

Consideraciones De Diseño " Puesta A Tierra de Tanques "

Traducido y Adaptado por: **Omar Graterol / Ingro. Electricista / CIV: 16518**

Tomado del Artículo "**Ground Systems Design Considerations for Vessels**", publicado por Marcus O. Durham and Robert A. Durham. En la Revista "IEEE Industry Applications Magazine" _ November/December 2001

Los tanques recipientes metálicos en general, tienen varios sistemas de protección y puesta a tierra. Estos incluyen conexión o puentado para descargas estáticas de fluidos en movimiento, tierra para protección contra descargas atmosféricas, tierras de estructuras metálicas altas adyacentes al tanque, objetos de la descarga y que extienden protección a su alrededor (Halo Lightning Systems), Conexión o puentado entre equipos o estructuras metálicas, protección catódica, control de corrientes desviadas, protección de líneas externas y suministro de potencia, conexiones de instrumentación, y protecciones de instrumentación.

Estos sistemas de puesta a tierra interactúan y algunas veces interfieren entre ellos.

Cada sistema tiene requerimientos únicos. Las consideraciones de diseño de cada uno de estos sistemas serán identificadas mas adelante, mediante procedimientos apropiados para Ingenieros de diseño, de operación o mantenimiento de sistemas eléctricos, para tanques usados en muchos de los segmentos de la industria petrolera y petroquímica. Aunque este artículo esta orientado a sistemas de puesta a tierra de tanques y recipientes metálicos, sus conceptos aplican a un amplio rango de estructuras.

En el diseño de las protecciones y del sistema de puesta a tierra de tanques y recipientes metálicos, existe mucha documentación y en algunos de estos documentos se encuentran ideas conflictivas. Algunos segmentos de estos documentos son muy útiles. Desafortunadamente, ningún documento por si solo, puede considerarse una guía que contenga todas las consideraciones de diseño e instalación. Esta recopilación corresponde a un diseño que se acerca a lo realmente requerido, presentado como un resultado de su exitosa implementación en diferentes instalaciones. La diferencias en la terminología de sistemas de puesta a tierra, para identificar los conductores se indican en la tabla 1.

Conductores	Descripción	Uso
De puesta a tierra	Caminos metálicos, comúnmente referidos como "La Tierra de un sistema"	Mantienen un potencial mínimo entre el metal y tierra
De tierra	Alambres conductores de corriente, conectados a tierra en un punto	Neutro de sistemas de potencia, o punto comun del negativo de sistemas DC de instrumentacion
De pantalla	Cintas metálicas, hilos trenzados o tubos concéntricos alrededor del conductor de la señal principal	Interceptar señales extrañas o de ruido y las conducen a tierra
De Conexión o Puentado	Alambres conductores conectados a estructuras o equipos metálicos que pueden resultar energizados	Mantener las diferencias de potencial entre estructuras o equipos metálicos a un nivel aceptable

Electricidad Estática

Los problemas con electricidad estática se originan ante la existencia de tres condiciones: una mezcla explosiva, una carga eléctrica acumulada en un material de baja conductividad y una descarga de un campo eléctrico que origina una chispa de suficiente intensidad para iniciar la ignición de la mezcla. La electricidad estática es generada cuando dos materiales disímiles están en movimiento relativo de uno con respecto al otro. Una carga estática se desarrolla por medio de un movimiento relativo de una sustancia con respecto a un objeto de metal, como puede ser un tanque, el cual está aislado de tierra. Igualmente al llenar un container aislado con material cargado creando así un campo eléctrico. Una tercera fuente de electricidad estática, es el movimiento de materiales líquidos o sólidos de baja conductividad, como pueden ser los hidrocarburos. Los efectos de estática de los hidrocarburos, son aumentados por el contenido de agua dispersa, soluciones acuosas, o burbujas de aire.

Los chorros o salpicaduras del llenado, la agitación y la mezcla son causas de electricidad estática dentro de tanques o recipientes. Actividades fuera del tanque, como el drenaje y la toma de muestras, pueden originar la acumulación de estática. Por ejemplo, un escape de vapor húmedo hacia la atmósfera, puede acumular electricidad estática con respecto a materiales aislantes con los que está en contacto o en movimiento relativo. Los campos eléctricos, se desarrollan en forma proporcional a la velocidad del movimiento. De acuerdo con esto, la velocidad de un flujo lineal, de un material de baja conductividad, debe mantenerse por debajo de 1 m/seg. Polvo dispersado desde una superficie puede desarrollar una carga estática. El efecto es mayor en superficies lisas. En general, una carga no se desarrollará si ambos materiales son conductivos.

Este tipo de acumulación de carga está generalmente limitada al movimiento de líquidos o sólidos. Gases no contaminados, muy raras veces pueden acumular una carga.

Prevención De Los Peligros De La Electricidad Estática

Varios pasos para mitigar el peligro de la electricidad estática. La primera fuente de protección es una puesta a tierra efectiva para propósitos de estática. Cualquier puesta a tierra adecuada para circuitos de potencia, protección contra descargas atmosféricas o protección personal, es efectiva para tierra de estática. Debido a que las corrientes de estática son muy bajas, un camino de conducción eléctrico, con una alta resistencia, en el orden de un megohmio (1 MΩ), es adecuado. Manteniendo la conductividad entre el fluido en movimiento y las superficies metálicas se disminuyen los efectos posibles de la estática. La conductividad se logra usando algunos procedimientos que son específicos para el sistema.

Fluidos.

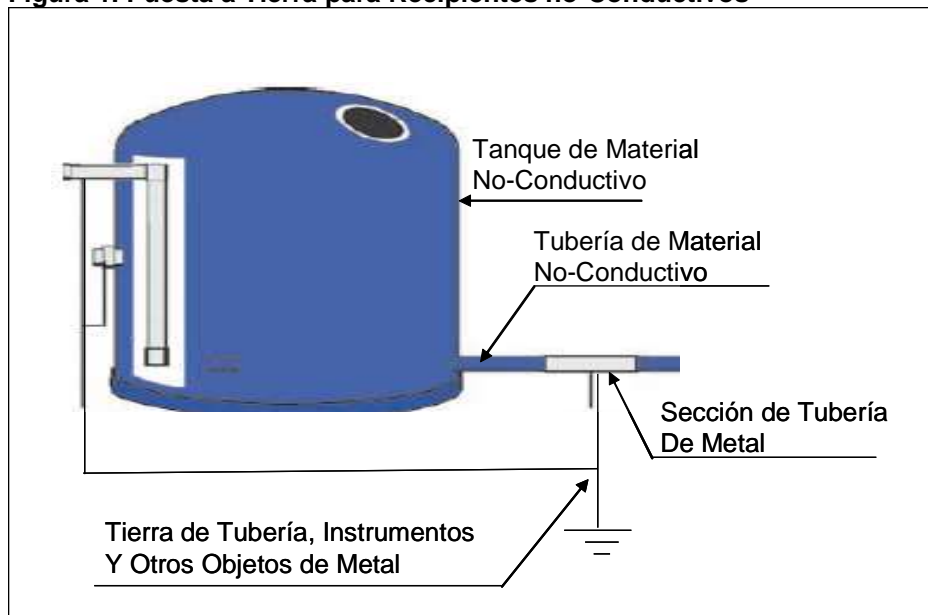
Los tanques de almacenamiento metálicos deben ser puestos a tierra y todas las estructuras metálicas o partes de ella, incluyendo las tuberías, deben estar conectados o puenteadas entre ellas, sin embargo puestas a tierra externas al tanque, no pueden controlar la formación de chispas o ignición dentro del tanque, por lo cual cualquier objeto o parte interna del tanque, debe ser puesto a tierra.

- Las boquillas o picos de las mangueras deben ser puestos a tierra antes de iniciar el llenado.
- Las mangueras con chorros de vapor para limpieza de tanques o recipientes que hayan contenido hidrocarburos, deben conectarse a tierra antes de aplicar el vapor al tanque o recipiente que también debe estar puesto a tierra.
- Tambores hayan contenido hidrocarburos, que vayan a ser limpiados con vapor, deben ser puestos a tierra antes de aplicar el vapor.
- Las boquillas y los embudos deben ser de metal y estar puestos a tierra.

