

5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

293703

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

“INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE
TIERRA. ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS
Y DESARROLLO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
ELI WOLFRED ALDANA GARCÍA

ASESOR: ING. ESTEBAN CORONA ESCAMILLA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo".

que presenta el pasante: Eli Walfred Aldana García
con número de cuenta: 8919933-0 para obtener el título de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 2 de Abril de 2001

PRESIDENTE	Ing. José Juan Contreras Espinosa	
VOCAL	Ing. Héctor Roa Ortiz	
SECRETARIO	Ing. Esteban Corona Escamilla	
PRIMER SUPLENTE	Dr. Armando Aguilar Márquez	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Francisco Rodríguez López	

AGRADECIMIENTOS.

A mi madre:

Porque de no haber estado de mi lado, esto no hubiera sido posible.

A mi abuelo:

Gracias por su apoyo y paciencia.

A mi familia:

Mis hermanas, mi abuela, mis tíos y tías que siempre me alentaron y me tuvieron confianza.

Índice.

Introducción.	1
Capítulo I	
Conceptos.	
1.1 Definición.	3
1.2 Objeto de la puesta a tierra.	3
1.3 Tipos.	5
1.4 Constitución.	7
1.5 Resistencia del sistema.	10
Capítulo II	
Factores del terreno.	
2.1 Resistividad.	12
2.2 Elementos que influyen.	14
2.2.1 Naturaleza del terreno.	15
2.2.2 Humedad.	17
2.2.3 Temperatura.	18
2.2.4 Salinidad.	19
2.2.5 Estratigrafía del terreno.	21
2.2.6 Variaciones estacionales.	22
2.2.7 Compactación.	24
2.2.8 Factores de naturaleza eléctrica.	24
Capítulo III	
Electrodos.	
3.1 Definición.	29
3.2 Tipos.	30
3.3 Tipo pica.	34
3.3.1 Picas en profundidad.	38
3.3.2 Picas en paralelo.	39

3.4 Pozo de inspección.	42
3.5 Placa.	45
3.6 Cables enterrados.	48
3.7 Electrodo naturales.	53

Capítulo IV

Medición de la resistividad del terreno.

4.1 Medición de la resistividad.	58
4.2 Método de Wenner.	60
4.3 Sistema Métrico.	63
4.4 Diferencias de potencias tolerables.	67
4.5 Potencial de paso tolerable.	71
4.6 Potencial de contacto tolerable.	73
4.7 Determinación de la corriente máxima de falla.	74

Capítulo V

Puesta a tierra.

5.1 En obras de construcción.	87
5.2 En edificios de nueva construcción.	93
5.3 En edificios existentes.	97
5.4 En instalaciones industriales.	102

Apéndice A.

Soldadura Aluminotérmica.	105
Conclusiones.	116
Bibliografía.	117

Introducción.

La fulguración en el cuerpo humano, así como en sistemas de manejo de potencial, son un problema al cual se le resta importancia debido al manejo inapropiado de las líneas de protección de estos, así como a la utilización de materiales inapropiados para la realización de los mismos.

Una forma de protección para las personas y los bienes, en este sentido, es la desviación a tierra de corrientes de defecto debidas a sobrecargas en los equipos o de origen atmosférico, que pueden presentarse en cualquier momento y en cualquier circuito, sea eléctrico, o electrónico. Tomando en cuenta que sin un sistema de tierras perfectamente establecido, los daños, tanto a los sistemas eléctricos, como a las personas, podrían ser irreversibles, incluso, se estaría hablando en un momento dado de pérdidas humanas.

Si se tiene en cuenta que las instalaciones eléctricas destinadas a viviendas son económicamente desfavorables, el tipo de trabajo menos apetecido por los instaladores, no se debe tan solo a la relación de material y mano de obra, sino también a la escasa sensibilidad de los constructores y de los usuarios hacia los problemas relacionados con la funcionalidad y con la seguridad. Respecto a lo que refiere a una instalación tipo industrial, nos encontramos con una situación favorable. Debido a los sistemas y circuitos con los que se cuentan, además del terreno con el cual se

dispone. Y solo queda el temor a que la instalación eléctrica pueda ser sometida a control por parte de funcionarios de la Inspección del Trabajo. Ahora bien, si las instalaciones no han sido realizadas de acuerdo con los conceptos contenidos en la legislación relativa a la prevención de accidentes laborales, los responsables de la empresa pueden incurrir en sanciones. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es dar a conocer los diferentes sistemas que existen de puesta a tierra, su procedimiento, además de la descripción de los elementos que son necesarios para obtener muy buenos resultados en el diseño de ésta, y destacar que la puesta a tierra es el elemento de protección imprescindible en todas las instalaciones eléctricas.

El análisis se basará principalmente en la investigación de los elementos que conforman la puesta a tierra, ya que se observará que existen muchos procedimientos para conseguir una muy buena instalación de puesta a tierra, ahorrándose mucho tiempo al basar el desarrollo a las normas principales sobre este tema a nivel internacional. Si se decide trabajar, ya no al límite de los cálculos, sino tratando de dejar una amplia banda de seguridad respecto a lo que se pide y a lo que en el desarrollo se puede obtener, como resultado se alcanzará un trabajo más que seguro y garantizado.

Capítulo I.

Conceptos.

1.1 DEFINICIÓN.

La unión eléctrica con la tierra de una parte de un circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, se efectúa mediante una instalación de puesta a tierra. Que según puede leerse en la ITC MIE RAT 01, Terminología, es "el conjunto formado por electrodos y líneas de tierra de una instalación eléctrica".

La denominación "puesta a tierra", comprende toda aleación metálica directa sin protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, permitiendo el paso a tierra de las corrientes de falla o las de descargas de origen atmosférico.

1.2 OBJETO DE LA PUESTA A TIERRA.

Antes de proceder al desarrollo de una instalación de puesta a tierra, es necesario conocer el objetivo de la misma. La instalación de puesta a tierra se considera como un circuito de protección paralelo a la instalación eléctrica, el cual tiene como fin primordial, el de proteger a las personas y los animales que puedan estar en

contacto con masas metálicas que pueden ponerse accidentalmente bajo tensión.

Otra función muy importante de la puesta a tierra de una instalación eléctrica es la de forzar la derivación, al terreno, de las intensidades de corrientes, de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya se trate de corrientes de defecto, bajo frecuencia industrial, o debidas a descargas atmosféricas, de carácter impulsional. Con ello se logra:

- Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra,
- Posibilitar la detección de defectos a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo, así, el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas,
- Limitar las sobretensiones internas (de maniobra transitorias y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones de explotación,
- Evitar que las tensiones de frente escarpado que originan las descargas de los rayos provoquen "cebados inversos", en el caso de instalaciones de exterior y, particularmente, en líneas aéreas.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

No se debe olvidar que desde el punto de vista eléctrico, al reducir la tensión, los accidentes pueden llegar a ser eliminados o aminorados, los mismos resultados se pueden obtener disminuyendo el tiempo de contacto con materiales en tensión. Con la puesta a tierra, se disminuye el primer riesgo, pues se evita que las masas metálicas se puedan poner en tensión al tenerlas conectadas a tierra, y también parte del segundo si, además de la puesta a tierra, dispone de interruptores diferenciales de alta sensibilidad. Se puede resumir en cuatro puntos importantes el objetivo básico de una instalación de puesta a tierra:

- ❑ Seguridad de las personas,
- ❑ Protección de las instalaciones,
- ❑ Mejora de la calidad del servicio, y
- ❑ Establecimiento y permanencia de un potencial de servicio.

1.3 TIPOS.

Podríamos encontrar un sin fin de clasificaciones para cada tipo de protección que se necesitara, pero de acuerdo a los fines a perseguir, podemos disponer de los siguientes tipos de puesta a tierra:

- ❑ Puesta a tierra para protección.
- ❑ Puesta a tierra para ejecución de trabajo, y

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

□ Puesta a tierra de funcionamiento.

Puesta a tierra para protección. Tiene como principal objetivo drenar hacia tierra las corrientes de defecto que puedan significar un peligro para la integridad física de las personas.

Esta, debe extenderse a todos los receptores y masas metálicas accesibles. Por ejemplo, en las instalaciones en edificios civiles la toma de tierra se relaciona con la envoltura de los aparatos receptores (lavadoras, lavavajillas, refrigeradores, etcétera) y con las masas metálicas (grifería, bañeras, cocinas, lámparas, etcétera). En dichas partes puede aparecer tensión como consecuencia de una avería o una falla.

Puesta a tierra para ejecución de trabajo. Su función, al igual que la anterior, es para garantizar la integridad física de aquel personal que se encuentra operando sobre elementos que comúnmente se hallan bajo tensión, pero que temporalmente están fuera de servicio, en conclusión, es una puesta a tierra provisional.

Puesta a tierra de funcionamiento. Dentro de este tipo, podemos citar la puesta a tierra del conductor de neutro de las redes de distribución de energía eléctrica, la conexión a tierra de las vías del ferrocarril y tranvía en aquellos casos en que éstas constituyen un conductor activo de la red de distribución, en conclusión, se refiere

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

a la conexión existente entre una parte de un circuito y el potencial de tierra.

1.4 CONSTITUCIÓN.

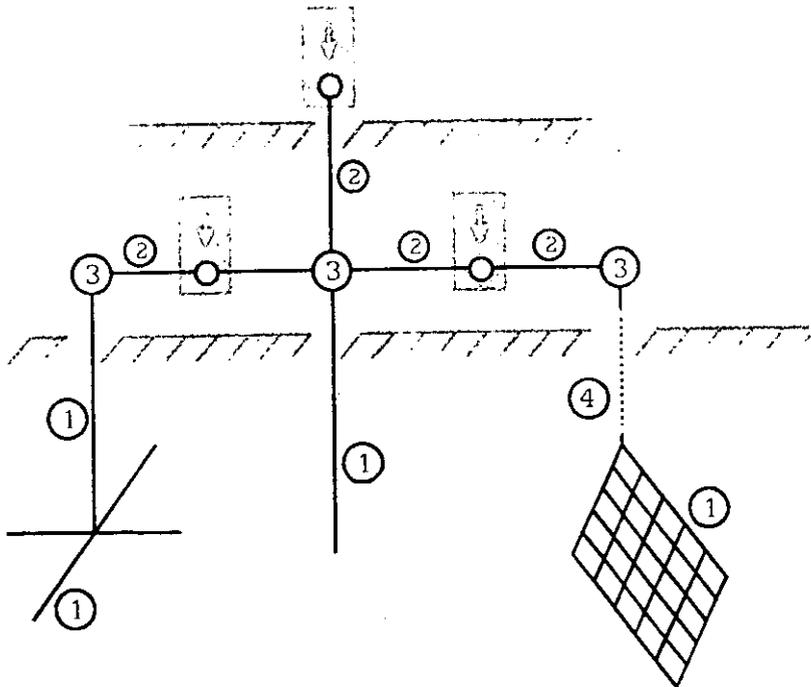
Es un sistema eléctrico constituido solamente por elementos resistivos. En esencia, una instalación de puesta a tierra se compone de unos electrodos (picas, placas, conductores desnudos, que se hayan en contacto, suficiente, con el terreno) y de una red de conductores aislados que los conectan a las partes de la instalación que deben ser puestas a tierra. En una construcción existen elementos que pueden contribuir a dispersar las corrientes de defecto, por ejemplo, el hierro enterrado de los pilares y cimientos, las tuberías metálicas, etcétera.

Es de suma importancia hacer notar que estos elementos, aun cuando se encuentren hundidos en el terreno (enterrados en el suelo) no sustituyen en absoluto a la instalación de puesta a tierra. Lo mismo aplica en lo que se refiere a tubos metálicos de servicios enterrados, por ejemplo el de desagüe.

Se debe tener muy presente en que la seguridad de las personas es lo que verdaderamente preocupa y se constituye en el fin primordial de la instalación de puesta a tierra, lo que no significa que se deje de reconocer los demás objetivos.

Según se puede ver en la ITC MIE RAT 13, apartado 3, "La instalación de puesta a tierra estará constituida por uno o varios electrodos enterrados y por las líneas de tierra que conecten dichos electrodos a los elementos que deben quedar puestos a tierra". Tal y como lo muestra la figura 1, que a continuación se muestra.

FIGURA 1. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN



de donde:

1. *Electrodo de puesta a tierra*: Es el conductor o el conjunto de conductores enterrado(s), que nos sirven para establecer una

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

conexión con tierra. Los conductores no aislados, colocados en contacto con tierra, para la conexión al electrodo, se considerarán parte de éste.

2. *Línea de tierra*: conductor o conjunto de conductores que une(n) el electrodo de tierra con una parte de la instalación que se haya de poner a tierra, siempre y cuando los conductores estén fuera del terreno o colocados en él, pero aislados del mismo.
3. *Punto de puesta a tierra*: Es un punto, situado generalmente fuera del terreno, que sirve de unión de las líneas de tierra con el electrodo, directamente o a través de líneas de enlace con él.
4. *Línea de enlace con el electrodo de (puesta a) tierra*: Cuando existiera un punto de puesta a tierra, se denomina línea de enlace con el electrodo de tierra a la parte de la línea de tierra comprendida entre el punto de puesta a tierra y el electrodo, siempre que el conductor esté fuera del terreno o colocado aislado dentro del mismo.

PUNTO DE PUESTA A TIERRA Y LÍNEA DE ENLACE CON TIERRA



1.5 RESISTENCIA DEL SISTEMA.

La resistencia total que presenta una instalación de puesta a tierra está constituida por la suma de las siguientes partes:

- La resistencia del conductor, (línea de tierra y línea de enlace con el electrodo) que conecta el electrodo de tierra al sistema que debe ponerse a tierra.
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el terreno, y
- La resistencia del suelo en el que está enterrado el electrodo.

La resistencia del conductor se puede determinar perfectamente por los procedimientos usuales. La de contacto con el terreno es despreciable por su escaso valor y la parte más significativa es la correspondiente al terreno en el cuál será introducido el electrodo o la red de tierra, según sea el caso.

A este respecto, debe señalarse la escasa importancia de la baja resistividad de los materiales utilizados como electrodos frente a la que posee el terreno.

En cuanto a la resistencia que presenta el terreno es función de la resistividad del mismo y de las dimensiones y forma del electrodo y aunque, pese a ello, se considere la tierra como un conductor de

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

ilimitada conductancia, por sus grandes dimensiones, no puede asumirse, por extensión, que las "conexiones" que a ella se efectúen mediante electrodos tenga esa misma propiedad, ya que cualquiera que sea la forma que presente, ofrecerán una resistencia definida al paso de la corriente y, en muchos casos, resultará difícil obtener una puesta a tierra de baja resistencia.

En los capítulos siguientes se analizarán todos y cada uno de los elementos que completan el sistema de tierras, comenzando con los factores del terreno.

Capítulo II.

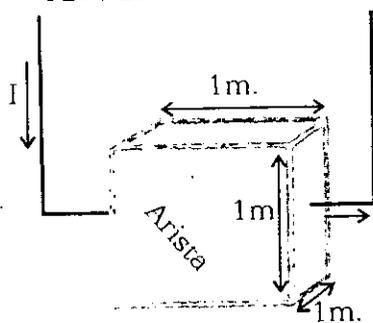
Factores del terreno.

2.1 RESISTIVIDAD.

La resistividad o resistencia específica, es la magnitud característica de toda materia que expresa su aptitud para la conducción de corrientes eléctricas.

Para conocer el comportamiento del terreno se tendrá que estudiar desde el punto de vista eléctrico, como un elemento encargado de disipar las corrientes de defecto que lleguen a través de los electrodos, es decir, se debe conocer la resistividad.

FIGURA 2. RESISTIVIDAD DE UN CUBO DE TERRENO DE 1 METRO DE LADO



$$R = \rho \frac{l}{S}$$

de donde:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \left(\frac{\Omega \text{m}^2}{\text{m}} \right) = \Omega \text{m}$$

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

ahora, para un cubo de un metro de lado:

$$R(\Omega) = \rho \frac{l(m)}{S(m^2)} = \rho \frac{1(m)}{(1 \times 1)m^2} = \frac{\rho}{1m}$$

despejando ρ :

$$\rho = R(\Omega \cdot m)$$

de la ecuación:

R = resistencia [Ω]

ρ = resistividad [$\Omega \cdot m$]

l = longitud [m]

S = sección [m^2]

La resistividad del terreno es la resistencia que presenta al paso de la corriente un cubo de terreno de 1 metro de arista. Se mide en Ωm y se representa con la letra ρ . Esencialmente, la resistividad del terreno, tiene su base en las capas que lo componen, su estratigrafía, la humedad que retenga, salinidad y temperatura. Esta resistividad se verá afectada en el transcurso del año, debido a las variaciones que trae cada estación.

Otro factor muy importante es la compactación del terreno, a medida que aumente el tamaño de las partículas que componen el terreno, aumentará la resistividad.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Debido a que no existe una uniformidad en las diferentes capas que componen el terreno, cuando queremos determinar la resistividad en un punto del terreno, por medio de un método de medida, lo que se determinará será la resistividad media de las capas comprendidas entre la superficie y una cierta profundidad, que se puede tomar como una resistividad aparente.

Como conclusión se tendrá que cuanto menor sea la resistividad del terreno, tanto más fácilmente se pueden alcanzar valores bajos para la resistencia de la instalación a tierra.

