

3 Cálculo malla de tierra

La puesta a tierra es un mecanismo de seguridad que forma parte de las instalaciones eléctricas y que consiste en conducir eventuales desvíos de la corriente hacia la tierra, impidiendo que el usuario entre en contacto con la electricidad.

3.1 Definición

La malla de tierra es un conjunto de conductores desnudos que permiten conectar los equipos que componen una instalación a un medio de referencia, en este caso la tierra. Tres componentes constituyen la resistencia de la malla de tierra:

- La resistencia del conductor que conecta los equipos a la malla de tierra.
- La resistencia de contacto entre la malla y el terreno.
- La resistencia del terreno donde se ubica la malla.
- Una malla de tierra puede estar formada por distintos elementos:
- Una o más barras enterradas.
- Conductores instalados horizontalmente formando diversas configuraciones.
- Un reticulado instalado en forma horizontal que puede tener o no barras conectadas en forma vertical en algunos puntos de ella.

3.2 Función del sistema de puesta a tierra

- Proporcionar un camino definido de regreso a la fuente de energía y con impedancia suficientemente baja, vía los conductores de tierra, de tal modo que ante el evento de una falla a tierra de un conductor activo, fluya por una ruta predeterminada una corriente suficiente, que permita operar al dispositivo de protección del circuito.
- Limitar a un valor seguro la elevación de potencial en todas las estructuras metálicas a las cuales tienen normalmente acceso personas y animales, bajo condiciones normales y anormales del circuito.

3.3 Requisitos del sistema de puesta a tierra

- Debe tener una resistencia tal, que el sistema se considere sólidamente puesto a tierra.
- La variación de la resistencia, debido a cambios ambientales, debe ser despreciable de manera que la corriente de falla a tierra, en cualquier momento, sea capaz de producir el disparo de las protecciones.
- Impedancia de onda de valor bajo para fácil paso de las descargas atmosféricas.
- Debe conducir las corrientes de falla sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre sus puntos vecinos.
- Al pasar la corriente de falla durante el tiempo máximo establecido de falla, (es decir disparo de respaldo), no debe haber calentamientos excesivos.
- Debe ser resistente a la corrosión.

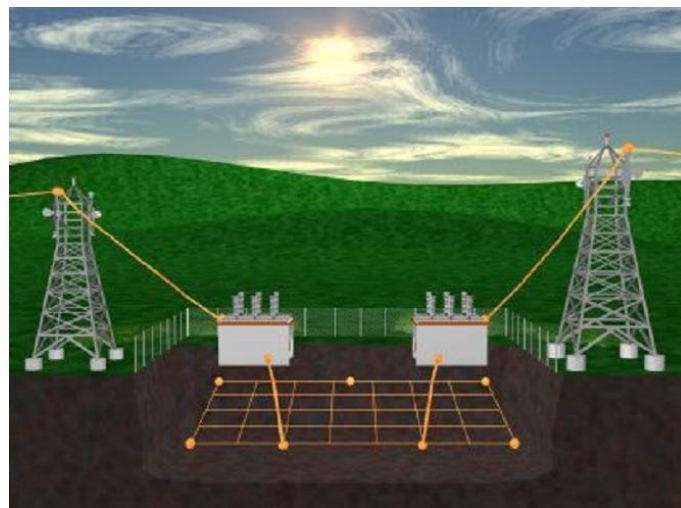


Figura 3-1. Malla de tierra de subestación

3.4 Opciones de conexión de mallas de tierra

Los métodos para efectuar una conexión a tierra en bajo voltaje reciben definiciones estándar. Cada uno se identifica por un código que contiene las siguientes letras:

T: tierra, conexión directa a tierra.

N: neutro

C: combinada

S: separada

3.4.1 Sistema tipo TN-S

En este tipo, el neutro tiene un único punto de conexión a tierra en el transformador de alimentación.