Tanques o recipientes aislados conectados a líneas aisladas deben tener una sección de tubería de metal conectada a tierra en la línea, además sus instrumentos u otros objetos metálicos deben estar conectados a tierra. **Ver Figura 1.** Si no tienen otros objetos de metal, los recipientes aislados deben tener un alambre de tierra insertado. La resistencia mecánica sin tomar en cuenta la corriente que pudieran manejar determina el tamaño del conductor o alambre a insertar. El tamaño mínimo para un alambre auto soportado, es uno No. 4 AWG. El tamaño mínimo para ser enterrado, es el No. 2 AWG. Conductores flexibles deben ser usados para conexiones que deben ser removidas frecuentemente. Los conductores de puesta a tierra pueden ser aislados, pero los conductores desnudos facilitan el chequeo de su continuidad. Las conexiones pueden ser hechas con conectores de presión o con soldaduras exotérmicas.

Los recipientes deben ser llenados lentamente, a bajas velocidades en la descarga. La turbulencia en las operaciones de llenado se debe minimizar usando las conexiones o extendiendo el tubo de llenado hasta cerca del fondo del tanque. Rejillas, mallas o trapos de filtrado y grating en la boquilla de entrada del tanque, deben eliminarse, ya que estos pueden causar la separación de cargas y las consecuentes chispas. Proyecciones o salientes internos que puedan causar una separación de cargas deben ser eliminadas. Adicionando una solución de sales conductivas (Antiestáticas) al flujo en una tubería, pueden eliminar el riesgo potencial de acumulación de estática. Para cualquier consideración, debe tenerse en cuenta que los tanques de techo flotante no permiten la presencia de una mezcla de hidrocarburos-aire que pueda ser inflamable en el interior del tanque. Sin embargo los tanques de techo flotante presentan el problema de la existencia de mezclas inflamables, por encima del techo en las áreas de contacto entre techo y pared del tanque, debido a escapes por el sello. Generalmente estas áreas se clasifican con Clase I, Div. 1.

Figura 1. Puesta a Tierra para Recipientes no-Conductivos



Polvos

Un sistema manejando polvos es muy similar a cualquier otro sistema manejando que maneje una materia inflamable. Nubes de polvo conductor o capas de polvo, pueden contribuir a la formación de una acumulación y descarga de electricidad estática. La descarga puede ocurrir entre un conductor aislante y tierra. La descarga no ocurre dentro del propio polvo. Entonces una apropiada conexión a tierra es requerida. Existen dos circunstancias adicionales. Primero, el aire donde se mueve el polvo puede ionizarse, esto previene la formación de un capacitor con el polvo como dieléctrico. Segundo el recipiente debe hacerse inerte para prevenir la conducción.

Personal

La ropa del personal y las actividades que estos desarrollan, pueden contribuir a la formación de chispas, con posibles daños a equipos y al propio personal. Atuendos apropiados, según sea el caso deben ser requeridos. Personal trabajando en actividades de llenado de tanques, deben utilizar botas de seguridad del tipo conductor. Suelas de goma o sintéticas, que pueden constituir el dieléctrico para la formación de un capacitor deben ser evitadas. El personal no se debe quitar la ropa exterior, en las cercanías de una mezcla inflamable. La separación de estas del cuerpo, puede causar una chispa de electricidad estática. Cascos de seguridad de metal no se deben usar. Ropa de tela o fibra sintética tiene mayor tendencia a la acumulación de electricidad estática que la ropa de telas o fibras naturales. Ropa de telas o fibras naturales aprobadas como retardantes de la llama deben usarse para reducir el riesgo de accidentes por las fuentes de ignición estática. Computadoras, cámaras fotográficas, celulares radios y otros equipos electrónicos no se deben usar en áreas clasificadas, a menos que estén aprobados para áreas clasificadas por las correspondientes organizaciones reconocidas en esta materia.

Corrientes de Descargas Atmosféricas

Los efectos de las descargas atmosféricas tienen dos orígenes:

1. Corrientes de las descargas directas.
2. Corrientes Indirectas.

Las descargas atmosféricas tienden a golpear las profusiones, puntos altos y bordes de estructuras. Las descargas atmosféricas causan daños por la energía calórica que disipan sus corrientes y por el esfuerzo mecánico de estas cuando viajan por caminos de alta impedancia.

No existe una simple guía que provea todas las consideraciones de diseño e instalación.

Debido a que resulta prácticamente imposible proteger contra todas las descargas directas, se debe hacer mayor énfasis en la disipación de la energía de la descarga para minimizar los daños. Un camino metálico a tierra de baja impedancia debe ser de un tamaño adecuado para manejar la tremenda cantidad de energía de la descarga atmosférica.

Los tres componentes de un sistema de protección son:

1. Terminal aéreo.
2. Conductores a tierra.
3. Terminales de tierra o barras.

El terminal aéreo (Punta franklin u otro dispositivo aprobado), provee el punto de contacto para la descarga.

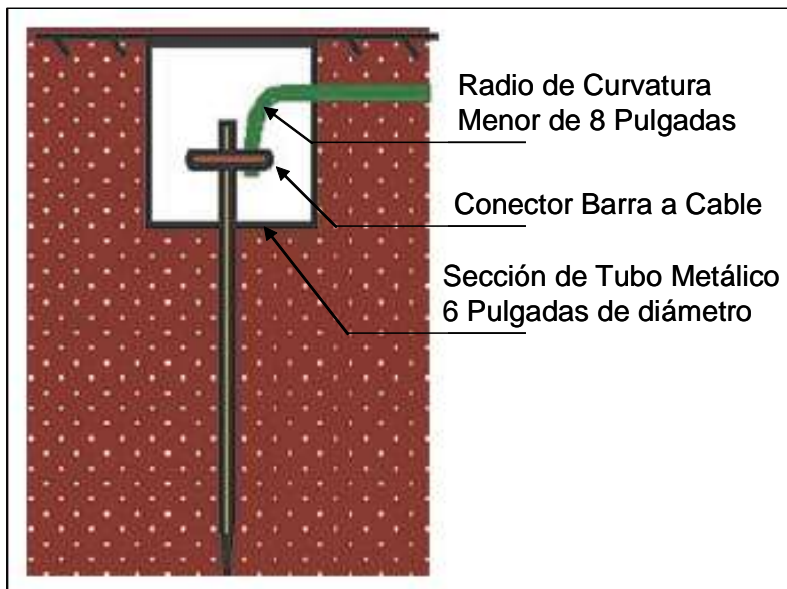
Los conductores a tierra (Bajantes), proveen un camino seguro para conducir la corriente de la descarga a los terminales de tierra o barras.

Los terminales de tierra o barras, proveen el punto de la superficie del terreno para la disipación de la energía de la descarga.

Se prefieren materiales no ferrosos para cada uno de los elementos del sistema de puesta a tierra, con el propósito de evitar los efectos de corrosión. Igualmente materiales disímiles en estos elementos deben ser evitados, ya que los mismos crean problemas de corrosión por la formación de juntas electrolíticas, aumento de la resistencia de contacto, conexiones flojas, caídas de voltaje como consecuencia del aumento de la impedancia. El sistema debe construirse en forma de jaula. Partiendo de que la impedancia es inversamente proporcional al número de rutas paralelas, se deben usar por los menos dos bajantes. Como la descarga atmosférica, se comporta como una fuente de alta frecuencia, curvas agudas o dobleces pronunciados de los bajantes deben evitarse, se recomienda un radio mínimo de 8 pulgadas.

Ver Figura 2.

Figura 2. Detalles de radio de curvatura del bajante en pozo de conexión de bajante



Conductores bajantes en estructuras metálicas, como tanques, torres, equipos o recipientes metálicos de proceso, son generalmente inefectivos y no se requieren. De usar estos bajantes, en el caso de una descarga, el pico de voltaje o potencial súbito que aparece en el conductor, con respecto al tanque o estructura metálica, hará saltar un arco entre el conductor y la estructura metálica. Por lo cual la disipación de la energía en estos casos, debe ser manejada mediante conexiones o el puenteado en las juntas y mediante un medio efectivo de la puesta a tierra de la estructura. La superficie o área de contacto, es más importante que la resistencia de puesta a tierra para evitar daños en estos equipos. La distribución de las corrientes de la descarga entre todo el sistema de puesta a tierra, asegurando las conexiones entre partes de la estructura y resistencias de puesta a tierra similares, mantiene todos los puntos a potenciales similares. Esto mitiga los problemas de arcos por superficies o puntos con diferentes potenciales, aun con resistencias de puesta a tierra elevadas. La malla de tierra o el ramal correspondiente debe extenderse o alejarse por lo menos 2 pies de las fundaciones de concreto de la estructura para prevenir daños a la misma.

El objetivo del diseño de un sistema de puesta a tierra es lograr que los requerimientos particulares de los diferentes sub-sistemas que puedan ser conflictivos entre ellos, se hagan compatibles consolidando así un buen sistema de puesta a tierra.