2.2 ELEMENTOS QUE INFLUYEN.

Los elementos que influyen en la resistividad de un terreno, y que se pueden, hasta cierto punto, cambiar, se enlistan a continuación:

- Naturaleza del terreno,
- Humedad,
- Temperatura,
- Salinidad,
- Estratigrafía,
- Variaciones estacionales,
- Factores de naturaleza eléctrica, y
- Compactación.

2.2.1 NATURALEZA DEL TERRENO.

Para la elaboración de una adecuada instalación de tierra, es fundamental, como primer paso, el conocer la naturaleza del terreno, ya que se podrán alcanzar valores muy bajos para la resistencia de la instalación, cuanto menor sea la resistividad del terreno.

Puede parecer que la investigación de la naturaleza y de la estructura geológica, para determinar la variación de la resistividad en función de la profundidad es más propia de la geofísica pero no es así, pues si bien para calcular la resistencia de una toma de tierra puntual es suficiente el conocimiento del perfil de la resistividad aparente de un terreno, no sucede lo mismo en el caso de una malla de gran extensión, como la de una subestación, por ejemplo.

Una de las bases necesarias para determinar la configuración de una red mallada que abarque una gran superficie es el conocimiento de la resistividad a diversas profundidades. Sin embargo, la resistividad del terreno en la superficie o en la profundidad, raramente se conocen antes del establecimiento de las obras y es frecuente que la realización de las redes de tierra sea la que aporte las primeras indicaciones sobre la calidad de los terrenos cuando, en buena lógica, debería ser el proceso inverso el que prevaleciera.

La siguiente tabla nos muestra los valores resistivos de acuerdo a la naturaleza del terreno.

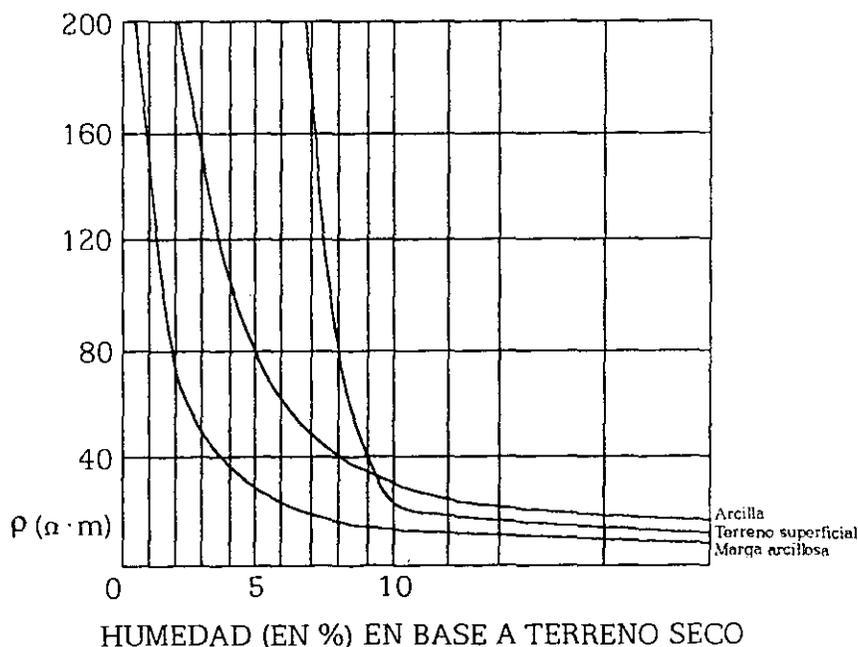
TABLA 1. NATURALEZA DEL TERRENO.

Naturaleza del terreno	Resistividad en Ω m
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 30
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10,000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

2.2.2 HUMEDAD.

El estado hidrométrico del terreno influye de forma importante sobre la resistividad, al aumentar la humedad disminuye la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad. En cualquier caso, siempre disminuirá la resistividad al aumentar agua, respecto a la que se tenía con el terreno seco. La gráfica 1, muestra las variaciones que se obtienen en la resistividad de acuerdo a la humedad.

GRÁFICA 1. VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN RELACIÓN A LA HUMEDAD



Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

La explicación por la cual al aumentar la humedad del terreno disminuye la resistividad, tiene sus bases en que cuyo principal efecto es disolver las sales solubles, la resistividad disminuye con rapidez pero, a partir de cifras del orden del 15% en peso, esta disminución es mucho menos marcada, a causa de la práctica saturación del terreno, y esto se puede observar en la gráfica mostrada anteriormente (gráfica 1)

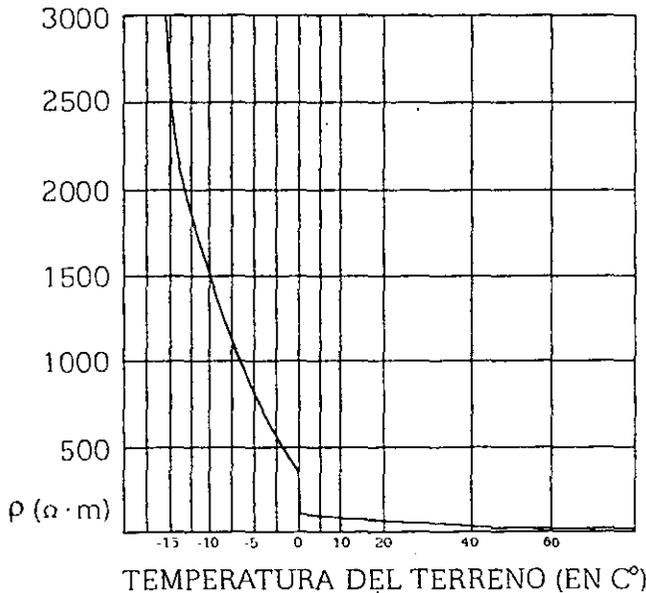
2.2.3 TEMPERATURA.

Las características térmicas del terreno dependen de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

Una de las causas por la cual la resistividad de la tierra aumenta se debe en parte a la temperatura que en ésta se halla. Se tiene que si la temperatura disminuye, la resistividad del terreno aumenta, pero cuando el terreno se enfría por debajo de 0° centígrados, la resistividad aumenta rápidamente.

Cuando un terreno está a una temperatura inferior a 0° grados el agua que contiene se congela. El hielo es aislante, desde el punto de vista eléctrico, pues la movilidad de los iones del terreno a través del agua se ve detenida al congelarse ésta.

GRÁFICA 2. VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



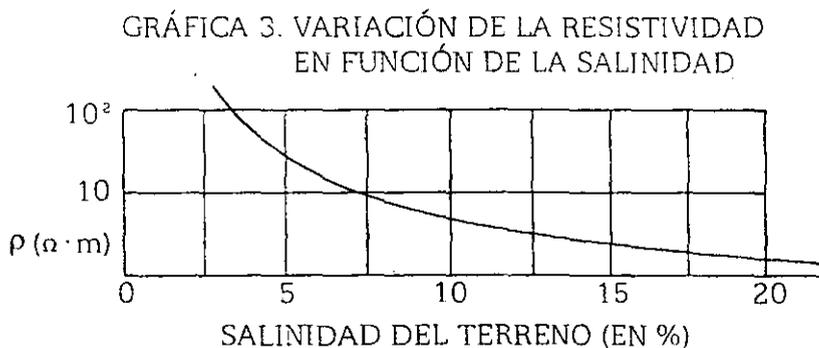
Respecto a éste agente se indica lo siguiente en la RAT 13 (4.4): "Al alcanzar el suelo temperaturas inferiores a los $0^{\circ}C$ aumenta mucho su resistividad." "...los electrodos se enterrarán a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia en el cálculo".

2.2.4 SALINIDAD.

Al aumentar la salinidad del terreno disminuye la resistividad. El agua disocia las sales en iones y cationes que se encargan de transportar los electrones por el terreno. Para comprender éste

fenómeno solo tenemos que recordar el comportamiento eléctrico del agua. El agua destilada es aislante y aunque introduzcamos unos electrodos en el interior de un recipiente conectados a una pila no circulará corriente eléctrica a través de ella.

Si al agua le añadimos una sal, por ejemplo "cloruro de sodio" o sal común, empezará a circular electricidad y a medida que añadamos más sal, circulará más electricidad: los electrones se desplazan por el agua gracias a los iones disociados. Partiendo de este proceso, encontramos una forma de tantas, de cómo se puede ayudar a la mejora de la resistividad del terreno (disminuyéndola)



No se debe olvidar que el agua hace que las sales penetren hacia la parte profunda del terreno, hacia la capa de depósito, y que un riego excesivo o unas lluvias excesivas lavan el terreno y, por lo tanto, arrastran la sal que rodea los electrodos aumentando la resistividad. Tampoco es aconsejable la colocación de los electrodos en zonas cercanas a los cruces de los ríos, tanto superficiales como

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

subterráneos, pues suelen ser terrenos muy lavados y por lo tanto más resistivos que lo normal.

2.2.5 ESTRATIGRAFÍA DEL TERRENO.

Como se sabe, el suelo está compuesto por varias capas de tierra, de diferentes agregados cada una, por tanto, la resistividad de estas capas también varía. En un área especial de terreno, donde se quiera enterrar el electrodo, se dice que, su resistividad será una combinación de la resistividad de las diferentes capas y del espesor de cada una de ellas. La resistividad media o resistividad aparente será una combinación de las resistividades de todas las capas que componen el terreno.

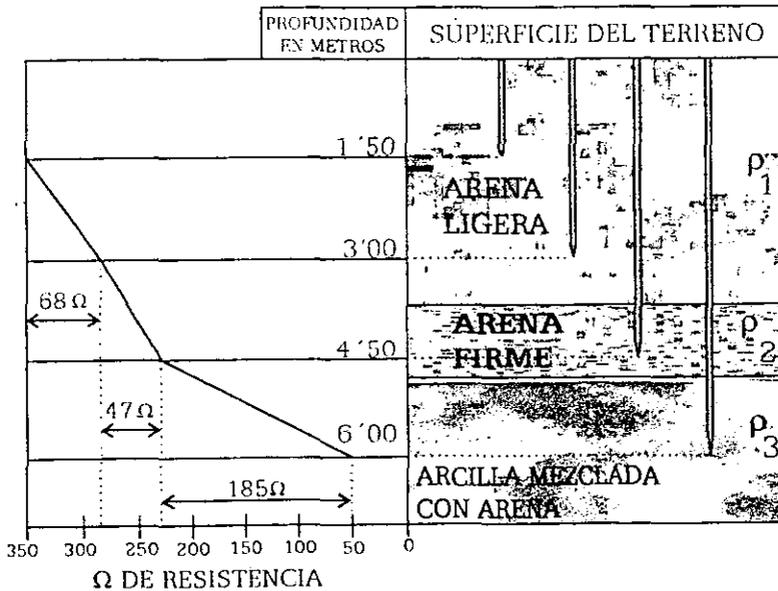
Si el área a trabajar y el terreno lo permiten, se debe aconsejar la instalación de electrodos en profundidad. Si el terreno es malo o el número de picas por instalar es grande o lo accidentado del terreno no lo permite, se colocarán en paralelo pero sabiendo el riesgo que propone esta decisión.

Queda, pues, justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y de la sequedad (que la aumenta) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

prolongadas. Será, por tanto, prudente tener en cuenta estas variaciones de resistividad en el establecimiento de una red de tierras enterrada a una profundidad del orden de 1 m.

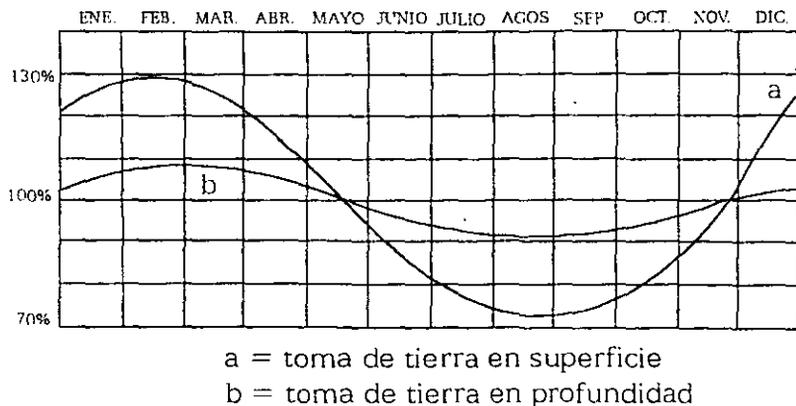
GRÁFICA 4. VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN FUNCIÓN DE LA ESTRATIGRAFÍA.



2.2.6 VARIACIONES ESTACIONALES.

En épocas de lluvias el nivel freático se aproxima a la superficie del terreno, presentando éste una resistividad menor que en el periodo de sequía, en el que el nivel freático se aleja de la superficie. A lo largo del año se presentan variaciones estacionales que nos causaran más variaciones en el sistema cuanto más próximo a la superficie del terreno se encuentra el electrodo.

GRÁFICA 5. VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD
EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES
ESTACIONARIAS



En la gráfica 5 se puede observar que en verano la resistividad es mayor que en invierno y que los electrodos enterrados a más profundidad tienen una variación estacional inferior a la de los electrodos enterrados superficialmente.

Es recomendable realizar las mediciones de chequeo en las épocas más desfavorables para el terreno, también, como ya se había expuesto, se recomienda enterrar los electrodos lo más profundamente que se pueda, o debajo de las cimentaciones de los edificios, de esta forma se obtendrá más seguridad para mantener estable el valor de la resistividad.

2.2.7 COMPACTACIÓN.

Para lograr una resistividad menor, se necesita de una compactación grande del terreno. La elección del electrodo, junto con su instalación y profundidad, es lo que determinará, junto con la resistividad del terreno, la puesta a tierra.

Este elemento influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de ésta supere al de la arcilla.

Es aconsejable la compactación del área, debido a que, una vez perforado el suelo, con las máquinas correspondientes, éste tiende a esparcirse y dejar una separación entre el electrodo y la tierra. Tal vez este tipo de situación parezcan vanas, pero significan muchos ohms de más a lo largo de nuestro diseño.

2.2.8 FACTORES DE NATURALEZA ELÉCTRICA.

Hay varios factores de naturaleza eléctrica que pueden modificar la resistividad de un terreno. Los factores que más influyen en el terreno, modificando su resistividad, son:

- El gradiente de potencial, y
- La magnitud de la corriente de defecto a tierra.

Cuando el contacto entre un electrodo y el terreno es mediano, pueden establecerse, en condiciones de circulación de corriente de defecto y a partir de un cierto valor, pequeñas descargas que, traspasando las delgadas capas aislantes que separen los dos medios, contribuyan a igualar los potenciales de ambos.

La resistencia del sistema de puesta a tierra arrojaría, en estas condiciones, valores inferiores a los que se hubieran obtenido cuando no se producía el fenómeno, acusándose principalmente esta reducción en instalaciones de puesta a tierra de pequeñas dimensiones.

Para magnitudes de la corriente de puesta a tierra que hay que tomar en cuenta por su importancia, esta el gradiente de potencial, que puede llegar, en las proximidades inmediatas de los electrodos, a alcanzar valores que provoquen la perforación del terreno.

Este fenómeno da lugar a la formación de uno o varios arcos que, a partir de puntos del electrodo, se propaguen a través del suelo en diversas direcciones y con eventuales ramificaciones, hasta que se deje de verificar la superación del nivel de tensión crítico (algunos kV/cm)

Prescindiendo de la caída de tensión en los arcos, la traducción de este efecto, que solo será apreciable en el caso de electrodos de pequeñas dimensiones, es prolongar, de alguna manera, las dimensiones de los mismos, que se comportarán como si fueran de mayor tamaño o bien se hubiera reducido la resistividad del terreno.

Sin embargo, no se debe olvidar que por diseño, debe evitarse el establecimiento de tales cargas, porque deterioran rápidamente los electrodos.

Tampoco, desde el punto de vista de las descargas atmosféricas, es posible beneficiarse de lo anterior porque la velocidad de propagación de los arcos en el suelo es muy lenta para ser tenida en cuenta durante la breve duración del abrupto frente de la descarga del rayo.

El calentamiento del suelo tiende a aumentar su conductividad mientras no vaya acompañado de evaporación. La resistividad de una capa de terreno puede disminuir en una relación de 2 a 1 para temperaturas entre algunos grados y 20 a 25°C, y en una relación del mismo orden entre 20 y 80°C.

La cantidad de calor que se genera en un electrodo puede considerarse que se divide en dos partes: la acumulación en el

volumen de terreno en contacto directo con el mismo, (terreno que presenta un calor específico medio, γ , de $175.10 \text{ ws/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$) y otra parte que la absorben las capas circundantes más frías, circulando a través del terreno (que tiene una conductividad calorífica del orden de $12 \text{ Wm}^\circ\text{C}$)

El efecto inicial de una circulación prolongada de corriente por una toma de tierra es disminuir su resistencia, con una importancia que depende de la contribución al valor total de la misma de las capas del terreno próximas, pero que no es apreciable más que para las tomas de tierra de dimensiones pequeñas.

Sin embargo, las corrientes que se presentan normalmente en las instalaciones de puesta a tierra son de corta duración, aunque a veces sean de gran magnitud, así que la influencia de la conductividad calorífica del terreno es, prácticamente, despreciable y sólo el calor específico determina la energía que puede disiparse en una toma de tierra, siendo la elevación de temperatura proporcional al tiempo.

La temperatura es máxima en la proximidad inmediata del electrodo, convirtiéndose las condiciones en críticas cuando se acerca a 100°C , al provocarse la evaporización rápida del agua atascada y dejar el electrodo en contacto con una capa deshidratada muy resistente e, incluso llegar a producir la calcinación del terreno

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

a su alrededor. La toma de tierra pierde entonces su poder de evacuación y tiende a subir su potencial hasta la tensión simple de la red, situación evidentemente peligrosa.

