

Tierras eléctricas

A. Llamas, Jorge de los Reyes P.

Maestría en Ingeniería Energética

ITESM Campus Monterrey, E. Garza Sada 2501 Sur, C.P. 64849, Monterrey, N.L.

Tel.: 3-284513, Fax: (8)-3284513, email: allamas@campus.mty.itesm.mx

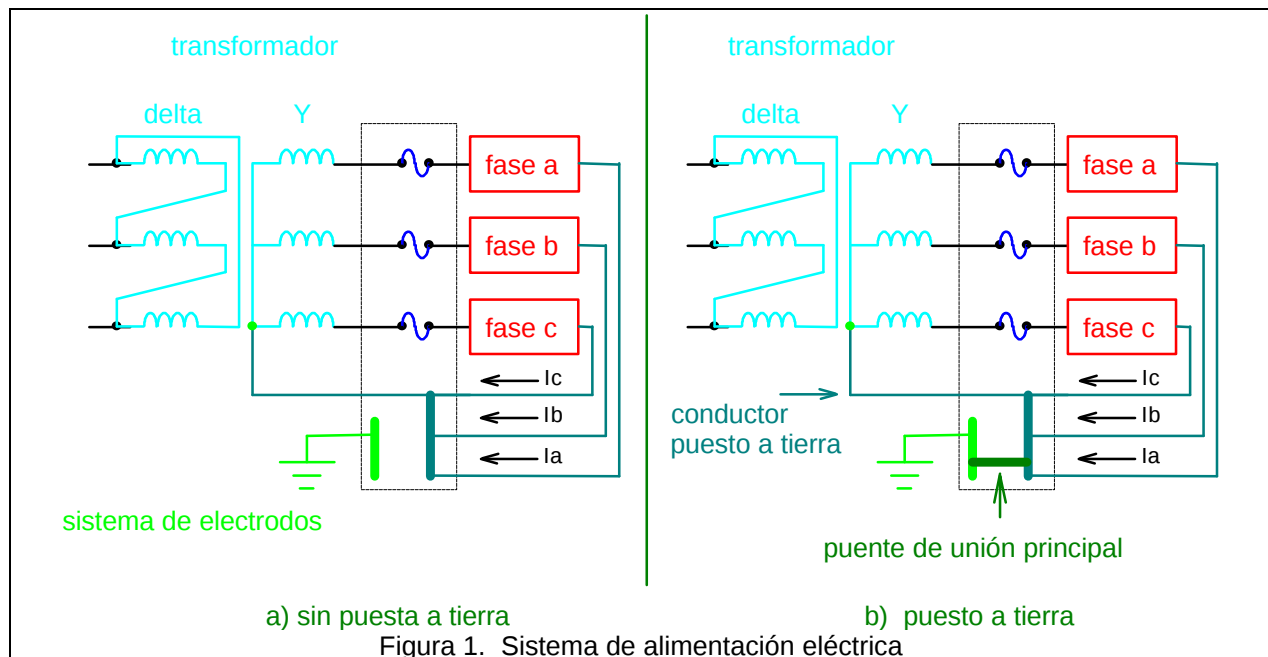
1. Introducción

Se explican las razones de poner a tierra haciendo distinción entre el aterrizaje del sistema y el aterrizaje del equipo. Se presentan y se ilustran las definiciones de los siguientes términos: tierra eléctrica, aterrizado o puesto a tierra, efectivamente aterrizado, conductor puesto a tierra, conductor de puesta a tierra de equipo, equipo de desconexión principal, conductor del electrodo de aterrizaje, puente de unión principal y sistema derivado separadamente. Estas definiciones son de acuerdo al NEC 1996 [1]. Se describen los electrodos naturales y los artificiales, ilustrando el concepto de cuerpo de tierra del electrodo. Se muestran dos de los problemas ocasionados por el uso de electrodos de aterrizaje aislados. Se muestra la necesidad de unir todos los electrodos en un edificio.

2. Justificación de las puestas a tierra

El NEC 100 define **tierra eléctrica** "ground" como una conexión entre el circuito eléctrico y tierra (puesta a tierra del