Al igual que con las corrientes o señales eléctricas de las fuentes tradicionales, la corriente de una descarga atmosférica, fluirá por el camino de mas baja impedancia. La inductancia de los conductores usados para puesta a tierra, no es lineal, no obstante se puede estimar en $0,5\mu\text{H}/\text{pie}$. El crecimiento rápido o variación de la onda de la descarga, define una frecuencia por encima de 1 Mega Hertz (1MHz). A estos valores nominales, despreciando el valor de resistencia del conductor, que se estima en $0,3\ \Omega/1000\ \text{Pies}$, la impedancia de puesta a tierra, excede los $3\Omega/\text{pie}$.

$$Z = R + jX_L$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$Z = 0 + 2\pi * 1\ \text{MHz} * 0,5\ \mu\text{H} = \underline{\underline{3,14\ \Omega/\text{Pie}}}$$

Usando un estimado conservador, una descarga estará en el orden de los 5 KA. La caída de tensión por pie de conductor, será de 15.700 Voltios (15,7 Kv/Pie). Normalmente las descargas exceden los 10 o 20 KA, con lo cual esta caída será mayor.

$$V_{\text{caida}} = I_{\text{Descarga}} * Z_{\text{Cond.}}$$

$$V_{\text{caida}} = 5000\ \text{Amp.} * 3,14\Omega = 15.700\ \text{V/Pie}$$

Esto significa que solamente unos pocos pies de diferencia entre los conductores bajantes, creara una diferencia de potencial apreciable durante los transitorios de la descarga. Los cálculos anteriores, demuestran que no hay nada mejor que un punto común y lo mas cercano posible para la conducción de la descarga a tierra. No obstante, los sistemas de puesta a tierra de la planta se conectan a tierra como un punto de referencia. La efectividad de la conexión a tierra depende de la resistividad del terreno, de la cantidad de energía a disipar y de las estructuras disponibles. Las técnicas para construir un sistema de puesta a tierra efectivo, se describen en las secciones sub.-secuentes.

Efecto De Las Descargas En Tanques

No se requiere una protección adicional para tanques metálicos, si estos cumplen los tres criterios siguientes:

1. Toda su estructura es eléctricamente continua.

2. Sus partes metálicas expuestas tienen los espesores mínimos requeridos.
3. Están sellados para prevenir escapes de los gases o vapores del producto almacenado.

La experiencia ha demostrado, que si los tanques están contruidos con láminas de por lo menos 3/16 de pulgada de espesor, y son eléctricamente continuos, no son susceptibles a perforación por la energía o golpe de la descarga. Sin embargo, todas las aberturas a la atmósfera, deben mantenerse cerradas durante tormentas o estar provistas con protección retarda-llamas.

Un arco que no causaría ningún daño a las paredes o estructura del tanque, puede contener suficiente energía para iniciar la ignición de una atmósfera inflamable. Es práctica común, dejar las bocas de visita abiertas o sin los sellos correspondientes. Esto crea peligros potenciales, en el caso de una descarga atmosférica.

Tanques grandes que tengan un contacto adecuado con la superficie del terreno donde están asentados se consideran puestos a tierra por si solos. Un tanque de por lo menos 20 pies de diámetro y asentado sobre el terreno o concreto se considera puesto a tierra por si solo. Un tanque de por lo menos 50 pies de diámetro, asentado en pavimento bituminoso se considera también puesto a tierra por si solo. Todos los demás tanques deben tener una puesta a tierra adicional. La tubería metálica conectada a un tanque que no este asentado sobre el terreno, puede ofrecer la protección requerida. Sin embargo, los tanque protegidos con sistemas de protección catódica, pueden estar aislados eléctricamente de las tuberías que están en contacto con ellos. Tanques metálicos aislados de tierra, deben tener conexiones o puentes a tierra para reducir el potencial eléctrico ante descargas atmosféricas y así prevenir el daño a los materiales aislantes entre tanque y tierra. Los tanques se aíslan de tierra cuando se necesita prevenir el terreno de la contaminación ante fugas del producto, para lo cual se colocan debajo del tanque, membranas o mantas aislantes. Tanques con conexiones eléctricas provenientes de fuentes externas, para motores o su instrumentación asociada, también necesitan ser conectados o Puenteados con sus sistemas de tierra para mantener la igualación de potenciales. Para mantener el equilibrio de estas conexiones, se deben usar un mínimo de dos conexiones o terminales de puesta a tierra con menos de 100 pies de separación entre ellos, medidos alrededor del perímetro del recipiente o tanque a ser protegido.

Anillo de Protección de Tierra

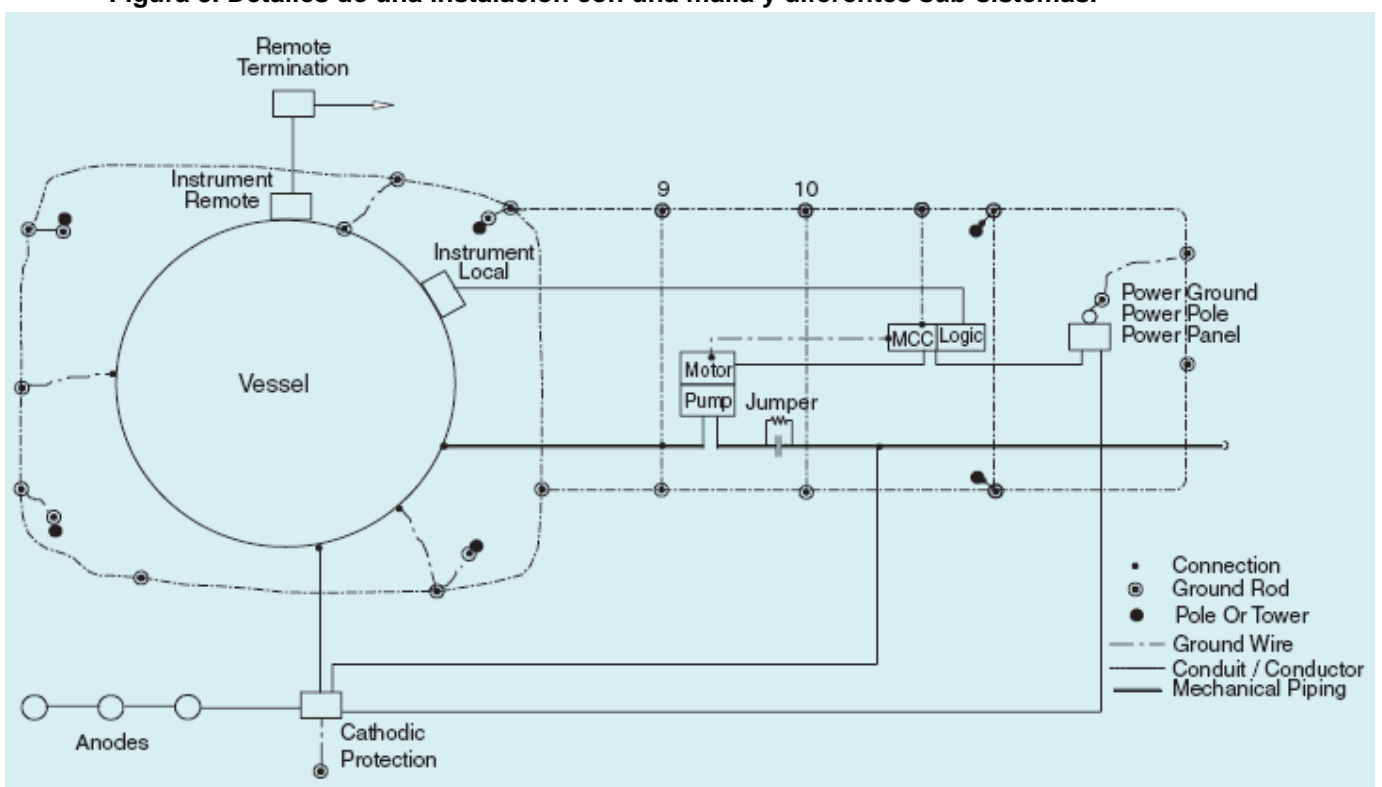
Nubes o descargas atmosféricas, pueden crear diferentes potenciales entre diferentes lugares de una planta o instalación que ocupe un área grande. Adicionalmente las diferencias entre la resistividad del suelo entre los diferentes lugares, puede contribuir a las diferencias de potencial. Otro problema puede originarse por la circulación de corrientes de falla del sistema de suministro de potencia. Más aun, las señales de instrumentación con lazos y fugas de corriente también contribuyen con las diferencias de potencial. Para mitigar estas condiciones, es imperativo que la referencia de puesta a tierra sea mantenida equilibrada a los largo o en toda la extensión de la planta o instalación. Si la planta o instalación ocupa un área mayor de 500 pies², un anillo de tierra debe ser instalado alrededor de la instalación, como se indica en la figura 3., formando una malla con conexiones transversales, especialmente en el área donde existan diferentes equipos que deben ser conectados a esta malla. Las características o requerimientos mínimos de esta malla son los siguientes:

