Corriente de falla rms en kiloamperes

A – Sección transversal del conductor en mm^2

T_m – Temperatura máxima disponible en $^{\circ}\text{C}$

T_a – Temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$

T_r – Temperatura de referencia para las constantes del material en $^{\circ}\text{C}$

α_o – Coeficiente térmico de la resistividad a 0°C en $1/^{\circ}\text{C}$

α_r – Coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de referencia T_r en $1/^{\circ}\text{C}$

ρ_r – Resistividad del conductor de puesta a tierra a una temperatura de referencia T_r en $\mu\Omega\text{-cm}$

$K_o = 1/\alpha_o$ ó $(1/\alpha_r) - T_r$ en $^{\circ}\text{C}$

t_c – Es el tiempo de duración de la corriente en segundos

TCAP – Es la capacidad térmica por unidad de volumen en $\text{J}/(\text{cm}^3 \times ^{\circ}\text{C})$

Si se calcula la sección transversal en KCM la ecuación queda:

$$I = 5,07 \times 10^{-3} A_{\text{KCM}} \sqrt{\left(\frac{\text{TCAP}}{t_c \alpha_r C_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \text{ ec.30}$$

La fórmula simplificada en unidades inglesas se simplifica por:

$$A_{\text{KCM}} = I \times K_f \times \sqrt{t_c} \text{ ec. 31}$$

A_{KCM} – es el área del conductor en KCM

I – corriente de falla rms en kiloamperes

t_c – es el tiempo de duración de la corriente en segundos

K_f – es la constante del material

Para el conductor de cobre con el 100% de conductividad $K_f = 7,00$

$$A_{KCM} = 7,0 \times I \times \sqrt{t_c} \text{ ec. 32}$$

Evaluación de la resistencia a tierra del sistema de puesta a tierra de la subestación

Un buen sistema de puesta a tierra deberá tener una baja resistencia para minimizar los potenciales que se pudieran presentar en la subestación eléctrica durante una falla a tierra.

Para subestaciones de transmisión y otras más grandes, el valor de la resistencia del sistema de puesta a tierra deberá ser de 1 Ohm o menor.

En subestaciones de distribución pequeñas, el valor aceptable de la resistencia del sistema de puesta a tierra debe estar entre 1 Ohm y 5 Ohms, dependiendo de las condiciones locales.

Cálculos simplificados

La estimación de la resistencia total es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el arreglo básico del sistema de puesta a tierra.

La resistencia depende del área ocupada por el sistema de puesta a tierra, la cual es conocida desde que se inicia el proyecto eléctrico.

Conociendo el valor de la resistividad del suelo, una aproximación del valor del sistema de puesta a tierra puede calcularse por medio de la fórmula de una placa metálica circular a una profundidad de cero metros, en un terreno uniforme:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\left(\frac{\pi}{A}\right)} \text{ ec. 33}$$

R_g – es la resistencia a tierra de la subestación en Ohms

ρ – es la resistividad del suelo en Ohms-metro

A – es el área ocupada por la malla de tierra en m^2

En el límite superior de una subestación, la resistencia a tierra se puede obtener agregando un segundo término:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \text{ ec. 34}$$

L_T - es la longitud total de los conductores enterrados en metros.

Sverak expandió la fórmula tomando en cuenta el efecto de la profundidad de la malla de tierra.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{(20 A)}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{(20/A)}} \right) \right] \text{ ec. 35}$$

h - es la profundidad de la malla de tierra en metros

Ecuaciones de Schwarz

Schwarz desarrolló las siguientes ecuaciones para determinar la resistencia total en un suelo homogéneo de un sistema de puesta a tierra, con una malla de tierra horizontal y de electrodos de puesta a tierra verticales.

La resistencia total del sistema de puesta a tierra, tomando en cuenta la resistencia de la malla, electrodos de puesta a tierra y la resistencia mutua a tierra.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \text{ ec. 36}$$

R_1 - resistencia a tierra de los conductores de la malla de tierra.

R_2 - resistencia a tierra de todos los electrodos de puesta a tierra

R_m - resistencia mutua a tierra entre el grupo de conductores de la malla de tierra, R_1 y el grupo de los electrodos de puesta a tierra, R_2 , en Ohms.

La resistencia a tierra de la malla de tierra está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2 L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad \text{ec. 37}$$

ρ – es la resistividad del suelo en Ohms- metro

L_C – es la longitud total de los conductores conectados de la malla de tierra, en metros

a' – es $\sqrt{(a \times 2 h)}$ para conductores enterrados a una profundidad h en metros ó

a' – es a para conductores sobre la superficie de la tierra en metros

$2a$ – es el diámetro del conductor en metros.

A – es el área que cubre los conductores en m^2

k_1, k_2 , son los coeficientes (ver gráficas A y B)

La resistencia a tierra de la cama de electrodos de puesta a tierra esta dada por:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[\ln \left(\frac{4 L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 \times L_R}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad \text{ec. 38}$$

L_R – es la longitud de cada electrodo de puesta a tierra

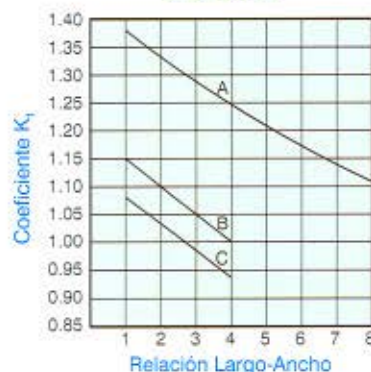
$2b$ – es el diámetro de la varilla en metros

n_R – número de electrodos de puesta a tierra en el lugar

La resistencia mutua a tierra entre la malla de tierra y la cama de electrodos de puesta a tierra:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2 L_C}{L_R} \right) + \frac{k_1 \times L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad \text{ec. 39}$$

Gráfica A



Curva A para profundidad $h=0$

$$Y_A = -0.04x + 1.41$$

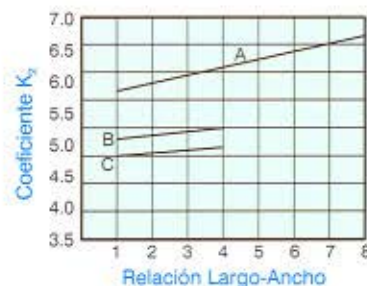
Curva B para profundidad $h = \frac{1}{10 \sqrt{\text{Area}}}$

$$Y_B = -0.05x + 1.20$$

Curva C para profundidad $h = \frac{1}{6 \sqrt{\text{Area}}}$

$$Y_C = -0.05x + 1.13$$

Gráfica B



Curva A para profundidad $h=0$

$$Y_A = 0.15x + 5.50$$

Curva B para profundidad $h = \frac{1}{10 \sqrt{\text{Area}}}$

$$Y_B = 0.10x + 4.68$$

Curva C para profundidad $h = \frac{1}{6 \sqrt{\text{Area}}}$

$$Y_C = -0.05x + 4.40$$

Cálculo de los potenciales máximos de paso y de contacto

Potencial de contacto (potencial de malla)