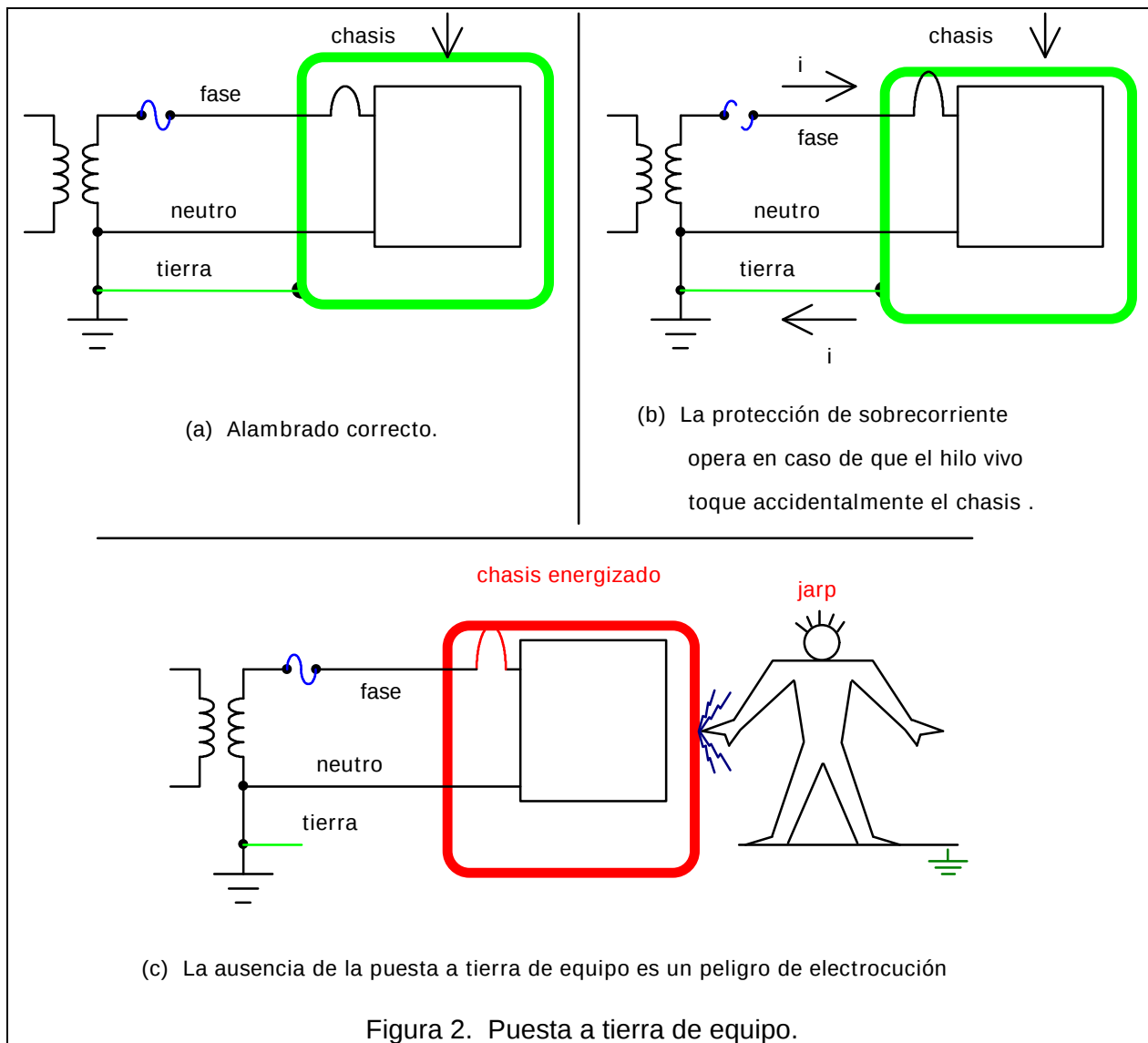
sistema) o entre el equipo y tierra (puesta a tierra del equipo), en caso de que la tierra no esté disponible, la unión es con algún otro elemento conductor que sustituya a la tierra (en el caso de un automóvil la "tierra" es el chasis). Conviene distinguir entre la puesta a tierra del sistema de alimentación y la puesta a tierra del equipo. La **puesta a tierra del sistema de alimentación eléctrica** consiste en unir al sistema de electrodos uno de los conductores de la acometida o uno de los conductores que salen del secundario de un transformador; a este conductor se le conoce como **conductor puesto a tierra**. La figura 1-a) muestra un sistema de alimentación no puesto a tierra, la figura 1 b) corresponde a un sistema de alimentación eléctrica puesto a tierra. El **puente de unión principal** estabiliza la diferencia de potencial entre el sistema de alimentación y tierra. El conductor puesto a tierra tiene un voltaje cero o de unos cuantos volts con respecto a tierra y esa es precisamente la función de la puesta a tierra del sistema de alimentación.



De acuerdo al NEC 250-1, FPN No.1 (FPN = "Fine Print Note"). Los sistemas de alimentación se ponen a tierra para a) limitar los sobrevoltajes transitorios debidos a descargas atmosféricas, a maniobras con interruptores, b) para limitar los voltajes en caso de contacto accidental del sistema de alimentación con líneas de voltaje superior y para estabilizar el voltaje del sistema de alimentación con respecto a tierra.