1. Máxima separación entre barras de puesta a tierra, de 50 pies.
2. Mínima separación entre barras de puesta a tierra, de 2,2 veces la longitud de la barra.
3. Los conductores del anillo, deben ser enterrados a una profundidad no menor a 30 pulgadas.
4. Los conductores del anillo, deben mantener una separación mínima de 2 pies de las fundaciones o bases de la estructura soporte; como una alternativa, sobre todo en caso de que sea obligante por falta de espacio, los conductores del anillo, pueden ir en el concreto de las fundaciones o en al menos 2 pulgadas de concreto por un largo no menor de 20 pies.
5. El conductor del anillo, debe ser por lo menos 2 AWG, de cobre desnudo.
6. Bajantes de protección contra descargas atmosféricas con sus barras de tierra dedicadas y los demás sistemas de puesta a tierra, deben ser conectados al anillo, al igual que cualquier otro equipo o metal no portador de corriente, que este a una distancia no mayor de 8 pies verticalmente y 6 pies horizontalmente, del anillo principal o cualquiera de sus ramales.
7. Todo el acero estructural debe ser conectado a la malla.

8. Los conductores, conexiones o superficies de conexión, al sistema de protección, no deben ser pintados.
9. La resistencia de cualquier conexión o puente entre objetos o estructuras metálicas, no debe ser mayor de 1Ω .
10. Las curvas en los conductores del sistema de puesta a tierra, incluyendo curvas de menos de 90° , deben mantener un radio de curvatura no menor a 8 pulgadas.
11. Conductores suspendidos, deben ser soportados por lo menos cada 3 pies.
12. Soldadura exotérmica o dispositivos de conexión aprobados, deben ser usados en todas las conexiones.
13. Conexiones que no estén a la vista o que no sean observables, deben ser con soldaduras exotérmicas o con conectores de presión.
14. Pozos de inspección deben ser ubicados en los puntos donde las barras de tierra se conecten a la malla, especialmente donde se interconecten los diferentes sub-sistemas de puesta a tierra. **Ver figura 2.** El pozo de inspección debe ser de por lo menos 6 pulgadas de diámetro y empotrado en un tubo o concreto. Una tapa debe ser colocada sobre el pozo y el mismo debe ser de fácil identificación.
15. Si las cercas están a una distancia horizontal de 6 pies, del anillo o de cualquier otra estructura conectada al anillo, o cuando las mismas pasan por debajo o cerca de una línea aérea, cuyos conductores pueden entrar en contacto con la cerca ante una falla de la línea, deben estar conectadas a la malla de tierra. La cerca debe tener conexión o puentes entre las diferentes secciones de la cerca y de las puertas.

La implementación de todos estos requerimientos, punto por punto, aseguran una conexión efectiva a tierra. **Ver Figura 3,** Detalles de una instalación con una malla y diferentes sub-sistemas.

Figura 3. Detalles de una instalación con una malla y diferentes sub-sistemas.



Llegada de Líneas o Cableado externo

En algunas instalaciones llegan líneas o cableado externo hasta un bastidor o edificio protegido con la malla de tierra interna. Estas líneas o cableado, incluyen suministro de potencia, transmisión de datos, comunicaciones teléfonos y cables de antenas. Estas líneas o cables a la entrada deben ser conectados o puestos a tierra en un solo punto a una barra común. Este

punto de conexión puede ser una malla separada tipo laberinto o un punto de conexión común o referencia de tierra, que finalmente será conectado al anillo o malla de puesta a tierra. Protecciones contra descargas atmosféricas instalados en las acometidas eléctricas y de servicio telefónico, y en las entradas de las antenas de radio y televisión, proveen protección tanto para los propios equipos del sistema al cual corresponde, como también a sus estructuras. Si es posible estas protecciones deben ser montadas y puestas a tierra en la barra común local del sitio donde entran. Estas líneas deben ser protegidas nuevamente antes de su distribución en las bandejas Portacables. Donde las líneas de transmisión de datos, están expuestas a transientes, usando segmentos de fibra óptica se puede lograr el aislamiento del ruido en forma efectiva. La protección contra descargas atmosféricas en líneas de suministro de potencia depende de la carga o capacidad de diseño. El voltaje, número de fases y la configuración define el tipo de protección requerida. Equipos o circuitos no electrónicos, pueden ser protegidos con protecciones del tipo derivación (Shunt type). Los dispositivos de protección pueden ser supresores de picos de voltaje (SPVs), o transformadores de aislamiento.

Barras de Tierra

Las barras de tierra deben ser de 8 pies de largo y con un diámetro de ½ pulgada. El material puede ser cobre sólido, cobre con revestimiento de acero o acero solo. Las barras entre ellas deben mantener una separación mínima, para evitar interferencias. Existe gran cantidad de cálculos para determinar la distancia o separación mas efectiva, no obstante para las condiciones típicas mas comunes, una separación mínima de 2,2 veces la longitud de las barras (entre 5 y 6 Mts para barras de 8 pies), debe ser adoptada. Una malla o un anillo de tierra, debe mantener el equilibrio de potenciales en la instalación. Cuando las barras forman parte de un sistema de puesta a tierra, en una malla o un anillo, su separación máxima debe ser 50 pies (Aprox. 15 mts.). Cuando la resistividad del terreno es muy alta, mayor de 5000 $\Omega/\text{cm.}$, se debe pensar en alternativas para bajar la resistencia de contacto, con empotramiento en concreto, agregados químicos, barras adicionales o barras profundas. Las barras deben ser conectadas unas con otras, preferiblemente usando el arreglo tipo anillo. Cuando una instalación adicional es instalada, en un sitio separado de las instalaciones existentes, un sistema de puesta a tierra alterno o adicional es una opción viable, en este caso en lugar de una malla completa o de un anillo, se puede trabajar el caso con triadas de barras encapsuladas en concreto, esta opción depende del tamaño de la instalación adicional, para instalaciones de tamaño comparable con las instalaciones existentes, aplica una malla o anillo adicional. La puesta a tierra del sistema de suministro de potencia, no puede ser usada para la conexión directa de protección contra descargas atmosféricas, el sistema de protección contra descargas atmosféricas, debe tener sus barras dedicadas o malla particular. No obstante los dos sistemas deben ser interconectados en el punto común o de referencia. Es recomendable dejar un pozo de inspección, donde se unen estos sistemas para futuras inspecciones o evaluación de los sistemas por separado.

Resistencia de Puesta a Tierra

Tradicionalmente la resistencia de un circuito de puesta a tierra, ha sido medida con el método de los tres o cuatro puntos. Se instalan los electrodos de prueba y se efectúa la medición con un instrumento AC. Sin embargo, hoy en día existen instrumentos o medidores tipo gancho, que permiten lecturas directas de la resistencia de puesta a tierra induciendo una señal en el conductor de opuesta a tierra donde se efectúa la medición. Las variaciones de temperatura y humedad afectaran la medición, por lo cual se recomienda efectuar la medición, dejando pasar, por los menos dos días después de un día lluvioso, esto permite que la medición se haga en un día promedio, generalmente sin lluvia. Suelos o terrenos secos, tendrán valores resistencia mayor que los suelos húmedos. Para asegurar la protección, el diseño se debe efectuar con valores promedio o con los valores más altos de resistividad.

El sistema de puesta a tierra debe ser inspeccionado visualmente cada seis meses, para identificar situaciones de corrosión, sulfatación, o signos de chispas, conductores dañados, o flojos, etc., y las pruebas eléctricas o mediciones deben efectuarse una vez por año.