En resumen se puede decir que se debe tener presente el deterioro significativo de los electrodos o del conjunto de puesta a tierra en el caso de cortocircuitos francos, o la caída de un rayo que se canalice a través de la puesta a tierra.

Es reglamentaria la comprobación de la red de tierra de la instalación ya que puede llegar a deteriorarse o a fundirse si la intensidad es muy elevada (cientos o miles de amperios)

Capítulo III

Electrodos.

3.1 DEFINICIÓN.

Se define como *Electrodo de puesta a tierra*, todo material conductor, generalmente metálico, en perfecto contacto con el terreno, destinado a que las corrientes de falla o de origen atmosférico sean canalizadas en su conducto, hacia el sistema de protección (tierra)

Los electrodos de puesta a tierra estarán formados por materiales metálicos en forma de varillas, cables, chapas, perfiles, que presenten una resistencia elevada a la corrosión por sí mismo, o mediante una protección adicional, tales como el cobre o el acero debidamente protegido, en cuyo caso se tendrá especial cuidado de no dañar el recubrimiento de protección durante el clavado.

El objetivo principal del electrodo, es que el potencial de la red de tierra, respecto de tierra sea 0 V, o lo más próximo a éste valor. Las conducciones de gas, depósitos en general, de GLP's, gasóleo, agua, etcétera, no pueden ser utilizadas como electrodo. La realización del proyecto de una instalación de puesta a tierra exige que pueda establecerse el comportamiento de los distintos tipos de electrodos que se puedan adoptar para la realización de la misma.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Para los tipos más normales de electrodos (al menos, los de geometría más sencilla) existen expresiones que pueden utilizarse para la determinación de los valores de resistencia obtenidas con ellos así como los potenciales y gradientes correspondientes, permitiendo esto verificar la bondad del diseño preliminar del sistema de puesta a tierra elegido.

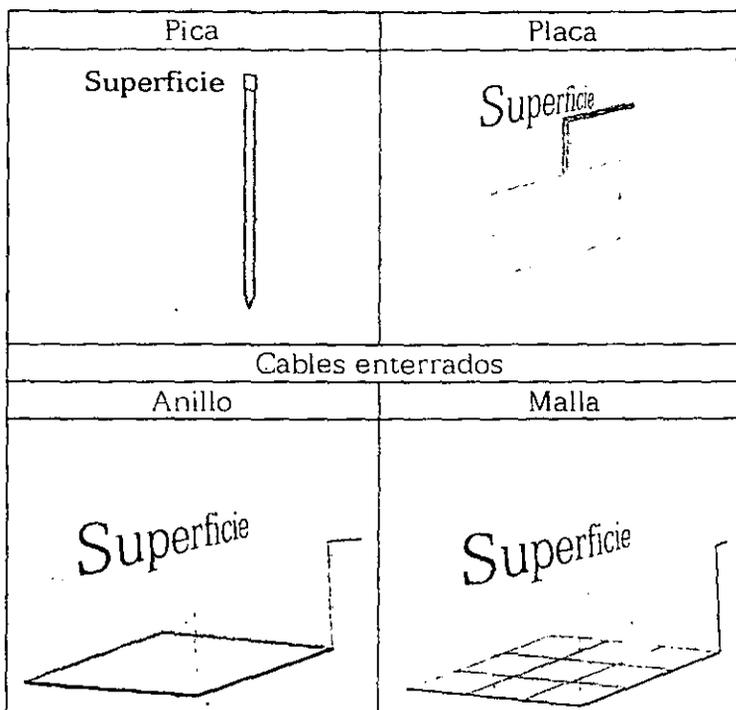
Las corrientes, tanto continuas como alternas, no producen daños por corrosión, y sólo pueden verse afectadas en las proximidades de ferrocarriles, tranvías etcétera, siendo la solución más empleada contra este fenómeno la protección catódica. Los agentes químicos, junto con la humedad, pueden corroer rápidamente los electrodos, si estos no están protegidos convenientemente.

3.2 TIPOS.

Según las características del terreno (mayor o menor posibilidad de hundir profundamente los cuerpos metálicos puestos en íntimo contacto con el mismo) se dispone de los siguientes tipos de electrodos:

- Picas,
- Placas, y
- Cables enterrados.

FIGURA 3. TIPOS DE ELECTRODOS



En algunos casos se combinan entre sí los tipos arriba indicados, por ejemplo: electrodo en anillo o malla complementado con electrodos en pica.

Conocida el área de desarrollo para el sistema de tierra, por ejemplo una planta de instalación eléctrica y la disposición de sus elementos, el diseño preliminar del sistema de puesta a tierra se realiza considerando, como base de partida, el hecho de que debe de estar adaptado a las características topológicas de la instalación y estructurado de tal forma que, con la red mínima necesaria, se

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

permita la conexión más racional de todos los elementos que lo precisen, aunque, obviamente, puede extenderse, a juicio del proyectista, para mejorar su eficacia.

La elección de un tipo de electrodo de tierra viene impuesta, comúnmente, por las condiciones eléctricas a satisfacer y por consideraciones técnicas y económicas, en que la naturaleza del terreno juega un papel importante.

En instalaciones que se refieren a centros de transformación (AT / BT), con corrientes de puesta a tierra relativamente moderadas, pueden emplearse los electrodos de tierra de geometría simple.

Para controlar las tensiones de paso en el exterior del recinto, si las condiciones del entorno lo permiten, puede convenir, en alguna ocasión, extender el electrodo de puesta a tierra fuera de la instalación o aumentar, artificialmente, la resistividad del terreno, mediante aceras o caminos perimetrales.

También, en esos casos, si el solar disponible es superior a las necesidades de la instalación, se pueden separar la red de tierras del perímetro exterior.

En instalaciones clasificadas en esa categoría, podrá recurrirse a la utilización de placas en el caso de terrenos de escasa consistencia,

en los que el trabajo de excavación de una fosa no resulte muy costoso y donde sea suficiente una toma de tierra de pequeñas dimensiones con resistencia relativamente elevada, por ejemplo la conexión del neutro de baja tensión de los transformadores.

El ejemplo de picas verticales, sobre todo si se dispone de medios mecánicos para clavarlas, conduce a soluciones más económicas, pudiendo situar varias de ellas en paralelo si fuera necesario, aunque en ese caso, para lograr la máxima eficiencia, deberán disponerse de forma que la distancia que guarden entre sí sea, al menos, igual a la longitud enterrada de las mismas. También es posible alcanzar mayores profundidades, empalmando una a continuación de la otra, con lo cual se logra tener contacto con zonas más conductoras de terreno, a comparación con la superficie, la cuál pudiera ser mucho más resistiva.

El uso de conductores en zanjas horizontales resulta particularmente económico cuando tales zanjas se abren para otros fines, por ejemplo, para establecer las fundaciones de la instalación. Por otra parte, este sistema es el más indicado para casos de subsuelos de naturaleza dura, recubiertos de un escaso espesor de terreno blando.

Un bucle enterrado, circundando el perímetro del terreno disponible es la solución que proporciona la resistencia más baja a igualdad de

longitud enterrada de conductor. Combinado o no con picas verticales, constituye la solución adoptada por las compañías eléctricas para resolver las puestas a tierra de sus centros de transformación.

Por último, las tomas de tierra en disposición radial son adecuadas para la puesta a tierra de estructuras de pequeñas dimensiones, cuando no son suficientes los conductores sencillos para obtener la resistencia deseada.

En el caso de instalaciones eléctricas, como son las centrales y subestaciones de gran extensión, la configuración más lógica para los electrodos de puesta a tierra son las redes en malla de conductores enterrados, pues constituyen el resultado natural que se obtiene cuando deben conectarse a tierra un número importante de aparatos diversos, así como carpinterías y otros soportes metálicos existentes.

3.3 TIPO PICA.

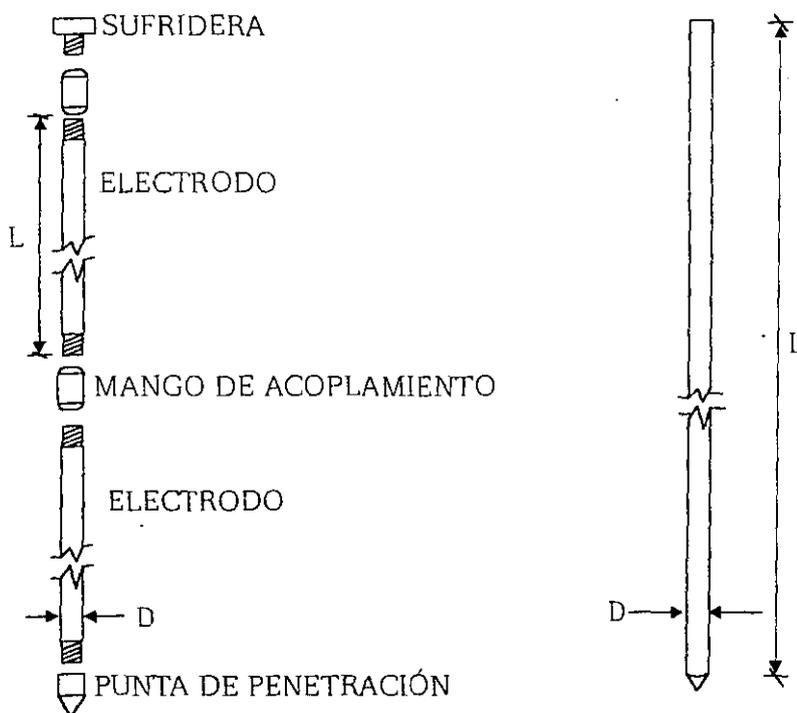
Son electrodos cilíndricos que se introducen en el terreno, comúnmente, de forma vertical, son generalmente fabricados de:

- Acero galvanizado de 25 mm de diámetro exterior mínimo,

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

- Perfiles de acero galvanizado, de 60 mm de lado como mínimo,
- Barras de cobre o acero recubierto de cobre, de 14 mm de diámetro como mínimo.

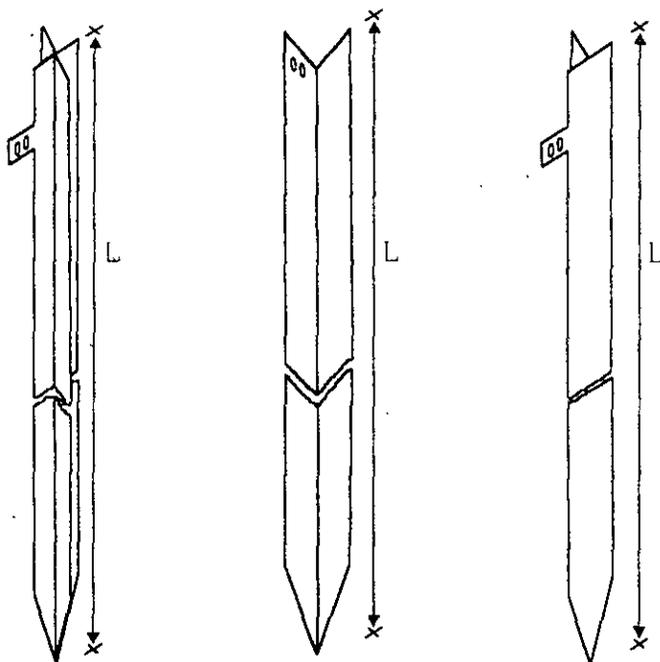
FIGURA 4. PARTES DE UN ELECTRODO DE PICA



Diámetros (D): 9 - 12 - 15 - 18 - 24 , [mm]	
Longitudes (L) comerciales aproximadas [m]: 1.5 - 2 - 2.5 - 3	Longitudes (L) comerciales aproximadas [m]: 1.5 - 2 - 2.5

Como regla se debe saber que la longitud de las picas no debe ser inferior a 2m.

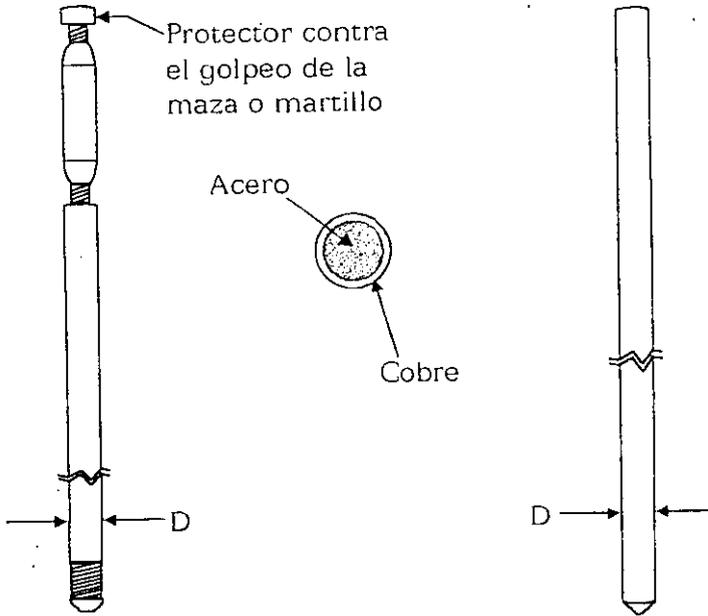
FIGURA 5. PERFILES DE ACERO GALVANIZADO EN BAÑO CALIENTE



Las longitudes comerciales que se pueden encontrar para estos electrodos son:
1m, 1.5 m, 2m, 3m y 4m.

La norma tecnológica de la edificación recomienda que las picas sean de alma de acero recubiertas de cobre electrolítico (unión molecular de cobre y acero), de 14 mm de diámetro y con un espesor de cobre de al menos 2 mm. Así, al clavar la pica, no se pelará y garantizará la unión eléctrica entre ésta y el terreno.

FIGURA 6. PICAS CILÍNDRICAS DE ACERO COBREADO



DIÁMETROS (D): 9, 12, 15 18, 24 [mm]	
Espiga con extremos roscados	Espiga simple
Longitudes aproximadas que se encuentran en el mercado [m]	
1.5 - 2 - 2.5	1.5 - 2 - 2.5 - 3

En lo que se refiere a la norma española RAT, encontramos en su apartado 3.4, acerca de las dimensiones mínimas de los electrodos de picas que: "a) Las dimensiones de las picas se ajustarán a las especificaciones siguientes":

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

- ❑ Los redondos de cobre o acero recubierto de cobre, no serán de un diámetro inferior a 14 mm. Los de acero sin recubrimiento no tendrán diámetro inferior a 20 mm.
- ❑ Los tubos no serán de un diámetro inferior a 14 mm. Los de acero sin recubrir no tendrán diámetro inferior a 20 mm.
- ❑ Los tubos no serán de un diámetro inferior a 30 mm ni de un espesor de pared inferior a 3 mm.

Una vez obtenida la resistividad del sistema (capítulo 4) se puede calcular, de una manera rápida y muy precisa, la resistencia a tierra de un electrodo, que se escribe como sigue:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{\varnothing}$$

donde:

R = resistencia del electrodo[Ω]

l = longitud del electrodo [m]

∅ = diámetro del electrodo [m]

ρ = resistividad del terreno [Ω m]

3.3.1 PICAS EN PROFUNDIDAD.

Consiste en la introducción de picas en el terreno, es decir, una encima de la otra, previamente empalmadas, hasta conseguir una

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

profundidad de 6, 8, 10 o 12 metros de profundidad. Las picas serán de acero recubiertas de cobre, de 14 ó 16 mm de diámetro, y de 200 cm de longitud, con lo que la longitud dependerá del número de picas que empalmemos.

A partir de la segunda pica, generalmente, es necesaria la utilización de maquinaria especial para la introducción de estas, como martillo neumático, sistema hidráulico, martillo sobre caballete de apoyo, etcétera. Se puede obtener la resistencia del terreno, aplicando la siguiente ecuación a este arreglo de picas:

$$R = 0.366 \left(\frac{\rho}{h} \right) \log \left(\frac{3h}{d} \right)$$

donde:

R = resistencia de puesta a tierra de la pica [Ω]

ρ = resistividad del terreno [Ω m]

h = profundidad [m]

d = diámetro de la pica de tierra [m]

3.3.2 PICAS EN PARALELO.

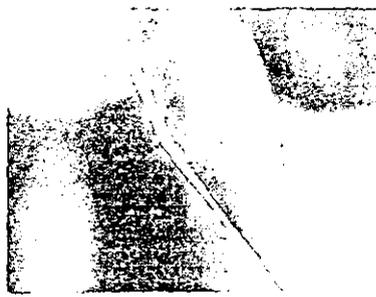
Por su fácil colocación y bajo costo, además de que no requiere de maquinaria especial, este tipo de picas es muy común en sistemas de puesta a tierra de edificios y viviendas.

Una vez introducida la primera pica en el terreno se mide su resistencia de puesta a tierra con el telurómetro o megohómetro, el cual nos dará una idea de la magnitud del valor de resistencia que se tiene. Basándose en este valor se puede calcular el número de picas aproximado que hay que colocar para obtener el valor prefijado.

ELECTRODOS.



PUNTA DE PENETRACIÓN.