Los valores del potencial de contacto son obtenidos por el producto del factor geométrico K_m , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo ρ y la corriente promedio por unidad de longitud del conductor enterrado del sistema de puesta a tierra (I_G/L_M)

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} \text{ ec. 40}$$

El factor geométrico K_m esta dado por:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_b} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \text{ ec. 41}$$

$K_{ii} = 1$ para mallas de tierra con electrodos de puesta a tierra a lo largo del perímetro o mallas de tierra con electrodos de puesta a tierra en las esquinas, así como también a lo largo del perímetro y dentro del área de la malla de tierra.

Para mallas de tierra sin electrodos de puesta a tierra o mallas de tierra que contengan algunos electrodos de puesta a tierra, ningún electrodo de puesta a tierra en las esquinas ni en el perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/3}} \text{ ec. 42}$$

$$K_b = \sqrt{1 + h/h_0} \text{ ec. 43}$$

$h_0 = 1$ m (profundidad de referencia de la malla de tierra)

El número efectivo de conductores en paralelo en una malla n , puede aplicarse a mallas de tierra rectangulares o irregulares y representa el número de conductores en paralelo de una malla de tierra rectangular equivalente.

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \text{ ec. 44}$$

donde:

$$n_a = \frac{2 L_C}{L_p} \text{ ec. 45}$$

$n_b = 1$ para mallas de tierra cuadradas

$n_c = 1$ para mallas de tierra cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$ para mallas de tierra cuadradas, rectangulares y en forma de L.

En otro caso:

$$n_b = \sqrt{\left(\frac{L_p}{4 \sqrt{A}}\right)} \text{ ec. 46}$$

$$n_c = \left[\frac{(L_x)(L_y)}{A} \right]^{0.7A / L_x L_y} \text{ ec. 47}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{(L^2x + L^2y)}} \text{ ec. 48}$$

Lc – es la longitud total del conductor horizontal de la malla de tierra, en metros.

Lp – es la longitud perimetral de la malla de tierra, en metros.

A – es el área de la malla de tierra en m².

Lx – es la máxima longitud de la malla de tierra en la dirección x, en metros.

Ly – es la máxima longitud de la malla de tierra en la dirección y, en metros.

Dm – es la máxima distancia entre dos puntos de la malla de tierra en metros.

D – distancia entre conductores en paralelo, en metros.

h – profundidad de los conductores de la malla de tierra.

d – diámetro del conductor de la malla de tierra, en metros.

El factor de irregularidad Ki, está definido por:

$$K_i = 0,644 + 0,148 n \text{ ec. 49}$$

Para mallas de tierra sin electrodos de puesta a tierra o mallas de tierra con pocos electrodos de puesta a tierra dentro de la malla, pero ninguno en las esquinas ni en el perímetro de la malla. La longitud efectiva enterrada es:

$$L_M = L_C + L_R \text{ ec.50}$$

Lr es la longitud total de todos los electrodos de puesta a tierra, en metros.

Para mallas de tierra con electrodos de puesta a tierra en las esquinas y a lo largo de su perímetro y dentro de la malla de tierra, la longitud efectiva enterrada es:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{(L^2x + L^2y)}} \right) \right] L_R \text{ ec.51}$$

Lr – es la longitud de cada electrodo de puesta a tierra, en metros.

Las mallas de tierra más comunes en una subestación eléctrica son:

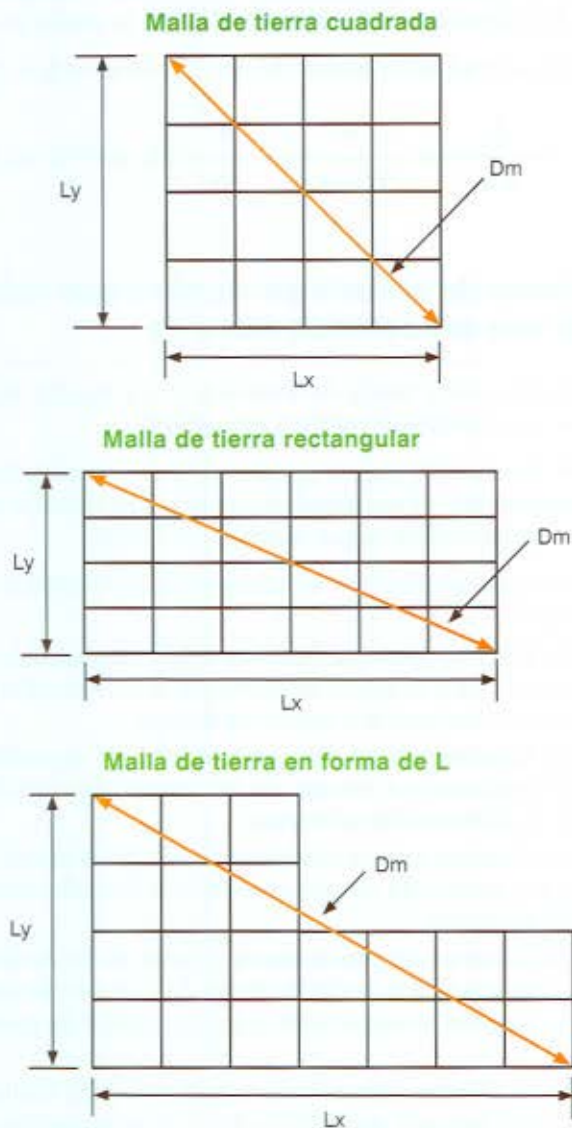


Fig. 94 Tipos de malla de puesta a tierra, mostrando la distancia máxima entre dos puntos de la malla

Potencial de paso

El potencial de paso se obtiene por el producto del factor geométrico K_s , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo ρ y la corriente promedio por unidad de longitud del conductor enterrado del sistema de puesta a tierra de la subestación.