La resistencia de un sistema de puesta a tierra, depende de su aplicación y en forma general mientras mas baja mejor para protección de seguridad de las personas y de las

propias instalaciones. Por lo anterior, siempre es bueno el esfuerzo que se pueda hacer para obtener un valor de puesta a tierra bajo, y un valor ideal puede ser cualquier valor menor de un ohmio (1Ω), pero por condiciones del terreno no siempre se puede obtener, y siempre afecta el costo de la instalación. En todo caso hablar de valores típicos es un tanto difícil, y cada aplicación o sub-sistema tiene sus propios requerimientos, no obstante a continuación, como simple referencia, se presentan algunos datos:

El Código Eléctrico Nacional (CEN), como una guía para sistemas de suministro de potencia, en su artículo 250, exige un valor máximo de 25Ω y si este valor no se obtiene con la primera barra, solo exige agregar una segunda barra adicional. En todo caso, De acuerdo con el libro verde de IEEE, Sección 4 "Los 25Ω per se, definidos por el CEN, no implican que esto sea un nivel satisfactorio de puesta a tierra", lo cual se puede evidenciar en el siguiente ejemplo: Considere que en un circuito de 120 VAC, con una puesta a tierra de 25Ω , tendrá una corriente de falla a tierra de 4,8 Amp. ($125\text{ V}/25\Omega = 4,8\text{ Amp.}$). Estos circuitos de 120 V AC, son protegidos normalmente con interruptores (Breaker) de 20 Amp., los cuales no disparan con este valor de corriente de falla, por lo cual la falla permanecerá por un tiempo, existiendo el riesgo de un contacto eléctrico de una persona (Corrientazo), cuyo nivel de corriente es suficiente para originar un accidente con consecuencia no previstas, ya que cualquier corriente mayor a seis (6) miliamperios, puede causar serios daños a una persona. Una corriente de 100 miliamperios, puede causar la muerte instantánea. Por lo cual una persona que se acerque a una instalación, donde exista una falla a tierra en las condiciones descritas, está en riesgo de ser afectado por un Corrientazo.

Por consideraciones de seguridad, la puesta a tierra eléctrica, debe ser menor a 5Ω . Esto asegura que el Breaker o interruptor, vera la corriente de falla a tierra, disparando en el caso de que el conductor de línea, se ponga en contacto con tierra. $125\text{ V} / 5\Omega = 25\text{ A}$.

Una buena referencia de la resistencia de puesta a tierra para los circuitos o equipos electrónicos, es un Ohm (1Ω). La baja resistencia permite la disipación segura a tierra, de la energía no deseada, incluso los armónicos generados en el circuito protegido. En general los circuitos electrónicos, son especialmente susceptibles a transientes y a variaciones en sus niveles de corriente, por lo cual estos dispositivos, exigen un valor de resistencia de puesta a tierra como el referido anteriormente de un ohmio (1Ω).

Para sub-estaciones eléctricas, es determinante el nivel de falla a tierra de la misma, en cuyo caso se debe hacer un cálculo completo, para definir el valor de resistencia de puesta a tierra, basado en el potencial de toque y potencial de paso. Basado en esto se pueden requerir valores por debajo de un ohmio (1Ω), para sub-estaciones de alto o medio voltaje para potencias mayores de 10 MVA, entre 5 y 10 MVA, se pueden encontrar valores entre uno y dos ohmios (1Ω y 2Ω), entre 2 y 5 MVA tres ohmios (3Ω) y para menores de 2 MVA hasta cinco ohmios (5Ω).

En el caso de tanques, que es el caso que nos ocupa, algunos fabricantes de sistemas de protección, contra descargas atmosféricas, indican que se debe buscar una resistencia de puesta a tierra menor de 10 Ohmios (10Ω), no obstante la definición de este valor debe responder a un análisis del problema en general el cual estará influenciado por la densidad de descargas atmosféricas en el área y por la experiencia o problemas que se hayan presentado, como pueden ser incendios de venteos, válvulas de presión vació, área del sello en tanques de techo flotante, perdida total de tanques, impacto en sus sistemas de medición, accidentes personales con muertos o lesionados por descargas atmosféricas, etc. En todo caso al igual que en los demás sub-sistemas mientras mas bajo el valor de puesta a tierra, menor serán los riesgos, especialmente ante descargas atmosféricas, que pueden ser el mayor problema en el caso de tanques, por lo cual es típico encontrar en estos casos valores de resistencia de puesta a tierra cercanos a un ohmio (1Ω).

Resistividad del Concreto

En un intento para mejorar la resistividad del suelo, se ha agregado varios químicos y se han creado los electrodos químicamente tratados, que han logrado reducir la resistencia de contado entre electrodos y tierra, mejorando así los valores de puesta a tierra, en suelos con alta resistividad. Sin embargo, los requerimientos y gastos de mantenimiento, han hecho de esta opción la menos preferida. Este problema le ha dado paso a la opción de electrodos encapsulados en concreto y concreto como relleno alrededor de los conductores de puesta a

tierra, por diferentes razones. El concreto es en cierta forma conductor, debido a su contenido de humedad y su alcalinidad, la cual provee iones libres. El concreto enterrado tiene una conductividad de aproximadamente 3000 Ω/cm ., el cual es mucho menos que el promedio de la conductividad de suelos, que esta alrededor de 6500 Ω/cm . Una barra de puesta a tierra de 5/8 de pulgada de diámetro, y de 8 pies de longitud, en un suelo de resistividad promedio, tendrá una resistencia de puesta a tierra de 23 Ω . Esto satisface los requerimientos del CEN. Si el suelo es rocoso su resistividad se eleva a unos 500 Ω/mt y su resistencia de puesta a tierra con la misma barra, será de 177 Ω . La misma barra, en este suelo, pero encapsulada en concreto, tendrá una resistencia de puesta a tierra de 10,6 Ω , de acuerdo con la formula de Dwight. Ver cálculo a continuación:

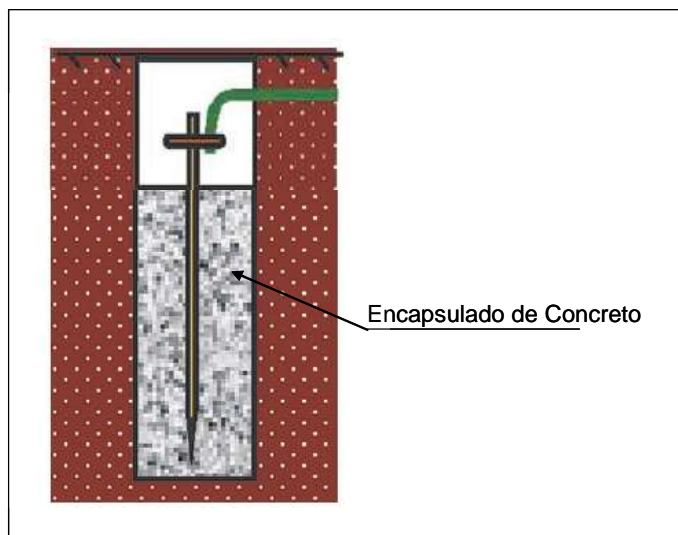
$$R = [\rho/1915L][\ln(48L/a) - 1]$$

$$R = [3,000/1915 \cdot 8][\ln(48 \cdot 8/0.625) - 1]$$

$$= 10.6 \Omega.$$

La construcción de un electrodo de concreto es simple, solo se tiene que abrir un hueco de 12 pulgadas, con una profundidad algo mayor que la longitud de la barra, se llena de concreto y se introduce la barra en el centro del concreto vaciado. **Ver Figura 4.**

Figura 4. Detalles de Barra encapsulada en Concreto.



Para verificar la factibilidad de la puesta a tierra, usando varias barras de puesta a tierra, calcule la resistencia resultante del arreglo de múltiples barras de puesta a tierra, usando la formula empírica incluida en el siguiente ejemplo. Los términos son R para la resistencia de un electrodo, n para el número de electrodos, y Rn es la resistencia de los "n" electrodos. La resistencia de la malla, se calcula según esta formula.

Para tres electrodos en concreto, la resistencia de puesta a tierra se reduce a 4,6 Ω .

$$R_{net} = [R_{one}/n]^{\frac{1}{n}} [2 - e^{-0.17(n-1)}]$$

$$R_{net} = [10.6/3]^{\frac{1}{3}} [2 - e^{-0.17(3-1)}]$$

$$= 4.6 \Omega.$$

Aunque este no es un valor bajo, el mismo es considerablemente mejor que los 177 Ω que se logra con una barra directamente al suelo en el caso original.

