

Capítulo 2

Consideraciones para el diseño de un sistema de tierras.

2.1 Seguridad y condiciones de riesgo

-Seguridad

El sistema de tierras tiene como objetivos principales:

- Proporcionar un medio para drenar las corrientes eléctricas bajo condiciones normales y de falla, sin exceder alguno de los límites de operación, de equipo o bien afectar de forma adversa la continuidad del servicio.
- Asegurar que cualquier persona que se encuentre dentro del área que ocupa el sistema de tierras, no esté expuesta tan fácilmente al peligro de una descarga eléctrica.

-Condiciones de riesgo

Circunstancias que pueden producir posibles accidentes de descargas eléctricas:

- Corrientes de falla a tierra relativamente altas en relación con el área del sistema de tierras.
- Resistividad del suelo y distribución de las corrientes de tierra tales que pueden producirse elevados gradientes de potencial en la superficie de la tierra.
- Presencia de un individuo en el punto, tiempo y posición tales que el cuerpo sea en puente entre dos puntos de una elevada diferencia de potencial.
- Ausencia de suficiente resistencia de contacto u otras resistencias en serie que limite la corriente a través del cuerpo humano a un valor seguro bajo las circunstancias anteriores.
- Duración de la falla, del contacto del cuerpo y por lo tanto del flujo de corriente a través del cuerpo por un tiempo suficiente para causar daño dada la intensidad de la corriente.

2.2 Resistencia del cuerpo humano

Para la corriente directa y para la corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia. Esta resistencia está medida entre extremidades, esto es, entre mano y ambos pies o entre un pie y el otro.

En cualquiera de los casos el valor de esta resistencia es difícil de establecer. La resistencia del cuerpo interno, no incluyendo la piel es de aproximadamente 300 ohm, sin embargo cuando se incluye la piel, e incluso el factor estado de ánimo de las personas, los valores de resistencia del cuerpo humano están dentro del rango de 500 a 3000 ohms.

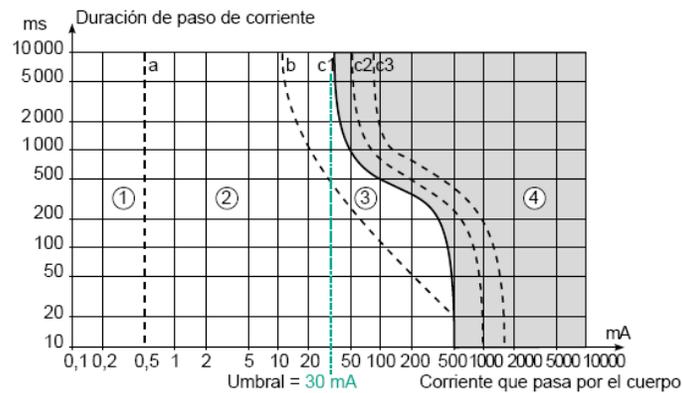
Para altos voltajes y corrientes, la resistencia disminuye por quemaduras o incluso perforaciones de la piel en el punto de contacto. Sin embargo la resistencia de contacto de una mano húmeda puede ser muy baja a cualquier voltaje.

El valor de la resistencia de los zapatos es incierto, aunque esta dependa de las condiciones, puede ser mucho más bajo que para la piel húmeda.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- Se ha seleccionado el valor de 1000 ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro.

Los efectos fisiológicos más comunes que se presentan al ir incrementando la corriente eléctrica que circula por el cuerpo se describen en la siguiente gráfica.



Zona 1: percepción
Zona 2: gran malestar y dolor
Zona 3: contracciones musculares
Zona 4: riesgo de fibrilación ventricular (parada cardíaca)
C₁: probabilidad 5%
C₃: probabilidad > 50%

La gráfica adjunta está tomada de la norma IEC 60479

- Una corriente de 0,5 mA es conocida como la corriente del umbral de percepción, y, la persona apenas la percibe como un cosquilleo.
- Las corrientes en la zona 2 (entre 0,5 mA y la curva b) son desagradables y permiten a la persona soltar el objeto energizado sin dañar su destreza manual.
- Las corrientes en la zona 3 son dolorosas y hacen difícil para la persona soltar el objeto energizado.
- En la zona 4 la persona puede sufrir de fibrilación ventricular, o un paro cardíaco, que le pueden causar la muerte. Entre las curvas c1 y c2 la probabilidad es del 5%; entre c2 y c3 de 50%, y arriba de c3, de más del 50%.

Todos los sistemas eléctricos deben diseñarse para que la magnitud y duración de la corriente que puede circular por el cuerpo humano siempre sea menor que la que cause fibrilación.