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_g}{L_s} \quad \text{ec. 52}$$

Para mallas de tierra con o sin electrodos de puesta a tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado es:

$$L_s = 0,75 L_c + 0,85 L_R \quad \text{ec. 53}$$

Se asume que el máximo potencial de paso ocurre a una distancia de un metro, en el exterior del conductor perimetral y se extiende sobre la bisectriz del ángulo que forma la esquina de la malla de tierra.

Para una profundidad de la malla de tierra $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{h-2}) \right] \text{ ec. 54}$$

Puesta a tierra de la malla de alambre que rodea el terreno de una subestación eléctrica

La puesta a tierra de la malla de alambre es de mucha importancia, debido a que es accesible al público en general.

El diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica deberá de comprender el potencial de toque sobre la malla de alambre, calculando el potencial de toque máximo tolerable.

Las formas en que usualmente se encuentran conectadas las mallas de alambre son:

- ☐ La malla de alambre metálica puesta a tierra requerirá de un puente de unión entre ella y la malla de tierra de la subestación eléctrica o tener electrodos de puesta a tierra separados.
- ☐ La malla de alambre que se encuentre dentro de la malla de tierra, deberá de conectarse por medio de un puente de unión a la malla de tierra de la subestación eléctrica.
- ☐ La malla de alambre que se encuentre fuera de la malla de tierra y se conecta por medio de un puente unión a la malla de tierra de la subestación eléctrica.
- ☐ La malla de alambre que se encuentra fuera de la malla de tierra, pero no es conectada a la malla de tierra de la subestación eléctrica. La malla de alambre es conectada a un conductor de puesta a tierra separado.
- ☐ En la malla de alambre que se encuentra fuera de la malla de tierra, pero no es conectada a la malla de tierra de la subestación eléctrica ni a un conductor de puesta a tierra separado, el contacto será realizará a través de la tierra; es por eso que se deberá de considerar que la malla de alambre puede energizarse.
- ☐ Los potenciales de paso y de contacto que se presentarán en ambos lados de la malla de alambre serán los mismos que se presenten en la malla de tierra de la subestación eléctrica al presentarse una falla.

