

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



PRÁCTICAS Y USO DE PUESTAS A TIERRA EN REDES ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN; MEJORAMIENTO DE LAS PUESTAS A TIERRA - TRATAMIENTO MEDIANTE INSUMOS QUIMICOS

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELÉCTRICISTA

PRESENTADO POR:

EFRAIN ISIDRO TARAZONA TINOCO

**PROMOCIÓN
1993 - I**

**LIMA – PERÚ
2008**

**PRÁCTICAS Y USO DE PUESTAS A TIERRA EN REDES
ELÉCTRICAS DE BAJA TENSIÓN; MEJORAMIENTO DE
LAS PUESTAS A TIERRA - TRATAMIENTO MEDIANTE
INSUMOS QUIMICOS**

**Gratitud inmensa a familiares
y amigos que durante éste tiempo
confiaron en mi y me acompañaron en
los momentos que más los necesitaba.**

Especialmente:

A mi padre: Ángel,

**...aunque no estés físicamente con
nosotros, seguramente estarás
también celebrando este hito.**

**A mis madres: Angélica y Asunción,
Por sus consejos y gran corazón.**

A mi esposa: Norith,

Por su paciente espera.

A mis hijos: Ángel y Álvaro

Quienes son fuerza y motor en mi vida.

**A mis hermanos: Antonio, Gladis,
Jhon, Wilmer, Marina y Cesar,**

**Por apoyarme permanentemente
fortaleciendo el perfil de unidad familiar;
sobretudo a que éste proyecto
se concretara.**

SUMARIO

Apoyándome en las Reglas de Código Nacional de Electricidad y en normas de estándares Nacionales e Internacionales, el objetivo principal en éste informe es el de presentar información actualizada respecto de los sistemas de Puesta a Tierra en Baja Tensión, así como sugerir métodos o procedimientos adecuados en la instalación de Puestas a Tierra puntuales en zonas urbanas.

Dentro de éste contexto el objetivo específico será realizar un análisis a sus elementos componentes y la conveniencia o inconveniencia de aplicar técnicas existentes de tratamiento de suelos para la disminución de su carácter resistivo; todo esto con la intención de conseguir en el diseño valores de resistencia de puesta a tierra menores o iguales que la mínima de 25Ω ; establecidas según el Código Nacional de Electricidad.

Para ello el informe empieza con una introducción, tocando aspectos como el de la importancia de la protección y seguridad de personas y equipos, la normatividad existente en las Puestas a Tierra y el análisis de variables eléctricas durante un contacto accidental.

El análisis de ingeniería será planteado, en el fundamento analítico para las medidas de Resistencia y Resistividad; en técnicas para conseguir un mejoramiento en la disminución de la resistencia de Puestas a Tierra mediante modelamientos o configuración de electrodos; en el estudio de los diversos factores que influyen en las resistividad de los suelos y en la importancia del conocimiento del potencial propio y el pH de los elementos metálicos y rellenos usados para el tratamiento de suelos.

Teniendo presente además efectos como la corrosión se buscara concluir finalmente en el insumo químico conveniente a adicionar.

ÍNDICE

	Pag
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	3
1.1 Protección Eléctrica de sistemas y equipos eléctricos.	3
1.1.1 Importancia de la Protección Eléctrica	3
1.1.2 Solicitaciones que Obligan a Proteger	4
1.1.3 Equipos y/o dispositivos de protección eléctrica	4
1.1.4 Protección de personas que hacen uso de la energía eléctrica	4
1.2 Normatividad y marcos legales.	4
1.2.1 Organismos relacionados con la normatividad y reglamentación del sistema eléctrico en el Perú.	5
1.2.2 Normas y/o reglamentos referidos a los sistemas de puesta a tierra	5
1.3 Esquemas de conexonado.	7
1.3.1 Necesidad de conectar a tierra los equipos	7
1.3.2 Configuración de esquemas de conexión a tierra (ECT); recomendadas por la CEI	7
1.3.3 Riesgos durante fallas en sistemas en baja tensión	11
1.3.4 Recorrido de la corriente de falla en sistemas típicos	12
1.4 La Seguridad Eléctrica	13
1.4.1 Finalidad de los sistemas de PAT	13
1.4.2 Seguridad eléctrica en las personas	14
1.4.3 Efectos fisiológicos durante un contacto eléctrico accidental	15
1.4.4 Análisis de las variables eléctricas en una persona durante un contacto eléctrico accidental	15
CAPITULO II	
FUNDAMENTO FISICO DE LAS PUESTAS A TIERRA EN BAJA TENSIÓN	24
2.1 Sistemas de puestas a tierra en zonas urbanas	24
2.2. Fundamento analítico para las medidas de resistencia y resistividades	25
2.2.1 Proceso de conducción eléctrica del suelo.	25

2.2.2	Criterios básicos y consideraciones para su modelamiento	26
2.3.	Valor de la resistencia de puesta a tierra en un recinto	30
2.4	Modelos típicos de electrodos de puesta a tierra.	31
2.4.1	Electrodo puntual semiesférico de radio "r"	31
2.4.2	Varilla enterrada verticalmente a ras de la superficie	31
2.4.3	Varilla vertical enterrada a una profundidad "t".	32
2.4.4	Electrodos horizontales.	33
2.4.5	Configuraciones de electrodos dispuestos en forma horizontal	33
2.4.6	Resistencia aproximada de una red mallada.	34
2.5	Conclusiones acerca de las configuraciones propuestas	35
2.6	Técnicas de reducción de la resistencia puesta tierra	35
2.6.1	Variando las dimensiones de los electrodos	35
2.6.2	Aumento de distancia entre ejes de los electrodos en paralelo	37
2.6.3	Varillas en paralelo (electrodos múltiples)	37
2.6.4	Saturación debido al número de electrodos	38
2.6.5	Mejoramiento con electrodos auxiliares.	39
2.6.6	Resumen de las formas de optimización de las configuraciones propuestas.	39

CAPITULO III

MEDICION DE RESISTIVIDADES Y DE RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA	41
3.1 Instrumentos de medida de resistividad y de resistencia	41
3.1.1 Telurómetro:	41
3.1.2. Geómetros.	41
3.1.3 Recomendaciones para el uso de instrumentos de medición	42
3.2 Medición de las resistividades	42
3.2.1 Objetivos	42
3.2.2 Métodos de medida de la resistividad	43
3.2.3 Selección del método para medida de resistividad	47
3.2.4 Procesamiento de la resistividad aparente	47
3.3 Medición de las resistencias de puesta a tierra.	48
3.3.1 Esquemas de las resistencias de puestas a tierra	48
3.3.2 Métodos tradicionales para la medición de resistencia de un sistema de Puesta a Tierra	49
3.3.3 Recomendaciones finales	57

CAPITULO: IV

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	60
4.1 Electrodo de puesta a tierra	60
4.1.1 Electrodo reglamentado por el CNE	60
4.1.2 Modelos de electrodos no reglamentados por el CNE	61
4.1.3. Electrodo artificial:	61
4.1.4 Metales usados en los Electrodo artificial	65
4.1.5 Electrodo artificial comercial	65
4.1.6 Electrodo no convencional	71
4.1.7 Dimensiones mínimas de los electrodos de puesta a tierra, tomados de otros estándares	75
4.2 Conductores de conexión a la puesta a tierra	75
4.2.1 Efectos adicionales de la corriente de falla sobre un electrodo	75
4.2.2 Conductores del electrodo de puesta a tierra.	75
4.2.3 Conductores de protección.	76
4.3 Conectores de puesta a tierra	78
4.3.1 Aspectos a tener en cuenta en la elección del conector	78
4.3.2 Tipos de conectores	80
4.3.3 Capacidad de transporte de corriente de falla	83

CAPITULO V

TRATAMIENTO DEL SUELO Y CORROSION EN PUESTAS A TIERRA	84
5.1. Acerca de la resistividad del suelo	84
5.1.1. Composición química de la tierra	84
5.1.2 Propiedades electromagnéticas de los suelos.	85
5.1.3 Factores que influyen en la resistividad de suelos.	85
5.1.4 Características de la resistividad del suelo peruano.	90
5.2 Tratamiento del suelo	91
5.2.1 Reducción de la resistividad del suelo	92
5.2.3 Consideraciones para el tratamiento químico del suelo	93
5.2.4 Sustancias usadas para el tratamiento del suelos	94
5.2.5 Descripción de sustancias usadas como rellenos	95
5.3 Influencia de la corrosión en las puestas a tierra.	114
5.3.1 Generalidades sobre la corrosión.	114
5.3.2 Explicación del fenómeno	114
5.3.3 Corrosión en los electrodos de puesta a tierra	116

5.3.4	Potenciales propios de los metales.	116
5.3.5	Velocidad de corrosión	117
5.3.6	Agresividad del electrolito.	119
5.3.7	corrosión de los metales en aterramientos	119
5.3.8	Corrosión bacteriana	120
5.3.9	Los suelos y la corrosión	121
5.3.10	Causas que originan corrosión en las puestas a tierra	122
5.3.11	Protección catódica.	123
5.3.12	Sugerencias respecto del efecto de corrosión	126

CAPITULO VI

DISEÑO EJECUCIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA

DE PUESTA A TIERRA BASICA		127
6.1	Diseño de la puesta a tierra.	127
6.1.1	Determinación de la resistividad del suelo.	128
6.1.2	Elementos de una puesta a tierra	128
6.1.3	Elección de la forma en que irá instalado electrodo	129
6.1.4	Selección del electrodo.	129
6.1.5	Estimación del presupuesto.	130
6.2	Ejecución de la puesta a tierra	130
6.2.1	Instalación de la puesta a tierra	130
6.2.2	Medición de la resistencia de puesta a tierra	131
6.3	Mantenimiento de las puestas a tierra	131
6.3.1	Inspección de las puestas a tierra	132
6.3.2	Evaluación del sistema de puesta a tierra	133
6.3.3	Conservación de la puesta a tierra	134
6.3.4	Renovación de la puesta a tierra	134

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES 135

ANEXOS	139
ANEXO A	140
ANEXO B	144
ANEXO C	146
ANEXO D	148
ANEXO E	153
ANEXO F	161

BIBLIOGRAFÍA 165

INTRODUCCION

Hablar de un sistema de Puesta a tierra (PAT), consiste en describir uno de los elementos prácticos de seguridad y protección tanto para el sistema eléctrico, como para el usuario de la Energía Eléctrica.

El diseño de una PAT consiste en conseguir el valor de una Resistencia objetivo para la dispersión de corriente; no es como se piensa, que se trate sólo de enterrar una varilla conductora para cumplir con las Normas y/o reglamentos; dado que una PAT mal diseñada puede tener consecuencia nefastas en las personas que hacen uso de la energía eléctrica; desde lesiones en el cuerpo, hasta incluso la muerte, aparte de daños costosos e irreparables en los equipos e instalaciones. El error que se cometa en un sistema de puesta a tierra representa un riesgo de la seguridad industrial.

En la actualidad muchos profesionales dedicados al rubro de las instalaciones eléctricas, sobre todo proyectistas que realizan el diseño de la puesta a tierra, sólo repiten las técnicas tradicionales y no desarrollan sus capacidades tampoco tienen en cuenta que cada diseño de PAT presenta sus propias particularidades.

El tratamiento del suelo para la mejora de su conductividad, se ha convertido en un tema comercial; pero el nivel de dificultad, se presenta debido a que hasta en el Código Nacional de Electricidad (CNE), sólo se da una información somera, a pesar de que estadísticamente se sabe que en las PAT, mínimamente se ha adicionado alguna sal. La información pública respecto a éste tema es escasa; normalmente se encuentra en datos de fabricantes de dichos insumos, esporádicas publicaciones de especialistas, en algunos textos y en recomendaciones de proyectistas o ingenieros que tienen experiencia en trabajos de campo.

Justamente esto último y mi relativa experiencia en trabajos de PAT es lo que me motiva a plasmar éste informe, para lo cual he seleccionado información actualizada de diversos medios: manuales, textos, Internet, etc; luego realizar el análisis de ingeniería en base a los diversos aspectos que involucran el diseño de una puesta a tierra; centrandome en nuestro tema específico: el uso de rellenos para la disminución de la resistencia de PAT.

Espero por tanto contribuir a la mejor comprensión del tema tratado y como consecuencia de ello a la mejora de las instalaciones de PAT; aún cuando entre las

limitaciones del informe está el no haber realizado por cuestiones de tiempo, una comprobación experimental de las diversas técnicas procedimentales.

El desarrollo de este informe se ha efectuado en los capítulos que se indican:

Capítulo I: A modo de introducción se describe algunos dispositivos de protección eléctrica, tanto para el sistema como para los equipos; necesario para entender donde ubicaríamos a los sistemas de puestas a tierra, como elemento efectivo de seguridad. También se indica bajo que Normas y/o reglamentos se sustentan los sistemas de PAT; asimismo el tema de la seguridad eléctrica, indicando los niveles de tensión y corriente admisibles para una persona.

Capítulo II: Se realiza una introducción a las puestas a tierra en zonas urbanas y en baja tensión; luego se busca precisar cual es el fundamento físico para las mediciones de la Resistividad del suelo, tensiones de toque y Paso y Resistencia de dispersión; asimismo se aborda el cálculo de sus Resistencias teóricas y las posibilidades de optimizarlas a partir de estos resultados.

Capítulo III: Nuestro trabajo se centra en las técnicas de medición tanto de resistividades de terreno, como de la Resistencia de PAT.

Capítulo IV. En este capítulo hacemos una descripción acerca de las componentes principales de un sistema de PAT básica: electrodos, conductores de conexión y los conectores. Asimismo analizamos de qué manera es posible tomar la mejor decisión, para su implementación en base a criterios técnicos y las características de sus componentes

Capítulo V: En este capítulo se describe las características del suelo y como es posible realizar su tratamiento para la mejora de su conductividad; también se hace un análisis técnico usando variada información para realizar estos procedimientos; mencionando en forma breve acerca del fenómeno de la corrosión en las electrodos de PAT y/o conectores

Capítulo VI: En esta parte describimos la forma como se realiza el diseño ejecución y el mantenimiento de una PAT puntual en baja tensión en una zona urbana.

Finalmente, quiero agradecer de modo particular el apoyo incondicional de los ingenieros Carlos Huayllasco M. y Justo Yanque M. por sus observaciones durante el desarrollo de este informe.

CAPITULO I

INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

1.1 PROTECCION ELECTRICA DE SISTEMAS Y EQUIPOS ELECTRICOS.

1.1.1 IMPORTANCIA DE LA PROTECCION ELECTRICA

Un sistema eléctrico es susceptible a fallas; estos pueden deberse a diversos factores, desde las que se cometen por errores humanos involuntarios, hasta las ocasionadas por factores externos naturales o intencionales.

La respuesta a una posibilidad de falla en el sistema eléctrico es la protección que puede ser al sistema o a los elementos del sistema eléctrico.

En general los sistemas de protección deben cumplir requisitos básicos como:

- Confiabilidad
- Selectividad
- Estabilidad
- Seguridad
- Sensibilidad
- Velocidad de operación

La protección a la cual nos referimos es para elementos materiales; sin embargo también es menester proteger a las personas. Es en este punto en el cual las puestas a tierra toman relevancia, como elementos de seguridad

- **Protección de un sistema eléctrico**

La protección de un sistema eléctrico consiste en la protección a la red eléctrica en su conjunto; para ello se dispone de componentes o sistemas de protección; en este aspecto por ejemplo los elementos de desconexión o relés cumplen una función importante

- **Protección de un equipo eléctrico**

La protección a un equipo eléctrico, consistirá en la protección a los componentes individuales de un sistema eléctrico. Los requisitos de los dispositivos de protección son los mismos descritos anteriormente pero cada elemento tiene una función individualizada.