Estructuras Altas Objeto de descargas Atmosféricas (Halo Systems)

Las estructuras altas, situadas alrededor de la estructura principal que se quiere proteger, que sobresalen en el área circundante, pueden proveer protección adicional a la estructura principal. Sin embargo, la clave para asegurar con estas estructuras una verdadera protección, es su sistema de puesta a tierra. Es incluso más importante que el sistema de puesta a tierra se extienda en todas las estructuras, que el propio valor de resistencia de puesta a tierra. Se ha observado, el impacto de una descarga a una estructura circundante y el fogonazo (Flash) se ve viajar por los bajantes en múltiples ocasiones, originando daños serios a los equipos eléctricos y electrónicos, incluyendo disparos falsos de protecciones eléctricas. La zona de protección de la línea de estática o cable de guarda, de una línea de distribución, se extiende en un radio de 100 pies, a los dos lados de la línea. Postes o mástiles de madera, al igual que estructuras o tanques aislados, deben tener un terminal de protección metálico, Punta Franklin, extendiéndose por encima del poste, estructura o tanque, por lo menos 2 pies sobre su punto más alto. Un conductor de puesta a tierra, o bajante aéreo, pasando por encima del poste de madera o estructura o tanque aislado, actuara como un terminal de protección aéreo. La separación entre terminales de protección aéreos, cuando se requieran varios, debe ser menor de 20 pies. Los conductores de tierra, deben interconectar todos los terminales y proveer por lo menos dos caminos para la descarga a tierra. Un solo camino puede ser usado, si el terminal esta ubicado a baja altura y la única conexión prevista se considera segura y de fácil inspección. Los bajantes deben ser por lo menos conductores 2 AWG. Los fogonazos o descargas laterales se pueden evitar mediante un buen sistema de conexiones o puentado entre estructuras y sus partes metálicas, o que tengan una separación física que no requiera el puentado. Seis pies mínimo de separación en el aire o tres pies mínimo, cuando estén enlazados por medios o materiales sólidos, como son concreto, madera, o ladrillos.

Protección Catódica

La protección catódica se diseña para proteger el metal del problema de la corrosión, cuando esta en contacto con suelos que son un medio electrolítico, donde se facilita el fenómeno de corrosión. Esto se puede lograr, por el método de ánodos de sacrificio, seleccionado un material de sacrificio, el cual constituye el ánodo (Placa positiva), este se conecta eléctricamente a la superficie que se quiere proteger. Igualmente por el método de inyección de corriente DC, mediante un rectificador de potencia, el cual se conecta entre el ánodo y el cátodo, para crear una diferencia de potencial que contrarresta la diferencia de potencial existente entre el metal a proteger y el medio donde se encuentra. La fuente del rectificador de potencia, debe ser conectada al sistema de potencia del área, de la misma forma que cualquier otra carga o equipo eléctrico, al cual debe ser provisto con su respectivo neutro y conexión a tierra del equipo. Pararrayos de un nivel apropiado de voltaje deben ser conectados a todas las líneas de alimentación según corresponda. Si el rectificador esta fuera del anillo de tierra, los supresores de pico de bajo voltaje deben ser conectados en el lado DC. La salida positiva del DC del rectificador, debe ser conectada al ánodo. Este circuito, debe ser protegido contra todo contacto con el suelo o tierra, metales u otros elementos puestos a tierra. La salida negativa del DC del rectificador, debe ser conectada al tanque, tubería, recipiente o estructura y en general al conjunto de equipos que se quiera proteger.

Como una medida o practica de construcción, el metal o conjunto de equipos que se quieran proteger, deben estar aisladas de otros equipos que aunque estén conectados mediante tuberías u otras conexiones con los equipos a proteger, no requieren la protección, en este caso se deben aislar y en el caso de tuberías se usan bridas aislantes. Cualquier metal en contacto eléctrico, con las estructuras a proteger, o con el terminal o ramal negativo, estará drenando corriente del sistema de protección catódica. Esta corriente puede llegar a ser tan grande y no se logren los potenciales de protección en las estructuras a proteger, quedando las mismas sin la protección esperada. Más aun, el tanque o recipiente y su tubería, pueden tener cada uno, su sistema de protección por separado, desde dos diferentes rectificadores o fuentes DC. Esto crea un gran reto, cuando los dos sistemas deben ser conectados a la malla de puesta a tierra del sistema eléctrico. Sin embargo, la malla del sistema eléctrico, no debe ser conectada directamente a los equipos tanques o tuberías aisladas para propósitos del sistema de protección catódica. Se requiere una resistencia de unos pocos ohmios, al hacer esta conexión, para así restringir las corrientes desviadas. Destacando que la resistencia debe ser lo suficientemente baja, como para que las corrientes de falla, puedan llegar a disparar los dispositivos de protección, esto implica que la máxima resistencia debe ser entre 1 y 5 Ω para circuitos o sistemas de 120 VAC.

Corrientes Desviadas.

Corrientes desviadas son todas aquellas que circulan por un camino, que no fue deliberadamente diseñado para la circulación de esas corrientes. Estas pueden ser el resultado de fallas, corrientes de desbalance de sistemas trifásicos, o caminos de retorno de otros circuitos. Estas pueden también ser corrientes de un sistema de protección catódica, o corrientes galvánicas provenientes de un proceso de corrosión activo. Muy raras veces se efectúan mediciones para determinar la existencia de corrientes desviadas, a menos que se hayan observado signos de corrosión activa o chispazos que hacen suponer la existencia de estas corrientes.

Los sistemas de protección catódica, pueden crear problemas de corrientes desviadas, pero el voltaje de estos sistemas es comparativamente bajo. Entonces, riesgos desde el punto de vista de chispas incendiarias o riesgo de corrientazos a las personas es muy bajo. En adición a esto, voltajes galvánicos pueden estar presentes, pero estos no exceden los 1,5 voltios debido a su origen o acción tipo baterías. Entonces el riesgo de ignición por estas fuentes de energía es muy bajo. Sin embargo, la existencia de las mismas puede causar corrosión a cualquier metal expuesto a estas corrientes.

Las corrientes desviadas provenientes de fallas y retornos de tierra, pueden crear serios problemas si el camino de estas corrientes es abierto y existe una abertura o separación donde pueda saltar la chispa. El dieléctrico del aire es aproximadamente, 30.000 Voltios / centímetro. Para la abertura o separación medible (Aprox. 0,01 cm.), el voltaje de arco es de aprox. 350 Voltios. Este nivel de voltaje generalmente no existe entre dos superficies separadas, no obstante conexiones y separaciones intermitentes (Caso que puede ocurrir en el momento de separación de una brida, o de levantar la rejilla de un canal), se puede crear el potencial o voltaje de arco, originándose así el chispazo. En este caso, en un área clasificada donde puede existir una mezcla inflamable, si el voltaje excede 35 Voltios, existirá la energía requerida para la ignición de la mezcla combustible, originándose así un incendio. Por encima de 50 Voltios, también existe el riesgo de corrientazos a las personas. Por estas razones, es preferible aislar las fuentes de las corrientes desviadas, cuando las mismas sean identificadas. La solución para las corrientes desviadas que se deban mantener o la mejor precaución que se debe tomar para cuando estas se presenten, es conectar todos los sistemas y estructuras metálicas unas con otras. Una conexión permanente aceptada se debe efectuar con un conductor No. 4 AWG, o conectar los sistema mediante una resistencia.

Las corrientes desviadas pueden surgir de múltiples conexiones a tierra. El sistema, la conexión o barra de tierra que origine la corriente desviada debe ser aislado de tierra y de la conexión de puesta a tierra. Las corrientes desviadas también pueden crear problemas serios en los sistemas de instrumentación. En adición a los otros orígenes de corrientes desviadas, las corrientes desviadas en instrumentación pueden surgir, por la conexión de las pantallas y sus conduits, puestos a tierra en más de un sitio. En una instalación nosotros encontramos, una corriente de 14 Amp. fluyendo hacia el electrodo de puesta a tierra. Los conductores apantallados deben ser normalmente conectados a tierra, solamente en el lado de la fuente, por lo cual la pantalla, no debe nunca estar en contacto con otro metal o con tierra en cualquier otro sitio. Las pantallas son conectadas en un solo lado a tierra, para prevenir la circulación de corrientes desviadas. Aunque esta es una práctica muy usada, y soluciona el problema de las corrientes desviadas, ante el problema de descargas atmosféricas, se pueden originar picos de voltaje en el extremo de la pantalla no conectado a tierra, en el cual se pueden instalar supresores de picos de voltaje entre la pantalla y tierra. Por lo anterior debe tomarse precauciones adicionales, cuando la pantalla este conectada en un solo lado y exista una alta incidencia de descargas atmosféricas en el área de la instalación. Similarmente el conduit usado para señales analógicas, no debe proveer un camino metálico continuo. Un lado del conduit se puede aislar, dejando separado el último tramo en un lado, llegando solo con el cable o se pueden usar maguitos de PVC en el tramo de llegada. No obstante un lado del conduit debe estar conectado a la malla de tierra.