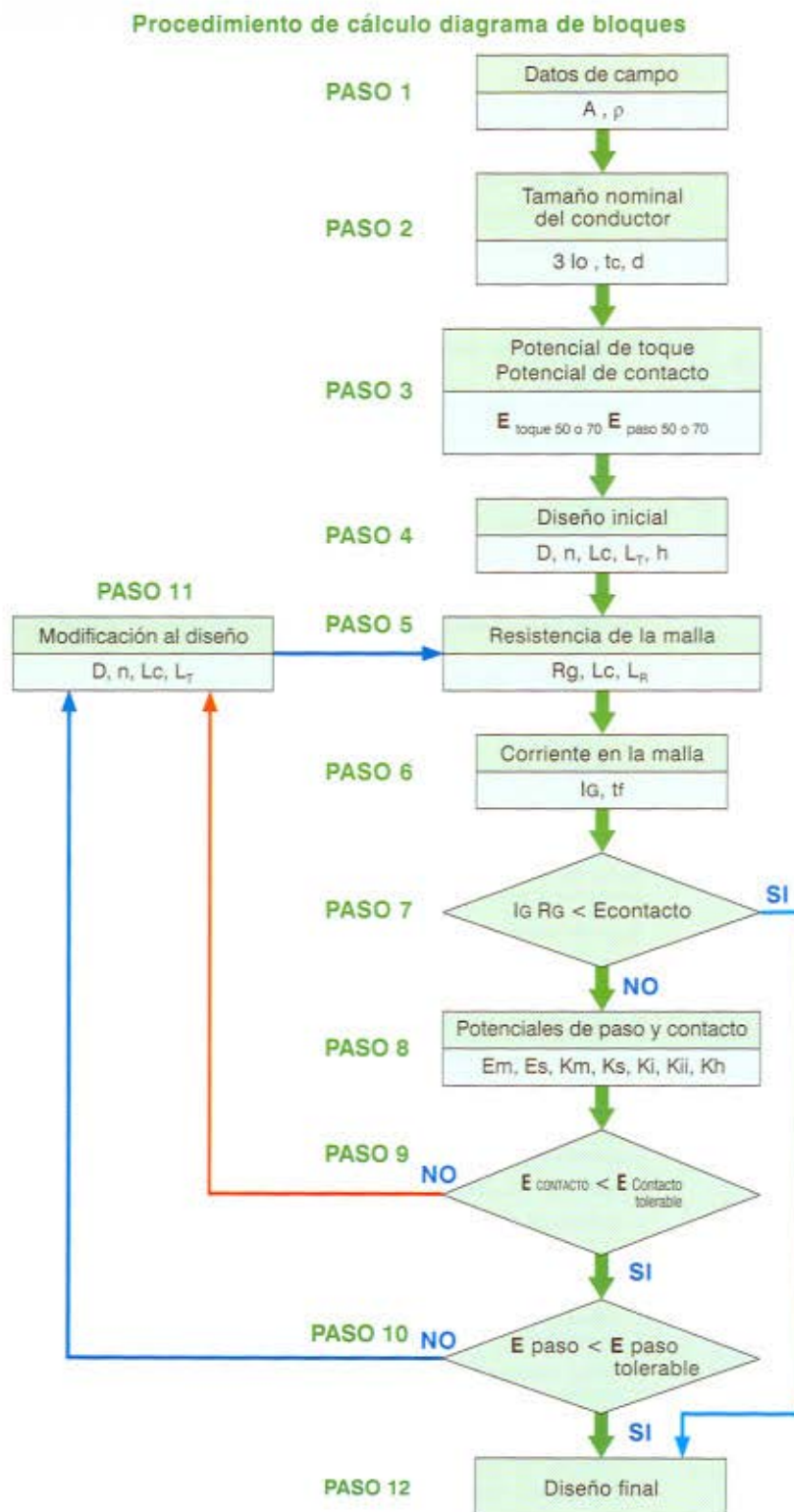


Fig. 95 Diagrama de bloques del procedimiento de cálculo

Sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas

Cálculo de los potenciales máximos de paso y de contacto

13

SÍMBOLO	DESCRIPCION
ρ	Resistividad del suelo, Ohms, metro
ρ_s	Resistividad de la capa superficial, Ohms - metro
$3I_0$	Corriente de falla simétrica en la subestación para el tamaño del conductor, en Amperes
A	Área total que ocupa la malla de tierra en m ²
C_s	Factor de decremento de la capa superficial
d	Diámetro del conductor de la malla de tierra, en metros
D	Espaciamiento entre conductores en paralelo, en metros
D_f	Factor de decremento para determinar I_0
D_m	Distancia máxima entre 2 puntos cualesquiera de la malla de tierra, en metros
$E_{CONTACTO}$	Potencial de contacto en la malla de tierra, en Volts
E_{PISO}	Potencial de paso en la malla de tierra, en Volts
$E_{PISO 50}$	Potencial de paso tolerable por el cuerpo humano con un peso de 50 kg, en Volts
$E_{PISO 70}$	Potencial de paso tolerable por el cuerpo humano con un peso de 70 kg, en Volts
$E_{CONTACTO 50}$	Potencial de contacto tolerable por el cuerpo humano con un peso de 50 kg, en Volts
$E_{CONTACTO 70}$	Potencial de contacto tolerable por el cuerpo humano con un peso de 70 kg, en Volts
h	Profundidad de los conductores de la malla de tierra, en metros
h_s	Espesor de la capa superficial, en metros
I_G	Corriente máxima en la malla de tierra que circulará entre la malla de tierra y el terreno adyacente (incluyendo la componente de c.d.) en Amperes
I_g	Corriente simétrica en la malla, en Amperes
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades
K_0	Factor de corrección que enfatiza los efectos de la profundidad de los conductores, método simplificado
K_1	Factor de corrección geométrico de la malla de tierra
K_0	Factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores interiores de la malla de tierra. Método simplificado
K_m	Factor de espaciamiento para el voltaje de malla método simplificado
K_s	Factor de espaciamiento para el potencial de paso, método simplificado
L_C	Longitud total del conductor de la malla de tierra, en metros
L_M	Longitud efectiva de $L_C + L_X$ para el potencial de malla, en metros
L_H	Longitud total de los electrodos de puesta a tierra, en metros
L_e	Longitud de cada electrodo de puesta a tierra (varilla) en metros
L_e	Longitud total efectiva de $L_C + L_X$ para el potencial de paso, en metros
L_T	Longitud total del conductor del sistema de puesta a tierra, incluyendo la malla de tierra y los electrodos de puesta a tierra, en metros
L_X	Longitud máxima de los conductores de la malla de tierra en la dirección X, en metros
L_Y	Longitud máxima de los conductores de la malla de tierra en la dirección Y, en metros
n	Factor geométrico compuesto por los factores n_a, n_b, n_c, n_d
n_R	Número de varillas (electrodos de puesta a tierra) en el área A
R_s	Resistencia del sistema de puesta a tierra, en Ohms
S_r	Factor de división de corriente
t_c	Tiempo de duración de la corriente para determinar el tamaño del conductor de la malla de tierra, en segundos
t_f	Tiempo de duración de la corriente para determinar el factor de decremento, s
t_s	Tiempo de duración de la corriente de descarga eléctrica para determinar la corriente en el cuerpo humano, en segundos

Las mallas de tierra más comunes en una subestación eléctrica son:

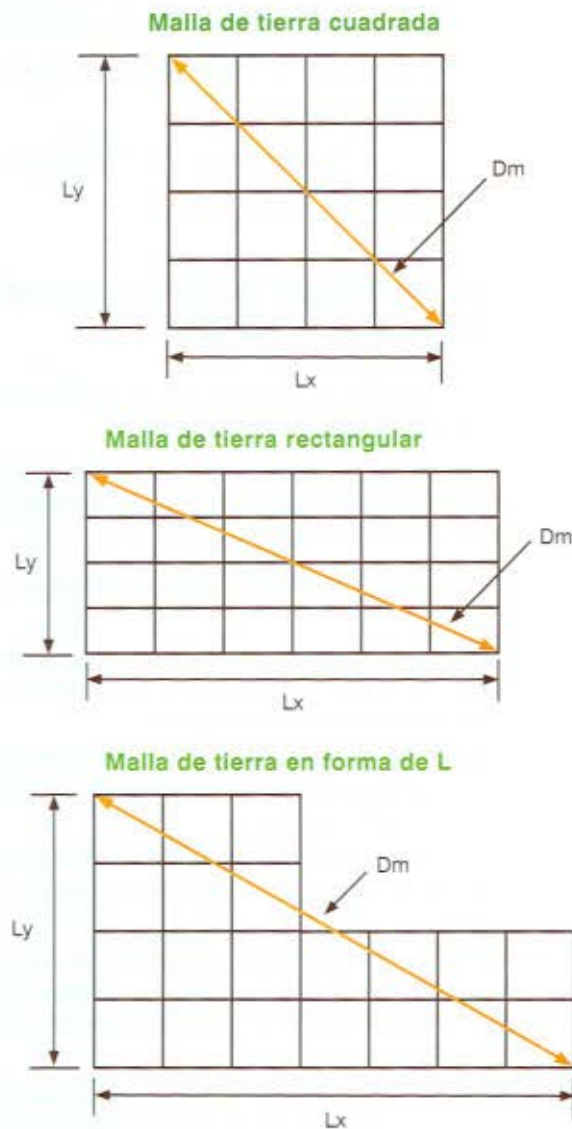


Fig. 94 Tipos de malla de puesta a tierra, mostrando la distancia máxima entre dos puntos de la malla

Potencial de paso

El potencial de paso se obtiene por el producto del factor geométrico K_s , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo ρ y la corriente promedio por unidad de longitud del conductor enterrado del sistema de puesta a tierra de la subestación.

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_g}{L_s} \quad \text{ec. 52}$$

Para mallas de tierra con o sin electrodos de puesta a tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado es:

$$L_s = 0,75 L_C + 0,85 L_R \quad \text{ec. 53}$$

Se asume que el máximo potencial de paso ocurre a una distancia de un metro, en el exterior del conductor perimetral y se extiende sobre la bisectriz del ángulo que forma la esquina de la malla de tierra.

Para una profundidad de la malla de tierra $0,25 \text{ m} < h < 2,5 \text{ m}$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \text{ ec. 54}$$

Puesta a tierra de la malla de alambre que rodea el terreno de una subestación eléctrica

La puesta a tierra de la malla de alambre es de mucha importancia, debido a que es accesible al público en general.

El diseño del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica deberá de comprender el potencial de toque sobre la malla de alambre, calculando el potencial de toque máximo tolerable.