- Protección del transformador
- Protección de salas de computo o centros de control, etc
- Protección de los equipos eléctricos diversos

- o Protección de los equipos electrónicos

1.1.2 SOLICITACIONES QUE OBLIGAN A PROTEGER

El sistema eléctrico o sus componentes pueden sufrir daños de diversa índole (mecánicos, térmicos, electromagnéticos, eléctricos, etc.) en relación a la protección eléctrica, los daños a que nos referimos ocurren cuando determinada magnitud física ha sido alterada. Hablamos entonces de:

- Protección contra sobre-corriente.
- Protección contra sobre-tensiones
- Protección contra sobre-carga
- Protección contra corrientes impulsionales
- Protección contra descargas atmosféricas
- Protección contra acumulación de carga estática
- Protección contra descargas inversas, etc

1.1.3 EQUIPOS Y/O DISPOSITIVOS DE PROTECCION ELECTRICA.

En la practica existen variados elementos y/o equipos de protección, puede decirse que éstos se incorporan al sistema eléctrico para proteger todo el conjunto o parte con funciones específicas, entendiéndose además que un equipo de protección forma parte de todo un sistema de protección.

Entre los elementos de protección comunes, están los:

- relés
- pararrayos
- Apartarrayos
- Trampas de onda
- limitadores de sobretensiones
- Jaulas de Faraday.
- Puestas a Tierra, etc.

1.1.4 PROTECCION DE PERSONAS QUE HACEN USO DE LA ENERGIA ELECTRICA

Como se describe líneas arriba, es posible proteger al sistema o los equipos eléctricos. Sin embargo: ¿Qué medidas de seguridad pueden asumirse, para proteger a las personas de los peligros que podría derivarse, frente al uso de la energía eléctrica?

Pues bien, existen muchas formas, una de ellas (motivo del informe); sería instalando sistemas de Puestas a Tierra.

1.2 NORMATIVIDAD Y MARCOS LEGALES.

Existen diferencias conceptuales entre una Norma y un Reglamento Técnico (Anexo A; Cuadro I); la principal es que la primera es voluntaria y la segunda obligatoria.

La tendencia actual en el mundo respecto a las Normas, es mantener estándares uniformes; el Cuadro II del anexo A nos sugiere un orden de prioridades respecto de las mismas [6]. Respecto de los sistemas de puesta tierra, la mayoría de países ha adoptado como cuestión obligatoria su instalación.

El CNE se basa en el NEC, código Americano y otros estándares.

1.2.1 ORGANISMOS RELACIONADOS CON LA NORMATIVIDAD Y REGLAMENTACION DEL SISTEMA ELECTRICO EN EL PERU.

Los sistemas de PAT, están reglamentados en el Perú; asimismo existen Normas y/o reglamentos tanto nacional como internacional que indican la necesidad de su instalación, tal como lo hacen el CNE-Suministro (2001-08-06) y el CNE- Utilización (30-01-2006), de uso obligatorio en todo el Perú para todo proyecto, ejecución, operación o mantenimiento eléctrico; Asimismo los organismos siguientes, consideran el uso de puestas a tierra y tienen relación con proyectos de ejecución o supervisión de puestas a tierra:

- Dirección general de electricidad (DGE).
- Organismo supervisor de la energía (OSINERG).
- Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI).
- Sistema Nacional de Defensa Civil (SINADECI).

1.2.2 NORMAS Y/O REGLAMENTOS REFERIDOS A LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

A. Disposiciones nacionales.

- **Código nacional de electricidad (CNE)**

El CNE no debe ser concebido como un compendio de especificaciones para proyectos, ni manual de instrucciones; sino para hacer cumplir las reglas en el sector eléctrico. Dependiendo de su aplicación, aspectos referidos a los sistemas de PAT, se pueden encontrar en casi todas sus secciones, específicamente en:

- **CNE – suministro:** En las generalidades; sección 3 : Métodos de puesta a tierra para instalaciones de suministro y comunicaciones.
- **CNE – utilización:** En la sección 60; puesta a tierra y enlace equipotencial.
- **Reglamento nacional de edificaciones (RNE)**

- **Reglamento técnico sobre conductores y cables eléctricos de consumo masivo y uso general.**
- **Procedimientos para la supervisión de la seguridad de las instalaciones eléctricas en servicios públicos.**
- **Normas técnicas peruanas.**

En proyectos eléctricos, las Normas indican desde la manera como se deben hacer las representaciones graficas, hasta especificar las formas de montaje y prueba a que deben someterse los equipos.

- NTP 370.052: 1999 SEGURIDAD ELÉCTRICA: Materiales que constituyen el pozo de puesta a tierra
- NTP 370.053: 1999 SEGURIDAD ELÉCTRICA: Elección de los materiales eléctricos en las instalaciones interiores para la puesta a tierra. Conductores de protección de cobre.
- NTP 370.054: 1999 SEGURIDAD ELÉCTRICA: Enchufes y tomacorrientes con protección a tierra para uso domestico y general similar.
- NTP 370.055: 1999 SEGURIDAD ELÉCTRICA: Glosario de términos sobre sistemas de puesta a tierra.
- NTP 370.056: 1999 SEGURIDAD ELÉCTRICA: Electrodo de cobre para puesta a tierra

B. Estándares internacionales

Cada país posee sus propias Normas, desarrolladas de acuerdo a sus necesidades y experiencias acumuladas por los especialistas; sin embargo a nivel internacional se toman como referencias las emitidas por ciertos organismos de normalización y/o reglamentación reconocidos y de prestigio, entre ellas :

- National Electrical Code (NEC)
- American National Standards Institute (ANSI)
- National Electrical Manufacturers Association (NEMA)
- Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica (CENELEC)
- Union Technique d'Electricité (UTE)
- Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)

1.3 ESQUEMAS DE CONEXIONADO

1.3.1 NECESIDAD DE CONECTAR A TIERRA LOS EQUIPOS

El uso masivo de la energía eléctrica se inicia prácticamente en 1900. A la fecha las Normas de instalación eléctrica están muy desarrolladas y tratan todos los aspectos importantes para la realización de una instalación correcta.

En BT, una Norma de referencia es la de la CEI 60364, y el reglamento en baja tensión del CNE. Los objetivos son siempre los mismos:

- fijar el potencial de los conductores activos respecto a la tierra, en funcionamiento Normal.
- limitar la tensión entre las masas de los materiales eléctricos y tierra, en caso de defecto de aislamiento.
- instalar dispositivos de protección que eliminen el riesgo de electrización, incluso de electrocución de las personas.
- limitar los incrementos de potencial debidos a los defectos de origen en Media Tensión.

1.3.2 CONFIGURACIÓN DE ESQUEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA (ECT); RECOMENDADAS POR LA CEI

La Norma CEI 60364 establece tres ECT estandarizados; éstas están referidos a:

- Las formas de conexión a Tierra del Secundario del Transformador en el lado de la fuente MT/BT.
- La forma de conectar las masas de las cargas a Tierra, por intermedio del Neutro del sistema.

Todos estos esquemas, buscan por igual prevenir la seguridad de las personas y sus eventuales ventajas y desventajas dependen del uso particular que se le da a la electricidad.

La denominación se realiza con un código de dos o más letras; en el cual:

Primera letra: Referida a la Conexión del Neutro de la fuente con respecto a Tierra (Puesta a Tierra).

T = Neutro conectado directamente a Tierra.

I = Neutro aislado de Tierra.

Segunda letra: Se refiere a la situación de las masas de la instalación receptora con respecto a tierra.

T = Masas conectadas directamente a tierra,

N = Masas conectadas directamente al punto de la alimentación puesto a tierra (en corriente alterna, este punto es normalmente el punto neutro).

Otras letras (eventuales): Se refieren a la situación relativa del conductor neutro y del conductor de protección.

S = Las funciones de neutro y de protección, aseguradas por conductores separados.

C = Las funciones de neutro y de protección, combinadas en un solo conductor. (Conductor CPN).

A. El esquema TT

La forma de conexión se indica en la figura: 1.1; donde:

- El neutro del transformador está puesto a tierra.
- Las masas de los receptores eléctricos también están conectadas a una toma de tierra.

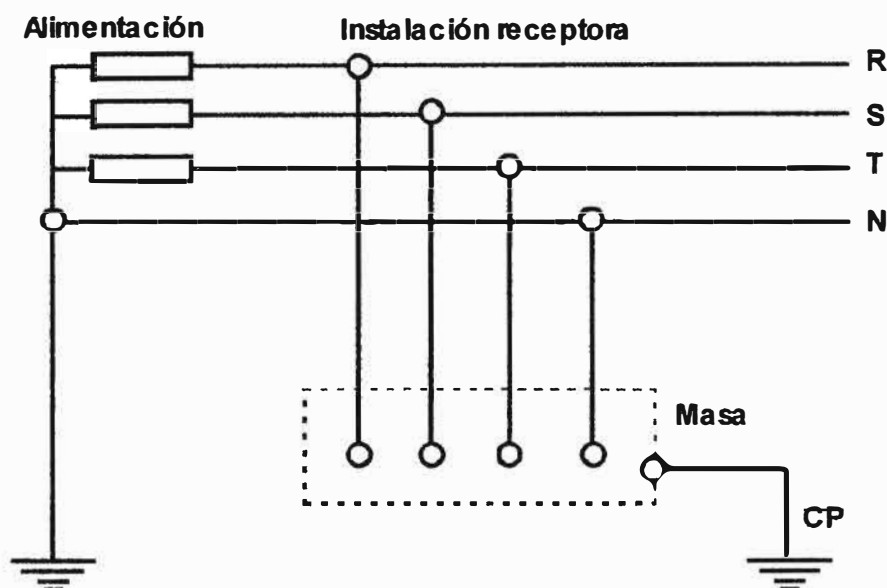


Figura: 1.1 Esquema TT

Ocurrida una falla, ésta es limitada por las Resistencias del Circuito hacia tierra; como esta es muy pequeña, asumimos tiene valor nulo; luego la corriente de falla solo dependerá de las Resistencias de Puesta a Tierra de la Fuente y de la Protección de las masas, produciendo una Tensión proporcional a la Resistencia de Puesta a Tierra de Protección ($<10 \Omega$), con una magnitud del orden del 50% de la Tensión nominal Fase-Tierra que será peligrosa.

La recomendación para asegurar una desconexión automática de la zona afectada es instalando un Interruptor Diferencial Residual (DDR); asimismo, aguas abajo también podrán utilizarse Interruptores Diferenciales Residuales.

B. El esquema IT

En este caso la conexión será como muestra la figura 1.2; es decir:

- El neutro del transformador no está conectado a tierra. Teóricamente está aislado; de hecho, está conectado a tierra por las capacidades parásitas de la red y/o por una impedancia de alto valor aproximadamente 1 500 ohmios (Neutro Impedante).
- Las masas de los receptores eléctricos están conectadas a tierra.

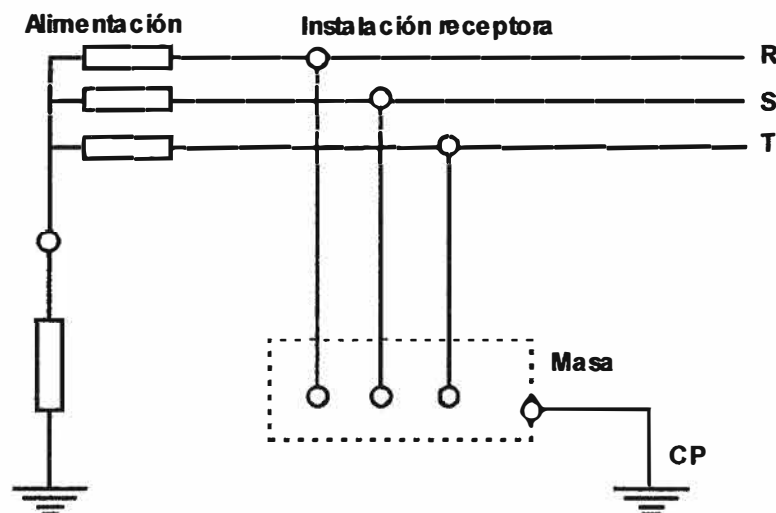


Figura 1.2 Esquema IT

Las fallas estando el Neutro aislado, dan bajas corrientes de falla dependientes de la Resistencia de contacto, originando también bajas Tensiones de Falla que pueden variar según que el Neutro sea distribuido o no; en ambos casos no resultan peligrosas.

Las fallas a través del Neutro Impedante se calculan con Impedancias 50% por debajo de la Impedancia de Fuga (con Neutro Aislado), lo cual permite obtener Tensiones de Falla débiles y por lo tanto no peligrosas.

Según lo cual, la instalación puede mantenerse en servicio, aún con una falla Fase-Tierra, debiendo estar advertidos de ello por un Controlador Permanente de Aislamiento (CPA)

C. El esquema TN

Este tipo de esquema presenta:

- El neutro del transformador puesto a tierra.
- Las masas de los receptores eléctricos conectadas al neutro

Se distinguen tres tipos de esquemas TN según la disposición relativa del conductor neutro y del conductor de protección:

a. **Esquema TN-S:** En el que el conductor neutro y el de protección están separados como en el esquema siguiente: (Figura 1.3)

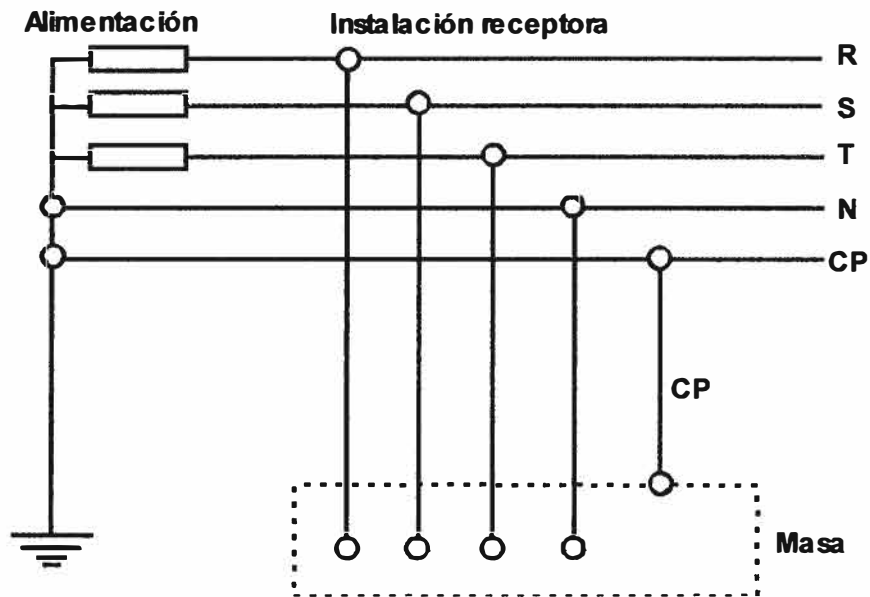


Figura: 1.3. Esquema de distribución tipo TN-S

b. **Esquema TN-C:** En el que las funciones de neutro y protección están combinados en un sólo conductor en todo el esquema (figura 1.4).