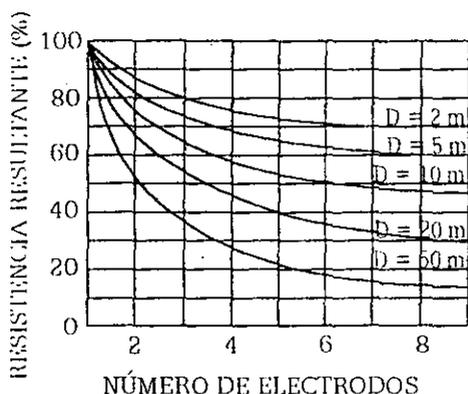


Las picas deben tener una separación, como mínimo, de 1.5 veces la longitud de la pica enterrada, y después, unirlas eléctricamente con cable de cobre desnudo de 35 mm^2 como mínimo, que se enterrará en el terreno.

Se ha comprobado que no es posible obtener valores bajos de resistencia de tierra sólo con aumentar el número de picas y sin tener en cuenta sus respectivas áreas de influencia. Para ilustrar mejor este punto, suponemos la instalación de picas en paralelo de 2 m de longitud las cuales serán variadas en distancia, unas de

otras, y en un porcentaje se hace notar la variación que se obtendría al aplicar estas distancias.

GRÁFICA 6. PORCENTAJE DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE TIERRA RESULTANTE CON RELACIÓN AL NÚMERO DE ELECTRODOS Y A LA SEPARACIÓN ENTRE ELLOS.



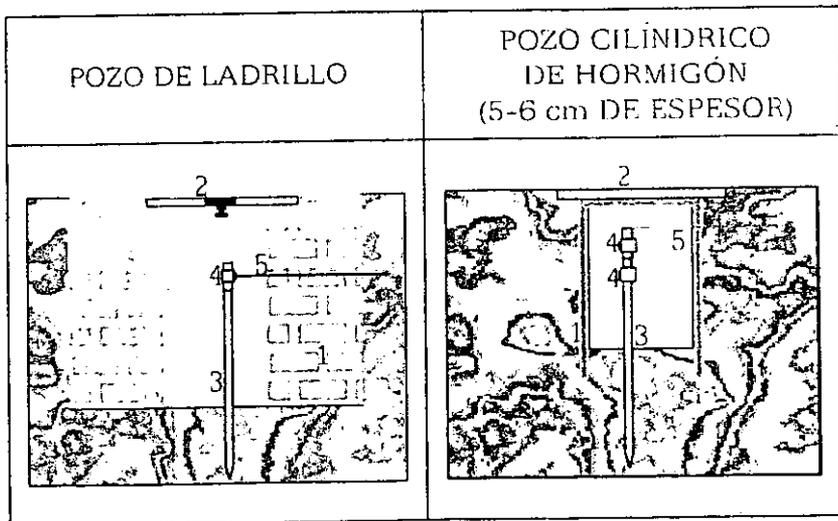
La instrucción NTE-IEP / 1973 del MOPU separa las picas de 2 m de longitud a 4 m, es decir, 2 veces la longitud enterrada, y uniendo las picas con cable de cobre desnudo y enterrándolo, de forma que se convierta esta unión en un electrodo adicional, obteniéndose con éste sistema los siguientes resultados:

- 1 pica de tierra de 2 m de longitud tiene una resistencia: R ,
- 2 picas de tierra de 2 m de longitud tienen una resistencia: $R/2$
- 3 picas de tierra de 2 m de longitud tienen una resistencia: $R/3$
- 4 picas de tierra de 2 m de longitud tienen una resistencia: $R/4$
- Etcétera.

3.4 POZO DE INSPECCIÓN.

Es útil el empleo de pozos cuando se requiere tener acceso al electrodo para efectuar controles y mediciones, así como también para llevar a cabo los posibles mantenimientos que se requieran. Ello es particularmente válido para las instalaciones de puesta a tierra que entran en el ámbito de las disposiciones legales para la prevención de los accidentes laborales. La figura 7 nos muestra dos tipos comunes de pozos, así como el material que los conforman:

FIGURA 7. POZOS DE INSPECCIÓN



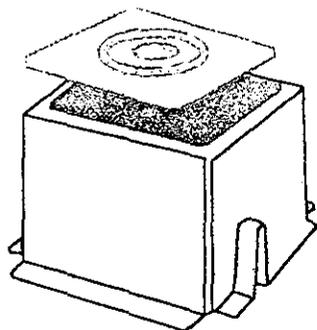
1. Pozo
2. Tapa de hormigón o hierro (evítese este último material siempre que sea posible)

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

3. Electrodo en forma de pica o tubular. Puede ser igualmente la derivación de un electrodo en malla.
4. Bornes.
5. Cables de cobre o de acero galvanizado.

Existen en el mercado diversos tipos de pozos prefabricados (de aleación ferrosa o de material aislante). El siguiente, es un ejemplo de pozo hecho de fundición de acero o hierro colado con revestimiento aislante de material plástico polivinílico. En la tapa aparece la leyenda: "Toma de tierra, Peligro" o la contraseña de tierra.

FIGURA 8. POZO DE INSPECCIÓN
COMERCIAL.



Dimensiones:
250 x 250 x 200 mm.

Cuando la puesta a tierra de una instalación se realiza con picas, es necesario realizar pozos de inspección que permitan la conexión de la línea de enlace con tierra de la instalación con la pica, y su posterior mantenimiento y conservación (añadir sales, agua,

comprobar la bondad de las conexiones, la medida de la resistencia de puesta a tierra, etcétera)

Como ya se sabe, el pozo de inspección es un hoyo donde se encuentra el electrodo de pica (unos 50 cm por debajo de la superficie del terreno), donde se conecta la línea de enlace con tierra (que estará aislada) y que sirve como aislamiento en la zona próxima al punto de contacto del electrodo con el terreno. Si la sufridera del electrodo no se encuentra a 50 cm de la superficie del terreno, si no próxima a la superficie, deberá realizarse un recubrimiento artificial por medio de un tubo aislante de gran resistencia mecánica para evitar potenciales peligrosos.

En el caso de que se prevean en la superficie próxima al electrodo gradientes de potencial peligrosos, se pondrá alrededor de la tapa una protección aislante, que solo se pueda quitar intencionalmente. Los pasos que hay que seguir para la buena realización de un pozo de inspección son:

- Hacer un hoyo de las dimensiones necesarias,
- Revestir las paredes con ladrillos enfoscados hasta unos 30 cm del suelo,
- Colocar un tubo de gres, fibrocemento o PVC, para el conductor de enlace con tierra y el electrodo,

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

- ❑ Con la ayuda de un molde de madera, revestir la parte superior de las paredes del pozo con cemento y colocar, si es posible, unos ángulos metálicos en el borde que consoliden el borde superior,
- ❑ Aislar el borde superior y la solera para poder ajustar la tapa,
- ❑ Colocar la tapa de cemento reforzado o armado, de forma que apoye bien y quede horizontal sin fisuras laterales. La tapa debe tener un sistema de asidero que permita retirarla sin que se deteriore,
- ❑ Colocar la protección aislante alrededor de la tapa, en caso necesario.
- ❑ Conectar la línea de enlace con tierra con el electrodo, y
- ❑ Humedecer el interior del pozo de inspección y tapar.

3.5 PLACA.

Son electrodos en forma rectangular o cuadrada, debido a su espesor, la superficie de contacto con el terreno es grande.

Comúnmente elaboradas de cobre, o de acero recubiertas de cobre, de al menos 2 mm de espesor, o de acero galvanizado, de 2.5 mm de espesor. Las placas que son de acero únicamente serán de un espesor mínimo de 3 mm. En el caso de suelos en los cuales la corrosión es elevada, los valores anteriores deberán ser aumentados.

La resistencia R en ohmios de una toma de tierra constituida por una placa enterrada a una profundidad suficiente es aproximadamente igual a:

$$R = 0.8 \left(\frac{\rho}{P} \right)$$

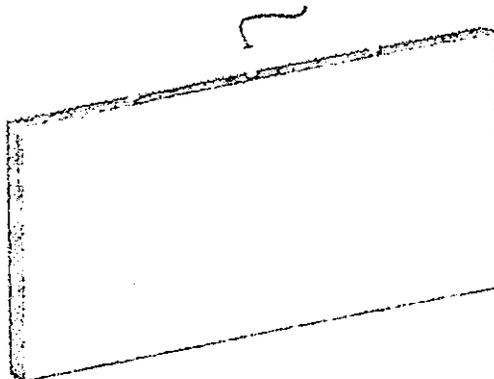
donde:

ρ = resistividad del terreno [Ω m]

P = perímetro de la placa [m]

Las placas más utilizadas son las de 0.5m * 1m y las de 1m * 1m. Para columnas de alumbrado, se pueden utilizar placas de 0.5m * 0.5m que tienen una superficie útil de 0.25 m².

FIGURA 9. ELECTRODO DE PLACA



Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

La instalación de un electrodo de placa es más laboriosa y más cara que la instalación de una pica, y requiere para su buena conservación, una escrupulosa colocación en el terreno.

En primer lugar se practicará en el terreno un hoyo de dimensiones suficientes, que como mínimo debe tener medio metro de ancho por un metro de largo y una profundidad tal que, una vez colocada la placa en forma vertical, su parte superior quede como mínimo a 50 cm por debajo de la superficie del terreno.

Se coloca la placa verticalmente y se rellena con tierra buena, arcillosa y grasa, y no con tierra de escombros o con piedras, hasta cubrirla por completo. Regar con agua, compactar la tierra y rellenar el hoyo.

Construir el pozo de inspección de forma similar al construido para los electrodos de pica, colocando el tubo aislante de gres o fibrocemento desde la placa hasta el ras de la superficie y colocar en su interior y conectar a la placa la línea de enlace con tierra. Volver a regar y tapar el pozo de inspección. La conexión de la placa a la línea de enlace con tierra se realizará con soldadura aluminotérmica (Apéndice A), si es posible, a lo ancho de la placa como se ve en la figura 9.

3.6 CABLES ENTERRADOS.

Este electrodo consiste en colocar horizontalmente un cable, pletina, unos flejes, etcétera, desnudos en zanjas, enterrados a suficiente profundidad. Los materiales más utilizados son:

- Cable de cobre macizo o cableado de 35 mm^2 de sección, como mínimo.
- Pletinas de cobre de 35 mm^2 de sección y de 2 mm de espesor, o de acero galvanizado, de 95 mm^2 de sección,
- Alambre de acero de 200 mm^2 de sección, recubierto con una capa de 6 mm^2 de cobre.

Tenemos dos procedimientos para la aplicación del cable enterrado, el primero, es la colocación de cable rectilíneo enterrado en una zanja de al menos 60 cm de profundidad (preferible de 80 cm en climas continentales, para evitar que se dispare la resistividad del terreno por debajo de los 0° centígrados).

El segundo, es en forma de bucle, es decir, unido el principio con el final. Es muy recomendable que se coloque en forma circular, se puede colocar en zanjas paralelas o en forma de elipse. La única precaución que se debe tomar, es que la distancia mínima entre ejes (entre las zanjas) sea de 5 m para evitar interferencias, finalmente se pueden unir el principio con el final del cable. Se

aconseja utilizar como electrodos de tierra los materiales indicados en la tabla 2. Se da una pequeña descripción del tipo de material del que se trata, así como de las dimensiones con las cuales se lograría conseguir un sistema lo suficientemente confiable y de una alta seguridad.

TABLA 2. ELECTRODOS TIPO CABLE.

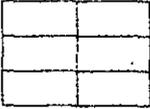
Electrodo		Acero galvanizado	Cobre	Acero cobreado
Alambre		Ø10 (78) Ø12 (113)	Ø7.5 (45) Ø9 (63) Ø10 (78)	Ø8.42 (55) Ø11.24 (99)
Cable		Ø7.5=7 X 2.52 (35) Ø10.5=19 X 2.10 (66)	Ø7.5=7 X 2.52 (35) Ø10.5=19 X 2.10 (66)	Ø8=7 X 2.58 (36) Ø10=19 X 2.05 (63) Ø13=19 X 2.58 (100)
Pletina		Ø40 X 3 ÷ 4 (120-160)	Ø40X3 ÷ 4 (120-160) 50X4 (200)	
Picas	Tubo	Ø48 X 5 Ø60.8 X 5.9		
	Varillas	L 50 X 50 X 5 T 50 X 50 X 6		
	Perfil redondo			Ø9 ÷ 25

Las dimensiones están expresadas en milímetros, los números entre paréntesis indican las secciones de los conductores, expresadas en milímetros cuadrados. Para los cables, además del diámetro circunscrito, se indica también la composición, o sea, el número de

hilos y su correspondiente diámetro, por ejemplo: (7 · X 2.52 = 7hilos de 2.52 mm de diámetro)

La resistencia de tierra en ohmios que ofrece el conductor enterrado como electrodo, es directamente proporcional a la resistividad del terreno e inversamente proporcional a la longitud, en metros del cable enterrado. Se puede efectuar una evaluación más rápida de la resistencia de tierra, con la ayuda de las siguientes ecuaciones:

TABLA 3. ECUACIONES PARA CALCULAR LA RESISTENCIA DE CABLES ENTERRADOS

Anillo	Malla	Cable rectilíneo
		
P = perímetro. [m]	L = suma de todos los lados que componen la malla. [m]	L = longitud. [m]
$R = \frac{2\rho}{P}$	$R = \frac{\rho}{L}$	$R = \frac{2\rho}{L}$

Si bien, pueden utilizarse barras, cables o conductores masivos, a igual sección, es preferible un conductor masivo a un cable, pues los hilos que lo constituyen siempre se destruyen más rápidamente que

un conductor de alma llena, razón por la que no se considera el empleo de trenzas flexibles.

Aunque un conductor tiene menor efectividad como electrodo cuando se producen cruces con otros, éstos son necesarios para prever varios caminos de paso de la corriente de puesta a tierra, evitando caídas de potencial excesivamente altas en el electrodo y asegurando la continuidad del mismo, aún en el caso de una rotura fortuita de alguno de los cables. Con el fin de asegurar la suficiencia mecánica, una malla típica se puede componer de cable de cobre, desnudo, de 95 mm^2 de sección (recuérdese que 50 mm^2 es el mínimo, para el cobre), enterrado a una profundidad comprendida entre conductores de 2 a 6 m, pero que, por razones prácticas conviene que coincida con la que fijan las alineaciones de las estructuras y demás equipamiento, para facilitar las conexiones de puesta a tierra.

Para reducir las tensiones de contacto puede referirse utilizar conductores de menor diámetro (si la densidad de corriente lo permite) en una malla más tupida, siendo lo importante lograr un equilibrio entre la seguridad y el coste de la instalación y del material.

Una tabla de valores prácticos de la ampacidad momentánea (o intensidad admisible de corta duración), en función de la duración

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

del paso de la corriente, se enuncia a continuación, para facilitar un dimensionado rápido.

TABLA 4. AMAPACIDAD MOMENTÁNEA DE CABLES DE COBRE.

Sección del conductor [mm ²]	Corriente admisible [kA], en función del tiempo de circulación de la corriente [seg], sin superar los 200°C.				
	1"	2"	5"	10"	15"
16	2.65	1.86	1.18	0.84	0.68
25	3.68	2.60	1.65	1.16	0.95
35	5.80	4.07	2.57	1.83	1.50
50	8.25	5.80	3.68	2.60	2.12
70	11.50	8.10	5.20	3.63	2.95
95	14	9.35	6.25	4.40	3.60
120	19.70	13	8.80	6.25	5.05
185	25.60	17.40	11	7.90	6.35
200	30.50	21.60	13.60	9.70	7.85
240	39.50	28	17.60	12.70	10.20
300	49.50	35	22.20	15.70	12.80
360	65.75	46.40	29.40	20.80	17

3.7 ELECTRODOS NATURALES.

Existen otros elementos que pueden contribuir eficazmente a la dispersión de las corrientes de defecto (hierro de los pedestales, tuberías metálicas, etcétera)

Hay que tomar en cuenta que estos elementos no sustituyen, en absoluto, a la red de tierra (los electrodos en pica, anillo, rectilíneo, etcétera, y las correspondientes conexiones entre ellos).

Estos elementos definidos como electrodos naturales, tienen dos funciones: la primera es, permitir un aumento de la superficie de contacto con la tierra y, la segunda es, reducir la resistencia total de tierra.

Otros elementos que funcionan como electrodos naturales, pueden ser las vigas metálicas introducidas en el terreno y con un total contacto con él, y se puede llegar a valorar la resistencia de puesta a tierra de este tipo de electrodo, considerando que es una pica de tipo circular y de diámetro el del círculo inscrito a la viga.

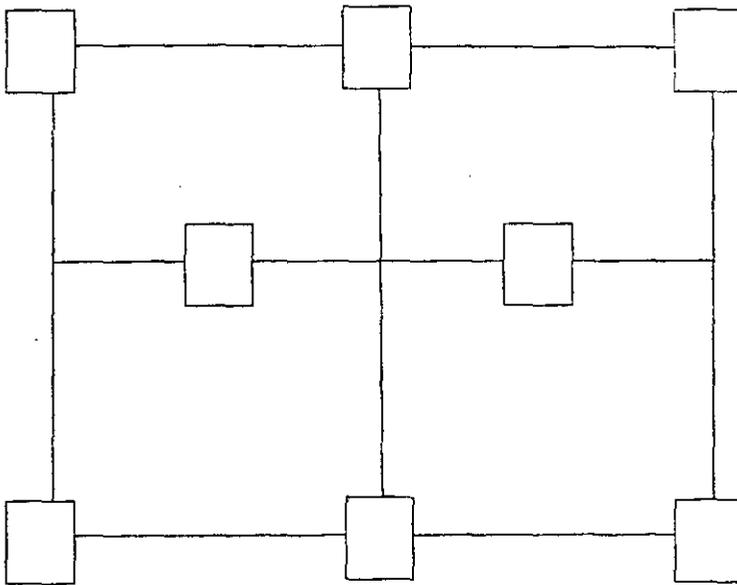
En terrenos normales la resistencia de puesta a tierra de una viga de este tipo oscila entre 50 y 150 ohmios, que en un simple análisis puede parecer un valor demasiado elevado.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

En edificios de cimentación de cemento, la armadura de cemento puede reemplazar al electrodo de puesta a tierra de pica de acero.