Las formas en que usualmente se encuentran conectadas las mallas de alambre son:

- ☐ La malla de alambre metálica puesta a tierra requerirá de un puente de unión entre ella y la malla de tierra de la subestación eléctrica o tener electrodos de puesta a tierra separados.
- ☐ La malla de alambre que se encuentre dentro de la malla de tierra, deberá de conectarse por medio de un puente de unión a la malla de tierra de la subestación eléctrica.
- ☐ La malla de alambre que se encuentre fuera de la malla de tierra y se conecta por medio de un puente unión a la malla de tierra de la subestación eléctrica.
- ☐ La malla de alambre que se encuentra fuera de la malla de tierra, pero no es conectada a la malla de tierra de la subestación eléctrica. La malla de alambre es conectada a un conductor de puesta a tierra separado.
- ☐ En la malla de alambre que se encuentra fuera de la malla de tierra, pero no es conectada a la malla de tierra de la subestación eléctrica ni a un conductor de puesta a tierra separado, el contacto será realizará a través de la tierra; es por eso que se deberá de considerar que la malla de alambre puede energizarse.
- ☐ Los potenciales de paso y de contacto que se presentarán en ambos lados de la malla de alambre serán los mismos que se presenten en la malla de tierra de la subestación eléctrica al presentarse una falla.