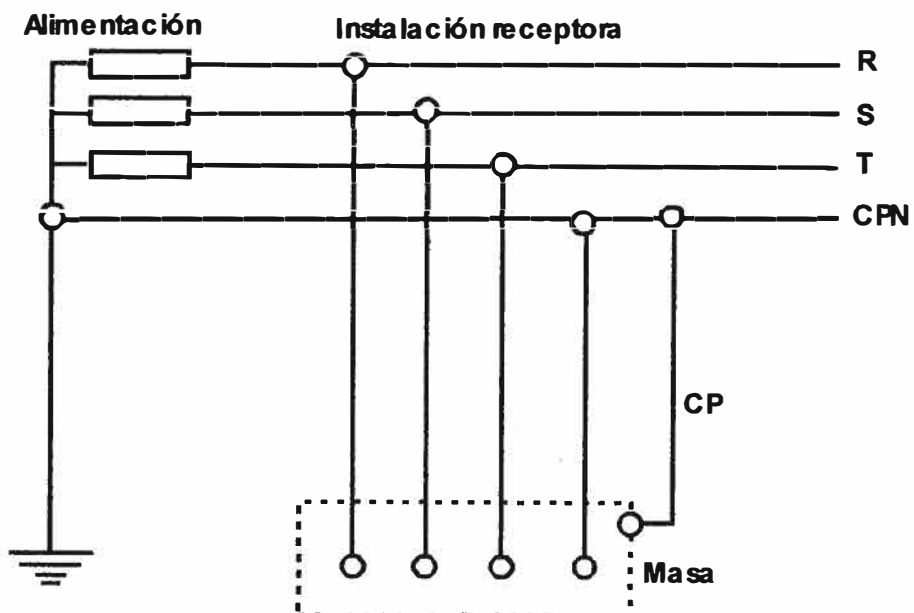


Figura 1.4 Esquema de distribución tipo TN-C

c. **Esquema TN-C-S:** En el que las funciones de neutro y protección están combinadas en un solo conductor en una parte del esquema (figura 1.5).

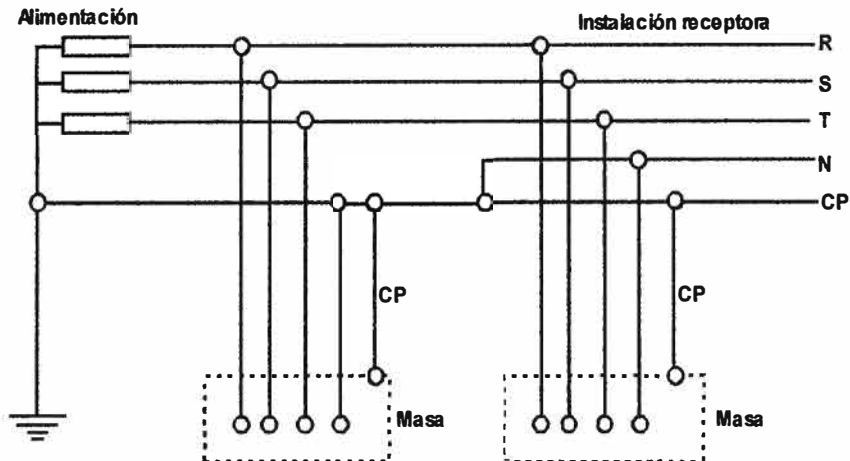


Figura 1.5. Esquema de distribución tipo TN-C-S

En los esquemas TN cualquier intensidad de defecto franco fase-masa es una intensidad de cortocircuito. El bucle de defecto está constituido exclusivamente por elementos conductores metálicos; en cuyo caso, hay que provocar el disparo de los dispositivos de protección contra cortocircuitos (DPCC) para protegerse.

1.3.3 RIESGO DURANTE FALLAS EN SISTEMAS EN BAJA TENSION

Cuando ocurren fallas y la persona hace contacto con alguna parte energizada, los riesgos son mayores cuando el equipo no cuenta con una PAT.

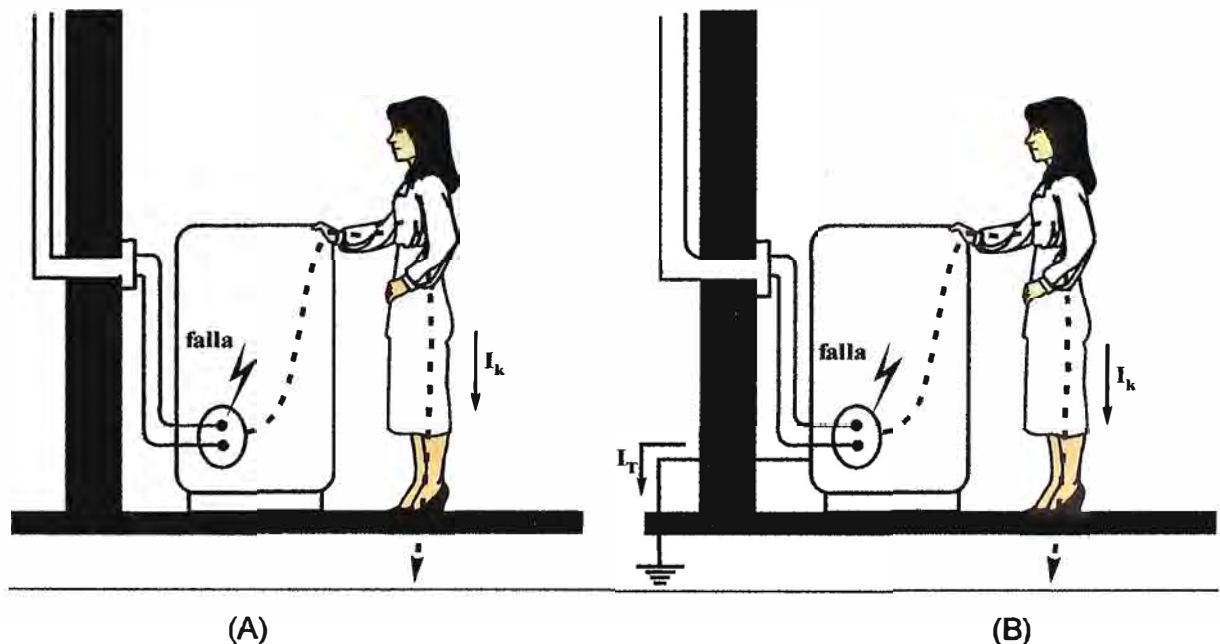


Fig. 1.6: recorrido de la corriente cuando el equipo: A) No tiene PAT; B) Tiene PAT

Esto porque cuando el equipo no está provisto de una puesta a tierra como puede verse en la figura 1.6(A); la corriente de falla pasa casi en su totalidad por la persona, ingresa al suelo para cerrar el circuito aún cuando el sistema tenga su neutro aislado. En caso el equipo cuente con una puesta a tierra, como en la figura 1.6 (B); la corriente de falla derivará, una parte por la puesta a tierra y otra mucho menor que ella por la persona, obviamente si la resistencia de puesta a tierra, está diseñada adecuadamente.

1.3.4 RECORRIDO DE LA CORRIENTE DE FALLA EN SISTEMAS TIPICOS

A. Sistema 220v con neutro aislado

Las tensiones de los alimentadores (V_n) están indirectamente referidas al potencial de tierra ($V = 0$) a través de las capacitancias parásitas (retorno de pequeñas corrientes). De modo, cuando se produce una falla Fase-Tierra, a falta de PAT en el lado de la fuente, la corriente (I_f) retorna por el suelo al circuito, pasando a través de dichas capacitancias y aunque es de baja magnitud siempre será muy peligrosa.

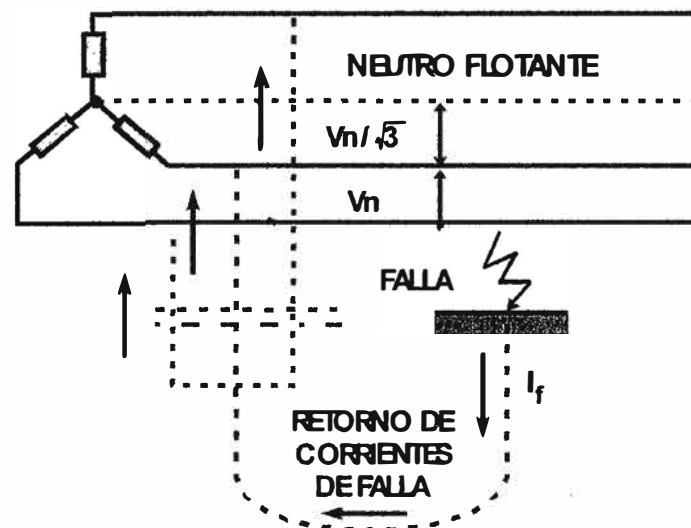


Figura 1.7. Sistema de 220V con neutro aislado

B. Sistemas 220 V con neutro puesto a Tierra.

Las tensiones (V_n) de los alimentadores están directamente referidas al potencial de Tierra ($V=0$), mediante la conexión sólida del punto Neutro (N) con la Puesta a Tierra. De ese modo cuando se produce una falla Fase -Tierra, la mayor parte de corriente (I_f) retorna por el suelo grandes corrientes directamente al punto Neutro, siendo muy peligrosa.

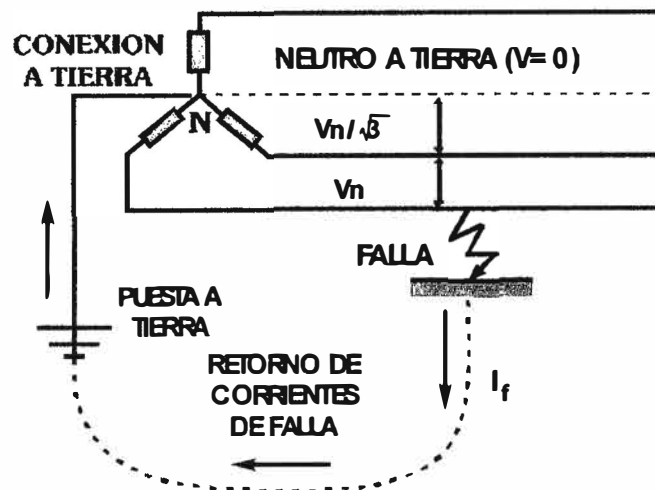


Figura 1.8 Sistemas 220 V con neutro puesto a tierra

1.4 LA SEGURIDAD ELECTRICA

El uso de la energía eléctrica suele ser susceptible a riesgos y peligros y gran parte de ellos pueden ser ocasionados por alguna falla eléctrica por lo que el tema de prevención y seguridad ofrece relevante importancia.

1.4.1 FINALIDAD DE LOS SISTEMAS DE PAT

A. Proporciona una unión sólida entre el sistema eléctrico y la tierra

Esto se consigue porque asumimos que la tierra tiene el potencial de referencia cero a la cual unimos el punto neutro y las masas, de modo que durante su funcionamiento normal o cuando ocurra una falla, esta sirva para:

- Proteger a las personas, a sufrir descarga cuando ocurre un contacto accidental ya sea por presencia de carga estática o corriente eléctrica
- Asegurar el funcionamiento del sistema propiamente y sus periféricos de protección, comunicaciones, control, etc.
- Permitir que la protección del circuito eléctrico, consiga despejar la falla apenas ésta ocurra

B. Evacua, conduce, deriva a tierra y cierra circuitos

Para que toda corriente ocasional o permanente pueda ser evacuada al suelo, asegurando la circulación de estas con una mínima Resistencia. Las corrientes en mención podrían ser:

- Corrientes impulsionales (rayo o maniobra)
- Corrientes senoidales (fallas a tierra)
- Corrientes inducidas (lazos, anillos, rayos indirectos)
- Corrientes de régimen permanente (desbalance de carga), etc

C. Control de potenciales anormales

Evitar que se produzcan tensiones peligrosas que pongan en riesgo la salud o vida de las personas, en las partes metálicas de los Equipos.

Controlando los Gradientes peligrosos que se originan durante una falla o las originadas por rayos; es decir:

- asegurar que las tensiones de toque y paso sean menores a los que puedan ser admisibles por el ser humano.
- Proteger los equipos sobre todo electrónicos que funcionan a baja tensión porque podría ocurrir una diferencia de potencial no admisible o hacer que se origine una descarga inversa de la masa a las partes energizadas.

1.4.2 SEGURIDAD ELECTRICA EN LAS PERSONAS

A. Causas de accidentes eléctricos

Muchas pueden ser las causas pero entre las más comunes encontramos:

- Falta de prevención.
- Exceso de confianza.
- Fallas técnicas.
- Fallas humanas.
- Imprudencia.
- Ignorancia, etc

B. Normas y/o reglamentos de seguridad contra accidentes eléctricos

El ministerio de energía y minas, mediante la DGE, elaboró el “Reglamento de seguridad e higiene ocupacional del subsector electricidad”, aprobándose por resolución ministerial el 21-06-2001. La cual consta de 114 Artículos, en la cual en su artículo 22 hace referencia al uso de conexiones permanentes de puestas a tierra.

C. Toques o contactos eléctricos.

Los contactos de las personas pueden ser:

- **contacto directo:**

Ocurre cuando se toca un conductor energizado de fase o neutro u otra parte conductora electrificada que está desprotegida de su aislamiento. Como la persona hace contacto directo con el suelo; éste toque es perjudicial y sumamente peligroso lo cual en la mayoría de casos provoca consecuencias funestas.

Para prevenir los contactos directos se deben alejar las partes activas de la instalación manteniéndola a una distancia imposible a un contacto accidental o evitarlos usando tensiones de servicio menores de 50V o con interruptores diferenciales residuales muy sensibles (menor de 30mA). También colocando puestas a tierra.

- **contacto indirecto.**

En este caso el contacto ocurre con una masa conductora o instalación eléctrica que presenta cierta tensión debido a fallas de aislamiento en sus conductores de fase. Dependiendo de la magnitud de la corriente sobre la persona suele denominarse fallas franca (máxima conducción de corriente) o falla amortiguada cuando hay cierta Resistencia amortiguada que limita dicha corriente.

Podría decirse a comparación del toque directo, éste tipo de toque son menos peligrosos, sin dejar de ser riesgosos porque el contacto ocurre a través de un medio que limita la corriente; sin embargo son difíciles de evitar.

Para prevenir se conecta las masas a las puestas a tierra; como también las puestas a tierra y masas, respectivamente están interconectarlas entre si.

1.4.3 EFECTOS FISIOLÓGICOS DURANTE UN CONTACTO ELÉCTRICO ACCIDENTAL

Entre los daños fisiológicos más comunes sobre el organismo de las personas tenemos:

- Paro cardiorrespiratorio o respiratorio
- Fibrilación ventricular:
- Quemaduras.
- Tetanización o contracción muscular
- Lesiones permanentes
- Lesiones secundarias
- Marca eléctrica

De los daños causados por efecto de la corriente eléctrica, la mas peligrosa es el paro cardiorrespiratorio

1.4.4 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES ELÉCTRICAS EN UNA PERSONA DURANTE UN CONTACTO ELÉCTRICO ACCIDENTAL

El desarrollo de la electricidad en el campo de la utilización trae consigo riesgos. Si queremos prevenirlos, es necesario conocer el comportamiento eléctrico al paso de la corriente eléctrica.

Durante las últimas décadas se han realizado experiencias sobre cadáveres, personas vivas y fundamentalmente sobre animales. Charles F. Dalziel realizó experimentos con animales de peso similar a las personas y sabiendo que los tejidos celulares están compuestos de agua y sal; tienen comportamiento de un cuerpo conductor la estatura, peso y eficacia del contacto influyen en el proceso. La ruta donde se encuentre el corazón (mano-mano y mano-pies) serán Resistencias más peligrosas.

Al respecto hay muchos estudios; gran parte de países han asumido la realizada por la CEI y la IEEE. La última Norma CEI 479-1:1994 ha sido mejorada por Normas de algunos países; parte de la misma describiremos en este informe.

La fibrilación ventricular es usualmente la causa esencial de los accidentes mortales, por eso es importante evitar que la persona este expuesta hasta este limite.

La gravedad de un accidente eléctrico dependerá de muchos factores: tiempo de exposición, intensidad de la corriente, tensión aplicada, naturaleza de la corriente, trayectoria de la corriente por el cuerpo humano, y Resistencia eléctrica del cuerpo, ya que unos individuos son más sensibles que otros.

A. Capacidad de aislamiento de la piel

El cuerpo humano es comparable con un conductor eléctrico. Este cuenta con un revestimiento o aislante cuya función es mantener el voltaje y los electrones dentro del conductor y separar los otros voltajes de el. También está cubierto de un material aislante: la epidermis o piel humana, del mismo modo que un aislante de un cable, la principal función es cuidar el interior del cuerpo. La piel también cumple una función de protección mecánica.