Puesta a tierra de equipos. Los materiales conductores (tuberías y gabinetes metálicos) que contienen conductores y equipo eléctrico se ponen a tierra para limitar el voltaje a tierra entre estos materiales (NEC 250-1, FPN No.2). Los **conductores de puesta a tierra** de equipo

se unen al conductor puesto a tierra para proporcionar una trayectoria de baja impedancia a la corriente de falla, lo que facilitará la operación de las protecciones de sobrecorriente bajo condiciones de falla a tierra. La puesta a tierra de equipos tiene dos propósitos: a) limitar el voltaje de los materiales metálicos no portadores de corriente con respecto a tierra y b) que en caso de falla a tierra, opere la protección de sobrecorriente. Las figuras 2 a) y b) ilustran un alambrado correcto y la forma en que opera la protección de sobrecorriente evitando que el chasis se ponga a un voltaje peligroso. La figura 2 c) muestra la forma en que la falta de la puesta a tierra pone en riesgo la vida



3. Definiciones

Tierra eléctrica (“ground”): Una conexión conductora, intencional o accidental, entre un circuito o equipo eléctrico y la Tierra (“earth”) o un cuerpo conductor que sirve en lugar de ella. En el idioma inglés se tienen “ground” y “earth”, mientras que en el español se tiene tierra, para evitar confusiones conviene emplear la expresión tierra eléctrica.

Puesto a tierra o aterrizado (“grounded”). Conectado a la Tierra o a algún cuerpo conductor que sirva en lugar de ella.

Efectivamente aterrizado (“effectively grounded”). Conectado intencionalmente a tierra por medio de conexiones de baja impedancia y con capacidad de corriente suficiente para prevenir la formación de sobrevoltajes transitorios que pudieran resultar en riesgos indebidos al equipo o a las personas.

Conductor puesto a tierra o conductor aterrizado (“grounded conductor”). Un conductor del sistema de alimentación eléctrica que intencionalmente se pone a tierra.

Conductor de puesta a tierra de equipo (“equipment grounding conductor”). Conductor que conecta las partes metálicas no destinadas a transportar corriente (carcasas, gabinetes, charolas y tuberías) con el conductor puesto a tierra, con el conductor del electrodo de aterrizaje o con ambos en el equipo de desconexión principal o en la fuente de un sistema derivado separadamente.

Conductor del electrodo de aterrizaje (“grounding electrode conductor”). El conductor empleado para conectar el electrodo de puesta a tierra al conductor de puesta a tierra de equipo, al conductor puesto a tierra o a ambos en el equipo de desconexión principal o en la fuente de un sistema derivado separadamente.

Equipo de desconexión principal (“service equipment”). Equipo requerido para formar el control principal y medio de desconexión del suministro, usualmente consiste en un interruptor termomagnético o un interruptor de cuchillas y fusibles y sus accesorios, se localiza cerca del punto de entrada de los conductores de alimentación a un edificio.

Puente de Unión Principal (“main bonding jumper”). La unión o conexión del conductor puesto a tierra con el conductor de puesta a tierra en el equipo de desconexión principal.

La figura 3 ilustra las definiciones anteriores. Tanto el conductor vivo como el conductor neutro portan corriente cuando la carga es alimentada. Bajo condiciones normales de operación la corriente por el conductor de puesta a tierra, por el conductor del electrodo de aterrizaje y por el puente de unión principal es cero; solo hay corriente en estos conductores en presencia de falla a tierra.