Procedimiento de cálculo diagrama de bloques

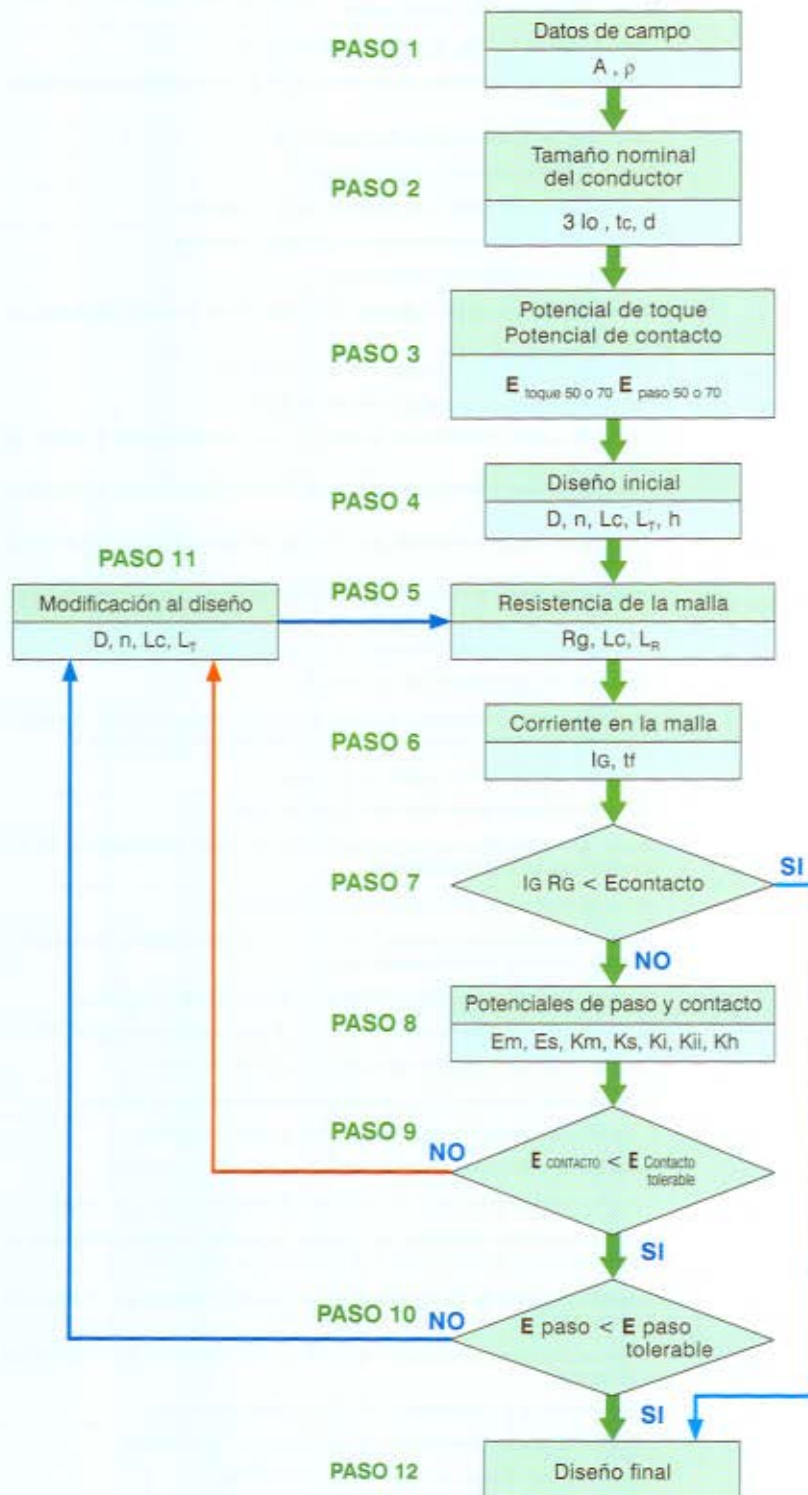


Fig. 95 Diagrama de bloques del procedimiento de cálculo

Sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas

Cálculo de los potenciales máximos de paso y de contacto

13

SÍMBOLO	DESCRIPCION
ρ	Resistividad del suelo, Ohms, metro
ρ_s	Resistividad de la capa superficial, Ohms - metro
$3I_0$	Corriente de falla simétrica en la subestación para el tamaño del conductor, en Amperes
A	Área total que ocupa la malla de tierra en m ²
C_s	Factor de decremento de la capa superficial
d	Diámetro del conductor de la malla de tierra, en metros
D	Espaciamiento entre conductores en paralelo, en metros
D_f	Factor de decremento para determinar I_0
D_m	Distancia máxima entre 2 puntos cualesquiera de la malla de tierra, en metros
$E_{CONTACTO}$	Potencial de contacto en la malla de tierra, en Volts
E_{PISO}	Potencial de paso en la malla de tierra, en Volts
$E_{PISO 50}$	Potencial de paso tolerable por el cuerpo humano con un peso de 50 kg, en Volts
$E_{PISO 70}$	Potencial de paso tolerable por el cuerpo humano con un peso de 70 kg, en Volts
$E_{CONTACTO 50}$	Potencial de contacto tolerable por el cuerpo humano con un peso de 50 kg, en Volts
$E_{CONTACTO 70}$	Potencial de contacto tolerable por el cuerpo humano con un peso de 70 kg, en Volts
h	Profundidad de los conductores de la malla de tierra, en metros
h_s	Espesor de la capa superficial, en metros
I_0	Corriente máxima en la malla de tierra que circulará entre la malla de tierra y el terreno adyacente (incluyendo la componente de c.d.) en Amperes
I_g	Corriente simétrica en la malla, en Amperes
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades
K_0	Factor de corrección que enfatiza los efectos de la profundidad de los conductores, método simplificado
K_1	Factor de corrección geométrico de la malla de tierra
K_0	Factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores interiores de la malla de tierra. Método simplificado
K_m	Factor de espaciamento para el voltaje de malla método simplificado
K_s	Factor de espaciamento para el potencial de paso, método simplificado
L_c	Longitud total del conductor de la malla de tierra, en metros
L_M	Longitud efectiva de $L_c + L_x$ para el potencial de malla, en metros
L_R	Longitud total de los electrodos de puesta a tierra, en metros
L_e	Longitud de cada electrodo de puesta a tierra (varilla) en metros
L_n	Longitud total efectiva de $L_c + L_x$ para el potencial de paso, en metros
L_T	Longitud total del conductor del sistema de puesta a tierra, incluyendo la malla de tierra y los electrodos de puesta a tierra, en metros
L_X	Longitud máxima de los conductores de la malla de tierra en la dirección X, en metros
L_Y	Longitud máxima de los conductores de la malla de tierra en la dirección Y, en metros
n	Factor geométrico compuesto por los factores n_a, n_b, n_c, n_d
n_R	Número de varillas (electrodos de puesta a tierra) en el área A
R_g	Resistencia del sistema de puesta a tierra, en Ohms
S_f	Factor de división de corriente
t_c	Tiempo de duración de la corriente para determinar el tamaño del conductor de la malla de tierra, en segundos
t_f	Tiempo de duración de la corriente para determinar el factor de decremento, s
t_s	Tiempo de duración de la corriente de descarga eléctrica para determinar la corriente en el cuerpo humano, en segundos

Métodos de medición de resistividad eléctrica de la tierra (suelo, terreno natural)

Contenido

Métodos de medición de resistividad eléctrica de la tierra (suelo, terreno natural) . . .	130
Método de 4 puntos	131
Método de Schlumberger-Palmer	132
Método de los 3 puntos o método aproximado .	133

Métodos de medición de resistividad eléctrica de la tierra (suelo, terreno natural)

La resistividad eléctrica del suelo o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga una sección transversal y longitud unitarias y sus unidades son Ohms-metro.

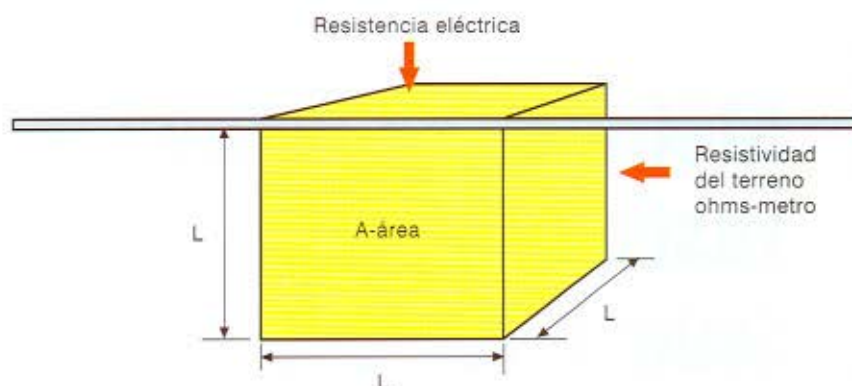


Fig.100 Resistividad del terreno

La resistividad del terreno es una variable básica que afecta la resistencia a tierra de un sistema de puesta a tierra. Ahora, se considerarán otros campos donde el valor de la resistividad del terreno es medida, así como también los factores que afectan en la prueba.

La medición de la resistividad del terreno es usualmente utilizada para buscar el mejor lugar y profundidad para la instalación de los electrodos de puesta a tierra de baja resistencia. Estos estudios deben ser hechos para nuevas unidades eléctricas que son construidas como por ejemplo estaciones de generación, subestaciones eléctricas, torres de transmisión, central telefónica, etc.

Finalmente, la resistividad del terreno se usa para indicar el grado de corrosión que se espera debajo de la tierra para tuberías de agua, aceite, gasolinas, gas, etc. En general, los lugares donde los valores de la resistividad son bajos tienden a incrementar la corrosión, por lo que esta información será una buena guía para la instalación de la protección catódica.

Cómo medir la resistividad eléctrica del terreno

El instrumento de medición que se utiliza para la medición de la resistividad del terreno es un instrumento de medición de resistencia a tierra, ya sea de 3 puntos ó 4 puntos.

Método de 4 puntos

El Doctor Frank Wenner de la U.S. Bureau of Standards desarrolló la teoría de esta prueba en 1915 y es la más empleada.

Se utilizan 4 electrodos de prueba iguales y se entierran en el suelo apartados a una distancia igual en línea recta y se conectan por medio de 4 conductores de prueba al aparato de medición de resistencia a tierra.

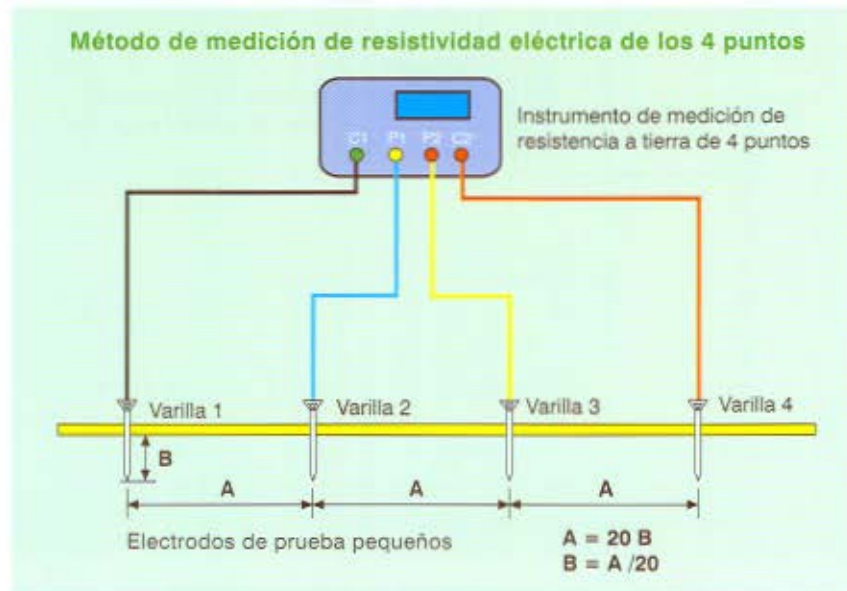


Fig. 101 Método de medición de Frank Wenner

De las lecturas resultan un valor de resistencia a tierra R , con dicho valor se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \pi A R \text{ ec. 61}$$

Donde:

ρ = resistividad del terreno en Ohms-metro

A = distanciamiento entre electrodos de prueba.