La capacidad de aislamiento de la piel es baja, si se compara con la forma aislante de un cable de 600V.

B. Impedancia del cuerpo humano

El cuerpo humano puede considerarse una impedancia, pero su valor depende de muchas variables entre ellas: la tensión, frecuencia, duración del paso de la corriente, temperatura, el grado de humedad de la piel, la superficie de contacto, la presión de contacto, la dureza de la epidermis, etc.

Las diferentes partes del cuerpo humano, tales como la piel, los músculos, la sangre, etc., presentan para la corriente eléctrica una impedancia compuesta por elementos resistivos y capacitivos.

Durante el paso de la electricidad la impedancia de nuestro cuerpo se comporta como una suma de tres impedancias en serie: [2]

- Impedancia de la piel (punto de entrada de corriente). ($Z_{P_{eni}}$)
- Impedancia interna del cuerpo humano. ($Z_{c_{eni}}$)
- Impedancia de la piel (punto salida de corriente).. ($Z_{P_{sal}}$)

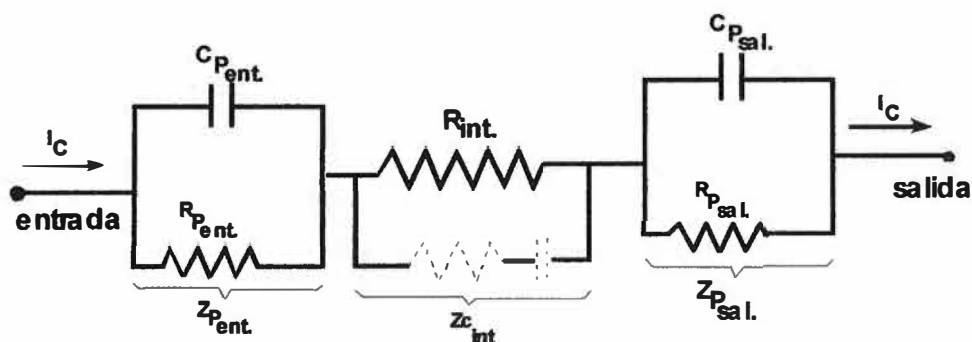


Figura 1.9 Modelo de impedancia corporal según CEI 479-84, entre los puntos de entrada y salida de la corriente eléctrica en el cuerpo humano

Hasta tensiones de contacto de 50 V en corriente alterna, la impedancia de la piel varía, incluso en un mismo individuo, dependiendo de factores externos tales como la temperatura, la humedad de la piel, etc. sin embargo, a partir de 50 V la impedancia de la piel decrece rápidamente, llegando a ser muy baja si la piel está perforada. La impedancia interna del cuerpo puede considerarse esencialmente como resistiva, con la particularidad de ser la Resistencia de los brazos y las piernas mucho mayor que la del tronco.

- **Resistencia eléctrica admisible**

Al aplicar una diferencia de potencial estacionaria y de muy bajo valor en AC o DC y a una frecuencia de 60 Hz podemos asumir que su comportamiento es resistivo. Para un intervalo tiempo de 3 segundos se puede considerar los siguientes valores:

Tabla 1.3 Resistencia eléctrica admisible según IEEE std 80-1976

Pecho a Mano (derecha)	650 Ω
Pecho a Mano (izquierda)	750 Ω
Mano izquierda a pie (s)	1.000 Ω
Mano derecha a pie (s)	1.250 Ω
Espalda a mano derecha	1.400 Ω
Otros puntos de contacto	> 1.400 Ω
Mano – mano	2.300 Ω
Mano – pie	1.100 Ω
Cuerpo	1.000 Ω

Como estimación practica, se asume una **Resistencia para el cuerpo humano de 1k Ω** .

- **Relación impedancia – frecuencia**

Normalmente, para uso doméstico e industrial se utilizan frecuencias de 60 Hz, pero cada vez es más frecuente utilizar frecuencias superiores, por ejemplo:

- 400 Hz en aeronáutica.
- 450 Hz en soldadura.
- 4.000 Hz en electroterapia.
- Hasta 1 MHz en alimentadores de potencia.

Experimentalmente se han realizado medidas de las variaciones de impedancia total del cuerpo humano con tensiones comprendidas entre 10 y 25 Voltios en corriente alterna, y variaciones de frecuencias entre 25 Hz y 20 KHz.

A partir de estos resultados se han deducido las curvas representadas en la figura 1.14, para tensiones de contacto comprendidas entre 10 y 1 000 Voltios y para un trayecto mano-mano o mano-pie.

Para tensiones de contacto de algunas decenas de voltios, la impedancia de la piel decrece proporcionalmente cuando aumenta la frecuencia. Por ejemplo, a 220 V con una frecuencia de 1.000 Hz la impedancia de la piel es ligeramente superior a la mitad de aquella a 50 Hz. Esto es debido a la influencia del efecto capacitivo de la piel.

Sin embargo, a muy altas frecuencias disminuye el riesgo de fibrilación ventricular pero prevalecen los efectos térmicos. Con fines terapéuticos, es usual, en medicina el empleo de altas frecuencias para producir un calor profundo en el organismo.

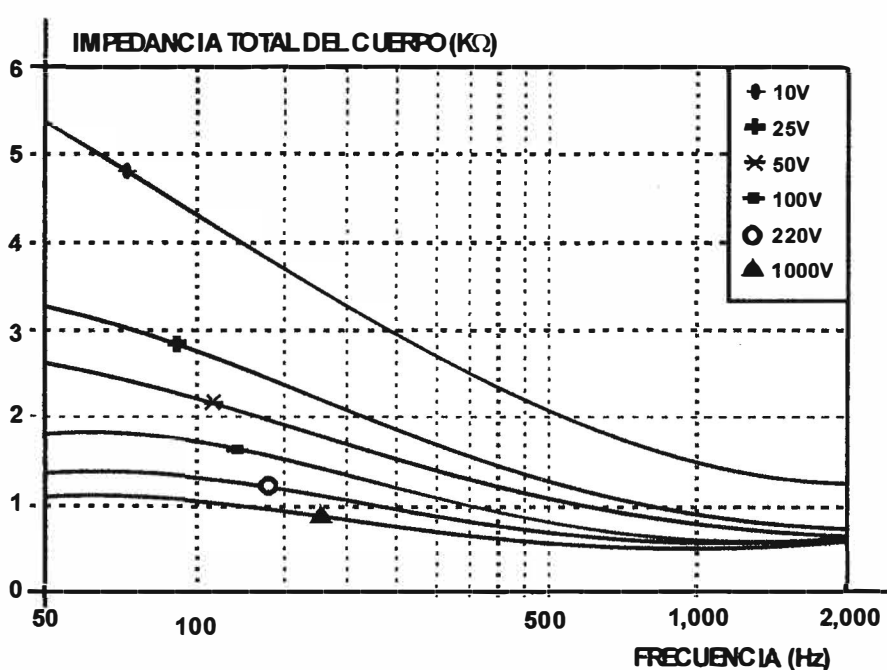


Figura 1.10 Impedancia total en función de la tensión y la frecuencia [18]

A partir de 100 000 Hz no se conocen valores experimentales que definan, ni los umbrales de no soltar ni los umbrales de fibrilación (que tocaremos en 1.4.4.3); tampoco se conoce ningún incidente, salvo las quemaduras provocadas por intensidades de «algunos amperios» y en función de la duración del paso de la corriente.

La corriente continua, en general, no es tan peligrosa como la alterna, ya que entre otras causas, es más fácil soltar los electrodos sujetos con la mano y que para duraciones de contacto superiores al período del ciclo cardiaco, el umbral de fibrilación ventricular es mucho más elevado que en corriente alterna.

C. Corriente eléctrica admisible

Es uno de los factores que más inciden en los efectos y lesiones ocasionados por el accidente eléctrico. El daño fisiológico que produce la corriente también es evaluado en función del tiempo; asimismo el tipo de corriente que circula.

En la figura 1.15 siguiente se representan los efectos de una corriente alterna ascendente con trayecto mano izquierda – pies.

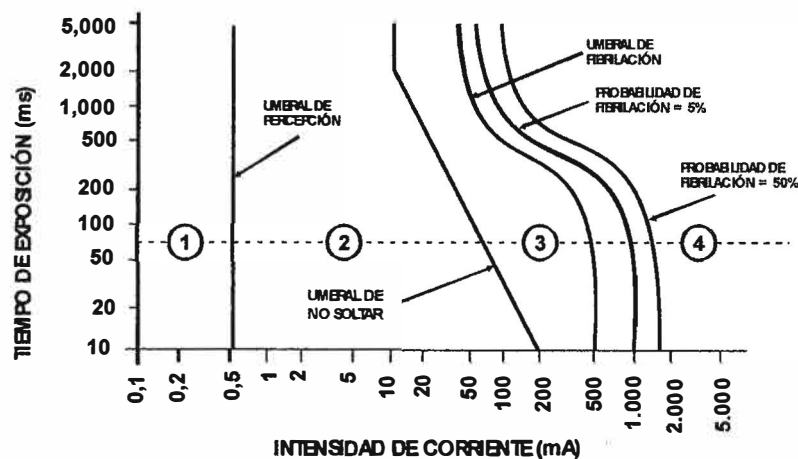


Figura 1.11 Duración del paso de la corriente por el cuerpo humano en función de la intensidad de esta corriente.

En este ábaco, tomado de la CEI 479-84 los efectos de la corriente alterna (de 15 a 100 Hz) se han dividido en cuatro zonas:

- **Zona 1:** zona de seguridad. Independiente del tiempo de contacto.
- **Zona 2:** habitualmente no se detecta ningún efecto fisiopatológico en esta zona.
- **Zonas 3 y 4:** en ellas existe riesgo para el individuo, por tanto no son zonas de seguridad. Pueden darse efectos fisiopatológicos con mayor o menor probabilidad en función de las variables intensidad y tiempo.

La tabla siguiente muestra como serian los valores de corriente para una frecuencia a 60 Hz y expuesto durante 3 segundos como máximo.

Tabla 1.4 Efectos de la corriente sobre el cuerpo durante 3s

Intensidad de Corriente (en mA)	Efectos sobre el cuerpo
hasta 1	Imperceptible para el hombre
2 a 3	Sensación de hormigueo en la zona expuesta
3 a 10	Contracción involuntaria. El sujeto generalmente consigue liberarse del contacto, de todas maneras la corriente no es mortal.
10 a 50	La corriente no es mortal si se aplica durante intervalos decrecientes a medida que aumenta su intensidad, de lo contrario los músculos de la respiración se ven afectados por calambres que pueden provocar la muerte por asfixia.
50 a 500	Corriente decididamente peligrosa en función creciente con la duración del contacto que da lugar a la fibrilación ventricular
más de 500	Decrece la posibilidad de fibrilación, pero aumenta el riesgo de muerte por parálisis de centros nerviosos y quemaduras internas.

D. Tensión admisible.

Conocida la Resistencia y corriente admisible es posible calcular la diferencia de potencial admisible. La tabla 1.5 nos indica el valor para aplicaciones temporales de una duración de 3 segundos y una frecuencia de 50- 60 Hz.

Tabla 1.5 Tensiones admisibles durante 3s

Lugar	tensión
Locales secos	50 V
Locales húmedos	24 V
Instalaciones sumergidas	12 V

La máxima tensión de contacto aplicada al ser humano que se acepta, está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la

corriente de falla, en este caso, la tensión máxima de contacto o de toque no debe superar los valores dados en la Tabla 1.6, tomados de la IEC 60364-4-44.

Tabla 1.6 Máxima tensión admisible

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible
> 2 s	50 V
750 ms	67 V
500 ms	80 V
400 ms	100 V
300 ms	125 V
200 ms	200 V
150 ms	240 V
100 ms	320 V
40 ms	500 V

E. TENSION Y CORRIENTE INSTANTANEAS

• Corriente instantánea admisible (I_k)

En base a las investigaciones realizadas por Dalziel y la IEEE, es posible definir un valor de la corriente instantánea que no cause fibrilación ventricular. Esta se define en base a sus propiedades termodinámicas, es decir con la cantidad de energía absorbida por el cuerpo humano. En el rango de tiempo de exposición a la corriente eléctrica de 0,003s a 3,0s; Dalziel estableció la relación siguiente para el 99,5% de las personas:

$$I_k^2 \times t = S_k \quad (1.1)$$

$$I_k = (S_k)^{1/2} / \sqrt{t} \quad (1.2)$$

Siendo:

I_k : valor rms de la corriente a través del cuerpo(en A)

t : tiempo de exposición a la corriente (en s)

S_k : Constante empírica relacionada al choque eléctrico tolerado por un cierto porcentaje de una población dada.

El valor de I_k sera:

$$I_k = 0,116 / \sqrt{t} \quad \text{para personas de 50kg}$$

$$I_k = 0,157 / \sqrt{t} \quad \text{para personas de 70kg}$$

- **Tensión instantánea admisible (V_k)**

La tensión instantánea se puede obtener usando la ley de Ohm a partir de la corriente instantánea anteriormente definida y la Resistencia de la persona, tomada entre dos puntos. Los conceptos de tensión de toque y paso adquieren importancia en los sistemas de media y alta tensión.

Para su cálculo se asume para los pies una superficie equivalente de un plato circular (electrodo) con un radio de 8 cm. aproximadamente y la resistencia del terreno calculada en términos de la resistividad (r_s) del terreno cerca de la superficie. Se considera aproximadamente:

Para la Resistencia de dos pies en serie (contacto de paso) igual a $6 r_s$.

Para la Resistencia de dos pies en paralelo (contacto de toque) igual a $1,5 r_s$.

Para propósitos prácticos, R_k para cada pie puede ser asumida de $3 r_s$.

- **Tensión de toque:**

Es la tensión que durante una falla puede resultar aplicada entre la mano y el pie de una persona de 50 Kg. que toque con aquella una masa o elemento metálico, normalmente sin tensión.

Siendo:

Resistencia total:

$$R_T = 1000 \Omega + 1.5 r_s \quad (1.3)$$

Entonces:

$$V_{\text{toque}} = 0.116 (1000 \Omega + 1.5 r_s) / \sqrt{t} \quad (1.4)$$

Para un suelo conformado con grava (subestaciones) tenemos que: $r_s = 3000 \Omega - m$

Reemplazando datos tenemos que:

$$V_{\text{toque}} = 638 / \sqrt{t} \quad (1.5)$$

- **Tensión de Paso:**

Es la diferencia de potencial que aparece entre los puntos distanciados un metro, sobre la superficie de la tierra.