De acuerdo con los estudios de Dalziel, la corriente permisible a través del cuerpo humano por un periodo corto de tiempo, 0.03-3s, sin causar fibrilación ventricular puede ser determinado como

$$I_b := \frac{0.116}{\sqrt{T}}$$

Donde

I_b (A) Es la corriente máxima tolerada por el corazón sin fibrilar.

T (s) Duración del tiempo de disparo de la protección

Basado en muchos estudios, la fórmula anterior puede considerarse como conservadora para corriente eléctrica a 60 Hz, y para una persona de 50 kg. (De 70 kg, la constante es 0.157).

2.3 Libramiento de una falla

Considerando la importancia de la duración de la falla, e implícitamente el factor de exposición del accidente, la rapidez de libramiento de falla a tierra es ventajosa por dos razones:

1. La probabilidad de un choque eléctrico se reduce enormemente debido a la rapidez del libramiento de falla, en contraste con las situaciones en las cuales la corriente de falla puede persistir por algunos minutos.
2. Las pruebas y experiencias demuestran que la probabilidad de un gran daño o la muerte también se reduce si la duración de la corriente que fluye a través del cuerpo es muy corta, el valor de la corriente permisible puede sin embargo estar basado en el tiempo de libramiento de los dispositivos de protección.

2.4 Situaciones típicas de choque

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas, debidas a disturbios atmosféricos o fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan peligro a los operadores o en general al personal que labora en el local de las instalaciones. Intensidades del orden de miles de amperes, producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto o puntos de contacto a tierra y si además, se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos, entre los cuales existe una diferencia de potencial debido al gradiente antes indicado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que lo dañe severamente. En tal situación, la corriente que circula por su cuerpo aumenta y si pasa por algún órgano vital como el corazón, puede resultar en fibrilación ventricular y causar la muerte. Por esto, es necesario considerar los siguientes conceptos:

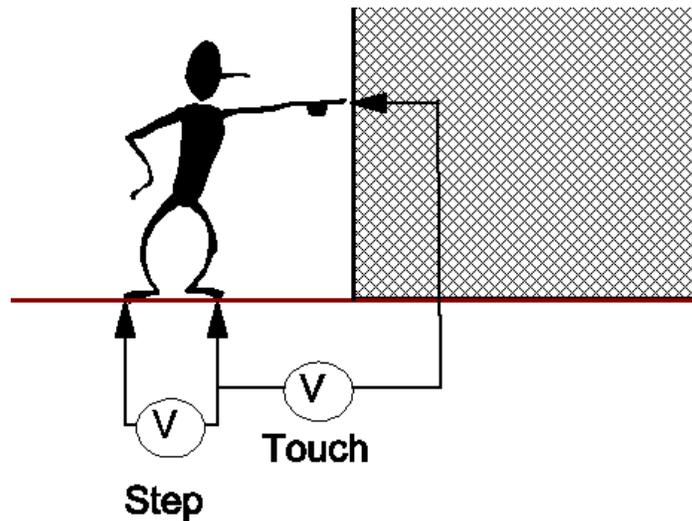
- ❖ Tensión de Paso (E_p): es la diferencia del potencial superficial que experimenta una persona parada, con los pies a 1 metro de separación y sin hacer contacto con algún objeto aterrizado.

- ❖ Elevación del potencial de tierra (GPR): Es el máximo potencial eléctrico que una rejilla para tierra en una subestación puede alcanzar con relación a un punto de tierra distante, asumiendo que esté al potencial de la tierra remota. Este potencial es igual a la corriente máxima de rejilla multiplicada por la resistencia de la misma.

- ❖ Tensión de Contacto (E_c): es la diferencia de potencial entre la elevación de potencial de tierra y el potencial superficial en el punto en donde la persona esta parada, cuando al mismo tiempo tiene sus manos en contacto con una estructura metálica aterrizada.

- ❖ Tensión de Malla (E_m): es la máxima tensión de contacto dentro de una malla en una rejilla para tierra.

- ❖ Tensión Transferida: es un caso especial de tensión de contacto en donde una tensión es transferida hacia el interior o la parte de afuera de la subestación desde un punto externo remoto.



La figura muestra los peligros eléctricos que un ser humano puede sufrir debido a un potencial de toque y de paso, y sus circuitos equivalentes.

En ambos casos el cuerpo humano está en serie con la resistencia de los pies y del pie a la superficie de la tierra, y forma un circuito en paralelo a la corriente eléctrica. La resistencia entre los pies y la superficie de la tierra es aproximadamente una resistencia de $3\rho_s$, donde ρ_s es la resistividad de la superficie de la tierra en ohms-metro.