3.4.2 Sistema Tipo TN-C-S

En este tipo, el neutro de la alimentación se pone a tierra en varios puntos. La alimentación en el interior de la instalación del cliente debiera ser TN-S, es decir, el neutro y la tierra separados, conectados sólo en la posición de servicio.

3.4.3 Sistema Tipo PNB

Este es una variación del sistema TN-C-S en que el cliente dispone de un terminal de tierra conectado al neutro de la alimentación pero el neutro se conecta a tierra en un único punto, normalmente cerca del punto de alimentación al cliente. Se reserva el uso de este arreglo cuando el cliente tiene un transformador particular.

3.4.4 Sistema Tipo TT

Este es un sistema donde la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero la instalación del cliente, la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas están conectadas a tierra vía un electrodo separado, que es independiente del electrodo de alimentación.

3.4.5 Sistema Tipo IT

Este es un sistema que no tiene conexión directa entre partes vivas y tierra pero con las partes conductivas expuestas de la instalación conectada a tierra.

3.5 Conexión equipotencial

Consiste en establecer una conexión conductiva directa entre la tierra de protección y todos los elementos conductores expuestos que pudieran quedar energizados bajo una condición de falla.

La conexión conjunta de todas las estructuras metálicas normalmente expuestas, y la conexión de éstas al terminal de tierra, previene la posibilidad de una diferencia de potencial peligrosa que surja entre conductores adyacentes ya sea bajo condiciones normales o anormales.

3.6 Medición resistividad del terreno

La resistividad del terreno es de importancia decisiva en el diseño de una puesta a tierra y la única forma de conocerla con exactitud es mediante medidas directas de campo. Para esto, se considera al terreno formado por capas o estratos homogéneos, de resistividad uniforme y espesor fijo.

3.6.1 Tipos de suelos

Es importante aclarar que el suelo no es un material homogéneo, y en general se suele modelar su composición por capas compuestas aproximadamente por los mismos materiales. La variedad de esta composición es muy grande, y corresponde a una clasificación de suelos mucho más exhaustiva.

Es así como, la conducción en los suelos, de carácter electroquímico, depende de factores como:

- La porosidad de materiales componentes del terreno.
- La distribución y disposición de los poros.
- La conductividad de la solución acuosa que llena los poros.

De este modo, considerando el tipo de agua que llena los poros del material que compone el terreno y la resistividad del agua, es posible una clasificación estimativa de los terrenos de acuerdo a su resistividad según se muestra en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Valores usuales de resistencia de tierra

Tipo de Terreno	Ohm-metro
Terrenos vegetales húmedos	10 - 50
Arcillas, gredas, limos	20 - 60
Arenas arcillosas	80 - 120
Fangos, turbas	150 – 300
Arenas	250 - 500
Suelos pedregosos	300 - 400
Rocas	1.000 – 10.000
Concreto húmedo	100 – 240
Concreto seco	10.000 – 50.000

3.7 Componentes de la malla de tierra

Hay dos principales componentes del sistema de puesta a tierra:

- Conductores de protecciones.
- Electrodo de tierra.

3.7.1 Conductores de conexión

Es un conductor separado instalado con cada circuito y está presente para asegurar que parte o toda la corriente de falla regrese por un lugar seguro. Estos conductores se encargan de que las partes conductivas expuestas (como las carcasas metálicas) permanezcan aproximadamente al mismo potencial durante las condiciones de falla eléctrica.

Los conductores forman una conexión equipotencial, que conectan entre sí y a tierra, partes conductivas expuestas que normalmente no llevan corriente, pero podrían hacerlo bajo una condición de falla.

3.7.2 Electrodo de tierra

Es el componente del sistema que está en contacto directo con el terreno y así proporciona un medio para botar cualquier tipo de corriente de fuga a tierra.

Los electrodos de tierra deben tener propiedades mecánicas y eléctricas apropiadas para responder satisfactoriamente a las solicitaciones que los afectan, durante un período de tiempo relativamente largo. El material debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones de suelo. El material preferido generalmente es el cobre.