El valor de la Resistencia total, será ahora, considerando 50kg como peso de las personas:

$$R_T = 1.000 \Omega + 6 r_s \quad (1.6)$$

Luego

$$V_{\text{paso}} = 0.116 (1000 \Omega + 6 r_s) / \sqrt{t} \quad (1.7)$$

Para un suelo natural tenemos que: $r_g = 1000 \Omega - m$

Reemplazando datos obtenemos:

$$V_{\text{paso}} = 812 / \sqrt{t} \quad (1.8)$$

La figura siguiente ha sido tomada de la Guía de seguridad eléctrica y nos ilustra con valores numéricos los valores de tensión de toque y paso que registraría una persona en un sistema de media tensión. [28]

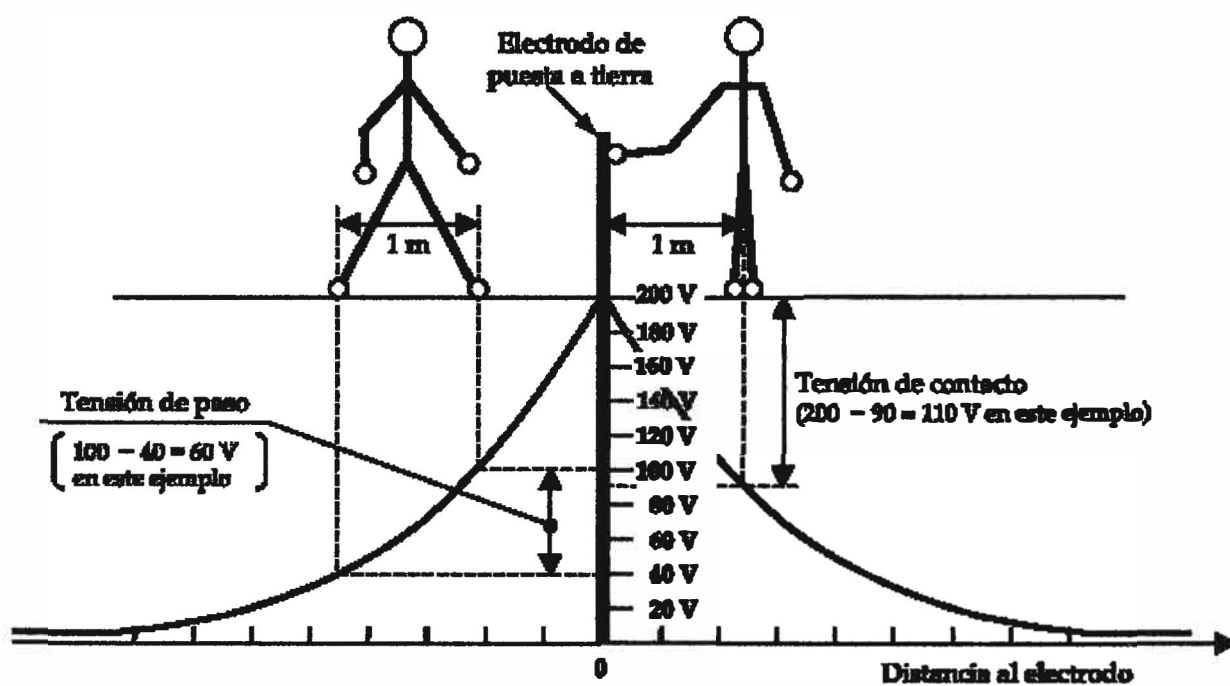


Figura 1.12 Tensiones de contacto (toque) y paso

CAPITULO II

FUNDAMENTO FISICO DE LAS PUESTAS A TIERRA EN BAJA TENSIÓN

2.1 SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN ZONAS URBANAS

Cuando se realiza el diseño de puesta a tierra en una zona urbana, debe tenerse claro los objetivos por los cuales se esta llevando a cabo este proyecto; además a que o quienes va dirigido éste sistema de seguridad. Tratándose por ejemplo de equipos electrónicos costosos, es importante que además de la función de seguridad de las personas, sirva de elemento de seguridad y protección para estos equipos, por lo que el valor de Resistencia de puesta a tierra de 25Ω no podría ser el adecuado y se hace de necesidad valores menores. En la sección 2.4 se indica un procedimiento básico para calcularla.

El CNE no da muchos detalles de la misma, incluso cuando se refiere a hospitales o clínicas se establece 25Ω como mínimo; sin embargo en el Reglamento nacional de edificaciones (enero de 1998), podemos encontrar las referencias siguientes:

- Para locales especiales Resistencias menores de 5Ω
- Para instalaciones medicas de emergencia valores menores de 3Ω .

Asimismo el proyectista debe tener en cuenta los factores externos e internos que podrían provocar variaciones en su valor de diseño en el tiempo y preveer en caso esta necesite de un mantenimiento.

Tratándose de zonas urbanas y dependiendo a que objetivo proteger, las puestas a tierra a diseñar pueden ser:

- **Puestas a tierra puntuales**

El diseño de la misma normalmente se realiza cuando se trata de instalaciones domesticas o recintos específicos (locales comerciales pequeños, cabinas publicas de telefonía, etc). Para estos fines lo común es diseñar las PAT con electrodos metálicos o si no se consigue los valores óptimos, se diseña(n) otra(s) y se interconectará(n).

- **Puestas a tierra extensas**

El diseño de la misma es mucho más complejo; ésta normalmente se realiza en instalaciones industriales, en las cuales hay varios recintos a donde se debe brindar la

seguridad del caso. Para esto, se hace uso de electrodos puntuales, anillos de tierra o mallas de puestas a tierra.

Asimismo dependiendo del periodo en que es necesaria su conexión, podemos clasificarlos en:

- **Puestas a tierra fijas**

Se entiende que estarán conectados todo el tiempo en el suelo, según su solicitud pueden ser:

- **permanentes:** Las PAT cumplen sus funciones debido a presencia de: Corrientes de carga estática, fuga de aislamientos, desbalance de cargas, corrientes geomagnéticas etc.
- **Ocasionales:** En este caso cumplirán su función en forma ocasional, estas pueden ser usadas para: evacuar grandes corrientes de fallas de aislamiento (francas o amortiguadas); presencia de descargas atmosféricas.

- **Puestas a tierra temporales**

Se entiende así a aquellas puestas a tierra que deberán conectarse solo en cierto intervalo de tiempo. Y cuando hay requerimientos como el mantenimiento de equipos eléctricos, líneas eléctricas. Puestas a tierra, etc.

2.2 FUNDAMENTO ANALITICO PARA LAS MEDIDAS DE RESISTENCIA Y RESISTIVIDADES

2.2.1 PROCESO DE CONDUCCIÓN ELÉCTRICA DEL SUELO.

la tierra no debería ser tan buena conductora de la electricidad; debido a la composición que presenta, sin embargo la dispersión de la corriente permite una capacidad de conducción aceptable que es de naturaleza Electrolítica y/o Electroquímica, y depende principalmente de la porosidad del material, que contiene la humedad y las sales solubles y acompaña en menor o mayor grado a otras características como la granulometría, la compactación y la temperatura que controlan su conductividad, especialmente tratándose de los estratos superficiales donde las corrientes por encima de (10 A) ocasionan su desecamiento por Efecto Joule y el incremento local de la Resistividad.

Asimismo como tiene esa ilimitada capacidad de recepción, conducción y dispersión de corrientes eléctricas, nos permite atribuirle la necesaria referencia de Potencial cero, por donde se pueden cerrar los circuitos de evacuación o de concentraciones de carga o aparición de corrientes, asegurando la seguridad de las personas, los animales y los aparatos de Baja Tensión.

2.2.2 CRITERIOS BÁSICOS Y CONSIDERACIONES PARA SU MODELAMIENTO

Para un modelo básico se hace necesario las leyes básicas de la electricidad dinámica.

A. Ley de Ohm

Esta ley puede expresarse en los materiales conductores de dos maneras y bajo un mismo significado:

1. La densidad de corriente (J) en un conductor, es directamente proporcional al campo eléctrico (E) en el medio donde se mueven los portadores de carga y a su conductividad (σ); siendo además: $\sigma = 1/\rho$

Así:

$$J = \sigma \cdot E \quad (2.1)$$

$$E = \rho \cdot J \quad (2.2)$$

2. La intensidad de corriente que circula es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a su Resistencia, Así:

$$V_{ab} = \Delta I \cdot R ; \quad \text{De otro modo:}$$

$$R = \frac{dV}{dI} \quad (2.3)$$

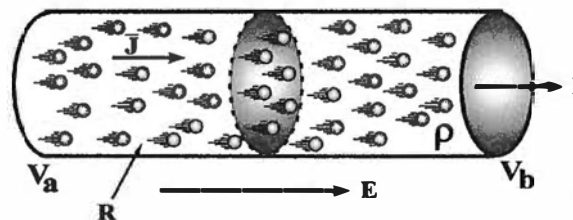


Figura 2.1 Modelo de conductor

B. Regla de Poulliet

Esta regla muestra un resultado experimental. Indica que es posible determinar la Resistencia de un conductor en base a sus dimensiones geométricas; su longitud L y el área de su sección transversal S . La constante de proporcionalidad se denomina resistividad " ρ ". En este caso para una porción de tierra, a la que además consideraremos homogénea:

$$R = \rho \frac{dl}{dS} \quad (2.4)$$

A pesar de que la corriente eléctrica es de naturaleza electrolítica; asumiremos el comportamiento de un sólido conductor homogéneo.

C. Determinación de la Resistencia de dispersión

Se sabe que los electrodos colocados en las PAT tienen ciertas dimensiones y sus líneas equipotenciales serán las que aproximadamente se indican en la fig. 2.2

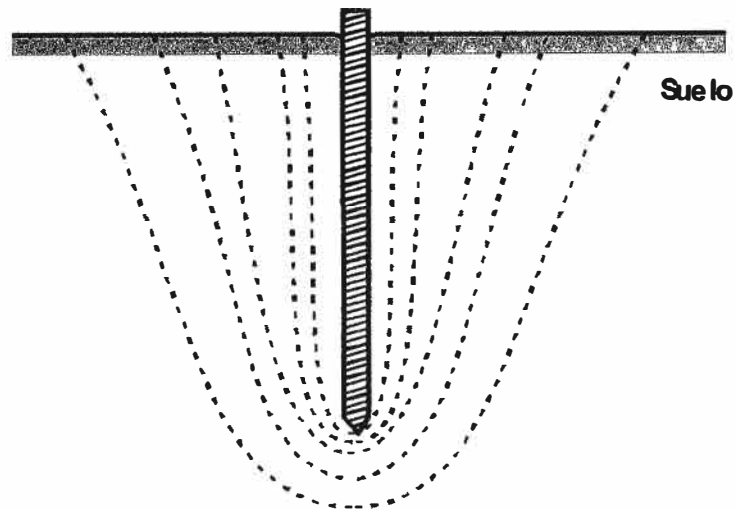


Figura 2.2 Líneas equipotenciales en una varilla conductora

Sin embargo para facilitar su comprensión, partiremos por asumir como modelo básico, el de un electrodo metálico puntual (Fig.2.3) donde se muestra la distribución de las líneas de corriente y líneas equipotenciales.

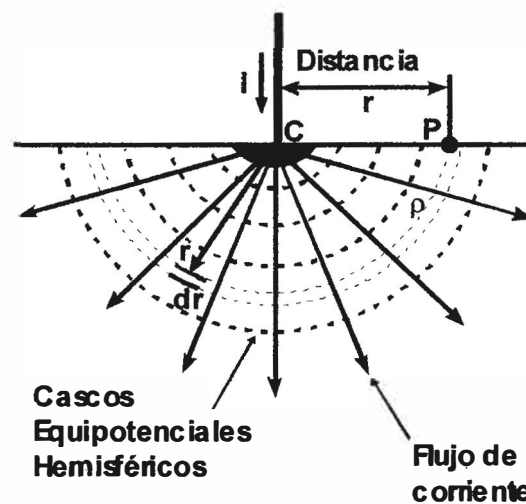


Figura 2.3 Líneas equipotenciales y de corriente en un electrodo puntual

Considerando además para este propósito las siguientes hipótesis:

- El suelo es homogéneo con resistividad " ρ "
- La corriente se dispersa formando hemisferios de área, ($S = 2\pi r^2$).

A partir de ésta conseguiremos determinar el Potencial de Electrodo (V) y su Resistencia de Dispersión Absolutos. Para una Densidad de Corriente (J), de una corriente dispersada (I) y a una distancia (r) cualquiera desde el punto (C) donde se ubica la Puesta a Tierra puntual.

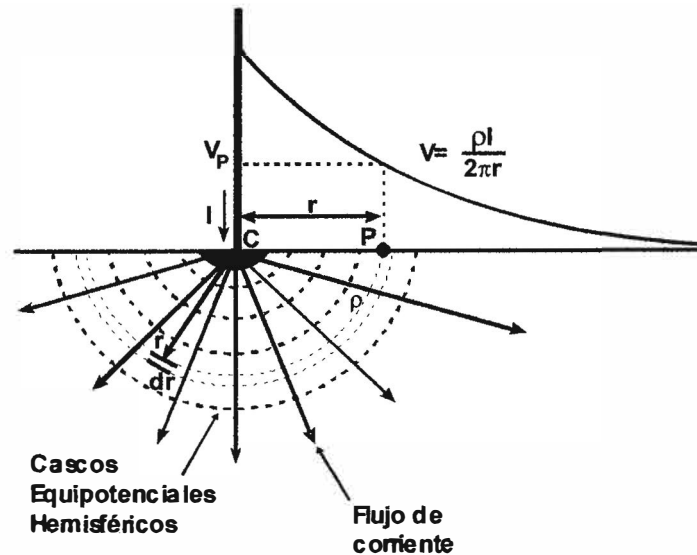


Figura 2.4 El potencial (V) disminuye a mayor posición (r) de alejamiento

$$E = \rho \cdot J = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (2.5)$$

Reemplazando (J) en la expresión del Campo (E) indicada en la ecuación (2.5).

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{\rho \cdot I}{2\pi r^2} \quad (2.6)$$

Despejando dV y luego integrando obtenemos el Potencial a partir de (C) respecto del infinito, expresión básica que permite hallar el Potencial Absoluto a una distancia cualquiera (r) del eje de abscisas.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.7)$$

Si la Puesta a Tierra puntual (C) tuviere un radio (r_o), la diferencia de potencial en la superficie del suelo respecto de un punto (P) será:

$$\Delta V = V_{r_o} - V_P = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{r_P} \right) \quad (2.8)$$

Si consideramos que P está en el infinito, entonces $V_P = 0$; entonces se determina V_o . A partir de la ley de Ohm determinamos la Resistencia de dispersión R_o ; es decir:

$$V_{r_o} = \frac{\rho I}{2\pi r_o} \quad (2.9)$$

$$R_o = \frac{\rho}{2\pi r_o} \quad (2.10)$$

D. Determinación de la diferencia de potencial en el suelo debido a la corriente inyectada por un electrodo.

Para determinar la resistividad, se hace uso de instrumentos de medida, como los telurómetros; los cuales sustentan su principio físico en el modelo de la Fig.2.5.

Mediante una fuente se inyecta corriente por el electrodo conectado en C1, produciéndose una corriente por el subsuelo y cerrando el lazo con el electrodo ubicado en C2; en base a los resultados anteriores, es posible deducir La expresión del Potencial absoluto en un punto (P) del suelo, inducidos desde los puntos C1 y C2.

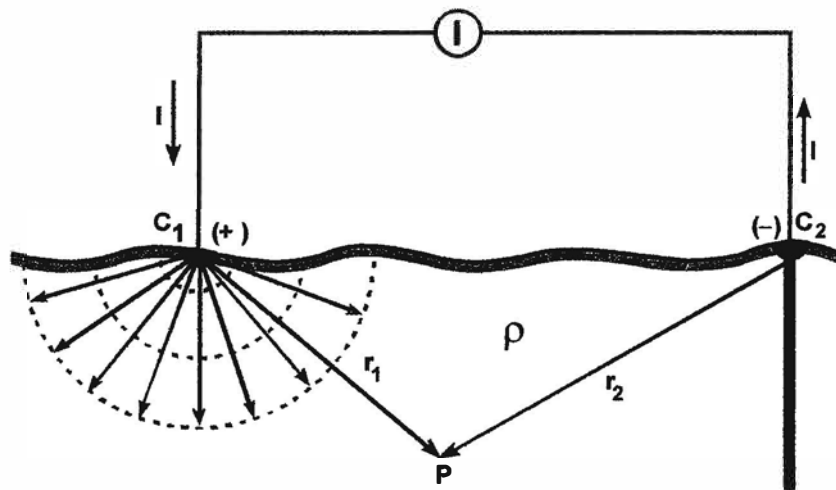


Figura 2.5 Para determinar el potencial en el punto P del subsuelo puede aplicarse el principio de superposición.