R = resistencia a tierra medida por el aparato de medición.

Con lo cual resultan valores de la resistividad del terreno y se promedian para obtener la resistividad del terreno.

Método de Schlumberger-Palmer

Este método es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos de prueba, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores a distancias múltiples (na) de la separación base de los electrodos internos (a).

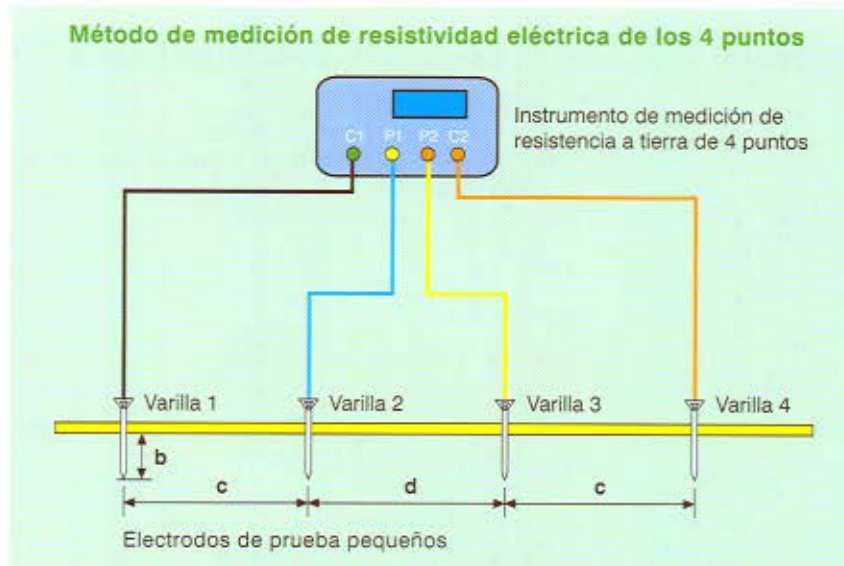


Fig. 102 Método de medición de Schlumberger-Palmer

Con el valor obtenido de la resistencia a tierra, se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d) R}{d} \text{ ec. 62}$$

Donde:

ρ = resistividad del terreno en Ohms-metro

d = distanciamiento entre electrodos interiores de prueba.

c = distanciamiento entre electrodos interiores y exteriores.

R = resistencia a tierra medida por el aparato de medición.

Métodos de medición de resistividad eléctrica de la tierra (suelo, terreno natural)

Contenido

Métodos de medición de resistividad eléctrica de la tierra (suelo, terreno natural) . . .	130
Método de 4 puntos	131
Método de Schlumberger-Palmer	132
Método de los 3 puntos o método aproximado .	133

Métodos de medición de resistividad eléctrica de la tierra (suelo, terreno natural)

La resistividad eléctrica del suelo o resistencia específica del suelo, es la resistencia de un volumen que tenga una sección transversal y longitud unitarias y sus unidades son Ohms-metro.

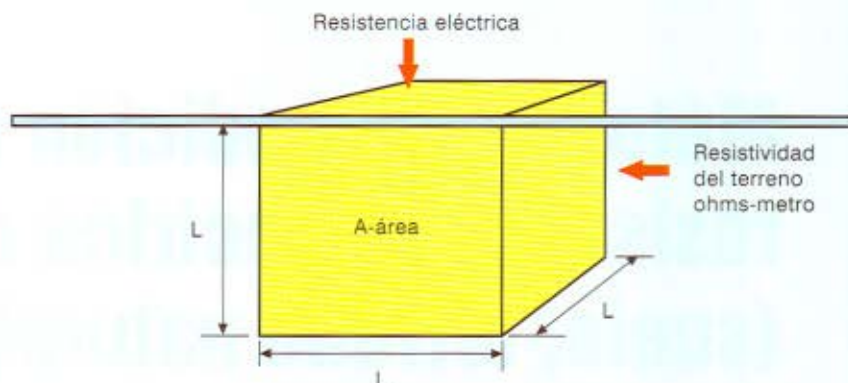


Fig.100 Resistividad del terreno

La resistividad del terreno es una variable básica que afecta la resistencia a tierra de un sistema de puesta a tierra. Ahora, se considerarán otros campos donde el valor de la resistividad del terreno es medida, así como también los factores que afectan en la prueba.

La medición de la resistividad del terreno es usualmente utilizada para buscar el mejor lugar y profundidad para la instalación de los electrodos de puesta a tierra de baja resistencia. Estos estudios deben ser hechos para nuevas unidades eléctricas que son construidas como por ejemplo estaciones de generación, subestaciones eléctricas, torres de transmisión, central telefónica, etc.

Finalmente, la resistividad del terreno se usa para indicar el grado de corrosión que se espera debajo de la tierra para tuberías de agua, aceite, gasolinas, gas, etc. En general, los lugares donde los valores de la resistividad son bajos tienden a incrementar la corrosión, por lo que esta información será una buena guía para la instalación de la protección catódica.

Cómo medir la resistividad eléctrica del terreno

El instrumento de medición que se utiliza para la medición de la resistividad del terreno es un instrumento de medición de resistencia a tierra, ya sea de 3 puntos ó 4 puntos.

Método de 4 puntos

El Doctor Frank Wenner de la U.S. Bureau of Standards desarrolló la teoría de esta prueba en 1915 y es la más empleada.

Se utilizan 4 electrodos de prueba iguales y se entierran en el suelo apartados a una distancia igual en línea recta y se conectan por medio de 4 conductores de prueba al aparato de medición de resistencia a tierra.