El electrodo puede tomar diversas formas: barras verticales, conductores horizontales, placas, combinación de conductores horizontales y barras verticales (mallas de tierra).

- **Barras:** Es la forma más común de electrodos, cuando no se requiere controlar los potenciales de superficie. Su costo de instalación es relativamente barato y pueden usarse para alcanzar en profundidad en capas de terreno de baja resistividad.
La barra es de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero empleado tiene alta resistencia mecánica. La capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente para que no se deslice al enterrar la barra.
- **Placas:** Los electrodos de placa son de cobre o de acero galvanizado. Las planchas de acero galvanizado tienen un mínimo de 3 mm de espesor y son cuadradas de 915 o 1220 mm por lado. Las planchas de cobre son típicamente cuadradas de 600 mm o 900 mm de lado y entre 1,6 mm y 3 mm de espesor.
- **Electrodos horizontales:** Están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cables). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia. Puede ser más difícil de conectar (por ejemplo a barras verticales), de modo que puede significar un costo de instalación levemente mayor.
- **Mallas de tierra:** Es un reticulado formado por la unión de conductores horizontales, normalmente según direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados, incluyendo eventualmente conductores verticales (barras). Se utiliza especialmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un bajo valor de resistencia.

3.8 Voltajes presentes en mallas de tierra

3.8.1 Tensión de paso

Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$Ep = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

Ep = Tensión de Paso Permissible en voltios.

ρ_s = Resistividad de la superficie del terreno en (Ω -m)

t = Duración máxima de falla en segundos.

3.8.2 Tensión de contacto

Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto que se pueda ser tocado simultáneamente por una persona; su valor permisible está dado por:

$$Ep = \frac{165 + 0.25 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

En donde:

Et = Tensión de contacto permisible en voltios.

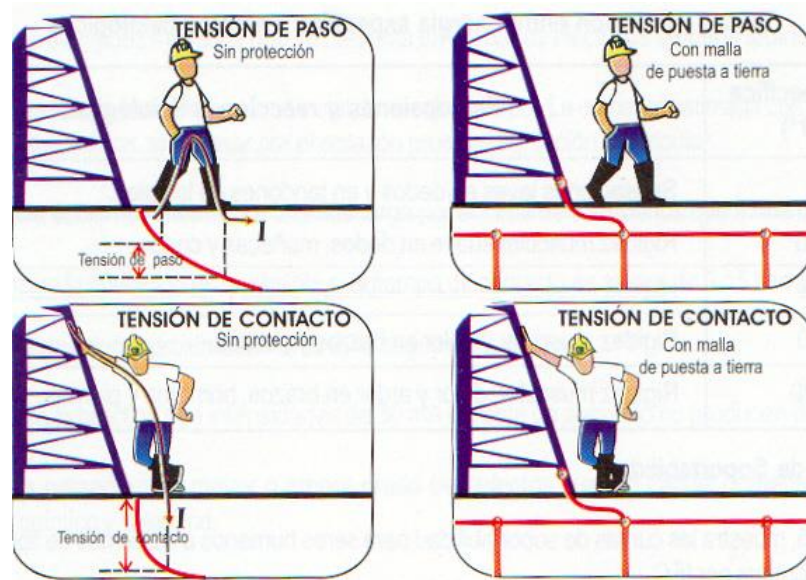


Figura 3-2. Tensiones de paso y de contacto

3.9 Métodos de instalación

El método de instalación, relleno y conexiones dependerá del tipo de sistema de electrodos que se usará y de las condiciones del terreno.

Para una correcta instalación se deben cumplir las siguientes condiciones:

- El trabajo debe realizarse eficientemente para minimizar costos de instalación.
- El terreno o material de relleno usado no debe tener un índice de acidez pH que cause corrosión al electrodo.
- Todas las uniones o conexiones bajo tierra deben ser construidas de modo que no se presente corrosión en la unión o conexión.