Cableado de Instrumentación

Los transitorios (Variaciones o inducción de voltaje de corta duración), son problemas que se presentan en sistemas o cableado de instrumentación, catalogados como ruido eléctrico, que genera serias consecuencias. Para cancelar el ruido o los transitorios de voltaje inducido, se utiliza como práctica común, entorchar los pares conductores de la señal. De esta forma, el ruido inducido, que es igual en los dos conductores se cancela por efecto del entorchado. Para

señales analógicas y señales discretas de alta frecuencia, se usan cables apantallados. Para señales de bajo nivel y alta frecuencia, se prefiere el uso de cables coaxiales. Los grupos de pares de cables entorchados, sometidos a un transitorio de voltaje por inducción, acoplan toda la energía disponible a todos los pares del grupo de cables. De esta forma mas pares de cables comparten la energía disponible por el campo que genera la inducción, lo cual permite que menos energía de este transitorio sea impuesta a la pieza o equipo electrónico que corresponda el grupo de pares de cables. Sin importar el numero de pares, todos los pares no utilizados (Pares libres del grupo de pares de cables), deben ser puestos a tierra, en la barra única o común de puesta a tierra. Cualquier energía transitoria, inducida en estos pares de cables, será drenada a tierra. Para mas de seis pares de un grupo, protectores del tipo paralelo (Shunt type protectors), son adecuados para disipar la energía. Para menos de seis pares, mas energía estará presente por cada par, por lo cual protectores en línea son requeridos. Los protectores en línea, incluyen filtros, así como protectores en paralelo. Los cables de instrumentación y comunicaciones, deben tenderse con retiros o separaciones mayores de 5 pies (1,5 mts.), de los cables de alta tensión o de circuitos con potencias significativas., con lo cual se elimina la mayoría del ruido inducido por la cercanía de estos circuitos. Si fuera necesario, cruzar en el recorrido cables de potencia, el cruce debe hacerse formando ángulos rectos con la dirección de los cables de potencia, para evitar la inducción. Para proveer una protección o apantallamiento mas completo, de las terminaciones y para proteger los equipos en ambientes contaminados desde el punto de vista electrico (Alto ruido eléctrico), el conjunto de equipos y terminaciones electrónicas deben ser colocados en cajas NEMA 12. Si se hace esto, suficiente ventilación debe ser provista para propósitos de enfriamiento.

Dispositivos de Protección

Dispositivos de protección, son algunas veces necesarios y se adicionan al sistema eléctrico para solucionar y controlar los transitorios. Estos dispositivos, pueden derivar la corriente, bloqueando la circulación de esta energía a lo largo del conductor, filtrando ciertas frecuencias, cortando las ondas de voltaje, o por una combinación de estas formas de protección. Sin importar la forma de protección, solamente unos pocos componentes están disponibles económicamente para diseñar las protecciones contra transitorios. Los dispositivos de protección se seleccionan con base al voltaje, la frecuencia y el esquema de puesta a tierra del sistema o circuito donde serán aplicados. El arreglo mas simple, son dos placas o puntos separados para proveer el camino para el arco, por encima de un cierto nivel. Esto puede ser una separación al aire ambiente, o una separación en un medio o material dieléctrico. Los clásicos pararrayos, se ubican en esta categoría. En algunos casos los dispositivos son construidos de tal forma que, el camino se convierte en una baja impedancia una vez que el rompimiento del arco ocurre. Carburo de silicón (Silcon carbide), es algunas veces usado para dispositivos de gran cantidad de energía. Tubos de gas y otros dispositivos rompe arcos, también se ubican en esta categoría. Esta es la mínima clase de protección factible para esta función, pero su capacidad de manejo de energía, es elevada en relación con su costo. Dispositivos con tubos de gas, adecuadamente diseñados, pueden ser efectivos para el control de descargas atmosféricas.

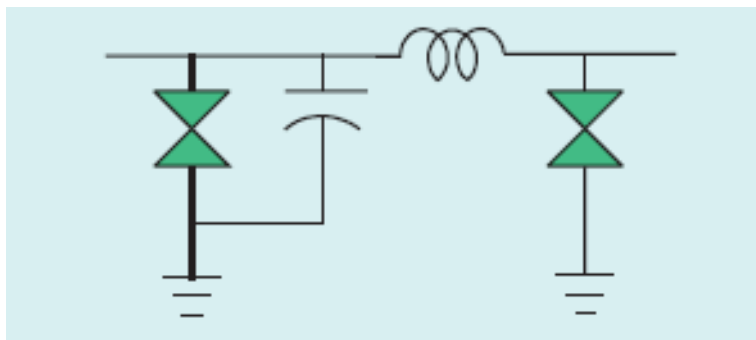
El siguiente arreglo común, usa elementos pasivos. Capacitares e inductores reaplican al circuito. Filtros bypass y pasabanda pueden ser implementados. Filtros en serie o en línea, usan bobinas inductoras. Se prefiere el uso de bobinas con núcleo de aire con respecto a las de núcleo de ferrita. Las bobinas de núcleo de aire, tienen menos atenuación y su frecuencia de corte es más alta. Sin embargo la de aire es preferida debido a que las características de las de núcleo de ferrita, cambian con la magnitud y la frecuencia de corriente a disipar. Los dispositivos semiconductores, son el arreglo mas avanzado. Estos dispositivos son más rápidos, pero ellos generalmente manejan menos energía que los demás dispositivos comparables en precio. Debido a su rango limitado de operación, estos dispositivos, deben especificados o seleccionados en forma mas precisa. Los dispositivos con base a silicón, pueden ser elementos de protección por niveles de voltaje o por corriente. Los dispositivos de Oxido de Metal (Metal-Oxide), actúan o disparan principalmente por niveles de voltaje, y son fabricados para manejar una cantidad de energía muy bien definida (Joule o Vatios por segundo). Estos dispositivos se seleccionan para un voltaje de cebado que el pico de voltaje esperado proveniente de la fuente de suministro de energía. La disipación de energía se basa en un frente o forma de onda estándar. Cada varistor de oxido de metal (Metal-oxide varistor o MOV), tendrán una capacidad resultante basado en el manejo de las corrientes transitorias. Los dispositivos, tienen una capacitancia inherente a su diseño. Sin embargo esto crea un problema

con las señales de alta frecuencia. La alta capacitancia a altas frecuencias, incrementa su impedancia y atenúa la señal principal.

Los diodos Zener y de juntas de silicón, son dispositivos mucho mas rápidos que los varistores, pero no pueden soportar tanta energía. Debido a que estas unidades no tienen mucha capacidad de disipación de energía, generalmente se acoplan con un pararrayo primario, como un dispositivo con tubo de gas. El diodo hace la función del disparo o cebado, aprovechando su rapidez y el tubo de gas disipará la energía. Muchas de las protecciones de transitorios son desarrolladas con dispositivos que dejan pasar la menor cantidad de energía, a una frecuencia particular hasta el equipo protegido. Muchos de los pararrayos, son diseñados para disipar energía para frecuencias de menos de 1 MHz. Por encima de esa frecuencia, existe menos energía que deba ser disipada.

Para sistemas de potencia de grandes volúmenes de energía, se pueden usar filtros de alta energía en fuente y a nivel de la carga filtros de baja energía, en general todos los componentes mostrados en la figura 5 pueden ser usados. **Ver Figura 5.** Algunas veces el capacitor, puede ser removido de estos circuitos, con impactos menores, debido a que es difícil hacer match con la frecuencia correspondiente. Las tierras son intencionalmente aisladas, para facilitar la disipación de energía, sin impactar a sistemas adyacentes. Para sistemas típicos, todos los sub-sistemas se conectan unos con otros. Haciendo siempre una sola conexión a la tierra de referencia.

Figura 5. Esquema con Filtros de alta Energía en la Fuente y Baja Energía en la Carga.



Filtro Alta Energía / Fuente

Filtro Baja Energía /Carga

Resumen

Existen numerosas consideraciones diferentes, para cada tipo de sistema conectado a tierra. No obstante existen aspectos claves para cada uno de ellos que deben ser considerados. El objetivo es convertir los aspectos conflictivos en requerimientos compatibles buscando los mayores beneficios de cada sistema de protección. Para protección contra descargas atmosféricas, una malla de tierra uniforme es recomendable en toda el área cubierta por el tanque o recipiente y todos sus equipos conectados. Para protección personal, el recipiente, todas las demás partes metálicas y el sistema eléctrico, deben ser conectados unos con otros. La conexión de la puesta a tierra del sistema de potencia, debe ser de baja resistencia. Para señales de instrumentación con protección a tierra, un solo punto de conexión a tierra es recomendado. Para protección catódica, el aislamiento de los equipos, estructuras o tuberías protegidas y la conexión o puenteo controlado con otros sistemas, previene o evita las corrientes desviadas.