El circuito en paralelo del cuerpo humano y los pies a tierra determina la corriente que fluye por el cuerpo humano y puede ser representado como:

$$R = 1000 + 1.5 \rho_s \quad [\Omega] \quad (\text{para el caso del potencial de toque})$$

$$R = 1000 + 6 \rho_s \quad [\Omega] \quad (\text{para el caso del potencial de paso})$$

Ya que es más fácil medir potencial de paso y de potencial que la corriente, los potenciales de paso y de toque máximos tolerables son:

$$E_{\text{paso}} := (1000 + 6\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T}} \right)$$

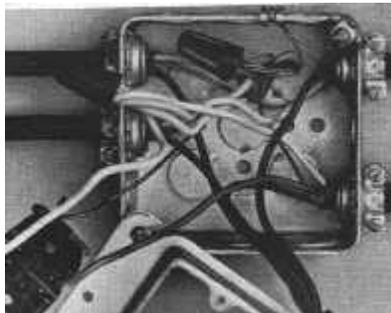
$$E_{\text{toque}} := (1000 + 1.5\rho_s) \left(\frac{0.116}{\sqrt{T}} \right)$$

2.5 Equipo que debe ser aterrizado

Los sistemas de puesta a tierra de equipos, por su importancia como medio de protección están muy normalizados a nivel mundial. En nuestro país, la norma vigente de Instalaciones Eléctricas, NOM- 001-SEDE-2005, contiene los requisitos mínimos de seguridad desde el punto de vista de la conducción de corrientes de falla.

- CANALIZACIONES Y EQUIPOS QUE DEBEN ESTAR PUESTOS A TIERRA

Deben estar aterrizadas, en general, todas las canalizaciones y cajas metálicas.

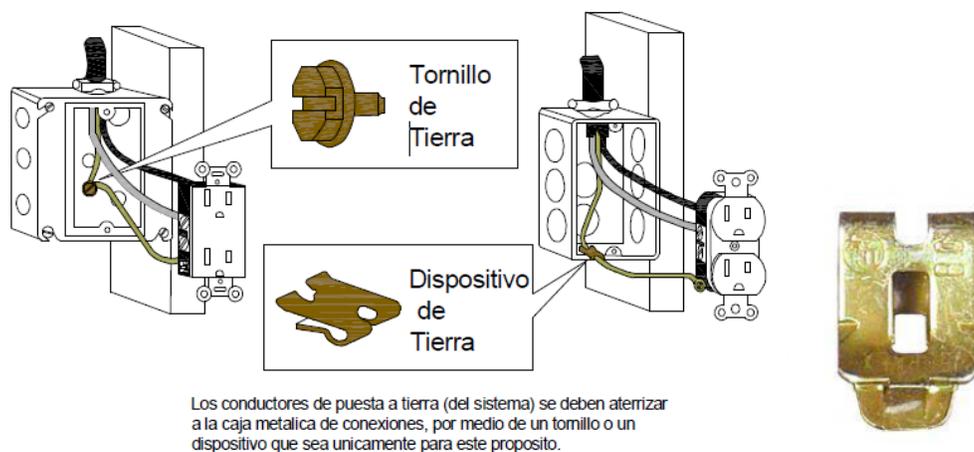


250-114. Continuidad y conexión de los conductores de puesta a tierra de equipo a cajas. Cuando entren en una caja o tablero dos o más conductores de puesta a tierra de equipo, todos esos conductores deben empalmarse o unirse dentro de la caja o a la caja, con accesorios adecuados a ese uso. No deben hacerse conexiones que dependan únicamente de soldadura. Los empalmes deben hacerse según se indica en 110-14(b), excepto el aislamiento, que no es necesario. La instalación de las conexiones de puesta a tierra debe hacerse de forma tal que la desconexión o desmontaje de una conexión, aparato eléctrico u otro dispositivo que reciba energía desde la caja, no impida ni interrumpa la continuidad de puesta a tierra.