3.10 Conexiones

Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es prudente evitar uniones y conexiones innecesarias.

Debe considerarse la duración y el valor de corriente de falla que se espera que soporte el sistema de tierra. Los métodos de unión empleados incluyen métodos mecánicos, soldadura en fuerte (bronceado), soldadura exotérmica y soldadura por fusión autógena.

3.10.1 Conexiones mecánicas

Las de uso más frecuente son la conexión apernada (en el caso de cintas o barras de sección rectangular) y la conexión por compresión (abrazadera). Es esencial una conexión eléctrica de baja resistencia. En las conexiones apernadas, debe tenerse cuidado con el tamaño de las perforaciones taladradas para acomodar el perno, para no perjudicar la capacidad de transporte de corriente de la cinta o barra.

3.10.2 Conexiones bronceadas

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y a aleaciones de cobre. Es esencial disponer las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado no fluyen como la soldadura. Es esencial además una buena fuente de calor, particularmente para conectores grandes. La técnica emplea alta temperatura y bronce como material de relleno, que es el que más se ajusta al cobre.

3.10.3 Uniones exotérmicas

Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvos de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro entorno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito.

3.10.4 Conexiones soldadas en forma autógena

Cuando necesitan unirse componentes de cobre de gran tamaño, se usa soldadura autógena en ambiente gaseoso. El arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área entorno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón, helio o nitrógeno. Este último se usa ampliamente como el “gas inerte” cuando se suelda cobre.

Los metales que pueden conectarse son acero inoxidable, bronce, cobre, acero con cubierta de cobre, acero galvanizado y riel de acero.

3.10.5 Capacidad de transporte de corriente de falla

El tipo de unión puede influir en el tamaño del conductor usado debido a las diferentes temperaturas máximas permisibles para las distintas uniones. La tabla siguiente indica la máxima temperatura permisible para diferentes tipos de uniones y el tamaño del conductor requerido según el tipo de unión, para una corriente de falla de 25 kA y una duración de 1 segundo.

Tabla 3-2. Temperatura máxima permisible para diferentes tipos de uniones

Uniones	Apernada	Bronceada	Soldada
Temp.			
Máxima	250°C	450°C	700°C
Calibre			
Conductor	152mm ²	117mm ²	101mm ²

3.11 Relleno

Derramando una mezcla de sustancias químicas y de tierra arneada en el volumen alrededor del electrodo, se obtendrá una reducción inmediata y significativa en su resistencia de puesta a tierra. Sin embargo, si los elementos químicos usados se eligen debido a que son solubles, continuarán diluyéndose progresivamente por agua de lluvia u otra causa y la resistividad del suelo va a aumentar, hasta eventualmente retornar a su valor original. Se necesita un mantenimiento regular para reaprovisionamiento de los elementos químicos diluidos. Además del costo de mantenimiento, debe considerarse el impacto en el ambiente local de las sustancias químicas incorporadas, lo que puede entrar en conflicto con la legislación de protección al ambiente. Esta razón descarta un grupo de materiales que antiguamente se empleaban como relleno. En particular, materiales que no debieran ser usados como relleno son: arena, polvo de coque, ceniza, y otros materiales ácidos y/o corrosivos.

3.12 Cálculo Malla de Tierra

El diseño de una malla de tierra está afectado por las siguientes variables:

- Conductor de la malla.
- Tensión permisible de paso.
- Tensión permisible de contacto.
- Configuración de la malla.
- Resistividad del terreno.
- Tiempo máximo de despeje de la falla.
- Profundidad de instalación de la falla.

Datos para el dimensionamiento:

- Dimensiones del patio: 60x50 m²
- Corriente máxima de falla: 2000 A
- Nivel de tensión: 420 V
- Resistividad del suelo: 300 Ω-m
- Resistividad de la superficie: 4000 Ω-m
- Tiempo máximo de falla: 1 seg.