Para una mayor eficacia, se recomienda soldar entre sí los redondos de las armaduras para obtener una red equipotencial, como se puede apreciar a continuación (figura 10)

FIGURA 10. MALLA DE TIERRA UTILIZANDO LOS REDONDOS METÁLICOS DE LAS ARMADURAS DE HORMIGÓN.



Se deberá realizar con cable desnudo de 35 mm^2 y los empalmes y uniones con soldadura aluminotérmica.

La resistencia de puesta a tierra con esta cimentación de cemento armado como electrodo de tierra, viene dada por la siguiente expresión:

$$R = 0.2 \left(\frac{\rho}{V} \right)$$

donde:

ρ = resistividad del terreno [Ω m]

V = volumen de la cimentación de cemento enterrada [m^3]

Los pilares de un edificio enterrado a cierta profundidad, ya sean metálicos o de cemento armado, se pueden considerar como electrodos adecuados de puesta a tierra.

Se deberán unir entre sí estos pilares por medio de conductores enterrados horizontalmente, que es lo que constituye la malla de toma de tierra. La soldadura de los conductores horizontales a los pilares, se efectuará a una profundidad como mínimo de 0.50 m por debajo de la superficie del terreno.

Los conductores enterrados horizontalmente que forman los lados de la malla deben tener una sección mínima de 35 mm^2 . La puesta a tierra por el sistema de malla tiene la ventaja de poder ser utilizada desde el principio de la construcción de los edificios, para poner a tierra la maquinaria auxiliar de la construcción, como hormigoneras, grúas, etcétera.

En las instalaciones receptoras funcionando a tensión nominal inferior a 1000 voltios se admite el empleo de la canalización del agua como electrodo de tierra, siempre y cuando las tuberías tengan una considerable extensión, sean metálicas y estén profundamente enterradas. En cualquier caso, será necesario solicitar autorización a la sociedad explotadora de la canalización.

Conviene no olvidar, sin embargo, que se va extendiendo el uso de tubos de material aislante, en cuyo caso la eficacia de la conducción del agua, como electrodo, es nula.

La conexión eléctrica del conductor de tierra al emplear la canalización del agua como electrodo, se realiza antes del contador general del agua. La entrada y salida de éste pueden, asimismo, cortocircuitarse con un puente realizado con cable o pletina de cobre o de acero galvanizado cuya sección corresponda a lo especificado en la tabla 2, fijándolos al tubo con abrazaderas adecuadas.

La capa de protección contra corrosión que eventualmente pueda recubrir el tubo (pintura) deberá eliminarse cuidadosamente a fin de obtener un buen contacto entre el conductor de tierra y el tubo metálico. Luego, se aplicará de nuevo la capa protectora contra la corrosión, por encima del conexionado.

La red de distribución de agua (caliente o fría) que se extiende después del contador –por lo tanto perteneciente a la propiedad común o a la sociedad constructora- deberá conectarse equipotencialmente a la instalación de tierra.

Prescindiendo del empleo de la conducción del agua como electrodo, la conexión entre ésta y la instalación de tierra de las redes de tuberías metálicas destinadas al aporte, distribución y descarga del agua en el interior de un edificio, adquiere una importancia particular a los efectos de equipotencialidad de las masas.

Recuérdese también que los empalmes entre distintas tuberías no garantizan una perfecta conexión eléctrica y por lo tanto será conveniente cortocircuitarlos mediante puentes.

Capítulo IV.

Medición de la resistividad del terreno.

4.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD.

Como primer paso que se debe realizar, para el desarrollo de un sistema de tierra, es la medición de la resistividad del terreno, ya que al conocer éste valor se puede decidir que tipo de material se va a utilizar en la estructuración del sistema. Existen varios métodos para llevar a cabo la medición. De los más importantes y más prácticos, y que se analizará en esta tesis, se tienen:

- Método de Wenner, y
- Sistema métrico.

En cualquiera de estos dos métodos se emplea el material siguiente para hacer la medición de la resistividad:

- Instrumento de medida de resistividades de cuatro botones,
- Cuatro picas para utilizarlas como electrodos, y
- Cuatro cables aislados para conectar las picas a los bornes del aparato de medida, de una sección mínima de 1.5 mm^2 .

Las picas auxiliares pueden ser introducidas 30 cm en el terreno, esta profundidad es suficiente para obtener medidas fiables. Las

picas auxiliares normales que vienen con los equipos de medición suelen tener 50 cm de longitud.

El valor que se obtiene al medir la resistividad de un terreno es una resistividad media o aparente, pero es un valor que es necesario conocer del terreno, y que dependerá de la resistividad de los diferentes estratos y del espesor de cada uno de ellos.

Por otra parte y refiriéndose a este punto, la MIE RAT 13 prescribe, en su punto 4.1, Resistividad del terreno, lo siguiente:

“En el apartado 2 de esta Instrucción se indica la necesidad de investigar las características del terreno, para realizar el proyecto de una instalación de tierra. Sin embargo, en las instalaciones de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior o igual a 16 kA no será imprescindible realizar la citada investigación previa de la resistividad del suelo, bastando el examen visual del terreno, pudiéndose estimar la resistividad por medio de la tabla 1, en la que se dan unos valores orientativos...” (esta tabla fue complementada y se puede localizar en la página 16)

Debe resaltarse que la estimación de la resistividad basándose en la clasificación del suelo y utilización de tablas puede dar lugar a grandes errores que obligarían a las pertinentes correcciones posteriores, por lo que teniendo presente la relativa simplicidad

para establecer la resistividad media por métodos sancionados por la práctica, será aconsejable realizar siempre, incluso en las instalaciones de tercera categoría (en las que se manejan potenciales relativamente bajos) las medidas necesarias para determinar el valor de la resistividad.

4.2 MÉTODO DE WENNER.

Consiste en calcular la resistividad aparente del terreno, y se desarrolla de la siguiente manera:

Se colocan cuatro electrodos a distancias iguales, simétricamente separados de un punto central que ubicaremos como "0", debajo del cual mediremos la resistividad del terreno. Para esta medición no es necesario que la profundidad de las picas, que para esto se utilizan, sobrepase los 30 cm. El espesor de la capa de terreno de la que se está midiendo la resistividad es directamente proporcional a la separación entre picas, y su valor es:

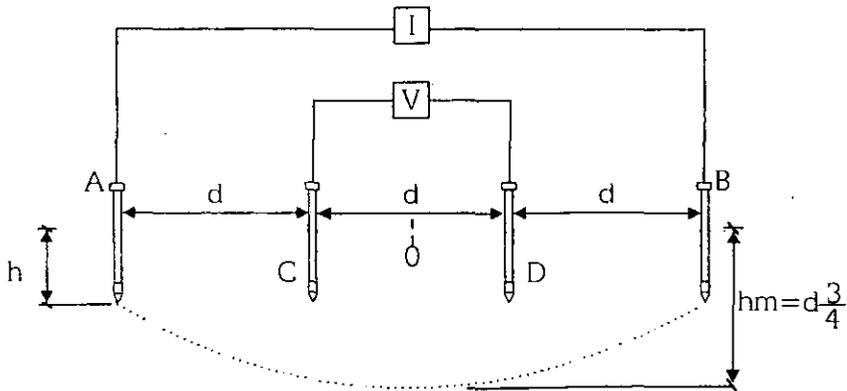
$$h_m = d \left(\frac{3}{4} \right)$$

donde:

h_m = profundidad para la medida de la resistividad media.

d = separación entre electrodos.

FIGURA 11. ESQUEMA DE MONTAJE DEL MÉTODO DE WENNER.



Al introducir una intensidad I en el terreno a través de los electrodos de intensidad A y B, aparecerá en los electrodos de tensión C y D, una diferencia de potencial V que será medida con el aparato respectivo (comúnmente un Megger)

El medidor tiene una resistencia variable en su interior que es la que varía la intensidad I que se introduce en el terreno. El medidor también registra la tensión V que se detecta entre los bornes de tensión.

La relación entre el voltaje y la corriente, será nuestro valor de la resistencia variable que se registre en el medidor. Una vez obtenida la resistencia "R" del Megger, procedemos a sustituir los valores correspondientes en la siguiente ecuación:

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

$$\rho = \frac{4 \pi d R}{1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4h^2}} - \frac{2d}{\sqrt{4d^2 + 4h^2}}}$$

donde:

ρ = resistividad del terreno [Ω m]

R = resistencia [Ω]

d = distancia entre electrodos [m]

h = profundidad de los electrodos [m]

En relación con este método, deben de tenerse presente los siguientes aspectos:

La densidad de la corriente en el suelo decrece regularmente cuando aumenta la profundidad en la vertical de los dos electrodos centrales de medida del potencial ya que la corriente penetra tanto más profundamente en el suelo cuanto más alejados estén los electrodos de inyección.

En la práctica, se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente, la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad de su valor en la superficie, siendo esta profundidad de investigación, h_m , del orden de magnitud de la distancia "d" que separa dos picas adyacentes, en suelo homogéneo.

Cuanta mayor extensión ocupe el electrodo de tierra, mayor será la profundidad del suelo de cuyas características dependen las de la red de tierra. Por otro lado, el reparto de potencial en la superficie es función, principalmente, de la resistividad de las capas de terreno superficial mientras que la resistencia de tierra no depende tanto de ello.

4.3 SISTEMA MÉTRICO.

Este método es utilizado cuando las picas auxiliares no pueden ser clavadas a intervalos regulares, es una variante del método de Wenner. También se utilizan dos picas de intensidad y dos picas de tensión a los bornes correspondientes del aparato de medición. Las picas de tensión serán los electrodos interiores, y los exteriores serán las picas de intensidad. Las cuatro picas serán colocadas simétricamente respecto a un punto "0", que se encuentra situado en el centro de la medición. Esto se puede observar en la figura 12. El valor de la resistividad que se obtendrá con la medición, será el del estrato de terreno que se encuentre debajo del punto "0".

La relación que existe entre la distancia de los electrodos de intensidad y la profundidad o área del terreno a la cual se medirá la resistividad aparente esta dada por:

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

$$h_m = \frac{L}{2}$$

donde,

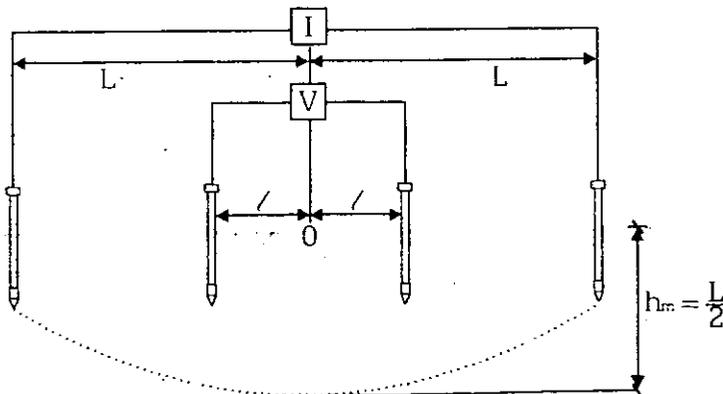
h_m = profundidad media [m]

L = distancia entre electrodos de intensidad [m]

Al igual que en el método de Wenner, se irán separando los electrodos de intensidad, y por lo tanto aumentando la distancia L y así conoceremos el valor de la resistencia a una profundidad h_m mayor.

A continuación se presenta el esquema que representan las posiciones de los electrodos.

FIGURA 12. ESQUEMA DE MONTAJE DEL MÉTODO DE SISTEMA MÉTRICO.



El valor de la resistividad aparente se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho = \left[\frac{\pi(L^2 - l^2)}{2l} \right] R$$

donde,

ρ = resistividad del terreno [Ω m]

L = distancia entre electrodos de intensidad [m]

l = distancia entre electrodos de tensión [m]

R = resistencia [Ω]

El valor de R se obtiene de igual forma que con el método Wenner, por lectura en el voltímetro y amperímetro, siendo la relación entre tensión y la intensidad nuestra famosa ley de Ohm.

Si las picas auxiliares no se pueden clavar en el terreno por su dureza o por ser terrenos pedregosos, o suelos artificiales de hormigón o similares, se colocarán las picas tumbadas en el suelo sobre trapos húmedos y después se regarán abundantemente.

Los valores medidos de la resistividad que se obtienen son muy similares a los que se obtendrían si se clavarán las picas. Este sistema es muy utilizado para la medida de la resistividad del electrodo de tierra en edificaciones de las ciudades donde es casi imposible clavar picas en las calles o en las aceras.

PICAS TUMBADAS SOBRE TRAPOS HÚMEDAS.



Tanto con el método de Wenner como con el Sistema métrico se ha calculado el valor de la resistividad del terreno, como paso previo para poder conocer la bondad de la puesta a tierra que se va a instalar posteriormente.

La bondad de una buena toma de tierra, la dará el valor de la resistencia de puesta a tierra que, como se ha comentado anteriormente, es el valor de la resistencia que se opondrá al paso de la corriente eléctrica a tierra cuando se utiliza un electrodo introducido en el terreno.

La combinación de la resistividad del terreno, el tipo de electrodo y el contacto electrodo-terreno será el que nos definirá el valor de la resistencia de puesta a tierra.

4.4 DIFERENCIAS DE POTENCIAS TOLERABLE.

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debido a cortocircuitos o descargas atmosféricas, obliga a tomar precauciones para que los potenciales resultantes no ofrezcan peligro a los operadores y en general al personal que labora en las plantas. La ecuación que liga los parámetros de la intensidad de corriente y el tiempo que puede tolerar un organismo es:

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

donde:

I_k = corriente efectiva (rms) que circula por el cuerpo [A]

t = tiempo de duración de la falla [seg]

0.116 = constante de energía (obtenida empíricamente)

En función a esta ecuación (la cual fue determinada después de un estudio realizado a personas a las cuales se les aplicó corriente eléctrica, en un rango de 0.3 a 3 segundos, con una intensidad tal que estas personas no sufrieran fibrilación ventricular¹) y tomando en cuenta que:

¹ En términos médicos, se refiere al trastorno funcional del corazón, en el que las fibras vibran independientemente y sin ritmo, y suele ser seguida por la parálisis total y la muerte.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Los efectos de la electricidad en el cuerpo humano dependen de la intensidad de la corriente que lo atraviesa, de la duración del contacto y de la resistencia eléctrica del propio cuerpo. Dicha resistencia varía según las condiciones físicas y químicas del sujeto (se dan valores particularmente bajos en las mujeres encinta, en presencia de alcohol en la sangre, en conexión con estados depresivos o de preocupación en general) y el estado de la epidermis, seca o mojada.

TABLA 5. EFECTOS DE LA CORRIENTE
SOBRE EL CUERPO HUMANO.

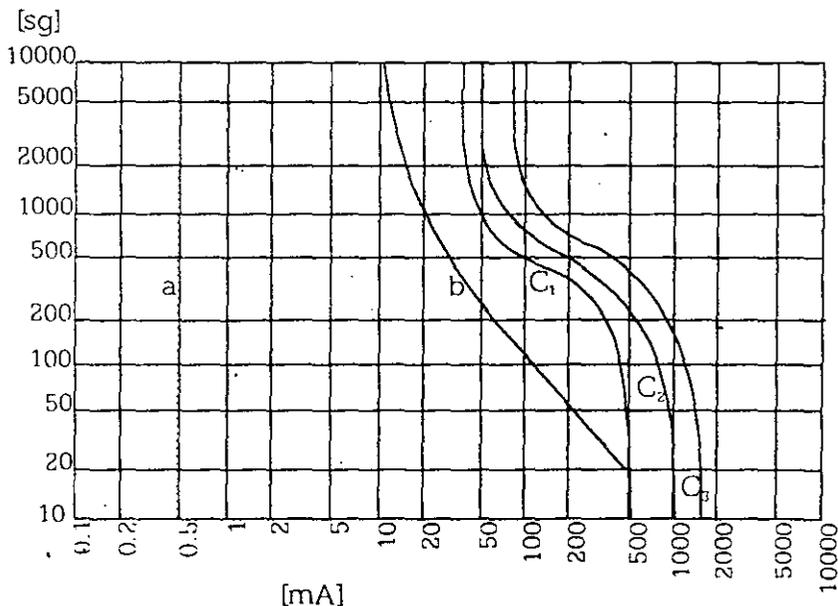
Corriente que atraviesa el cuerpo humano (mA)	Efectos.
Hasta 1	Imperceptible.
2 a 3	Sensación de hormigueo.
3 a 10	Se consigue desprenderse del contacto (liberación)
10 a 50	En intervalos decrecientes, la corriente no es mortal, de lo contrario, los músculos de la respiración se ven afectados por calambres que pueden provocar la muerte por asfixia.
50 a 500	En función creciente con la duración del contacto la corriente es peligrosa ya que da lugar a la fibrilación cardíaca. Posible defunción del infortunado.
Más de 500	Decrece la posibilidad de fibrilación pero aumenta el riesgo de muerte por parálisis de los centros nerviosos o a causa de fenómenos secundarios.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

La resistencia media del cuerpo humano se estimará en un valor convencional, y tomando en cuenta los valores máximos admisibles que no pueden ser rebasados en una instalación, de 1000Ω .