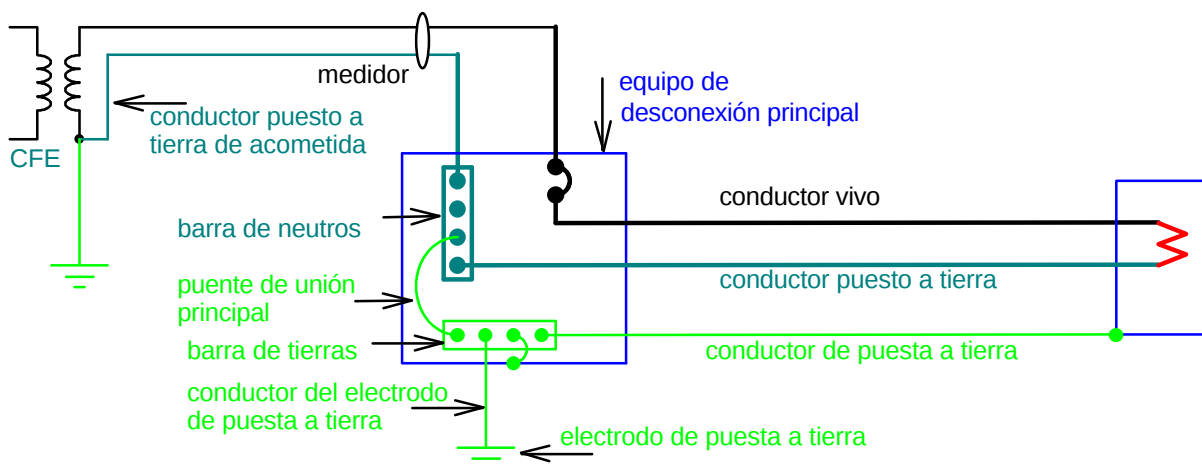
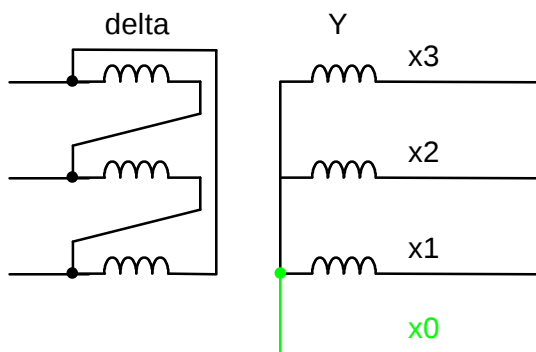
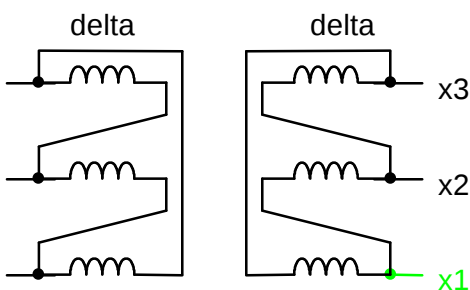


Figura 3. Conductor puesto a tierra, conductor de puesta a tierra y puente de unión principal

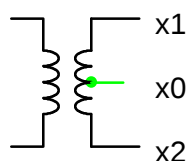
Sistema derivado separadamente. Un sistema de alimentación ubicado dentro de la propiedad en el cual la potencia se deriva de un generador, de un transformador o de los devanados de un convertidor y no hay conexión directa, incluyendo un conductor sólidamente puesto a tierra, a los conductores de alimentación de otro sistema.



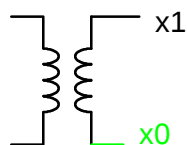
a) transformador trifásico delta - estrella



b) transformador trifásico delta - delta



c) transformador monofásico de tres hilos



d) transformador monofásico

Figura 4 Conexiones más comunes de transformadores

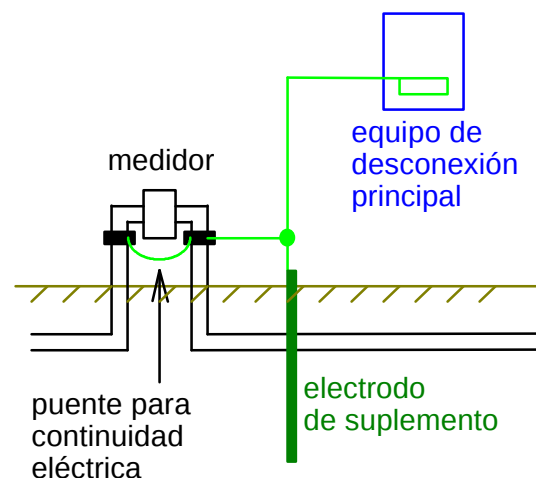
Ejemplos de sistemas derivados separadamente en transformadores son los siguientes: Los secundarios a) delta - estrella, b) delta - delta, c) monofásico de tres hilos, d) monofásico de dos hilos. Estas conexiones se muestran en la figura 4, los conductores secundarios que se pueden poner a tierra aparecen en verde. Otros ejemplos de sistemas derivados separadamente son: a) un generador de emergencia con interruptor de transferencia de cuatro polos, b) un UPS con "bypass" a través de transformador y, c) un transformador ferroresonante.

4. Sistema de Electrodo de puesta a tierra.

Los electrodos pueden ser naturales o artificiales.

Electrodos naturales, NEC 250-81:

- a) **Tubería metálica de agua.** Tubería metálica de agua en contacto directo con la tierra. Debe cumplir con lo siguiente:
- I. de 3 m o más,
 - II. debe tener como suplemento otro electrodo natural o uno artificial y
 - III. debe ser eléctricamente continua, no se debe depender del medidor o del filtro para la continuidad. Deben instalarse puentes en el medidor y el filtro.