3.12.1 Selección del conductor

Sea $T_a=25^{\circ}\text{C}$ y $T_m=250^{\circ}\text{C}$ (uniones apernadas).

$$Ac = I_{cc} \left(\frac{33 * t_{falla}}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 - T_a} + 1\right)} \right)^{1/2} [CM]$$

$$Ac = 2000 \left(\frac{33 * 1}{\log\left(\frac{250 - 25}{234 - 25} + 1\right)} \right)^{1/2} [CM]$$

$$Ac = 22.205 CM$$

Se sabe que:

$$1cm = 5 * 10^{-4} mm^2 \Rightarrow 22.205 cm = 11.1 mm^2 \Rightarrow \text{Diámetro} = 3.76 mm$$

3.12.2 Elección de la malla

Supóngase que se tienen cuadrados de 10m.

Con los siguientes datos:

- A= 40m (Longitud de la malla).
- B= 40m (Ancho de la malla).
- n= 5 (Número de conductores en paralelo de longitud A).
- m= 5 (Número de conductores en paralelo de longitud B):
- D= 10m (Espaciamiento entre conductores).
- h= 0.7m (Profundidad de enterramiento).
- d= 0.004m (Diámetro del conductor).
- L= 400m (Longitud total del conductor).
- km= Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.
- ki= Coeficiente de irregularidad del terreno.
- ks= Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia y el espaciado de la malla.

$$km = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{D^2}{16 * h * d} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \right)$$

$$km = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{10^2}{16 * 0.7 * 0.00376} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} \right) = 1.045$$

$$ki = 0.65 + 0.172 * n$$

$$ki = 0.65 + 0.172 * 5 = 1.5$$

$$ks = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{2 * D} + \frac{1}{3 * D} + \frac{1}{4 * D} \right)$$

$$ks = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 * 0.7} + \frac{1}{10 + 0.7} + \frac{1}{2 * 10} + \frac{1}{3 * 10} + \frac{1}{4 * 10} \right) = 0.291$$

3.12.3 Tensión de paso

Valor permisible:

$$Ep = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \Rightarrow Ep = \frac{165 + 4000}{\sqrt{1}} \Rightarrow Ep = 4165 [V]$$

Valor real:

$$Ep = ks * ki * \frac{\rho * I_{cc}}{L} \Rightarrow Ep = 0.291 * 1.5 * \frac{300 * 2000}{400} \Rightarrow Ep = 655 [V]$$

3.12.4 Tensión de Contacto

Valor permisible:

$$Et = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}} \Rightarrow Et = \frac{165 + 0.25 * 4000}{\sqrt{1}} \Rightarrow Et = 1165 [V]$$

Valor real:

$$Et = km * ki * \frac{\rho * I_{cc}}{L} \Rightarrow Et = 1.045 * 1.5 * \frac{300 * 2000}{400} \Rightarrow Et = 2352 [V]$$

Al obtener el valor real muy superior al valor permisible, está claro que la malla obtenida no cumple con las condiciones para ser segura. Por lo tanto, se opta por nuevas configuraciones para realizar los cálculos nuevamente, para que la malla si cumpla con los requisitos mínimos.

3.12.5 Configuración correcta de la malla

Supóngase que se tienen cuadrados de 7m.

Con los siguientes datos:

- A= 63m (Longitud de la malla).
- B= 49m (Ancho de la malla).
- n= 8 (Número de conductores en paralelo de longitud A).
- m= 10 (Número de conductores en paralelo de longitud B):
- D= 7m (Espaciamiento entre conductores).
- h= 0.7m (Profundidad de enterramiento).
- d= 0.004m (Diámetro del conductor).
- L= 994m (Longitud total del conductor).
- km= Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla.
- ki= Coeficiente de irregularidad del terreno.
- ks= Coeficiente que tiene en cuenta, la influencia y el espaciamiento de la malla.