La norma UNE 20572-1 define cuatro zonas, importantes, y sus curvas de seguridad delimitadoras:

GRÁFICA 7. ZONA TIEMPO/INTENSIDAD DE LOS EFECTOS DE LA CORRIENTE ALTERNA (15 A 100 Hz) SOBRE LAS PERSONAS



Zona 1 Habitualmente ninguna reacción,

Zona 2 Habitualmente ningún efecto fisiológico peligroso,

Zona 3 Habitualmente ningún daño orgánico. Probabilidad de contracciones musculares y de dificultad de respiración, de

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

perturbaciones reversibles en la formación y la propagación de los impulsos del corazón, incluida fibrilación auricular y paradas temporales del corazón sin fibrilación ventricular; aumenta con la intensidad de la corriente y el tiempo.

Zona 4 Además de los efectos de la zona 3, la probabilidad de fibrilación ventricular aumenta hasta aproximadamente el 5% (curva C_2), hasta aproximadamente el 50% (curva C_3), y más del 50% más allá de la curva C_3 , con la intensidad y el tiempo aumentan los efectos patofisiológicos tales como parada cardiaca, parada de la respiración y quemaduras graves que pueden producirse.

TABLA 6. FACTORES DE DENSIDAD DE LA CORRIENTE QUE ATRAVIESA EL CORAZÓN EN FUNCIÓN DEL TRAYECTO PARA QUE SE PRODUZCA FIBRILACIÓN VENTRICULAR

Trayecto de la corriente	Factor de corriente de corazón
Mano izquierda a pie derecho o a los dos pies	1
Dos manos a los dos pies	1
Mano izquierda a mano derecha	0.4
Mano derecha a pie izquierdo o pie derecho, o los dos pies	0.8
Espalda a la mano derecha	0.3
Espalda a la mano izquierda	0.7
Pecho a la mano derecha	1.3
Pecho a la mano izquierda	1.5
Centro a la mano izquierda o mano derecha, o a los dos pies	0.7
Pie derecho a pie izquierdo	0

El factor de corriente del corazón permite calcular las corrientes que pasan por el cuerpo humano para los trayectos indicados en la tabla 6, para recorridos diferentes del de mano izquierda a los pies, que representan el mismo peligro de fibrilación ventricular que aquellos que corresponden a la corriente de referencia entre mano izquierda y los dos pies dado en la gráfica 7.

Por ejemplo, una corriente de 200 mA mano derecha a pie izquierdo tiene el mismo efecto que una corriente de 400 mA de mano izquierda a mano derecha.

Al igual que para la resistencia del cuerpo humano, en la cual se acordara utilizar como valor convencional el de 1000Ω , para el cálculo de la potencia de paso, se empleará el factor de corrección de 6, y para el correspondiente a la potencia de contacto, se utilizará el factor de corrección de 1.5 como valores convencionales para los cálculos respectivos.

4.5 POTENCIAL DE PASO TOLERABLE.

El potencial de paso tolerable es la diferencia de potencial que aparece entre los dos pies (generalmente un metro) Cuando una persona está parada en la superficie del terreno, en el cual se presenta un gradiente a causa del flujo de la corriente de falla. Otra

definición similar utilizada en la IEEE Standard 81, donde se suprime a la persona, especifica que:

"La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo".

El gradiente de potencial en una región coincide, prácticamente, con el valor más elevado que puede alcanzar la denominada tensión de paso, que adquiere, evidentemente, sus valores más elevados en las proximidades inmediatas de los electrodos de tierra.

La ecuación del potencial de paso tolerable se puede definir como sigue: La potencia de paso involucra la resistencia del cuerpo humano, así como su factor de corrección, el cual incluye la resistividad del terreno.

Finalmente se esta hablando de una potencia, al ser multiplicada por la corriente efectiva que cruza por el cuerpo humano (I_k), quedando la ecuación:

$$E_p = (1000 + 6\rho) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

de la cual se obtiene:

$$E_p = \frac{116 + 0.7 (\rho)}{\sqrt{t}}$$

donde:

E_p = potencia de paso tolerable [V]

ρ = resistividad del suelo en la superficie [Ω m]

t = tiempo de duración de la falla [seg.]

4.6 POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE.

El potencial de contacto es la diferencia de potencial a través del cuerpo de una persona, entre una mano y los dos pies, cuando está tocando un objeto o equipo con conexiones a tierra. De la misma forma en que se obtuvo la ecuación anterior y aplicando su factor de corrección correspondiente, se obtiene:

$$E_c = (1000 + 1.5\rho) \left(\frac{0.116}{\sqrt{t}} \right)$$

y finalmente:

$$E_c = \frac{116 + 0.17 (\rho)}{\sqrt{t}}$$

donde:

E_c = potencial de contacto tolerable [V]

ρ = resistividad del suelo en la superficie [Ω m]

t = tiempo de duración de la falla [seg.]

4.7 DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA.

Para calcular el valor de la corriente de falla, se necesita, primero, analizar que tipo de sistema se tiene. Si se esta tratando el caso de un sistema de tierra para casa-habitación, edificios civiles, donde solo se estaría manejando potencias bajas, sistemas monofásicos, se puede hacer uso del método del "Bus Infinito", el cual se basa en analizar una falla a tierra del sistema, (denominada de secuencia positiva)

Si se estuviera hablando de un sistema de tierra a nivel industrial, lo más factible, y para el caso de esta tesis, es que se recurra al método de las componentes simétricas, desarrollado mediante el análisis de sistemas en "Por Unidad", (PU.). A continuación se explica el procedimiento de estos dos métodos.

Para efectos de análisis y cálculos de sistemas eléctricos, podemos simplificarlo, si todas las cantidades eléctricas (potencia, voltaje, corriente e impedancia) se expresan como el cociente de la cantidad eléctrica, dividido por una base o magnitud de referencia de esa misma cantidad.

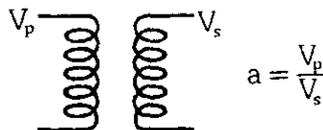
Este método de representar las cantidades en PU permite eliminar los distintos niveles de voltaje, estableciendo un circuito equivalente

de la red. Puesto que la base de una cantidad debe estar en las mismas unidades que la cantidad original.

Las cantidades en por unidad serán números reales que conservan el mismo ángulo de fase que las cantidades originales, por lo tanto el valor en PU de cualquier cantidad se define como el cociente de su valor referido a un valor base y expresado en forma decimal.

Se especificarán dos valores base, la potencia y el voltaje. En el análisis de sistemas eléctricos el voltaje nominal de los equipos y las líneas es normalmente conocido, así como la potencia aparente o capacidad de dichos equipos.

La potencia base seleccionada se usará en cualquier parte del sistema, no así para el voltaje, ya que una vez seleccionado, primero, se ubica en un punto conveniente del circuito, en un valor lo más cercano al valor base, y después de ubicar éste valor, será utilizado para obtener los nuevos valores base del circuito, mediante la siguiente relación de transformación:



The diagram shows a transformer with two windings. The primary winding on the left is connected to a voltage source labeled V_p . The secondary winding on the right is connected to a voltage source labeled V_s . To the right of the transformer, the transformation ratio is given as $a = \frac{V_p}{V_s}$.

Partiendo de los siguientes datos:

$$S_B, V_B, I_B, Z_B$$

$$S_B \text{ [MVA]} \text{ y } V_B \text{ [KV]}$$

Podemos desarrollar:

$$Z_B = \frac{V_B}{S_B / V_B} = \frac{V_B^2}{S_B}$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} \text{ } [\Omega]$$

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} \text{ [A]}$$

Relacionando los valores:

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B}$$

Para el cambio de base:

$$Z_{pu} = \frac{Z}{V_B^2 / S_B} = Z \frac{S_B}{V_B^2}$$

- 1.-Valores en PU. del fabricante, y
- 2.-Valores particulares.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

$$Z = Z_{pu1} * Z_{B1}$$

y

$$Z = Z_{pu2} * Z_{B2}$$

por tanto,

$$Z_{pu2} * Z_{B2} = Z_{pu1} * Z_{B1}$$

obteniéndose:

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \frac{Z_{B1}}{Z_{B2}}$$

sustituyendo:

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \frac{V_{B1}^2 / S_{B1}}{V_{B2}^2 / S_{B2}}$$

y se obtiene la ecuación .

de "cambio de base":

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \left(\frac{V_{B1}}{V_{B2}} \right)^2 \left(\frac{S_{B2}}{S_{B1}} \right)$$

Los pasos a seguir para el método en PU. son los siguientes:

- El paso inicial es disponer del diagrama unifilar en donde se representan todos los elementos del sistema, tales como generadores, motores, transformadores, líneas, etcétera. Se deben indicar sus características más importantes como potencia, tensión de operación e impedancia (datos de placa)
- Como segundo paso, se utiliza el diagrama de impedancias o reactancias respectivo que puedan tener influencia en el cálculo, en dicho diagrama se expresan todas las impedancias o reactancias en PU. referidas a una base común.
- En el tercer paso, se lleva a cabo la reducción de impedancias por combinaciones en serie y paralelo, según sea el caso, y transformaciones delta-estrella, hasta obtener la impedancia equivalente entre la fuente y el punto de falla.
- Como cuarto paso, se calculan las corrientes y potencias de corto circuito en el punto de falla, o en cualquier punto que se requiera saber la situación del sistema con las siguientes expresiones:

$$I_{cc_{pu}} = \frac{1}{Z_{eq_{pu}}} \text{ [PU]}$$

y

$$P_{cc_{pu}} = \frac{S_{B2}}{Z_{eq_{pu}}} \text{ [MPU]}$$

Las cuales son calculadas basándose en la impedancia equivalente, y así finalmente se pueden deducir nuestras ecuaciones para la obtención de la potencia interruptiva, la que definirá los valores de capacidad de los equipos, como para la corriente máxima de falla a tierra.

No hay que olvidar que esta primera parte es dedicada al cálculo de la corriente de falla a tierra para sistemas eléctricos de edificios civiles (casa-habitación, hospitales, negocios, etcétera) ya que solo trabajamos con el diagrama de secuencia positiva de los aparatos y máquinas eléctricas.

Si el análisis se requiere para un sistema trifásico a nivel industrial, donde se trabaja con motores, transformadores y maquinaria de grandes capacidades de potencial, por ejemplo en una subestación, tomando en cuenta que una falla de línea a tierra tiene una alta probabilidad de ocurrencia respecto a cualquier otra falla en el sistema, el proceso de cálculo a desarrollar será mediante el método de componentes simétricas.

El método de componentes simétricas es para resolver un sistema trifásico desequilibrado, basado en la sustitución de dicho sistema trifásico desequilibrado por tres sistemas trifásicos equilibrados que combinados en forma adecuada son equivalentes al sistema original de análisis.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

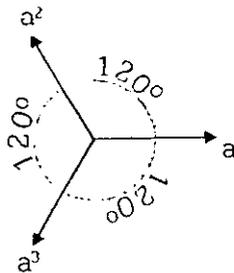
Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Los tres sistemas trifásicos equivalentes son:

- Un sistema directo o de secuencia positiva,
- Un sistema inverso o de secuencia negativa y
- Un sistema homopolar o de secuencia cero.

Para entender más claramente estos sistemas o secuencias, empezaremos hablando sobre el operado a , el cual tiene las siguientes características:

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1 \cos 120^\circ + j 1 \sin 120^\circ = -0.5 + j0.866$$



y de acuerdo a este diagrama obtenemos que:

$$a \times a = a^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 \cos 240^\circ + j 1 \sin 240^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$a \times a \times a = a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \cos 360^\circ + j 1 \sin 360^\circ = 1 + j0$$

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

y con las particularidades:

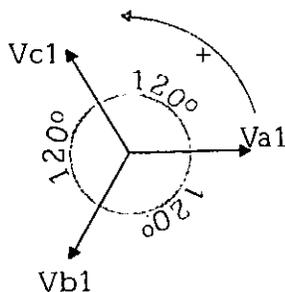
$$a + a^2 + a^3 = 0$$

$$a + a^2 = -1$$

de aquí podemos desprender hacia el análisis de los sistemas.

Sistema de secuencia positiva (secuencia ABC)

Consiste de tres fasores de igual magnitud y con 120° de separación de fase y con una secuencia igual a la del sistema trifásico desequilibrado.

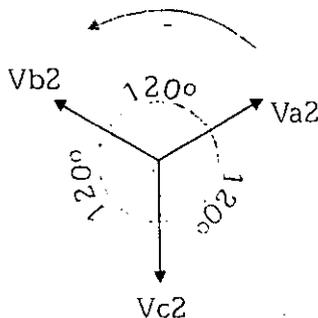


$V_{a1} = V_{a1}$	$I_{a1} = I_{a1}$
$V_{b1} = a^2 \cdot V_{a1}$	$I_{b1} = a^2 \cdot I_{a1}$
$V_{c1} = a \cdot V_{a1}$	$I_{c1} = a \cdot I_{a1}$

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Sistema de secuencia negativa (secuencia ACB)

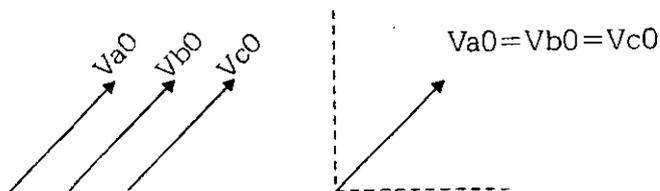
Consiste de tres fasores de igual magnitud y con 120° de separación de fases, con una secuencia opuesta al del sistema trifásico desequilibrado.



$V_{a2} = V_{a2}$	$I_{a2} = I_{a2}$
$V_{b2} = a \cdot V_{a2}$	$I_{b2} = a \cdot I_{a2}$
$V_{c2} = a^2 \cdot V_{a2}$	$I_{c2} = a^2 \cdot I_{a2}$

Sistema de secuencia cero.

Consiste de tres fasores de igual magnitud y en fase, mismo ángulo, tal y como se muestra a continuación:



Finalmente se deducen las ecuaciones:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

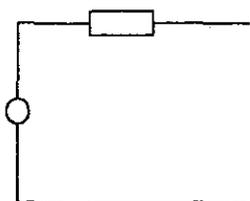
$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} = a^2 * V_{a1} + a * V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = a * V_{a1} + a^2 * V_{a2} + V_{a0}$$

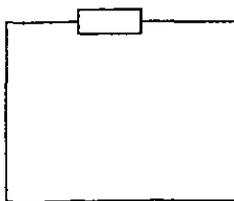
Para el análisis de una falla asimétrica en un sistema eléctrico, se deben determinar las componentes simétricas, de las corrientes desequilibradas que por él circulan y como las componentes de secuencia de una fase dan lugar a caídas de tensión de la misma secuencia y son independientes de las corrientes de las otras, por tanto, las corrientes de cualquier secuencia pueden considerarse circulando en una red independiente, formada solamente por las impedancias de dicha secuencia. El circuito monofásico equivalente formado por las impedancias de cualquier secuencia se denomina red de secuencia y se interconectan para representar diversas condiciones de falla, de tal forma que tenemos tres tipos de redes de secuencia.

Redes de secuencia:

Positiva.



Negativa.



Cero.

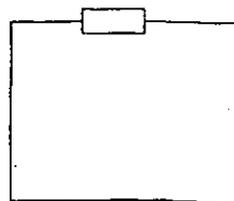


Diagrama de impedancias de secuencia positiva:

Este diagrama se obtiene en forma bastante sencilla reemplazando cada elemento del sistema mostrado del diagrama unifilar por su impedancia ya referida a una base común y representando también a las fuentes de voltaje con sus valores expresados en PU. y referidos, también a la base común.

Diagrama de impedancias de secuencia negativa:

Este diagrama generalmente es idéntico al anterior, con la única diferencia de que no contiene fuentes de voltaje, ocasionalmente los valores de reactancia negativa pueden ser diferentes a los de secuencia positiva.

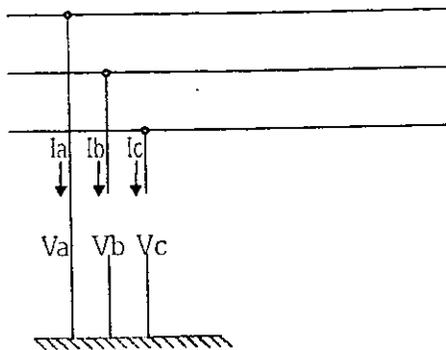
Diagrama de impedancias de secuencia cero:

En la elaboración de este diagrama se requiere de condiciones especiales, ya que las corrientes de secuencia cero circulan hacia tierra, por lo que influyen en forma determinante el cómo se encuentran los neutros de los distintos elementos conectados a tierra.