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

Figura 5. Tubería metálica de agua

- b) **Estructura metálica del edificio.** Si está disponible se debe unir para formar el sistema de electrodos.
- c) **Electrodo embebido en concreto.** Los cimientos de la construcción siempre que las varillas de refuerzo tengan continuidad a lo largo 6 m o más y sean por lo menos de $\frac{1}{2}$ ". Un conductor desnudo de cobre de por lo menos 6 m y de calibre 4 o mayor puede ser empleado en lugar de las varillas.

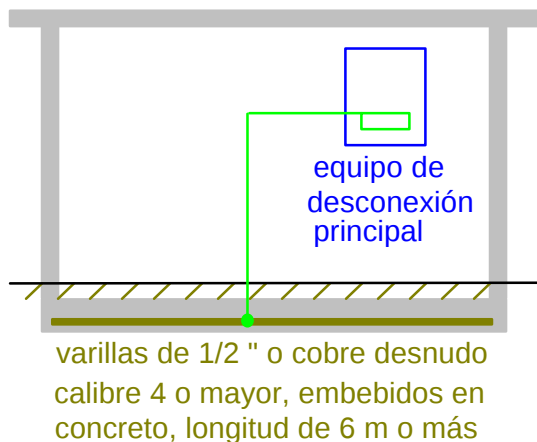


Figura 6. Cimientos o cobre embebido en concreto

- d) **Anillo de tierra ("ground ring").** Un anillo de tierra alrededor del edificio o estructura, en contacto directo con la tierra, por lo menos a 76 cm bajo tierra y formado por conductor desnudo de cobre de calibre 2 o mayor. Si es posible unirlo en forma alternada a las columnas exteriores del edificio (una columna sí y otra no) [2], vea la figura 9.

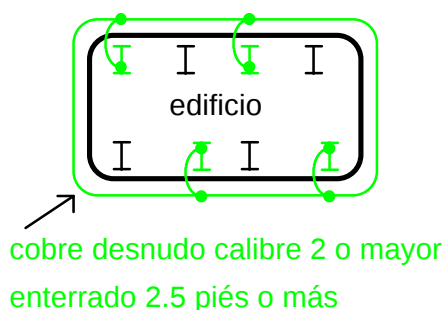


Figura 7. Anillo de tierra eléctrica

Electrodos artificiales, NEC 250-83:

- a) **Tubería metálica y tanques metálicos.** Tubería metálica y tanques enterrados, por ejemplo, un pozo con pared metálica. *No usar la tubería metálica de gas como electrodo, no usar electrodos de aluminio.*
- b) **Varillas.** Las varillas deben tener una longitud mínima de 2.4 m cuando sean de fierro o de acero deben estar galvanizadas o recubiertas de material resistente a la corrosión.
- c) **Placas.** Una placa de por lo menos 2 ft², de acero o de fierro y por lo menos de $\frac{1}{4}$ " de espesor.

La resistencia de los electrodos artificiales debe ser menor a 25 Ω . En caso de que la resistencia sea mayor hay que agregar otro electrodo en paralelo a una distancia de por lo menos 1.8 m (250-84). Para explicar esto, considérese que una varilla de puesta a tierra se encuentra rodeada por cilindros concéntricos de tierra. Los cilindros cercanos tienen poca área y alta resistencia. Los cilindros externos tienen menor resistencia. Al haber tomado en cuenta cierta cantidad de cilindros, la resistencia de la conexión electrodo - tierra ya no disminuye si se agrega un cilindro más. Esta cantidad de cilindros forma el "cuerpo de tierra efectivo" del electrodo, el cual abarca un cilindro de radio aproximadamente igual a la longitud del electrodo y una longitud dos veces la del electrodo [3], figura 8. De esta forma, para disminuir efectivamente la resistencia del sistema de electrodos, la distancia que debe haber entre dos varillas es de al menos el doble de su longitud, de lo contrario los cilindros de tierra que rodean a los electrodos se traslaparán y su resistencia efectiva no disminuirá. La distancia que manda el NEC de 1.8 m es pequeña ya que los cuerpos de tierra se traslapan, 6 m es una distancia consistente con las dimensiones de los cuerpos de tierra para varillas de 3 m.

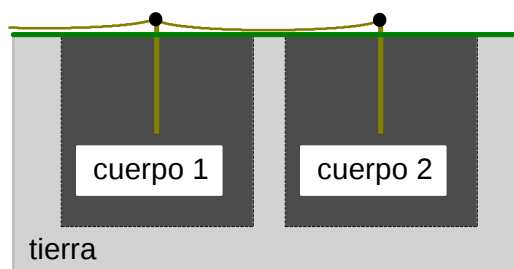


Figura 8. Los cuerpos de tierra no se traslapan

El artículo 250-81 obliga a unir todos los electrodos naturales o artificiales si estos están disponibles. La figura 9 ilustra esta situación.