$$km = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{D^2}{16 * h * d} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \frac{9}{10} * \frac{11}{12} * \frac{13}{14} \right)$$

$$km = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{7^2}{16 * 0.7 * 0.004} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \frac{9}{10} * \frac{11}{12} * \frac{13}{14} \right) = 0.8367$$

$$ki = 0.65 + 0.172 * n, \text{ para } n \leq 7; \text{ Para } n > 8 \text{ } ki = 2$$

$$ki = 2$$

$$ks = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{2 * D} + \frac{1}{3 * D} + \frac{1}{4 * D} + \frac{1}{5 * D} + \frac{1}{6 * D} + \frac{1}{7 * D} \right)$$

$$ks = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 * 0.7} + \frac{1}{7 + 0.7} + \frac{1}{2 * 7} + \frac{1}{3 * 7} + \frac{1}{4 * 7} + \frac{1}{5 * 7} + \frac{1}{6 * 7} + \frac{1}{7 * 7} \right) = 0.3412$$

- Tensión de paso

Valor permisible:

$$Ep = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \Rightarrow Ep = \frac{165 + 4000}{\sqrt{1}} \Rightarrow Ep = 4165 [V]$$

Valor real:

$$Ep = ks * ki * \frac{\rho * I_{cc}}{L} \Rightarrow Ep = 0.3412 * 2 * \frac{300 * 2000}{994} \Rightarrow Ep = 412 [V]$$

- Tensión de contacto

Valor permisible:

$$Et = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}} \Rightarrow Et = \frac{165 + 0.25 * 4000}{\sqrt{1}} \Rightarrow Et = 1165 [V]$$

Valor real:

$$Et = km * ki * \frac{\rho * I_{cc}}{L} \Rightarrow Et = 0.8367 * 2 * \frac{300 * 2000}{994} \Rightarrow Et = 1010 [V]$$

Para esta configuración de la malla, los valores de tensión de contacto y de paso si cumplen los requisitos mínimos, y se opta por construir esta configuración.

Para comprobar la resistencia total de la malla se usara el método de Laurent y Niemann.

$$R = 0.443 * \rho \left(\frac{1}{\sqrt{A\gamma}} + \frac{1}{L} \right)$$

Donde:

R= Resistencia en ohms.

A γ = Área de la malla de puesta a tierra.

ρ = Resistividad del suelo.

L= Longitud total del conductor.

Esta ecuación es una aproximación y su resultado siempre es mayor que el valor real.

$$R = 0.443 * 300 \left(\frac{1}{\sqrt{63 * 49}} + \frac{1}{994} \right) = 2.52 \Omega$$

La Norma Chilena Eléctrica 4/2003 estipula en el punto 10.1.6.2 que la resistencia combinada de todas las puestas a tierra resultantes de la aplicación de esta exigencia no deberá exceder de 5 Ohm.

Considerando que el valor de resistencia obtenido es menor que el exigido por la norma, el cálculo de la malla de tierra cumple con todos los requisitos requeridos.

3.13 Conclusión del capítulo

En toda instalación eléctrica es necesario garantizar la seguridad de las personas que harán uso de ella. Para tal efecto es necesario dotarla de los mecanismos de protección que correspondan.

Cuando se trate de instalaciones eléctricas fijas y móviles; con estructuras susceptibles de deterioro desde el punto de vista eléctrico, es fundamental la protección contra las fallas de aislación que originan la aparición de tensiones por contactos indirectos.

Las tensiones por contacto indirecto son originadas en las estructuras metálicas de los equipos eléctricos, cuando un conductor o terminal energizado, ante la pérdida de aislación, establece contacto con la estructura, energizándola.

Para minimizar los efectos de dichos contactos indirectos, toda instalación eléctrica debe contar con un sistema de protección; el método más efectivo y el que presenta la mayor seguridad para las personas es el sistema de Puestas a Tierra de Protección.