Como un aspecto importante y que en muchos casos presenta dificultades, además de las consideraciones generales ya comentadas en el cuerpo de este artículo, está el cálculo de la resistencia de puesta a tierra, de lo cual existen numerosos volúmenes y publicaciones, como por ejemplo los publicados por IEEE, programas especializados, etc. La gran mayoría de estos procedimientos de cálculo, responden a estudios o investigaciones experimentales o empíricas, que se han adoptado como practica común y hoy en día son aceptadas en el diseño o estimados para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra, por lo cual como una extensión del alcance de este artículo, se ha efectuado una recopilación de algunos métodos de calculo, incluyendo algunos ejemplos contenidos el IEEE-80, desarrollados en Excel, aplicables a suelos uniformes, que pueden ser utilizados como referencia. Ver Anexo A.

Anexo A: Ejemplos de Cálculo de Resistencia de Puesta a Tierra – IEEE-142 y IEEE-80.

Anexo A:
Ejemplos de Calculo de Resistencia de Puesta a Tierra
IEEE- 142 y IEEE-80.

Calculo de Resistencia de Puesta a Tierra Una Barra Vertical						
Determinar la Resistencia de puesta a tierra, que se puede lograr con base a una electrodo o barra vertical de 10 pies (3,048 mts.) de longitud (Profundidad), y 3/4 de pulgadas (0,01905 mts) de diametro. La resistividad (varia según lo indicado en la tabla 1.						
				Diametro d (Mts)	Coverision Diametro a Radio	
		π	L (Mts)			
Tabla 1	ρ	3,1416	3,048	0,01905	2	
	Ohmios-Metro	Resultados (Ω)				
	50	16,07	Formula			
	100	32,14	Tomado de Tabla 13 IEEE-142, para una barra de longitud L y radio a			
	200	64,27	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$			
	300	96,41				
	400	128,55				
	500	160,68				
	1000	321,37				
	2000	642,74				

Calculo de Resistencia de Puesta a Tierra Dos Barras Verticales						
Determinar la Resistencia de puesta a tierra, que se puede lograr con base a dos electrodos o barras verticales de 10 pies (3,048 mts.) de longitud (Profundidad), y 3/4 de pulgadas (0,01905 mts) de diametro, con una separacion de 4 mts. La resistividad (varia según lo indicado en la tabla 1.						
				Diametro d (Mts)..... (a = radio)	Separacion S (Mts)	
		π	L (Mts)			
Tabla 1	ρ	3,1416	3,048	0,01905	4	
	Ohmios-Metro	Resultados (Ω)				
	50	8,97	Formula			
	100	17,94	Tomado de Tabla 13 IEEE-142, para dos barras de longitud L y radio a y separacion S mayor que L			
	200	35,88	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$			
	300	53,82				
	400	71,76				
	500	89,71				
	1000	179,41				
	2000	358,82				

Calculo de Resistencia de Puesta a Tierra Para un Alambre Enterrado							
Determinar la Resistencia de puesta a tierra, que se puede lograr con base a un conductor enterrado de 100 mts. de longitud, a una profundidad de 0,6 Mts., conductor de cobre desnudo 2/0. La resistividad (varia según lo indicado en la tabla 1).							
Datos Conductor		Conductor	Cobre	2/0	Diametro Cond.	Mils Pulgada	419
		π	L	Diametro d (Mts)... (a = radio)	S	Longitud (Mts)	Profundidad (Mts)
Tabla 1	ρ	3,1416	50	0,0106426	0,3	100	0,6
	Ohmios-Metro	Resultados (Ω)					
	50	1,20	Formula				
	100	2,39	Tomado de Tabla 13 IEEE-142, para un alambre enterrado de longitud 2L y profundidad S/2				
	200	4,79	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$				
	300	7,18					
	400	9,57					
	500	11,97					
	1000	23,94					
	2000	47,87					

Calculo de Resistencia de Puesta a Tierra Para una Malla Reticulada sin Barras Adicionales							
Determinar la Resistencia de puesta a tierra, que se puede lograr para un area de 70x70 Mts (4900 Mts2), con base a una malla de puesta a tierra sin barras de tierra, con una cuadrícula de 10x10, lo cual equivale a 1540 mts. de conductor enterrado, a una profundidad de 0,6 Mts., conductor de cobre desnudo 2/0. La resistividad (varia según lo indicado en la tabla 1).							
Datos Conductor		Conductor	Cobre	2/0	Diametro Cond.	Mils Pulgada	419
		A	L	h			
Tabla 1	ρ	4900	1540	0,6			
	Ohmios-Metro	Resultados (Ω)					
	50	0,35	Formula				
	100	0,69	Tomado de IEEE-80 (Formula 40), para una malla reticulada con alambre enterrado de longitud L y profundidad h. El terreno tiene un area A.				
	200	1,38	$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right]$				
	300	2,08					
	400	2,77					
	500	3,46					
	1000	6,92					
	2000	13,84					

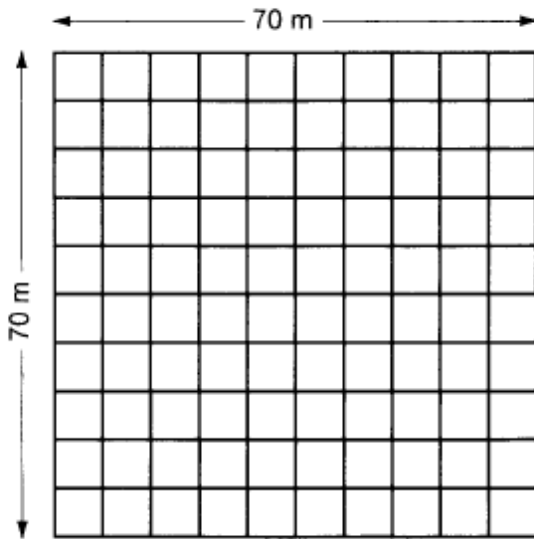


Fig C1
Square Grid Without Ground Rods

Calculo de Resistencia de Puesta a Tierra Para una Malla Reticulada con Barras Adicionales							
Determinar la Resistencia de puesta a tierra, que se puede lograr para un area de 70x70 Mts (4900 Mts2), con base a una malla de puesta a tierra sin barras de tierra, con una cuadrícula de 10x10, lo cual equivale a 1540 mts. de conductor enterrado, a una profundidad de 0,6 Mts., conductor de cobre desnudo 2/0. La resistividad (varia según lo indicado en la tabla 1.							
Datos Conductor		Conductor	Cobre	2/0	Diametro Cond.	Mils Pulgada	419
		Longitud Conductor	1540				
		A	h	Cantidad de Barras Adicionales	Longitud por Barra (Mts.)	Longitud Total Barras adicionales (Mts.)	Longitud Total L (Mts.)
Tabla 1	ρ	4900	0,6	50	10	500	2040
	Ohmios-Metro	Resultados (Ω)					
	50	0,34					
	Formula						
	Tomado de IEEE-80 (Formula 40), para una malla reticulada con alambre enterrado de longitud L y profundidad h. El terreno tiene un area A.						
	100	0,68					
	200	1,35					
	300	2,03					
	400	2,70					
500	3,38						
1000	6,76						
2000	13,52						
$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right]$							

Nota: En los ejemplos anteriores, se puede ver la variación de la resistencia de puesta a tierra, para un suelo que tiene una resistividad determinada según mediciones, que por ejemplo puede ser 400 Ohmios/Centímetro..La cual se ve

según resultados, que puede variar desde 128,75 Ohmios, hasta 2,7 Ohmios, para los arreglos planteados, basados en un suelo uniforme.

Otros arreglos, y para suelos de varias capas (No uniformes), tienen soluciones más complicadas desde el punto de vista matemático y normalmente se utilizan programas computarizados para los análisis correspondientes, que incluyen cálculos de potencial de toque y potencial de paso. Estos programas a su vez, efectúan análisis desde el punto de vista económico de la solución.

Maracaibo - Venezuela... 15 -11-2006.

Recopilado, adaptado y traducido por:

Omar Graterol / Ingro. Electricista / CIV: 16518