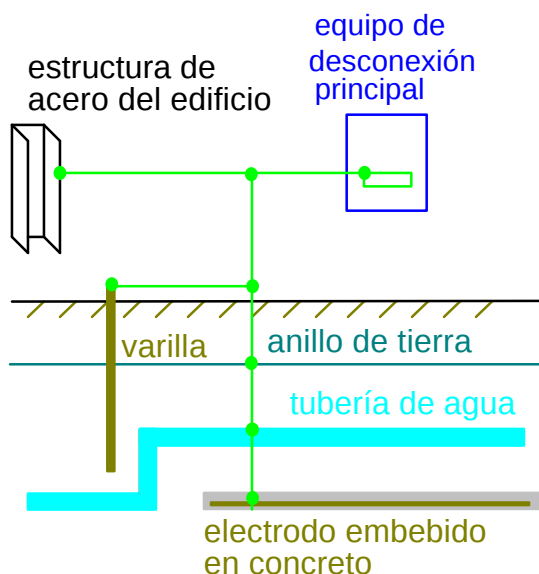


Figura 9. Unir los electrodos disponibles

El artículo 250-80 indica que las tuberías y ductos metálicos que no están asociados con el sistema eléctrico (por ejemplo los ductos de aire) deben ser puestos a tierra. Deben unirse en alguno de los puntos siguientes:

- a) gabinete del medio de desconexión principal;
- b) conductor puesto a tierra en el medio de desconexión principal;
- c) conductor del electrodo si este es de calibre suficiente; o
- d) a uno o más de los electrodos.

5. Problemas ocasionados por el uso de electrodos aislados.

Si se tienen electrodos aislados en un mismo edificio, pueden aparecer diferencias de potencial grandes y ocasionar daños catastróficos. Con respecto a la figura 10 (adaptada de [4]), se tiene una alimentación eléctrica 1 la cual abastece a las cargas A y B, la fuente 2 alimenta a la carga C, los electrodos del sistema 1 y del 2 están aislados, mientras que las cargas A, B y C están unidas por medio de cables de comunicación. Una descarga atmosférica ocasionaría que los gabinetes A y B se elevaran miles de volts con respecto al gabinete C, esta diferencia de potencial pondría en peligro la vida humana y el equipo.

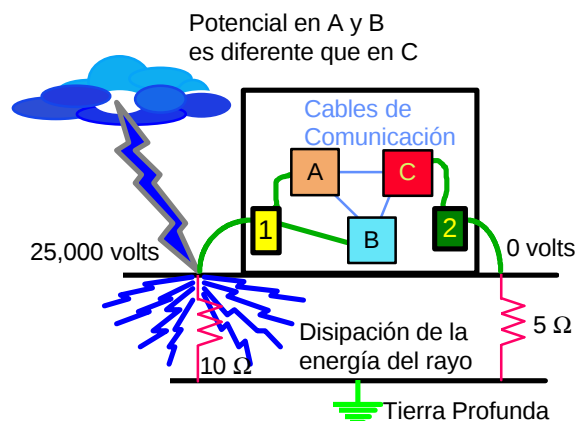


Figura 10 Electrodos aislados

Supongamos que el electrodo de un pararrayos y el electrodo de la alimentación eléctrica de un edificio no se unen. En caso de que una descarga atmosférica cayera en el pararrayos, se tendría que el potencial de todo el equipo metálico unido al conductor de bajada del pararrayos estaría a un potencial elevado. Mientras que las partes metálicas puestas a tierra del sistema de alimentación eléctrica, quedarían a potencial de tierra profunda, como se muestra en la figura 10. Si están próximas partes metálicas con diferente potencial podría ocurrir arqueo con consecuencias fatales (en inglés a este arqueo se le llama "sideflash" [4]). Con esto, queda demostrada la necesidad de unir todos los electrodos dentro de un mismo edificio. Conviene aclarar que se deben unir a nivel de suelo o tierra y no en otro lugar.

La sección NEC 250-86 prohíbe emplear los conductores de bajada o los electrodos del sistema de pararrayos en lugar de los electrodos artificiales de la sección NEC 250-83. La misma sección indica que esta prohibición no significa que los electrodos de distintos sistemas no se deban unir. NEC 250-86, FPN no. 2 indica que la unión de los electrodos de los distintos sistemas limitará las diferencias de potencial entre los electrodos y los alambros asociados. La sección 250-71(b) del NEC da los detalles de la unión del sistema de tierras de alimentación eléctrica con los otros sistemas de tierra. (pararrayos, cable, comunicaciones y teléfono).