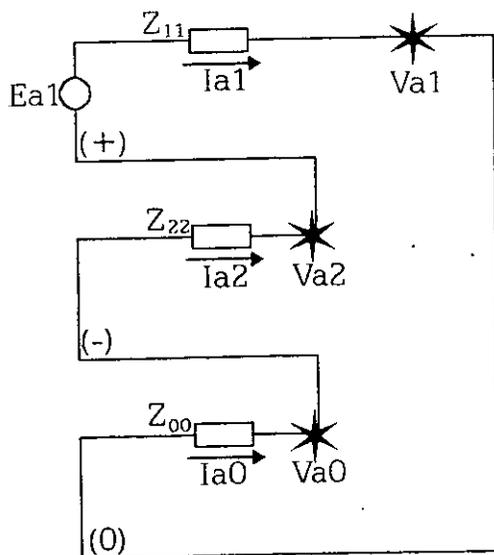
Como podemos recordar, nuestro estudio está enfocado al análisis del desvío de la corriente de falla a tierra, es decir, de cortocircuitos

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

provocados por fallas de línea a tierra, partiendo del siguiente diagrama:



Para tal efecto, se obtendría el siguiente circuito:



de donde se obtiene:

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

$$V_{a1} = E_{a1} - Z_{11} \cdot I_{a1}$$

$$V_{a2} = - Z_{22} \cdot I_{a2}$$

$$V_{a0} = - Z_{00} \cdot I_{a0}$$

sustituyendo en:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

Se obtiene:

$$E_{a1} - Z_{11} \cdot I_{a1} + (- Z_{22} \cdot I_{a1}) + (- Z_{00} \cdot I_{a1}) = 0$$

$$I_{a1} (Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}) = E_{a1}$$

y finalmente:

$$I_{a1} = \frac{3E_{a1}}{Z_{11} + Z_{22} + Z_{00}}$$

donde:

I_{a1} = valor eficaz máximo simétrico correspondiente al periodo subtransitorio [A]

E_{a1} = voltaje de fase a neutro (fuerza electromotriz simple) [V]

Z_{11} = reactancia directa o de secuencia positiva [Ω]

Z_{22} = Reactancia inversa o de secuencia negativa [Ω]

Z_{00} = Reactancia homopolar o de secuencia cero [Ω]

Capítulo V

Puesta a tierra.

5.1 EN OBRAS DE CONSTRUCCIÓN.

Una de las causas por las cuales se presentan accidentes, incluso mortales, se debe a una falta de conocimiento para realizar una instalación eléctrica adecuada, que comúnmente se lleva de una forma muy provisional y casi siempre a la intemperie.

Los factores que se deben de tener en cuenta son, la presencia de agua para amasar cemento y arena, el intenso movimiento de elementos que pueden causar daños en las instalaciones, y una de las más importantes es, la poca familiaridad de los obreros de la construcción con la electricidad.

Las condiciones en las que se trabaja y la eventualidad de las instalaciones, hacen necesario incrementar las medidas de seguridad para garantizar la integridad de las personas que trabajan en las obras.

Las instalaciones se limitan al periodo de ejecución de la obra, y deben desmontarse inmediatamente acabada ésta. Las instalaciones se van variando y las necesidades de potencia son distintas a medida que avanza la obra. Estas instalaciones van provistas de una

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

"Instalación de enlace", muy simplificada, dado el carácter provisional de las obras, y que consta de:

- Acometida,
- Armario de protección y medida,
- Cuadro general de mando y protección, y
- Circuitos interiores.

El carácter provisional de estas instalaciones es motivo de que en ocasiones no se preste la debida atención, en detrimento de la seguridad de las personas que trabajan. El punto relativo a la puesta a tierra en las instalaciones eléctricas de obras está contemplado en el R. E. B. T. MI BT 028, en la NTE IEP/1973, normas particulares de las empresas eléctricas, etcétera. El tratamiento que le da el R. E. B. T., relativo a la protección contra contactos indirectos, es el siguiente:

En el origen de toda instalación interior a la llegada de los conductores de acometida, se dispondrá un interruptor diferencial de alta sensibilidad mínima de 300 miliamperios. Este interruptor podrá estar, además, provisto de los dispositivos de protección contra cortocircuitos y sobrecargas.

En las instalaciones destinadas a obras, los interruptores diferenciales serán de la sensibilidad anteriormente citada cuando

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

las masas de toda la maquinaria estén puestas a tierra, y los valores de la resistencia de ésta satisfagan lo señalado en la instrucción MI EBT 039. En caso contrario, los interruptores diferenciales serán de alta sensibilidad. Esta protección puede establecerse para la totalidad de la instalación o individualmente para cada una de las máquinas o aparatos utilizados.

La norma tecnológica de la edificación contempla la puesta a tierra durante la ejecución de una obra como una puesta a tierra provisional y que se configura como un circuito de protección que va, desde uno o varios electrodos situados en contacto con el terreno, hasta su conexión con las máquinas eléctricas y masas metálicas que hayan de ponerse a tierra.

El número de picas a introducir en el terreno se puede calcular de acuerdo con la siguiente tabla:

TABLA 7. NÚMERO DE PICAS EN RELACIÓN AL TERRENO.

Naturaleza Del terreno	Terrenos Orgánicos Arcillas y margas	Arenas arcillosas y graveras, rocas sedimentarias y metamórficas	Calizas agrietadas y rocas eruptivas	Grava y arena sílicea
Nº de picas	2	3	6	12

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Lo ideal en estos casos, es construir una red de tierras en la cimentación del edificio, que además de ser la instalación de puesta a tierra definitiva del edificio, pueda servir para la puesta a tierra provisional de la obra. La NTE IEP-73 define, igualmente la instalación anterior, que debe realizarse con cable conductor tendido sobre el terreno.

Todos los empalmes y uniones que se realicen, se harán, si es posible, con soldadura aluminotérmica o mediante piezas de empalme adecuadas. La medición se hará del conjunto de la instalación provisional y se controlarán todas las conexiones. El valor máximo de la resistencia de puesta a tierra de la instalación será de 80Ω .

Desde la provisionalidad de la obra, como norma de mantenimiento, se realizará cada 3 días una inspección visual de la instalación. Los elementos que hay que conectar a la instalación de puesta a tierra provisional, serán las máquinas eléctricas y masas metálicas que no dispongan de doble aislamiento.

Las máquinas eléctricas más utilizadas en una obra son:

- Grúa torre,
- Grupos de soldadura,
- Hormigonera,

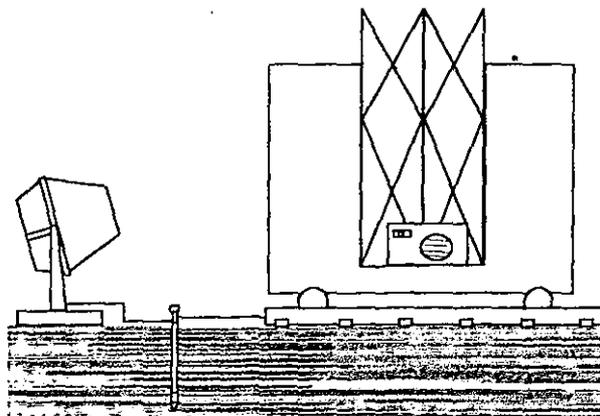
Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

- Alumbrado, y
- Pequeña maquinaria en general.

Esta instalación de puesta a tierra es obligatoria como medida de protección contra contactos indirectos.

En las obras está prohibido el empleo de tensiones superiores a 220 V respecto a tierra. Además, siendo considerada una obra, por definición, un lugar húmedo, las lámparas portátiles no deberán alimentarse a más de 25V con relación a tierra y las herramientas portátiles a más de 50V con relación a tierra.

FIGURA 13. ESQUEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA GRÚA Y UNA HORMIGONERA.



Las lámparas eléctricas portátiles deberán estar siempre provistas de una envoltura de protección.

Si la instalación de puesta a tierra provisional es distinta de la definitiva, se deberán montar electrodos independientes en:

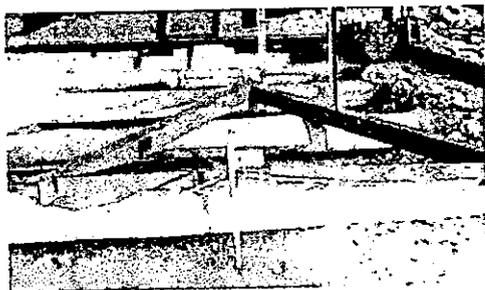
- ☐ El cuadro general de mando y protección,
- ☐ Cada una de las grúas torre que pueda haber en la obra, independientes del conductor de protección que debe llevar la derivación de cada máquina,
- ☐ La sección del conductor de la línea principal de tierra, será como mínimo de 35 mm²,
- ☐ La sección del conductor de protección de cada máquina será igual a la del conductor.

La puesta a tierra de los motores eléctricos debe efectuarse directamente en las respectivas carcasas y no a través de las estructuras metálicas a las que se hallan fijados.

Cuando el motor este fijado sobre un material aislante y se accione la máquina por medio de correas aislantes, si la estructura de la máquina es metálica deberá ponerse, también, a tierra. Conectar a tierra los carriles con independencia de la puesta a tierra de los motores que accionan las grúas o el carro suspendido. Prevéanse puentes en las uniones de los carriles a fin de asegurar la continuidad metálica.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Las estructuras metálicas de grandes masas de metal (depósitos de arena, cemento, agua) se deben conectar a tierra para protegerlas de las descargas atmosféricas. Utilícense picas como electrodos.



DETALLE DE LA PUESTA
A TIERRA PROVISIONAL.



HORMIGONERA PUESTA
A TIERRA.

5.2 EN EDIFICIOS DE NUEVA CONSTRUCCIÓN.

La bondad de la puesta a tierra viene determinada por el valor de la resistencia de puesta a tierra del edificio en conjunto. Este valor, como sabemos, depende de la resistividad del terreno, de los electrodos utilizados y del contacto que existe entre el terreno y el electrodo.

Existen valores máximos de resistividad que nos garantizan la seguridad de las personas en caso de corriente de defecto:

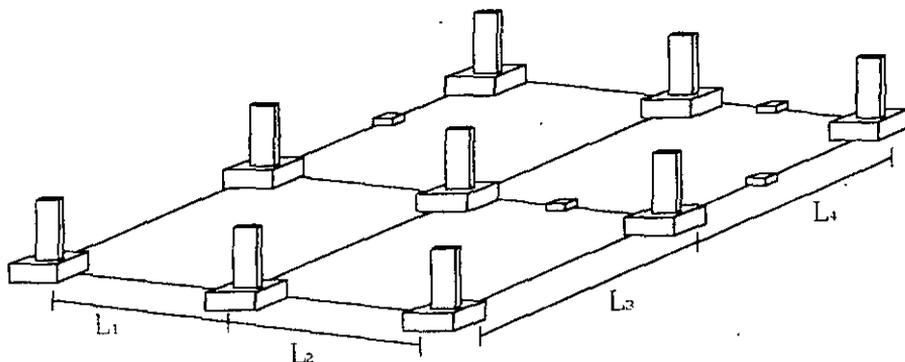
- En edificios destinados principalmente a viviendas; 80Ω máximo,
- Edificios con pararrayos; 15Ω máximo,
- Instalaciones de máxima seguridad; 2 a 5Ω , e
- Instalaciones de ordenadores; 1 a 2Ω .

Para obtenerse estos valores, una vez conocido el terreno, se van introduciendo los electrodos y efectuando medidas periódicas hasta alcanzar el valor deseado.

La NTE-IEP introduce un sistema de cálculo para la puesta a tierra de un edificio, donde se calcula el número de picas necesario para conseguir un valor de resistencia de puesta a tierra inferior a 80Ω o a 15Ω , a partir de una simple clasificación de los terrenos más comunes y de la longitud, en metros, del perímetro del edificio, bajo el que se enterrará cable desnudo de cobre de 35mm^2 de sección.

Para utilizar la tabla de cálculo rápido, debe conocerse: la longitud en planta de la conducción enterrada en metros, donde $\sum L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$ (recinto exterior), y la naturaleza del terreno, y si el edificio debe llevar pararrayos o no.

FIGURA 14. CÁLCULO DE LA LONGITUD EN PLANTA DE LA CONDUCCIÓN ENTERRADA.



La tabla 8 de cálculo que incluye la Norma tecnológica de la Edificación, y que se presenta a continuación, tiene una doble entrada, en función de los parámetros comentados anteriormente.

La tabla está calculada para que los edificios con pararrayos no sobrepasen un valor de resistencia de tierra de 15Ω y los edificios sin pararrayos no sobrepasen los 80Ω . La columna de la derecha nos permite ir alternando la intensidad del cable enterrado con las picas y, según los casos, ir reduciendo el número de metros de cable a utilizar y aumentando el número de picas, o viceversa.

El cable que se puede utilizar es cable de cobre de 35 mm^2 de sección como mínimo, y las picas de 2 m de longitud y 14 mm de diámetro con recubrimiento electrolítico de cobre.

TABLA 8. CÁLCULO DE LA TOMA DE TIERRA ADECUADA

Naturaleza del terreno								
Terrenos orgánicos, arcillas y margas		Arenas arcillosas y gravas. Rocas sedimentarias		Calizas agrietadas y rocas eruptivas		Grava y arena silíceas		Núm. de Picas.
Sin pararrayos	Con pararrayos	Sin pararrayos	Con pararrayos	Sin pararrayos	Con pararrayos	Sin pararrayos	Con pararrayos	
25	34	28	67	54	134	162	400	0
↑	30	25	63	50	130	158	396	1
	26	↑	59	46	126	154	392	2
			55	42	122	150	388	3
			51	38	118	146	384	4
			47	34	114	142	380	5
			43	30	110	138	376	6
			39	↑	106	134	372	7
			35		105	130	368	9
					98	126	364	9
					94	122	360	10
					90	118	356	11
					86	114	352	12
					82	110	348	13
					78	106	344	14
					74	102	340	15
					70	98	336	16
						90	328	18
					↑	82	320	20
							312	22
							304	24
							296	26
							288	28
							280	30
							272	32
							264	34
							256	36
							248	38
							240	40
							232	42
							224	44
							216	46
							208	48
							200	50
							↑	

↑ Longitud en planta de la conducción enterrada [m]

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Para utilizar la tabla 8, se entra en la columna elegida de abajo hacia arriba, hasta encontrar el número que coincida con la longitud en planta con la conducción enterrada en metros.

Después se desplaza en horizontal hasta la columna que pone "número de picas", que nos indicará el número de picas que hay que introducir en el terreno y soldar al cable enterrado, obteniéndose de esta manera el valor deseado de la resistencia de la tierra.

Si el perímetro del edificio es inferior al primer número que nos encontramos en la columna a que corresponda se pondrá la longitud en metros correspondiente a este número como mínimo y en la columna de la derecha el número de picas que le corresponda. Si fuera imposible el hincado de picas tendríamos que subir hasta la primer fila de la tabla que nos da la longitud de cable enterrado para la que no se precisan picas obteniéndose de esta forma una toma de tierra equivalente a la obtenida en los casos anteriores.

5.3 EN EDIFICIOS EXISTENTES.

En este punto se contemplan diferentes sistemas para poner a tierra edificios existentes que carecen de instalación de puesta a tierra o que se ha deteriorado por alguna circunstancia y hay que reconstruirla.

La puesta a tierra de edificios existentes es similar a la de edificios de nueva construcción desde el punto de vista de conseguir que entre el terreno y las partes metálicas del edificio no haya tensiones o diferencias de potencial peligrosas. Los valores que se utilizan son también los 80Ω para edificios sin pararrayos y 15Ω para edificios con pararrayos.

Los electrodos que se utilizan serán artificiales, elementos de la construcción o electrodos de hecho, por lo que se hará referencia, sobre todo, a los electrodos artificiales descritos.

Al hacer el estudio de la rehabilitación del edificio, la instalación eléctrica del mismo se diseñará en colaboración con el restaurador del edificio y con el técnico de la empresa eléctrica.

La instalación se diseñará de, acuerdo con las características del edificio y su estructura, adecuando la instalación en todo momento a su singularidad. La caja general de protección se colocará lo más cerca posible de la puerta del edificio, la línea repartidora discurrirá por lugares de uso común, empotrada, entubada o en bandejas hasta llegar a una concentración de contadores, tipo armario o, si es posible, en un cuarto para alojar las centralizaciones.

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

Las derivaciones individuales discurrirán por lugares de uso común, por lo general la escalera, hasta llegar a la entrada de cada vivienda donde se instalará un cuadro general de mando y protección, donde se alojará, como mínimo, un diferencial y un interruptor general.

La red de tierras será un punto importante para la seguridad de las personas y de las instalaciones, en ocasiones es difícil de diseñar e instalar, ya que hablamos de edificios construidos en ciudades consolidadas, donde es casi imposible encontrar un terreno donde implantar la toma de tierra

La puesta a tierra tiene que llegar obligatoriamente a la centralización de contadores para, desde allí, acompañando a las derivaciones individuales, llegar a las viviendas o locales y repartirse por todos los circuitos interiores. También es conveniente que llegue a la base de los ascensores o montacargas para poner a tierra las armaduras metálicas y los carriles de desplazamiento. Otros elementos importantes para poner a tierra en las viviendas rehabilitadas son las antenas de televisión, pues son elementos capaces de captar rayos y, por lo tanto, disminuir la seguridad de las personas y de las cosas.

Las normas CEI dicen: "Todo edificio provisto de instalaciones eléctricas debe tener una instalación de tierra propia (instalación de tierra propia)"

“Estarán protegidas contra las tensiones de contacto todas las partes metálicas de la instalación eléctrica y de los aparatos receptores alimentados por sistemas de tensión no superior a 1000 V, que ordinariamente no están bajo tensión, pero que, por defecto de aislamiento o por otras causas fortuitas, pudieran llegar a encontrarse bajo tensión.”

“...cada instalación receptora, o conjunto de instalaciones ubicadas en un mismo edificio o en sus dependencias, debe disponerse de su propia instalación de tierra, A dicha instalación de tierra se deberán conectar todos los sistemas de tuberías metálicas accesibles destinadas al aporte, distribución y descarga de las aguas así como todas las masas metálicas accesibles, de considerable extensión, que existan dentro del área de la propia instalación receptora”.