Según la expresión anterior, Los Potenciales en un punto (P) del suelo inducidos desde (C1) y (C2) serán:

$$V_{P(1)} = \frac{\rho I}{2\pi r_1} \quad \text{y} \quad V_{P(2)} = -\frac{\rho I}{2\pi r_2} \quad (2.11)$$

El Potencial Total (V_p) en dicho punto (p) estará dado por la suma algebraica:

$$V_p = V_{p(1)} + V_{p(2)} \quad (2.12)$$

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.13)$$

Idénticamente entre otros dos puntos cualesquiera del suelo; tales como M y N, cuyas distancias respecto de los electrodos se esboza en la figura 2.6, es posible determinar la expresión que defina la diferencia de potencial (V_s) entre estos puntos.

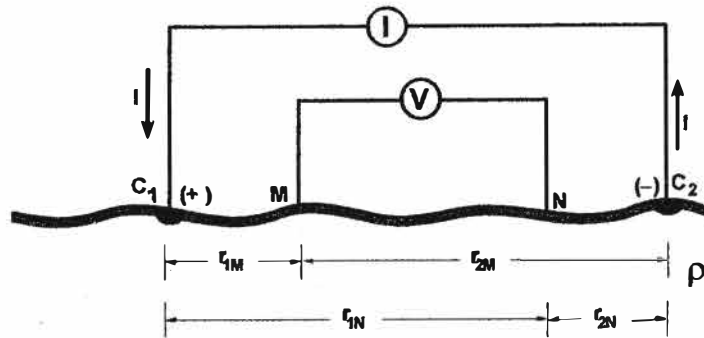


Figura 2.6 Debido a la corriente circulante por el subsuelo es posible medir la diferencia de potencial entre dos puntos M y N

$$V_s = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{1M}} - \frac{1}{r_{2M}} - \frac{1}{r_{1N}} + \frac{1}{r_{2N}} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} F(r_n) \quad (2.14)$$

Conociendo los parámetros (I) y (V_s) o la Resistencia $R = V_s / I$, que se mide con un Telurómetro, se halla la Resistividad del suelo (ρ); asimismo conociendo la Resistividad del Suelo, se puede hallar la Resistencia de Dispersión (R).

Ambas expresiones dependerán de un factor al que usualmente se le denomina como el factor de forma $F(r_n)$

$$\rho = 2\pi R \frac{1}{F(r_n)} \quad (2.15)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} F(r_n) \quad (2.16)$$

2.3 VALOR DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN UN RECINTO

Dada las funciones que cumplen las Puestas a Tierra, la Resistencia de puesta a tierra en un recinto requerido para controlar a que en todas las estructuras metálicas conectadas no se superen los tensiones de seguridad, este podría ser evaluado de un modo aproximado teniendo como variables la corriente nominal del dispositivo automático protector del circuito (I_n)

$$R_{pt} = \frac{V_s}{2.5I_n} \quad (2.17)$$

Así por ejemplo en un recinto seco donde la instalación eléctrica esta protegida con un Interruptor automático de 10A, la tensión de seguridad de acuerdo a la tabla (1.3) es de

50V; luego la Resistencia de puesta a tierra debiera ser de 2Ω . Conseguir este valor no es tan fácil; pero tampoco imposible.

2.4 MODELOS TÍPICOS DE ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.

2.4.1 ELECTRODO PUNTUAL SEMIESFÉRICO DE RADIO "r"

El modelo de electrodo puntual, es un modelo básicamente teórico; la expresión de su resistencia de dispersión se definió en la ecuación 2.4; su importancia radica en la posibilidad de deducir a partir de ella, la resistencia aproximada de otros modelos.

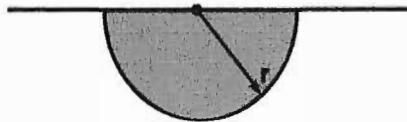


Figura 2.7 Modelo de electrodo puntual

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (2.18)$$

Donde:

R: resistencia de dispersión (Ω)

ρ : es la resistividad del terreno ($\Omega - m$)

r: es el radio del electrodo semiesférico (m)

2.4.2 VARILLA ENTERRADA VERTICALMENTE A RAZ DE LA SUPERFICIE

- Para suelos de un solo estrato.

La Resistencia de contacto de una varilla figura 2.8 está dada por la fórmula de Dwight

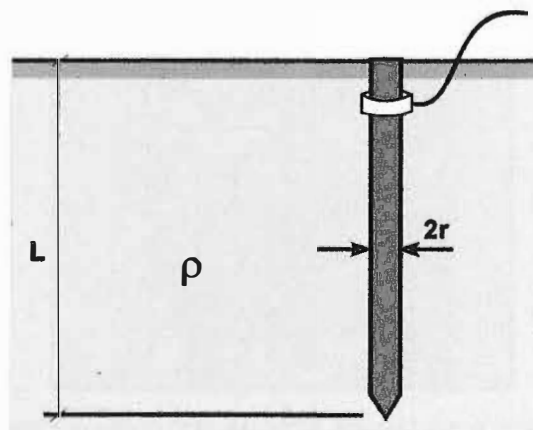


Figura 2.8 Electrodo vertical

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right) \quad (2.19)$$

Donde:

R: resistencia de dispersión (Ω)

ρ : es la resistividad del terreno ($\Omega - m$)

L: es el largo de la varilla (m)

r: es el radio de la sección de la varilla (m)

NOTA:

Si el suelo es de un sólo estrato, las ecuaciones siguientes pueden también usarse. los márgenes de diferencia son pequeños

$$R = \frac{\rho}{2L} \operatorname{arc\,senh}\left(\frac{L}{r}\right) \quad (2.20)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \frac{2L}{r} \quad (2.21)$$

En caso la varilla está en un suelo de dos estratos, en las ecuaciones anteriores; la resistividad a indicar será la aparente (ρ_a).

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \operatorname{Ln} \frac{2L}{r} \quad (2.22)$$

2.4.3 VARILLA VERTICAL ENTERRADA A UNA PROFUNDIDAD "h".

Es común observar situaciones como el caso Figura 2.9.

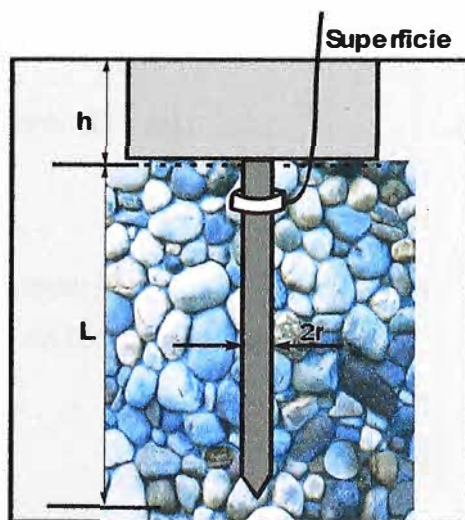


Figura 2.9 Caso de electrodo vertical enterrado a una profundidad "h"

La ecuación de la Resistencia de dispersión será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{L}{r} \sqrt{\frac{3L+4h}{L+4h}} \right) \quad (2.23)$$

El objetivo de enterrar una profundidad “h” al electrodo debajo de la superficie es para disminuir los posibles gradientes de potencial sobre la superficie del terreno en los contornos de la barra.

2.4.4 ELECTRODOS HORIZONTALES.

La Resistencia de aterramiento de un conductor o electrodo enterrado horizontalmente en el suelo a una profundidad “h” metros se calcula: [14]

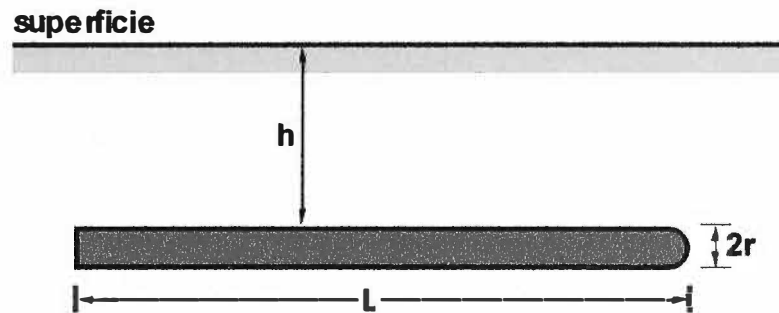


Figura 2.10 Pletina o electrodo horizontal

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[L n \left(\frac{2L^2}{rh} - 2 + \frac{2h}{L} - \left(\frac{h}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right) \right] \quad (2.24)$$

Donde:

R: Resistencia (Ω)

ρ : es la resistividad del terreno ($\Omega - m$)

L: longitud (m)

r: radio del electrodo (m)

h: profundidad de enterramiento (m)

También se puede utilizar, en forma aproximada:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L n \frac{2L^2}{hr} \quad (2.25)$$

2.4.5 CONFIGURACIONES DE ELECTRODOS A PROFUNDIDAD DISPUESTOS EN FORMA HORIZONTAL [14]

A. Conductor en forma de “L”

En este caso el conductor rectilíneo es doblado en forma de “L” y enterrado horizontalmente a una profundidad “h”

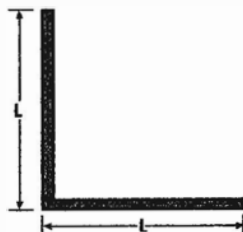


Figura 2.11 Conductor rectilíneo doblado en ángulo recto

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{L^2}{2rh} \right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{h}{L} + 1,656 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \quad (2.26)$$

B. Conductor en forma de estrella de tres puntas

Idéntica a la configuración anterior y a una profundidad "h", el modelo de la puesta a tierra será la que se indica.

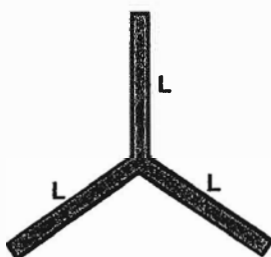


Figura 2.12 Modelo de estrella de tres puntas

$$R = \frac{\rho}{3\pi L} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{L^2}{2rh} \right) + 1,077 - 0,836 \frac{h}{L} + 3,808 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 13,824 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \quad (2.27)$$

R: Resistencia (Ω)

ρ : Resistividad aparente del terreno

L: longitud de cada rama (m)

r: radio del electrodo (m)

h: profundidad de enterramiento (m)

2.4.6 RESISTENCIA APROXIMADA DE UNA RED MALLADA.

Según la fórmula experimental de "Laureen", se tiene la siguiente fórmula para el cálculo de puesta a tierra de una malla:

$$R = \frac{\rho}{\sqrt[4]{S/\pi}} + \frac{\rho}{L} \quad (2.28)$$

Donde:

- ρ : Resistividad aparente ($\Omega - m$)
 S : Area de la superficie que cubre la malla (m^2).
 L : Longitud total de conductor de la malla (m).

2.5 CONCLUSIONES ACERCA DE LAS CONFIGURACIONES PROPUESTAS

Si se quisiera optimizar el modelo adecuado para una puesta a tierra a partir de las configuraciones indicadas; se concluye a partir de las ecuaciones que las configuraciones últimas (Angulo recto, estrella, red mallada), ofrecen resistencias de dispersión más bajas respecto de la varilla simple; aunque económicamente no resultan rentables.

2.6 TECNICAS DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA PUESTA TIERRA

Cuando no se consigue que la Resistencia de puesta a tierra sea menor de 25Ω , se puede proceder por algunas técnicas de mejoramiento del valor de su conductividad. El CNE por ejemplo permite para los sistemas con un electrodo único (varilla, tubería o placa); complementarse con electrodos adicionales de los tipos mencionados anteriormente separados por lo menos una distancia de 2 m entre sí.

Enumeremos ésta y otras técnicas factibles:

- aumento del diámetro de los electrodos.
- aumento de la longitud de los electrodos.
- aumento del número de electrodos.
- aumento de la distancia entre ejes de los electrodos.
- Potenciamiento del diámetro de los electrodos mediante el uso de electrodos auxiliares.

2.6.1 Variando las dimensiones de los electrodos

En la ecuación (2.22) es fácil advertir que como ésta depende de variable como: la longitud del electrodo (L); el radio de su sección recta "r" y de la resistividad del suelo (ρ); entonces puede conseguirse cierta reducción modificando "L" y "r".

- **Varillas o conductores de mayor radio.**

De la ecuación anterior al aumentar el radio (r) del electrodo se puede notar una disminución en el valor de la resistencia. La grafica siguiente muestra la variación su resistencia al modificar su diámetro..

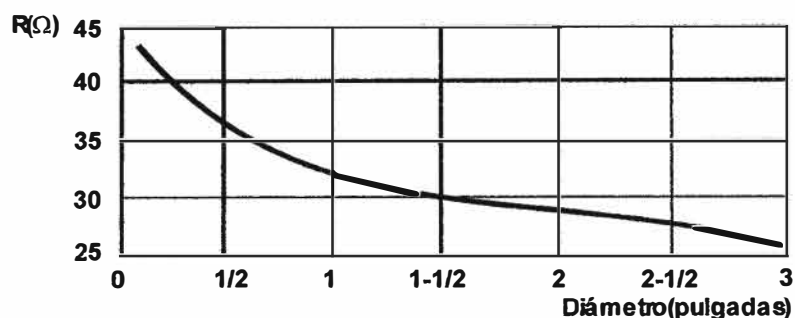


Figura 2.13 Variación de la resistencia con el diámetro del conductor [4]

Experimentalmente se ha comprobado que usando varillas de 19 mm en lugar de varillas de 13 mm se logra una reducción en la Resistencia a tierra de hasta un 10% máximo. [4] Este resultado no es tan significativo realmente, pero si costoso.

- **Varillas o conductores mas largos**

De modo idéntico usando la ecuación (2.22) se nota que al aumento de longitud la resistencia disminuye.

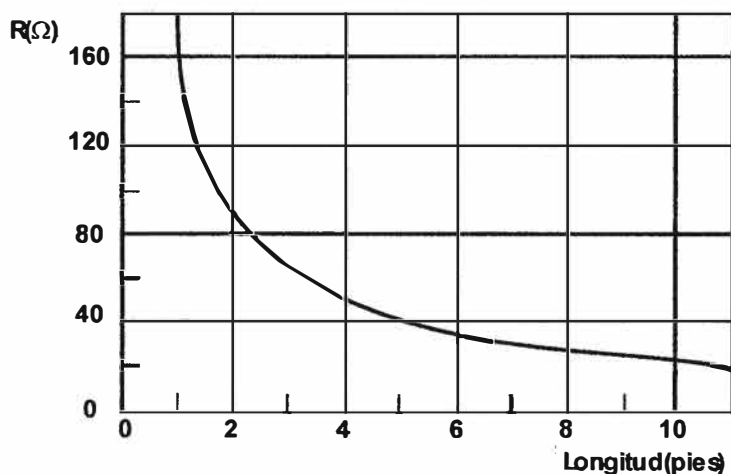


Figura 2.14 Variación de la resistencia con la longitud de la varilla

Para los casos donde las capas superiores de la tierra son de arena y donde a gran profundidad se encuentra una capa de terreno húmedo, existen modelos de varillas que se acoplan unas a otras para lograr longitudes hasta de 15 m.

Por lo general, duplicando el largo, se obtiene una reducción del 40% de Resistencia a tierra [4]; aunque el costo de la instalación resulta ser onerosa.

Otra ventaja es que con el uso de varillas largas, que se combinan con electrodos horizontales, se controla mejor el gradiente de potencial en la superficie. Aun así ésta no es todavía una buena alternativa.