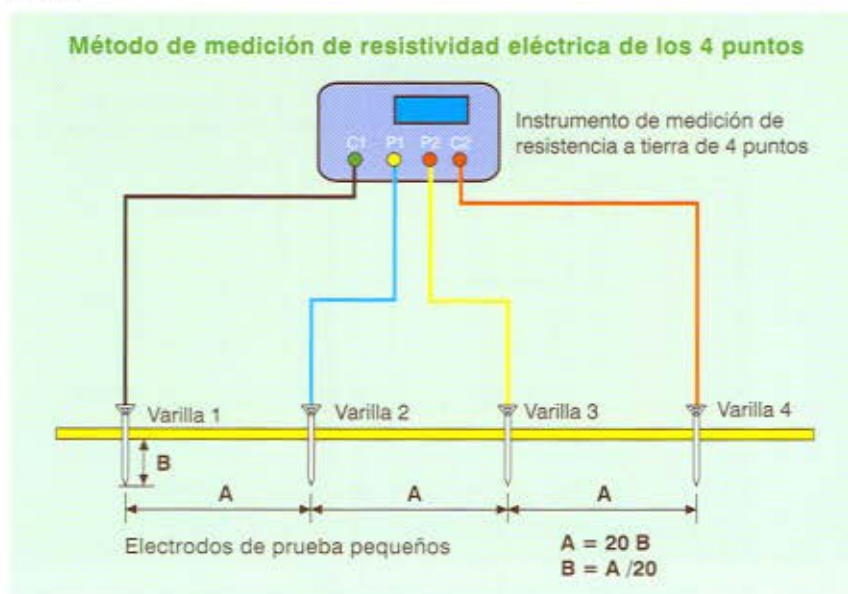


Fig. 101 Método de medición de Frank Wenner

De las lecturas resultan un valor de resistencia a tierra R , con dicho valor se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \pi A R \quad \text{ec. 61}$$

Donde:

ρ = resistividad del terreno en Ohms-metro

A = distanciamiento entre electrodos de prueba.

R = resistencia a tierra medida por el aparato de medición.

Con lo cual resultan valores de la resistividad del terreno y se promedian para obtener la resistividad del terreno.

Método de Schlumberger-Palmer

Este método es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos de prueba, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores a distancias múltiples (na) de la separación base de los electrodos internos (a).

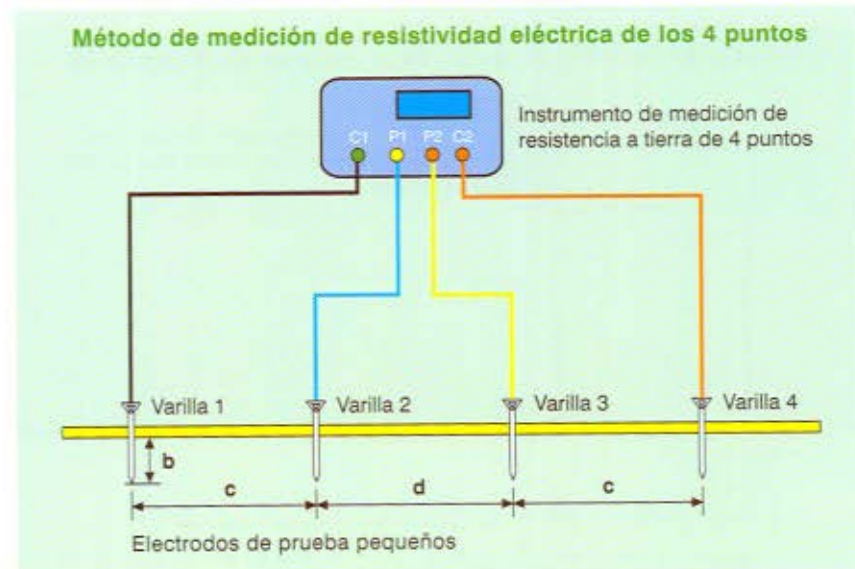


Fig. 102 Método de medición de Schlumberger-Palmer

Con el valor obtenido de la resistencia a tierra, se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d) R}{d} \text{ ec. 62}$$

Donde:

ρ = resistividad del terreno en Ohms-metro

d = distanciamiento entre electrodos interiores de prueba.

c = distanciamiento entre electrodos interiores y exteriores.

R = resistencia a tierra medida por el aparato de medición.

Método de los 3 puntos o método aproximado

Este método de los 3 puntos es el que se explicó anteriormente, y con la siguiente expresión se encuentra la resistividad del terreno:

$$\rho = \frac{R}{2 \pi L} \left(\ln \frac{2,943 L}{d} \right) \text{ ec. 63}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno.

L = Longitud de la varilla enterrada.

d = diámetro de la varilla enterrada.

R = resistencia medida con el aparato de medición.

La resistividad del terreno decrece con la humedad y las sales disueltas.

En el suelo, la conducción de corriente es grandemente electrolítica. Así la cantidad de humedad y del contenido de sal en el suelo afectará radicalmente a la resistividad. Si la cantidad de agua en el suelo varia, de acuerdo con el clima, los meses del año, la naturaleza del subsuelo y la profundidad permanente del nivel friático, la resistividad variará.

Los efectos típicos del agua en el suelo:

Cuando el suelo está seco los dos tipos de suelo son buenos aisladores (resistividad más grande que 1000×10^6 Ohms-cm).

Con el contenido de humedad del 15%, la resistividad del terreno decrece (por un factor alrededor de 100 000).

Actualmente, el **agua pura tiene una resistividad infinitamente alta**. Naturalmente, la sal dentro de la tierra, disuelta en agua, baja la resistividad. Sólo un pequeño aumento de sal puede reducir la resistividad del terreno.

Efecto de la temperatura sobre la resistividad del terreno.

Existen dos factores que se manifiestan al incrementarse la temperatura y podrá decrecer la resistividad:

1. El agua presente en el suelo principalmente determina la resistividad.
2. Un incremento en la temperatura marcadamente decrecerá la resistividad con el agua.

Cuando el agua está congelada en el suelo, la resistividad salta apreciablemente; el hielo tiene una resistividad alta. Por lo que al decrecer la temperatura hacia la congelación, se tendrá un valor realmente alto, como en el Polo Norte.

Variaciones de la resistividad del terreno en diferentes épocas

La resistividad del terreno varía considerablemente en diferentes épocas del año, esto es particularmente cierto en lugares donde existen cambios extremos de temperatura, lugares lluviosos, secos y otras variaciones de temporadas.