“En la instalación de tierra debe existir siempre un conductor de protección que será, en cualquier caso, distinto a cualquier otro conductor de la instalación: en particular, no puede ser considerado como conductor de protección la línea del neutro aún cuando esté puesto a tierra”.

“Todas las partes metálicas de la instalación eléctrica y de los aparatos receptores que deban ser protegidas contra las tensiones de contacto, deberán conectarse al conductor de protección”.

Para conseguir una mayor eficacia en la instalación de una toma de tierra de un edificio, y su posterior conservación, se relaciona una serie de consejos prácticos, confirmados por la experiencia de día a día, tanto para el emplazamiento de los electrodos como para la conservación de la toma de tierra propiamente dicho.

Para conseguir una buena resistencia de puesta a tierra se recomienda:

- a) Colocar los electrodos en zonas de conductividad máxima,
- b) No colocar los electrodos al ras de muros, rocas, etcétera, puesto que impiden la difusión de las posibles corrientes de fuga,
- c) No colocar electrodos en patios estrechos rodeados de muros, por las razones expuestas en el punto b),
- d) Evitar pozos, cisternas, albercas, etcétera, puesto que el agua en principio es mala conductora y los muros de contención pueden impedir la difusión de las corrientes de fuga y ocasionar en el terreno circundante gradientes de potencial,
- e) Evitar las laderas de los ríos, especialmente en las zonas cóncavas, ya que por lo general, son zonas reblandecidas y con el tiempo pueden llegar a quedarse al aire los electrodos,
- f) La distancia a muros, rocas, etcétera, deberá superar los 3 m,
- g) En caso de que exista un centro de transformación, la distancia entre la toma de tierra del centro de transformación

Instalación de un sistema de tierra. Análisis de los elementos y desarrollo.

y la toma de tierra del edificio será, como mínimo, de 15 m para terrenos buenos conductores. En terrenos malos conductores es conveniente aumentar esta distancia.

- h) No colocar electrodos cerca de instalaciones que produzcan corrientes vagabundas, como el metro, tranvías, etcétera,
- i) Para una mayor eficacia y vida útil de la instalación, el conjunto de electrodos se deberá instalar debajo de la cimentación del edificio,
- j) Todas las uniones, empalmes, derivaciones, etcétera, se recomiendan que se realicen con soldadura aluminotérmica,
- k) Los conductores de protección serán aislados, de igual sección que el conductor de fase y de color verde-amarillo a rayas.

5.4 EN INSTALACIONES INDUSTRIALES.

Entendemos como tales las realizadas en industrias pequeñas, medianas y grandes, almacenes, obra, aparcamientos y ambientes similares en las que se produce una prestación laboral por parte de "personal subordinado o equiparado al mismo".

Estas industrias están afectadas, por lo tanto, por las disposiciones ministeriales concernientes a la prevención de accidentes laborales y el suministro de energía eléctrica a las mismas puede efectuarse mediante redes eléctricas de hasta 400 V de tensión o con redes de

media o alta tensión (requiriéndose, por lo tanto, cabinas transformadoras para la alimentación de los aparatos receptores).

Resulta evidente que la citada interpretación es restrictiva y debe extenderse también a los edificios civiles (hospitales, escuelas, locales destinados al culto y a espectáculos públicos, etcétera) sujetos a la legislación en materia preventiva de accidentes, en tanto que en ellos hay personas que efectúan una presentación laboral fuera del propio domicilio.

Además, también en dichos lugares es posible que el suministro de la energía eléctrica se efectúe a media o alta tensión.

Por otra parte, recordemos que la comprobación y el control de dichas instalaciones corre a cargo de la Inspección del Trabajo o del ENPI (Organismo Nacional para la prevención de Accidentes).

A cargo de este último se encuentra la comprobación así como las inspecciones periódicas de las instalaciones de puesta a tierra y de los dispositivos destinados a neutralizar las descargas atmosféricas, así como la verificación de los ascensores destinados al servicio privado.

Asimismo, está confiada al ENPI la comprobación y revisiones periódicas de escaleras aéreas de inclinación variable, puentes

extensibles transportables, puentes suspendidos provistos de una árgana, árganas de puentes suspendidos utilizadas en la construcción, hidroextractores provistos de cestas de más de 50 cm de diámetro, grúas y otros aparatos para levantamiento con capacidad superior a 200 Kg excluidos los de accionamiento manual. Puesto que muchos de los aparatos mencionados más arriba son de accionamiento eléctrico, se sigue de ello que deberán ser puesto a tierra.

Queda prohibido el utilizar como electrodos:

- El neutro de la instalación, aunque a éste le haya dado una tierra "segura" la empresa distribuidora,
- La canalización del agua en instalaciones alimentadas con tensiones superiores a 1000 V, y
- Las tuberías de aire comprimido y gas, incluso en el caso de que formen parte de las instalaciones de propiedad del usuario.

Soldadura aluminotérmica.

Conexión de conductores enterrados.

Como sabemos, la malla es una red de seguridad y protección, que al ser, comúnmente inaccesible, no puede recibir mantenimiento, mucho menos ser inspeccionada, y se construye para una duración como mínimo igual a la de la edificación y equipos que ha de proteger. Por lo tanto se requiere la construcción de una maya que esté exenta de averías.

El sistema más fiable que existe actualmente y que evita que se puedan producir discontinuidades, es la soldadura aluminotérmica ya que, mediante ella, eliminaremos los contactos físicos y garantizaremos la continuidad material entre los extremos de los conductores o elementos a conectar.

La buena soldadura deberá cumplir varias condiciones:

- a) Tener alto punto de fusión, ya que al producirse un defecto franco a tierra, podría dar lugar a que se fundiese la conexión, dejando la malla abierta y anulando su eficacia.
- b) Contar con una buena conductividad, ya que el aumento de resistencia llevaría a la instalación de mallas de mayor tamaño con el siguiente encarecimiento.

c) El método de ejecución debe ser simple y fiable.

Los tipos más comunes y conocidos de soldadura, mediante arco eléctrico o soporte oxiacetilénico, exige voluminosos y pesados equipos, además de mano de obra especializada, ya que la soldadura de un cable, compuesto por varios conductores, es de difícil ejecución. Para evitar todos estos inconvenientes y a la vez satisfacer las exigencias planteadas, se desarrolló el método de soldadura aluminotérmica.

La aluminotermia consiste en una reacción química en la que se reduce óxido de cobre mediante aluminio en polvo:



Ésta es una reacción que se produce con desprendimiento de calor. Al combinarse el aluminio con el oxígeno se forma Alúmina y se precipita cobre metálico en forma líquida debido al calor de la reacción, que cae como metal de aportación sobre las piezas a unir. Esta reacción no se produce a la temperatura ambiente, por lo que para iniciarla es necesario elevar la temperatura, hecho que se realiza mediante un cartucho que contiene pólvora para la ignición.

Para realización práctica de la soldadura, se necesita un equipo y una forma de ejecución que se analiza a continuación:

1.- Elementos.

Para la ejecución de la soldadura disponemos de un equipo que se compone de los siguientes elementos:

a) MOLDE. Es una pieza de grafito dividida en tres o más partes, donde se hallan:

- El crisol, donde se produce la reacción,
- La chimenea, por donde bajará el cobre fundido,
- La cámara de soldadura, donde el cobre líquido envolverá los extremos de los elementos a soldar, y
- Los taladros por donde se colocan los cables, pletinas, etcétera, que vamos a soldar.

Se construye de grafito porque resiste perfectamente las altas temperaturas sin producir deformaciones, y porque no se producen adherencias de los metales fundidos y es fácilmente mecanizable.

b) TENAZAS O MANGO. Es el accesorio que nos permite abrir y cerrar el molde sin quemarnos, ya que el molde alcanza altas temperaturas después de cada soldadura. Dispone de un trinquete que evita que se pueda abrir el molde espontáneamente.

c) CARTUCHO. Caja cilíndrica de plástico, hermética que contiene la masa de aportación. Está compuesta de óxido de cobre, aluminio en

polvo y feldespatos, a la que se añaden productos varios para fluidificar la masa de cobre fundido y evitar la oxidación durante el periodo de solidificación. Es de color negrozco y brillo metálico. En el fondo del tubo, prensada, está la masa de ignición (fósforo rojo, peróxido de bario y aluminio micronizado), de color blanquecino y muy brillante, en forma de polvo finísimo. Este polvo se esparce por encima de la masa de aportación.

d) DISCO DE CONTENCIÓN. Es una chapa de forma circular y muy poco espesor, que se coloca en el fondo del crisol, en la embocadura con la chimenea, antes de echar la masa de aportación en el crisol para evitar que ésta caiga a la cámara de soldadura.

e) PISTOLA DE IGNICIÓN. Elemento que se utilizará para proyectar chispas sobre la masa de ignición, incendiándola y provocando la reacción aluminotérmica de la masa de aportación.

ELEMENTOS PARA REALIZAR LA SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA

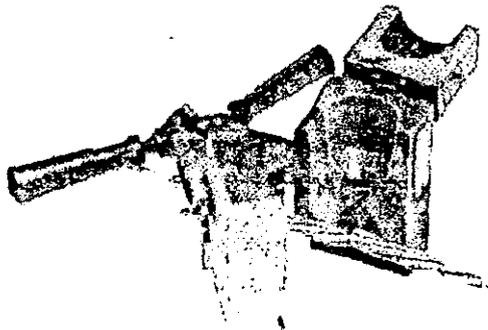


2.- Procedimiento de realización de una soldadura.

La ejecución física de una soldadura es muy fácil. En primer lugar se fijan los moldes al mango o tenaza. Después se introducen los cables, pletinas o elementos que hay que unir por los taladros del molde. Se procederá a la limpieza de los elementos a unir, exigencia de cualquier tipo de soldadura, hasta conseguir que los conductores estén exentos de grasa, humedad, etcétera, al igual que el molde.

La presencia de agua en los cables a unir, o bien humedad en el molde de grafito puede producir fisuras en la soldadura, ya que por el calor de la reacción química, el agua se evapora instantáneamente, y al expandirse buscando la salida, provoca arrastres incontrolados de cobre, alúmina y escorias.

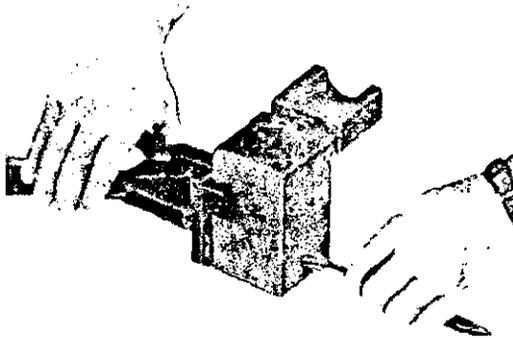
MOLDE DE GRAFITO PARA LA SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA. PRIMERA FASE: INTRODUCCIÓN DE CABLES



Para eliminar el vapor del agua del molde de grafito y el agua de los cables o pletinas, se usa la lamparilla de fontanero, alimentada por gas butano, que eliminará los problemas antes descritos.

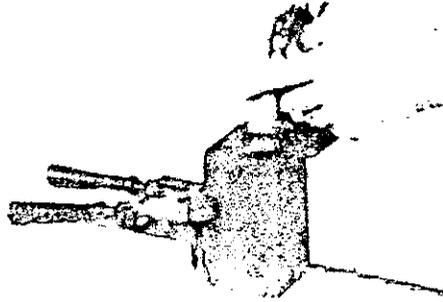
El siguiente paso es cerrar las tenazas o mango, que permanecerá en esa posición gracias a su diseño especial.

COLOCACIÓN DE LOS ELECTRODOS A UNIR,
CERRADO DE LAS TENAZAS Y COLOCACIÓN DEL
DISCO DE CONTENCIÓN EN EL MOLDE.



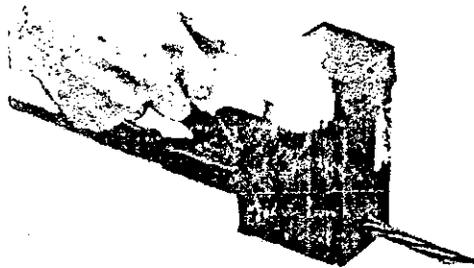
A continuación se coloca el disco de contención y se vierte sobre el molde la masa de aportación contenida en el cartucho.

VERTIDO DE LA MASA DE APORTACIÓN EN EL MOLDE.
COLOCACIÓN DE LA MASA DE IGNICIÓN SOBRE EL METAL
DE SOLDADURA Y EN EL BORDE DEL MOLDE



Golpeando el fondo del cartucho se desprende el polvo de ignición que colocaremos sobre la masa de aportación y un poco sobre el borde del molde que queda debajo del rebaje que presenta la tapa.

CIERRE DE LA TAPA. CON LA PISTOLA DE IGNICIÓN
INCENDIAR LA MASA. ABRIR EL MOLDE Y LIMPIAR



Abra el molde después de que el metal se solidifique, quite escorias del molde antes de la próxima conexión.

IGNICIÓN DE LA SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA



La pistola de ignición proyectará una chispa sobre el polvo de ignición que propiciará el inicio de la reacción de aluminotermia que se propaga rápidamente a toda la masa, desde la superficie hasta el fondo del crisol.

El cobre líquido funde el disco de contención, y fluye por la chimenea hacia la cámara de soldadura. El cobre líquido rodea los conductores, barras o pletinas, provocando la fusión parcial de éstos y haciendo un todo compacto de cobre. Se solidifica en conjunto de forma muy rápida, ya que el calor es absorbido por el molde de grafito que alcanza una alta temperatura. De esta forma, a los diez segundos de producida la reacción ya se puede abrir el molde, con la ayuda de las tenazas naturalmente.

Encima de la soldadura aparece una porción de escoria, de color grisáceo y aspecto diferente a la soldadura de cobre, que se mantiene al rojo durante más tiempo. Esta la escoria de la soldadura se desprende con un simple golpe, aunque no es necesario ni siquiera retirarla.

Tipos de soldadura aluminotérmica.

El número de soldaduras distintas que se pueden realizar es muy grande, pudiendo conseguir cualquier tipo de empalme con este sistema. Los moldes que se comercializan de forma más usual permiten realizar los siguiente tipos de soldaduras:

- ❑ Conexión horizontal,
- ❑ Conexión en T,
- ❑ Cable pasante con superficie horizontal,
- ❑ Cable terminal con superficie vertical,
- ❑ Cable terminal con pletina horizontal,
- ❑ Terminal cable horizontal con pletina horizontal,
- ❑ Cable terminal horizontal con pica vertical, y
- ❑ Cable pasante horizontal con pica vertical.

La necesidad de disponer de un tipo de molde para cada sección de conductor, pletina, etcétera, es un inconveniente. La normalización

de las secciones de los conductores que se usan en las mallas de tierra reducen en gran medida este problema.

FIGURA A-1. TIPOS DE SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA MÁS USUALES.

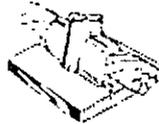
Conexión horizontal



Conexión horizontal T



Cable pasante horizontal
con superficie horizontal
(plano o tubo)



Cable hacia abajo 45°
con superficie vertical



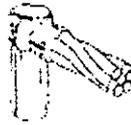
Cable horizontal con
Pletina horizontal



Cable horizontal con
superficie horizontal
(plano o tubo)



Cable horizontal
con pica vertical



Cable pasante
horizontal con
pica vertical



CONCLUSIONES.

Se puede resumir que la instalación de puesta a tierra es un circuito de protección, no solo para el sistema eléctrico en donde se instale, sino también para las personas que laboren en esas instalaciones e incluso ajenas a éstas.

El desarrollo de la puesta a tierra no es muy complejo y solo requiere de un poco de tiempo para analizar el terreno, así como los elementos que podemos aplicar, auxiliándonos de las tablas que por norma llenan los requisitos, e incluso podemos dar un rango más grande de seguridad, al aplicar los procedimientos de calculo que para cada arreglo se expone.

Anexamos a los términos de seguridad el que nuestro sistema de protección (sistema de tierra) tenga las condiciones de continuidad más que seguras. Si analizamos la unión mecánica (referido a este tema) nos encontraremos que se necesitan realizar cálculos para evitar la ruptura en ese punto de unión, que se necesitará conocer en donde se encuentran dichas uniones para revisiones posteriores, sin embargo, con la soldadura aluminotérmica, este tipo de percances pueden desaparecer, situación ventajosa en caso de que el sistema de tierra se encuentre bajo los cimientos de una construcción.

BIBLIOGRAFÍA

Instalaciones de puesta a tierra,
Vittorio Re,
Marcombo.

Instalaciones eléctricas industriales,
Pedro Camarena M.,
C. E. C. S. A.

Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas,
José C. Toledano,
Juan J. Martínez Requena,
Paraninfo.

Curso de puesta a tierra,
A.D.A.E.,
Paraninfo.

Grounding and Shielding in facilities,
Ralph Morrison,
Warren H. Lewis,
John Willey & sons.

La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT,
Rogelio García Márquez,
Marcombo.

Protección contra sobre tensiones de instalaciones de baja tensión,
Peter Hasse,
Paraninfo.

IEEE.
Standard 80-1986. Guide for safety in substation Grounding.

IEEE.

Standard 141-1976. Electric power distribution for industrial plants.

IEEE.

Standard 142-1982. Grounding of industrial power systems.

NOM-001-SE-1999.

Instalaciones eléctricas (utilización).

PEMEX. Norma

3.223.01 Instalación de sistemas de conexión a tierra.