2.6.2 AUMENTO DE DISTANCIA ENTRE EJES DE LOS ELECTRODOS EN PARALELO

Colocar dos varillas en paralelo es una manera efectiva de bajar la Resistencia. Pero, las varillas no deben estar colocadas muy cerca una de otra, debido a los efectos mutuos que afectan la impedancia del circuito. La distancia entre ellas o de cualquier electrodo, por razones de eficiencia no debe ser menos de 2 m, aunque se recomienda Fig. 2.14 que estén separadas más del largo de cualquiera de ellas. [10]

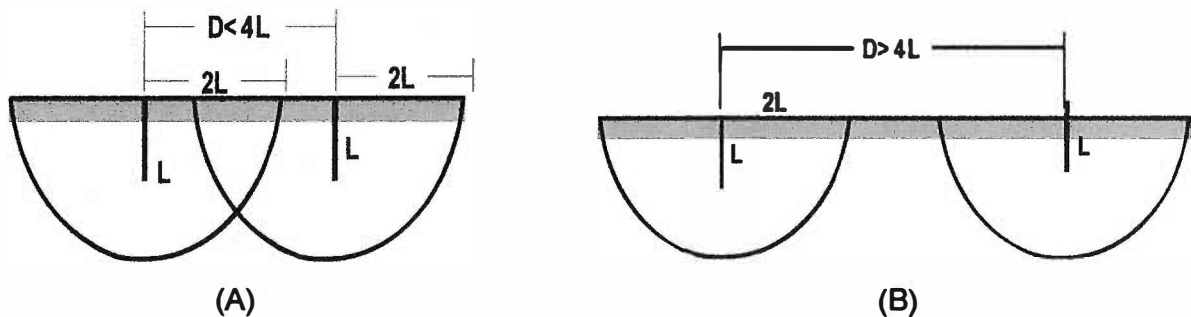


Figura 2.15 Si las varillas están muy cerca una de la otra (A), producen un efecto mutuo; mientras tanto en (B) no ocurre eso

Por ejemplo, dos varillas en paralelo a 3 metros de distancia ofrecen una Resistencia del 65% de la Resistencia a tierra de una sola de ellas. Pero, incrementando ese espaciamiento a 6 m, la reducción de la Resistencia es próxima al 55%. [4]

2.6.3 VARILLAS EN PARALELO (ELECTRODOS MÚLTIPLES)

De acuerdo a la regla anterior al colocar varillas en paralelo, se disminuye el valor de la Resistencia total. Pero debe tenerse en cuenta que cuando se utilizan múltiples electrodos, cada electrodo adicional no contribuye con una reducción proporcional en la Resistencia del circuito. Por ejemplo, dos varillas reducen la Resistencia al 58% de una sola, mientras que 10 varillas apenas reducen ese valor al 10%. [4].

En la tabla 2.1 se muestra como varía la resistencia de acuerdo al número de jabalinas en paralelo. La constante "K" indica una relación entre la resistencia equivalente de "n" varillas en paralelo (R_n), respecto de la resistencia de una sola varilla (R_1); a su vez ambas resistencias están expresadas en términos de la resistividad aparente.

Asimismo en esta tabla se muestran valores para distintas separaciones entre varillas y variadas dimensiones de las mismas. "L" es la longitud de la varilla; "d" es el diámetro.

Así:

Tabla 2.1 resistencia equivalente para varias resistencias en paralelo [8]

L=2,4m		d = 5/8"		R ₁ = 0,425 pa				
Separación	2,5m		3m		4m		5m	
Número de Jabalinas	Req [Ω]	K	Req [Ω]	K	Req [Ω]	K	Req [Ω]	K
2	0,241 pa	0,566	0,237 pa	0,557	0,231 pa	0,511	0,228 pa	0,536
3	0,173 pa	0,408	0,169 pa	0,397	0,163 pa	0,383	0,159 pa	0,374
4	0,137 pa	0,324	0,133 pa	0,313	0,127 pa	0,298	0,123 pa	0,289
5	0,115 pa	0,270	0,110 pa	0,260	0,105 pa	0,246	0,101 pa	0,237
6	0,099 pa	0,233	0,095 pa	0,223	0,089 pa	0,210	0,088 pa	0,202
7	0,087 pa	0,206	0,083 pa	0,196	0,078 pa	0,184	0,075 pa	0,176
8	0,078 pa	0,185	0,075 pa	0,176	0,070 pa	0,164	0,066 pa	0,156
9	0,071 pa	0,168	0,068 pa	0,159	0,063 pa	0,148	0,060 pa	0,141
10	0,065 pa	0,154	0,062 pa	0,140	0,057 pa	0,135	0,054 pa	0,128
11	0,060 pa	0,142	0,057 pa	0,134	0,053 pa	0,124	0,050 pa	0,118
12	0,056 pa	0,132	0,053 pa	0,125	0,049 pa	0,115	0,046 pa	0,109
13	0,053 pa	0,124	0,050 pa	0,117	0,046 pa	0,107	0,043 pa	0,101
14	0,049 pa	0,117	0,047 pa	0,110	0,043 pa	0,101	0,040 pa	0,095
15	0,047 pa	0,110	0,044 pa	0,103	0,040 pa	0,095	0,038 pa	0,089

Se puede observar que con cuatro electrodos se consigue reducir notablemente; sin embargo a partir de 6 electrodos el valor de la Resistencia cambia muy lentamente.

2.6.4 SATURACIÓN DEBIDO AL NÚMERO DE ELECTRODOS

En la figura 2.15, se puede observar con mas detalle lo anteriormente planteado, es decir que a partir de aproximadamente 6 varillas la resistencia equivalente (que esta expresado como un factor de su resistividad aparente), ya no disminuye notablemente; por lo que se hace innecesaria y antieconómica seguir colocando mas electrodos.

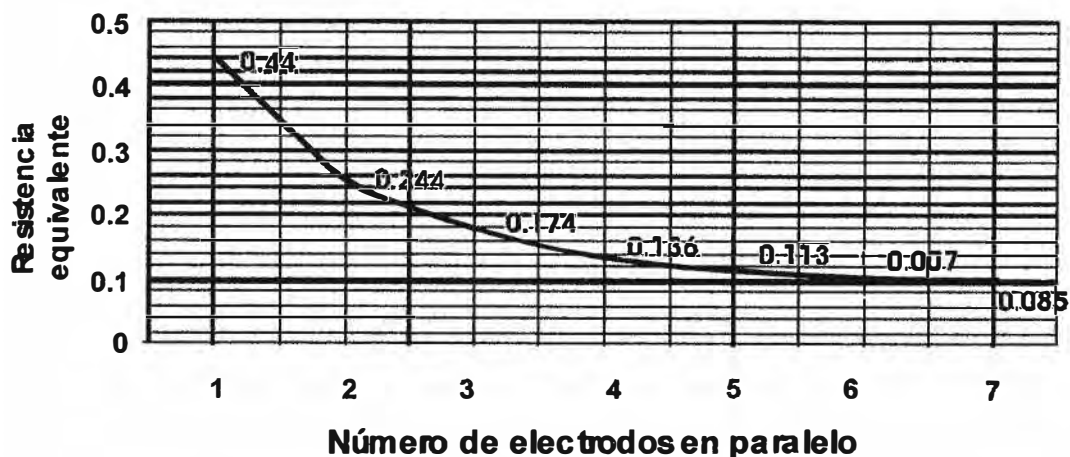


Figura. 2.16 La resistencia equivalente disminuye conectando electrodos en paralelo. [8]

Algunos proyectistas consideran que el valor de la resistencia neta de “n” electrodos en paralelo “Rn”, está determinada en función de la Resistencia de una sola varilla R. Este es un valor aproximado que considera que las varillas están espaciadas por una distancia igual al diámetro de un cilindro protector. [4]

Entonces:

$$R_n := \frac{R}{n} \cdot \left[2 - e^{-0.17 \cdot (n-1)} \right] \quad (2.29)$$

2.6.5 MEJORAMIENTO CON ELECTRODOS AUXILIARES.

Consiste adicionar un helicoide de cobre al electrodo vertical u horizontal, como se indica en la figura 2.17. El objetivo teóricamente consistiría en aumentar el diámetro del electrodo, al mismo tiempo que se esta conectando otro electrodo en paralelo. Esta técnica es muy difundida en el mercado peruano; sin embargo dependiendo del sentido de enrollado, existen muchas discusiones sobre su efectividad por el hecho de que contraviene las leyes de inducción de Lenz.



Figura 2.17 Helicoide colocada en paralelo para “disminuir la resistencia equivalente”

Consultas realizadas a especialistas indican que se consigue sólo una ligera reducción. Así para una varilla de 2.40m de longitud tratada con un Gel y helicoide reduce de 30 Ohm hasta 28 Ohm aproximadamente.

2.6.6 RESUMEN DE LAS FORMAS DE OPTIMIZACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES PROPUESTAS.

- Respecto del diámetro del electrodo; la Resistencia a tierra no disminuye considerablemente con el aumento del diámetro de la jabalina. Así para un incremento doble del diámetro; la Resistencia disminuye solo al 11%. [8]
- Respecto del efecto de espaciamiento y de longitud; si dos electrodos están ubicados muy próximos uno de otro, hay interferencia de campos eléctricos

entre ellos y aumenta el valor de la Resistencia, una separación menor que el doble de su longitud no es aconsejable.

- cuando se incrementa mucho el número de electrodos, debido al efecto “mutuo”, la Resistencia a tierra aumenta, es decir, hay una cierta saturación, lo mismo sucede con la separación entre ellos. Habrá siempre un valor bajo el cual la Resistencia aumenta y encima del cual la influencia de disminución es mínima.
- Es de observar que, muchas varillas cortas tienden a ser más efectivas que unas cuantas largas. Esto puede ser verificado al unir las ecuaciones de las Resistencias individuales y las de grupo. Pero como se dijo anteriormente no resulta económicamente una solución práctica. [4]

CAPITULO III

MEDICION DE RESISTIVIDADES Y DE RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA

3.1 INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE RESISTIVIDAD Y DE RESISTENCIA

Los instrumentos a usar para las medidas son:

3.1.1 TELURÓMETRO: También llamado terrómetro o *Megger* de cuatro terminales; permiten medir:

- Resistividad del suelo indirectamente.
- Resistencias de dispersión de Puestas a Tierra.
- potenciales de toque y paso indirectamente.

3.1.2 GEOMETROS. Se pueden medir:

- Resistencias de dispersión.
- la Resistividad por el método de los tres puntos.



Figura 3.1 Modelo de telurómetro digital

Actualmente los equipos de medición digitales llevan dispositivos de pinza; resultan mucho más prácticos y no necesitan desconectar el circuito para realizar medidas.

3.1.3 RECOMENDACIONES PARA EL USO DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

- **Respecto del tipo corriente de medidas.**

La corriente debe ser alterna o pulsante, debido a que una fuente continua posibilita la polarización del suelo para generar el fenómeno de electrolisis. En caso de instrumentos a batería deberá disponerse de un rectificador estático DC/AC

- **Requisitos mínimos de los instrumentos**

Existen tradicionalmente equipos que trabajan a manivela y a batería; analógicos y digitales, siendo éstos últimos los más usados. En la actualidad los equipos modernos deberían cumplir con los siguientes requisitos:

- Compactos y de fácil traslado.
- Permitir almacenamiento de información.
- Interfase para PC, accesorios, manual, medición multipolo controlados por microprocesador.
- Opción para medición con pinzas y sin estacas.
- Al usar transductores de medición deben ser de similar clase de precisión.
- Deben tener certificaciones de los siguientes ensayos tipos: [8]
- Aislamiento: IEC 61000 – 4 – 2, IEC 61010 – 1
- Compatibilidad electromagnética: IEC 1000 – 4 – 2, IEC 61326 – 1
- Climáticos: DIN 40040
- Mecánicos: IEC 529, DIN 40050
- Clase de precisión: (+/-2%)
- Medición de RE: IEC 61557 – 5
- Fabricación: DIN ISO 9001

3.2 MEDICIÓN DE LAS RESISTIVIDADES

3.2.1 OBJETIVOS

La Resistividad del suelo se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grosor de la roca en estudios geofísicos; así como para encontrar los puntos óptimos para el diseño de un Sistema de Puesta a Tierra. Asimismo puede ser empleada para indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas.

Tratándose del diseño de Puestas a Tierra se tiene las siguientes finalidades:

- Obtener la Resistividad de cada estrato o capa.
- Encontrar la profundidad de los estratos o capas.
- Ubicación óptima de las instalaciones de Puesta a Tierra.
- Estimación de la Resistencia de Puestas a Tierra de una estructura o un sistema.

- Estimación de gradientes de potencial incluyendo voltajes de toque y paso.
- Cálculo del acoplamiento inductivo entre circuitos de potencia y comunicaciones cercanos.
- Diseño de sistemas de protección catódica.

3.2.2 MÉTODOS DE MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD

Entre los métodos de medición comunes para nuestros propósitos se tienen:

A. Método de los tres electrodos (método del electrodo piloto)

Consiste en medir la Resistencia de PAT de un electrodo principal de dimensiones conocidas, bajo el criterio del radio eléctrico equivalente (R_o) enterrado en un suelo cuya Resistividad se desea conocer.

El valor de la resistividad equivalente obtenida, es próxima a los valores de resistividad aparente obtenidas por el método Wenner

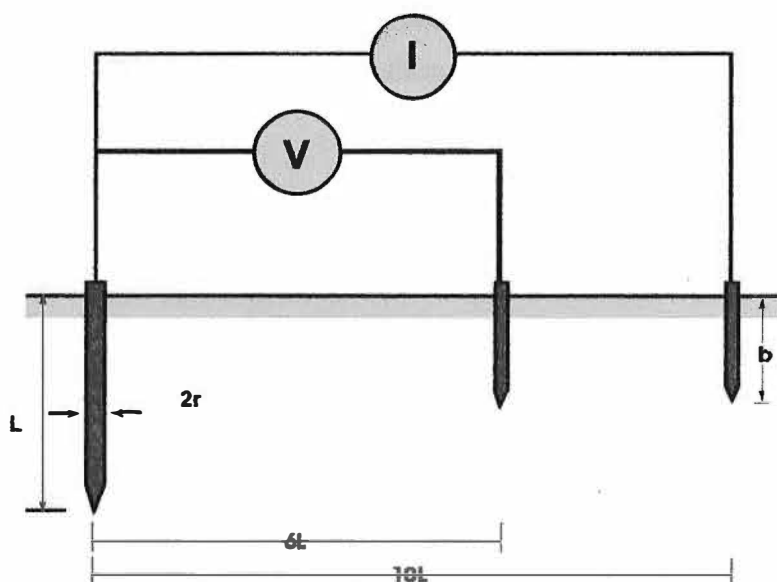


Figura 3.2 Método de tres electrodos

Según el gráfico, la separación entre el electrodo principal y los electrodos auxiliares de tensión y corriente se sugiere sean “ $6L$ ” y “ $10L$ ”. Asimismo la profundidad de clavado de los electrodos auxiliares se recomienda sea aproximadamente 15cm, para lograr buen contacto. [3]

El cálculo de la Resistividad aparente a una profundidad dada, puede ser realizado usando cualquiera de las tres ecuaciones siguientes: (3.1); (3.2) ; (3.3).

$$a) \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \frac{2L}{r} \quad (3.1)$$

$$b) \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Arcsenh} \frac{L}{r} \quad (3.2)$$

$$c) \quad R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Se recomienda la ecuación (3.3) a partir de la cual se obtiene.

$$\rho_a = \frac{2\pi L R}{\left(\operatorname{Ln} \frac{4L}{r} - 1 \right)} \quad (3.4)$$

Donde:

ρ_a Resistividad aparente para una profundidad L ($\Omega \cdot m$)

L Longitud del electrodo enterrado en contacto con el suelo (m)

r : radio de la sección del electrodo (m)

R : Valor medido de la Resistencia (Ω)

Este método requiere de procesamiento de datos de medidas, lo cual presenta dificultades; sin embargo, estos datos son utilizados por proyectistas en forma directa, como valor aproximado.

B. Método de los cuatro electrodos

El principio de éste método está basado en la medición de la diferencia de potencial entre dos de los electrodos, luego de haber inyectado al suelo una corriente a través de los otros dos.

La corriente inyectada puede ser corriente continua conmutada o corriente alterna de baja frecuencia (menores de 200 Hz) por razones de acoplamiento entre los conductores.