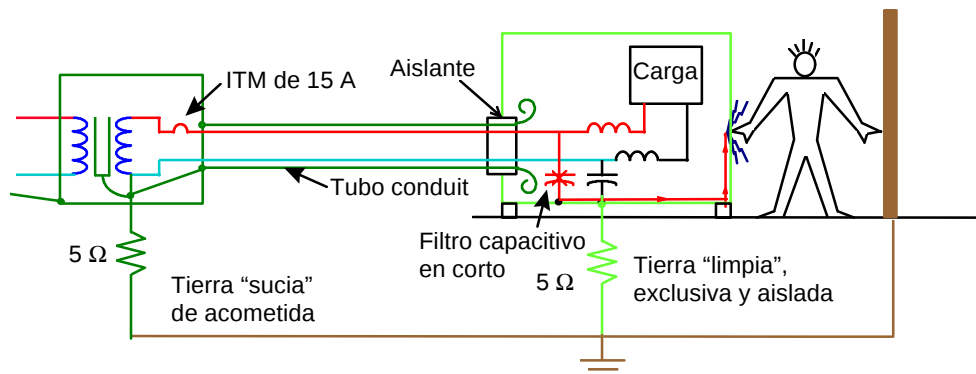


Figura 11. Tierra de computadora, limpia, aislada y exclusiva

Otra práctica, conocida como “tierra de computadoras aislada, exclusiva y limpia”, que también pone en peligro la vida humana se describe con la ayuda de la figura 11 (adaptada de [5]). En esta figura hay dos violaciones al código. La primera es que no hay puesta a tierra de equipo en el gabinete de la carga, la segunda es la puesta a tierra exclusiva y aislada. La figura ilustra que un capacitor se puso en corto circuito, ocasionando que el gabinete de la carga se ponga al mismo potencial que el del conductor vivo. Si consideramos impedancias de $5\ \Omega$ en cada uno de los electrodos y voltaje de 120 V, la corriente será de 12 A, dicha corriente no será suficiente para que la protección de sobrecorriente opere. La trayectoria que sigue esta corriente es a través del conductor vivo, del filtro capacitivo en corto, del gabinete de la carga, del electrodo exclusivo, de la tierra, del electrodo sucio y del conductor puesto a tierra. Esta corriente dará lugar a que el gabinete de la carga se ponga a 60 V con respecto a tierra profunda. Si alguien toca una columna que está a tierra profunda y toca el gabinete energizado tendrá 60 V entre

sus dos manos. Con esto es claro que se están derrotando las funciones de la puesta a tierra de equipo: a) limitar el voltaje de los materiales metálicos no portadores de corriente con respecto a tierra y b) que en caso de falla a tierra, opere la protección de sobrecorriente.

6. Unión ilegal entre neutro y tierra

En la literatura [6] se insiste que el sistema de alimentación se debe poner a tierra en un solo punto. La figura 12 (a) ilustra el alambrado correcto, las computadoras están conectadas con cable de comunicación y cuando el voltaje en dicho cable es cero en un extremo, también lo es en el otro. La figura 12 (b) tiene unión ilegal entre neutro y tierra, la corriente del neutro (i) se divide ahora por el hilo neutro (i_1), por el cable de tierra (i_2) y por el cable de tierra de comunicación (i_3). La corriente i_3 ocasiona un voltaje entre las dos computadoras debido a la resistencia del cable de comunicación. Hay error en la comunicación y en caso extremo la entrada de comunicación se puede dañar.