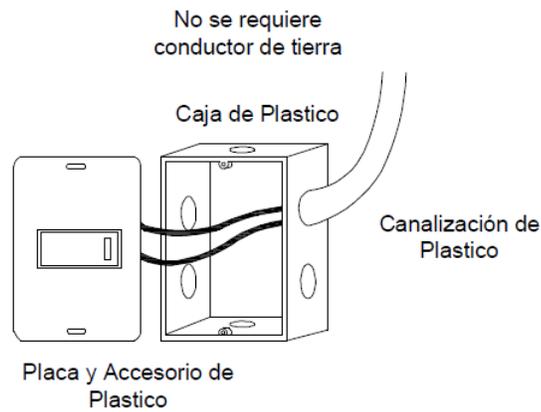
- 110-14 (b) Empalmes. Los conductores deben empalmarse con dispositivos adecuados según su uso o con soldadura de bronce, soldadura autógena, o soldadura con un metal de aleación fundible. Los empalmes soldados deben unirse primero, de forma que aseguren, antes de soldarse, una conexión firme, tanto mecánica como eléctrica. Los empalmes, uniones y extremos libres de los conductores deben cubrirse con un aislamiento equivalente al de los conductores o con un dispositivo aislante adecuado.

Excepción: No es necesario que el conductor de puesta a tierra de equipo, tal como se permite en la Excepción 4 de 250-74, esté conectado a los otros conductores de puesta a tierra de equipo ni a la caja.

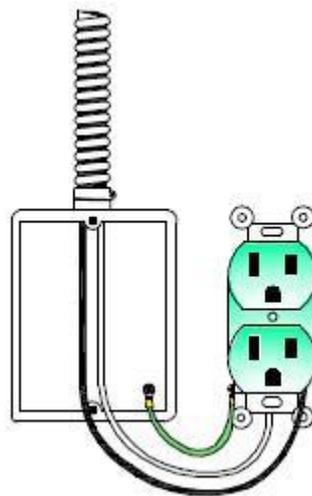
a) Cajas metálicas. Se debe hacer una conexión entre el conductor o conductores de puesta a tierra de equipo y la caja metálica, por medio de un tornillo de puesta a tierra que no debe utilizarse para otro uso o de un dispositivo aprobado y listado para puesta a tierra.



b) *Cajas no metálicas. Cuando lleguen a una caja de empalmes no metálica uno o más conductores de puesta a tierra de equipo, se deben instalar de manera que puedan conectarse a cualquier herraje o dispositivo de la caja que deba ponerse a tierra.*



Hay que hacer notar que la cinta metálica del cable tipo AC puede servir de puesta a tierra, por lo que de la caja al receptáculo debe salir el conductor de puesta a tierra.



250-74. *Conexión de la terminal de puesta a tierra de un receptáculo a la caja. Se debe realizar una conexión de la terminal de puesta a tierra de un receptáculo a la caja de conexiones efectivamente puesta a tierra.*

318-7. Puesta a tierra de los soportes para cables

a) Soporte tipo charola metálico para cables. Los soportes tipo charola metálicos para cables que soporten conductores se deben poner a tierra como lo exige el Artículo 250 para las envolventes de conductores. Para la puesta a tierra deben cumplirse los siguientes requisitos:

1) Las secciones de soporte tipo charola, los accesorios y otras canalizaciones conectadas deben empalmarse o unirse según lo establecido en 250-75, utilizando conectores mecánicos con tornillos o puentes de unión que cumplan los requisitos establecidos en 250-79.

2) Para efectuar la conexión de puesta a tierra del sistema de soporte tipo charola, se debe proveer de un cable de puesta a tierra de un material compatible con el del soporte y en toda la extensión del sistema de soporte tipo charola. El conductor de puesta a tierra debe unirse eléctricamente a los soportes tipo charola utilizando conectores metálicos con tornillos o puentes de unión de sección transversal adecuada a intervalos no mayores que 15 m. El tamaño nominal del conductor de puesta a tierra debe basarse en la capacidad o ajuste máximo del dispositivo de protección contra sobrecorriente del circuito o circuitos instalados en el soporte tipo charola.

3) El conductor de puesta a tierra puede alojarse en la parte exterior del soporte tipo charola, siempre que no quede expuesto a daño mecánico.

EQUIPO FIJO ESPECÍFICO

250-43. Equipo fijo o conectado de forma permanente-específico. Deben ser puestos a tierra, independientemente de su tensión eléctrica nominal, las partes metálicas expuestas y no conductoras de corriente eléctrica del equipo descrito a continuación ((a) a (j)), y las partes metálicas no destinadas a conducir corriente eléctrica del equipo y de envolventes descritas en (k) y (l):

a) Armazones y estructuras de tableros de distribución.

b) Órganos de tubos.

c) Armazones de motores.

d) Cubiertas de los controladores de motores.

e) Grúas y elevadores.

f) Estacionamientos públicos, teatros y estudios cinematográficos.

g) Anuncios luminosos.