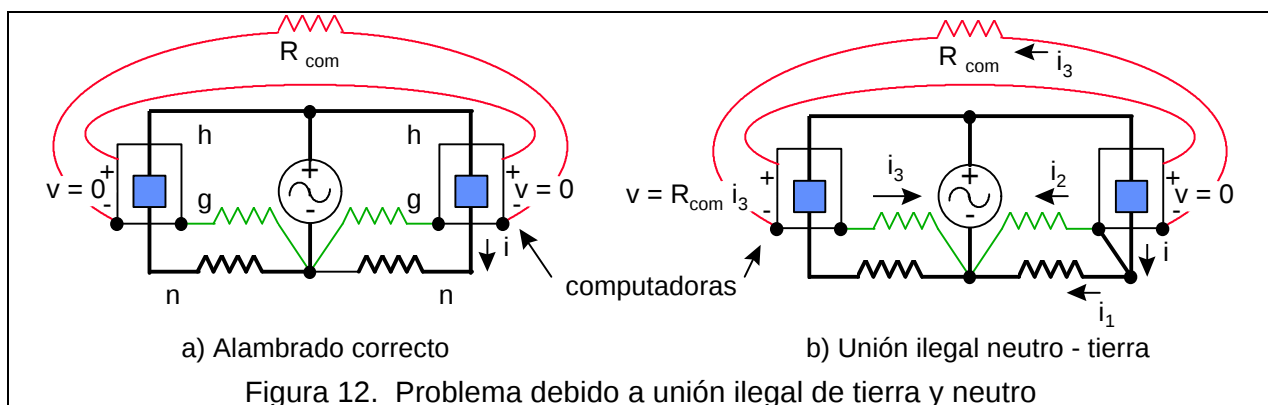
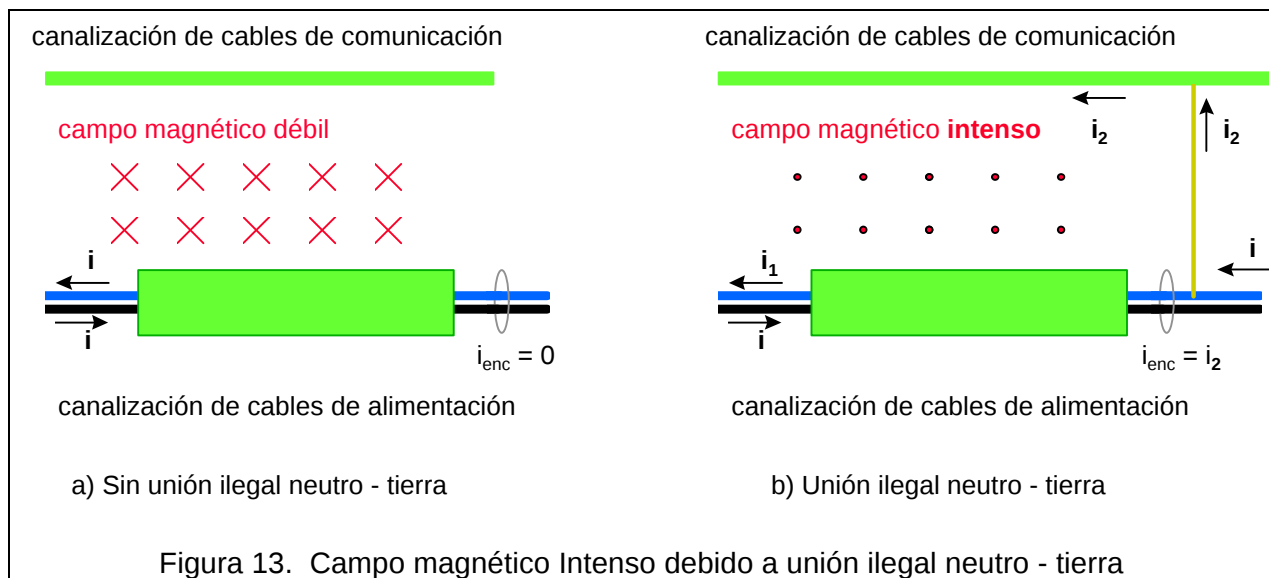


Figura 12. Problema debido a unión ilegal de tierra y neutro



Además de voltajes y corrientes indeseables en los cables de comunicación, la unión ilegal entre neutro y tierra da lugar a fuerzas magnetomotrices que no se cancelan. Los campos magnéticos resultantes pueden ocasionar interferencia electromagnética en computadoras, monitores y proyectores de vídeo. La Figura 13 ilustra dicha situación. En la Figura 13 a), el campo magnético es débil pues la corriente encerrada es cero. Una pinza de corriente detectaría 0 A. En la Figura 13 b) la densidad de campo magnético es intensa pues la corriente encerrada es igual a la que corriente que se va por la canalización de los cables de comunicación. Una densidad de campo magnético del orden de 2 mG no debe ocasionar ningún problema en los equipos mencionados. Pero una intensidad de campo magnético de 20 mG puede ocasionar que la imagen de un monitor sea inestable, en el idioma inglés a esto se le conoce como "monitor jittering".

7. Bibliografía

- [1] Early, Sheehan and Caloggero, 1996 National Electrical Code Handbook, National Fire Protection Association.
- [2] Fred Hartwell, "Understanding NE Code Rules on Grounding and Bonding," Electrical Construction and Maintenance, Intertec Electrical Group, 1994, ISBN: 0-87288-543-7.
- [3] Joseph R. Knisley, "Understanding grounding electrode requirements of the NE

Code," Electrical Construction and Maintenance, September 1991.

[4] Keneth M. Michaels, "Effective Grounding of Electrical Systems," Electrical Construction and Maintenance, Jan. 94.

[5] US Department of Commerce, National Bureau of Standards, "Guideline on Electrical Power for ADP Installations," Federal Information Processing Standards - Publication 94, September 21, 1983.

[6] IEEE Recommended Practice for Grounding of Commercial Power Systems, IEEE Std 142-1991, ISBN: 1-55937-141-2.