- h) Equipo de proyección de películas.*
- i) Circuitos de control remoto, señalización y alarma contra incendios de energía limitada.*
- j) Luminarios.*
- k) Bombas de agua operadas por motor.*
- l) Ademes metálicos de pozos.*

EQUIPO FIJO EN GENERAL

250-42. Equipo fijo o conectado de forma permanente. Las partes metálicas expuestas y no conductoras de corriente eléctrica del equipo fijo que no estén destinadas a transportar corriente y que tengan probabilidad de energizarse, deben ser puestos a tierra si se presenta cualquiera de las circunstancias mencionadas en los siguientes incisos:

- a) Distancias horizontales y verticales. Si están a menos de 2,5 m en vertical o de 1,50 m en horizontal de tierra u objetos metálicos puestos a tierra y que puedan entrar en contacto con personas.*
- b) Lugares mojados o húmedos. Cuando estén instaladas en lugares mojados o húmedos y no estén aisladas.*
- c) Contacto eléctrico. Cuando estén en contacto eléctrico con metales.*
- d) Áreas peligrosas (clasificadas). Cuando estén en un área peligrosa (clasificada) de los cubiertos en los Artículos 500 a 517.*
- e) Método de alambrado. Cuando estén alimentados por medio de cables con forro metálico, recubiertos de metal, en canalizaciones metálicas u otro método de instalación que pueda servir de puesta a tierra del equipo,....*
- f) De más de 150 V a tierra. Cuando el equipo funcione con cualquier terminal a más de 150 V a tierra.*

CALIBRE DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS.

250-95. *Tamaño nominal de los conductores de puesta a tierra de equipo. ...*

Cuando haya conductores en paralelo en varias canalizaciones o cables, como se permite en 310-4, el conductor de puesta a tierra de equipo, cuando exista, debe estar instalado en paralelo. Cada conductor de puesta a tierra de equipo instalado en paralelo debe tener un tamaño nominal seleccionado sobre la base de la corriente eléctrica nominal del dispositivo de protección contra sobrecorriente que proteja los conductores del circuito en la canalización o cable, según la Tabla 250-95.

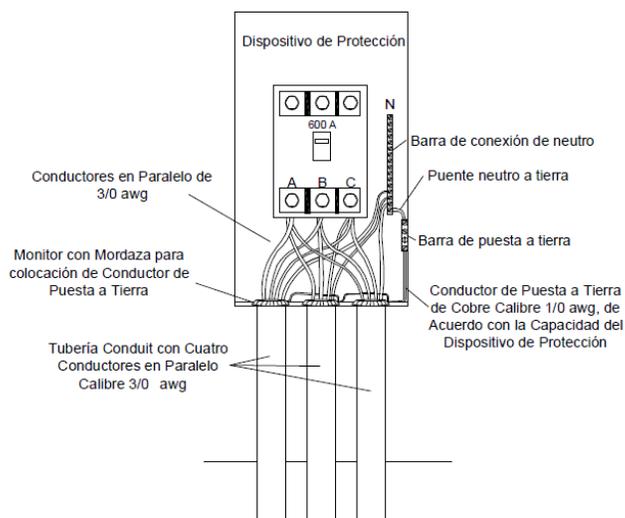


TABLA 250-95.- Tamaño nominal mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos

<p>Capacidad o ajuste del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc. Sin exceder de:</p>	<p>Tamaño nominal mm² (AWG o kcmil)</p>	
	<p>(A)</p>	<p>Cable de cobre</p>
15	2,08 (14)	---
20	3,31 (12)	---
30	5,26 (10)	---
40	5,26 (10)	---
60	5,26 (10)	---
100	8,37 (8)	13,3 (6)
200	13,3 (6)	21,2 (4)
300	21,2 (4)	33,6 (2)
400	33,6 (2)	42,4 (1)
500	33,6 (2)	53,5 (1/0)
600	42,4 (1)	67,4 (2/0)
800	53,5 (1/0)	85,0 (3/0)
1 000	67,4 (2/0)	107 (4/0)
1 200	85,0 (3/0)	127 (250)
1 600	107 (4/0)	177 (350)
2 000	127 (250)	203 (400)
2 500	177 (350)	304 (600)
3 000	203 (400)	304 (600)
4 000	253 (500)	405 (800)
5 000	354,7 (700)	608 (1 200)
6 000	405 (800)	608 (1 200)

Véase limitaciones a la instalación en 250-92(a)

Nota: Para cumplir lo establecido en 250-51, los conductores de puesta a tierra de los equipos podrían ser de mayor tamaño que lo especificado en esta Tabla.

Quando el tamaño nominal de los conductores se ajuste para compensar caídas de tensión eléctrica, los conductores de puesta a tierra de equipo, cuando deban instalarse, se deben ajustar proporcionalmente según el área en mm^2 de su sección transversal.