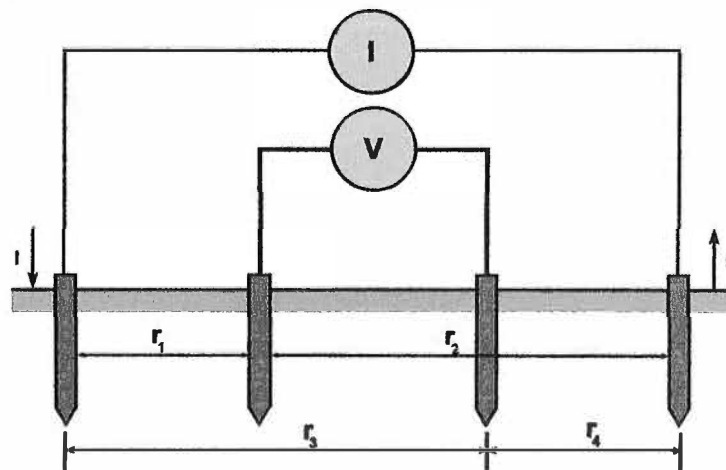


Figura 3.3 método de 4 electrodos

La ecuación fundamental para esta técnica; según la ecuación (2.6) será:

$$\rho_a = \frac{2\pi R}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad (3.5)$$

Donde:

R : Valor medido de la Resistencia (Ω)

ρ : Resistividad del suelo ($\Omega - m$)

r1, r2, r3, r4: Distancia entre los electrodos de acuerdo a la Fig. 3.3 (m)

Si el suelo considerado es homogéneo, el valor de la Resistividad medida por éste método corresponderá a un único valor de Resistividad presente en el suelo; pero si no es homogéneo, entonces el valor obtenido será ficticio, llamándose Resistividad aparente y se designa por " ρ_a ".

Existen varias configuraciones clásicas de éste método, dependiendo de la forma relativa en que se ubiquen los electrodos; no obstante para las aplicaciones de puestas a tierra, a nivel internacional se ha estandarizado el método Wenner, por lo que no se aceptan otros métodos.

- **Configuración de Wenner**

Para esta configuración, los cuatro electrodos se colocan en una línea recta, con igual separación y profundidad de penetración en el suelo. El método de medición está basado en la ecuación que se muestra desarrollada por el Dr. Frank Wenner, donde los electrodos 1 y 4 (extremos) se utilizan para inyectar la corriente y los electrodos 2 y 3 (centrales) sirven para medir la diferencia de potencial que al dividirse por la corriente inyectada da un valor de Resistencia R.

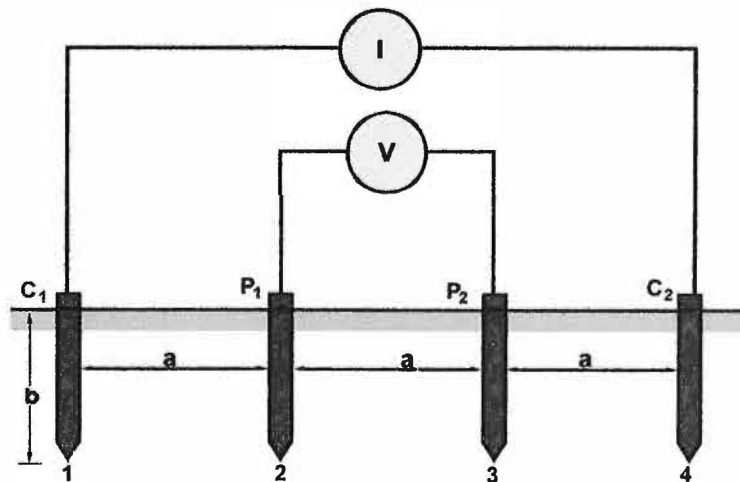


Figura 3.4 ubicación de electrodos según el método Wenner

Se sugiere que la profundidad de clavado (b), sea: $b \leq a/20$ [3]. Entonces el valor de la resistividad será:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (3.6)$$

O también:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{n} \quad (3.7)$$

Donde:

R : Valor medido de la Resistencia (Ω)

ρ : Resistividad del suelo ($\Omega - m$)

a : Distancia entre electrodos (metros)

b : Profundidad de penetración de los electrodos (metros)

n : Factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2 (depende de la relación b/a)

La segunda ecuación puede aproximarse a:

$$\rho = 4\pi a R \quad \text{si } b > a \quad (3.8)$$

$$\rho = 2\pi a R \quad \text{si } b < a \quad (3.9)$$

En la figura se puede observar el método de la configuración de Wenner utilizando un instrumento específico de cuatro terminales.

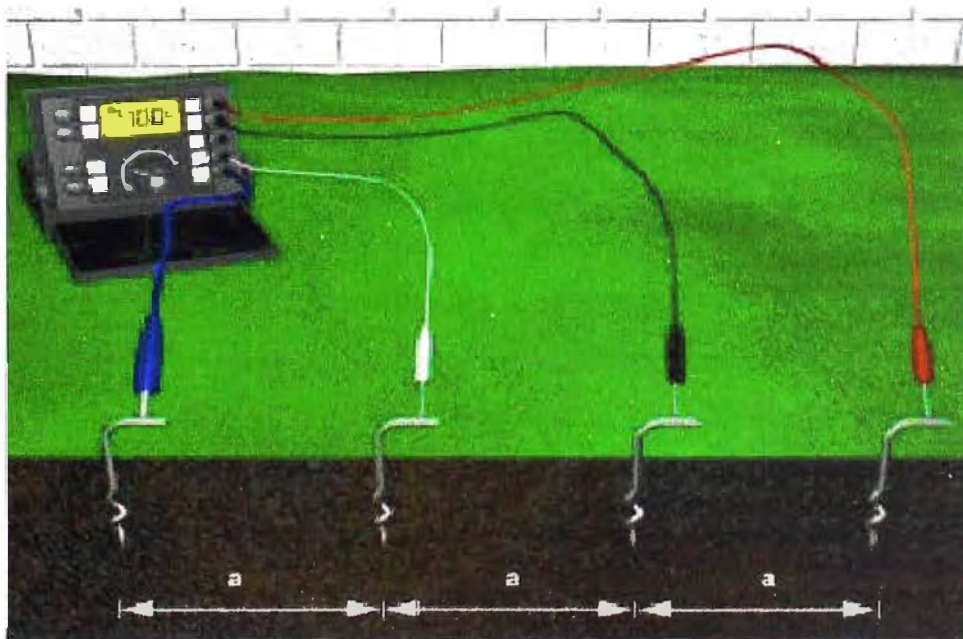


Figura 3.5 Colocación de un telurómetro para el método Wenner

La configuración de Wenner permite una visualización más rápida de la curva, ya que la Resistividad puede ser obtenida en forma más directa a partir de los valores de Resistencia R leídos en el instrumento.

3.2.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA MEDIDA DE RESISTIVIDAD

Las medidas de Resistividad del suelo más confiable, más económicas y menos laboriosas son las que se hacen por el método de sondeos geoelectrónicos verticales es decir con cuatro electrodos; lo cual no excluye el método de los tres electrodos.

El método que más se adecua es el método de Wenner, aunque a veces a falta de espacio se aproxima con las medidas del electrodo piloto.

Entre otras recomendaciones a tener en cuenta al usar los métodos tenemos:

- **Método de WENNER**
 - No exige alta sensibilidad de los Instrumentos de Medida.
 - Es aplicable para despliegues cortos, de pequeña profundidad.
 - Las variaciones laterales del suelo sólo distorsionan la precisión en sondeos de gran profundidad que no se usan para PAT de CA.
 - Facilita el procesamiento simplificado de las Medidas de campo (una característica ESTANDAR y una AUXILIAR)
- **Método del electrodo Piloto.**
 - Aplicable al Diseño de PATs basado en electrodos verticales.
 - Exige suelos penetrables hasta la profundidad de instalación.
 - Su característica depende del espesor del Estrato superficial

3.2.4 PROCESAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD APARENTE

Luego de realizadas las medidas de campo se procede a evaluar sus resultados, dado que usamos el método Wenner procesamos cada valor de Resistividad en función de las distancias "a"; es así que tenemos una serie de puntos con las cuales construiremos las "características de campo" (curvas de sondeo Geoelectrónico o perfiles de Resistividad). Las curvas obtenidas para un aterramiento puntual simple pueden ser diversas; sin embargo lo común en caso de suelos de uno y dos estratos, serán como las que se muestran en la fig 3.6.

Por lo general, para cada espaciamiento se toman dos lecturas de Resistividad en direcciones perpendiculares entre sí. La gráfica resultante de trazar el promedio de las mediciones de Resistividad (ρ) contra distancia entre electrodos (a) se denomina perfil de Resistividad aparente (ρ_a) del suelo.

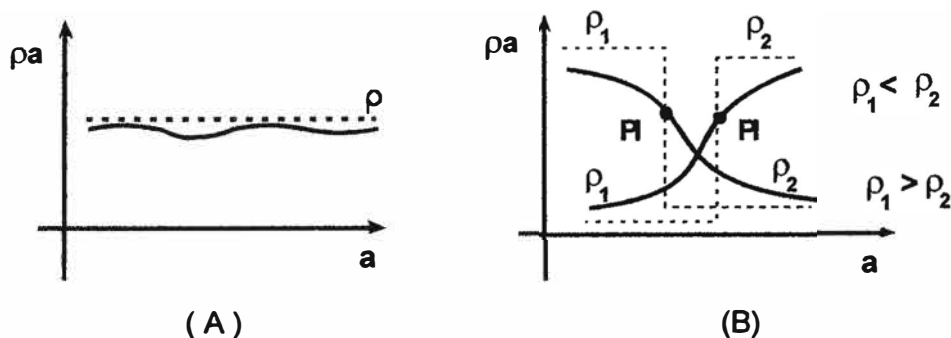


Figura 3.6: Perfiles de resistividad: A) para un estrato B) para dos estratos

- Como se puede observar en caso de tratarse de un solo estrato, el grafico es casi una recta horizontal; por lo que valor de la Resistividad lo obtendremos en forma practica del promedio aritmético de las medidas realizadas.
- En caso tenga dos estratos la tendencia de la curva puede ser ascendente o descendente. El punto de inflexión (PI), nos da la referencia del límite entre los estratos. Una de las técnicas usadas para medir la Resistividad aparente puede ser el método de TAGG o procesamiento grafico mediante curvas patrón.
- Estadísticamente, la mayoría de casos (95%) los suelos presentan dos estratos. Son mínimos los casos de tres estratos. [3]

3.3 MEDICIÓN DE LAS RESISTENCIAS DE PUESTA A TIERRA.

3.3.1 ESQUEMAS DE LAS RESISTENCIAS DE PUESTAS A TIERRA

En general el modelo circuital de un sistema de Puesta a Tierra debe asumirse como el de un circuito RLC; la resistencia depende de las resistividades del electrodo, relleno y suelo. Las componentes inductiva y capacitiva, están relacionadas con la longitud del conductor enterrado y la forma de armado de los electrodos respectivamente.

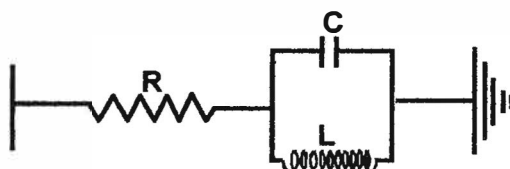


Figura 3.7 Esquema circuital general de un sistema de puesta a tierra

Asimismo si la varilla de Puesta a Tierra está sobre algún tipo de relleno la configuración resistiva toma cierta configuración especial como veremos mas adelante.

3.3.2 METODOS TRADICIONALES PARA LA MEDICION DE RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.

Antes de presentar los métodos más comunes en la medición de Resistencia de Puesta a Tierra de sistemas pequeños; veamos algunas recomendaciones:

A. Recomendaciones, respecto al voltaje, corriente y frecuencia a usar.

Análogamente como en las mediciones de Resistividad:

- La corriente debe ser alterna o corriente directa y periódica.
- Para PAT puntuales se recomienda frecuencia entre 50 y 150Hz (o entre 93 y 128 Hz), para sistemas pequeños y medianos. la frecuencia en este rango permite al equipo descartar o neutralizar las tensiones perturbadoras que se acerquen, con igual frecuencia. [5]
- En cuanto a la magnitud de las corrientes utilizadas puede ser desde los pocos miliamperios hasta los cientos de miliamperios para sistemas instalados en zonas urbanas a fin de evitar posibles potenciales transferidos que son peligrosos para las personas cercanas al área del sistema.

B. Método de los dos puntos o dos polos.

Según éste método se mide el total de la Resistencia del electrodo en estudio (R_o) mas la Resistencia de un electrodo auxiliar (R_a); asumiendo que $R_a \ll R_o$ entonces la medición realizada se considera a la Resistencia del electrodo en estudio.

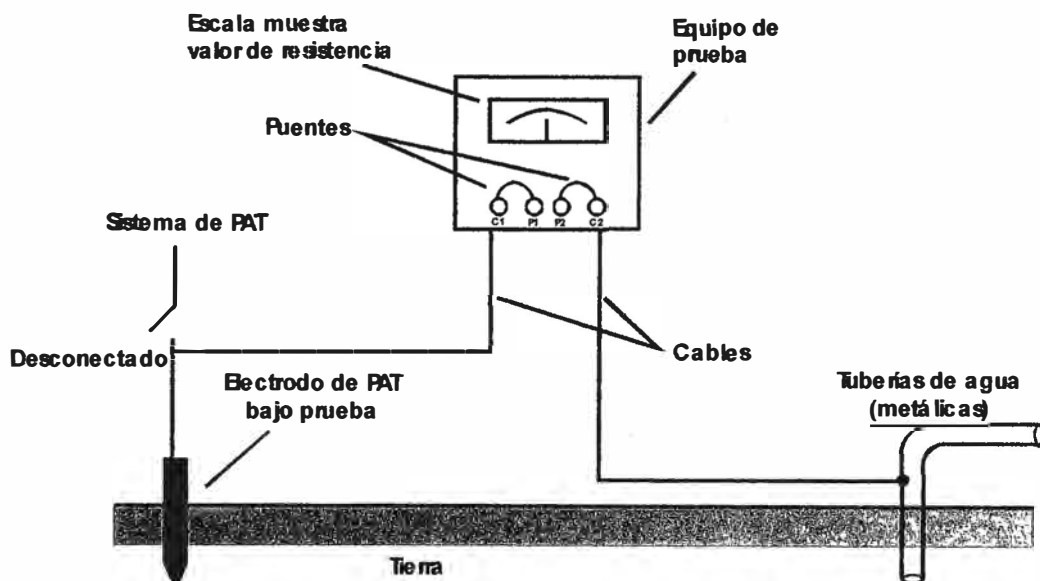


Fig. 3.8 conexión según el método de tres electrodos

Normalmente éste método se utiliza para determinar la Resistencia de un electrodo simple en un área residencial donde se tiene además un sistema de suministro de agua que utiliza tuberías metálicas sin conexiones o aislantes plásticos (electrodo auxiliar). La Resistencia del sistema de suministro de agua en el área se asume muy pequeña (alrededor de 1 Ohm) en comparación con la Resistencia máxima permitida para un electrodo simple (alrededor de 25 Ohm).

Entre los inconvenientes que podría presentarse está el hecho de que cada día es mas frecuente el uso de tuberías plásticas o la medición puede llevar a grandes errores cuando se intenta medir la Resistencias de pocos Ohmios; pero al menos puede dar una idea de la Resistencia del sistema en estudio.

En la figura se ilustra ésta técnica obsérvese que los terminales C1 y P1 y los terminales C2 y P2 están unidos mediante un puente para realizar esta medición. En equipos modernos el puente es realizado internamente por ellos al seleccionar el tipo de medición o método que se desea realizar.

C. Método de los tres Puntos.

En éste método se utilizan dos electrodos auxiliares con Resistencias R_y y R_z que se colocan de tal forma que conformen un triangulo con el electrodo principal de resistencia R_x .

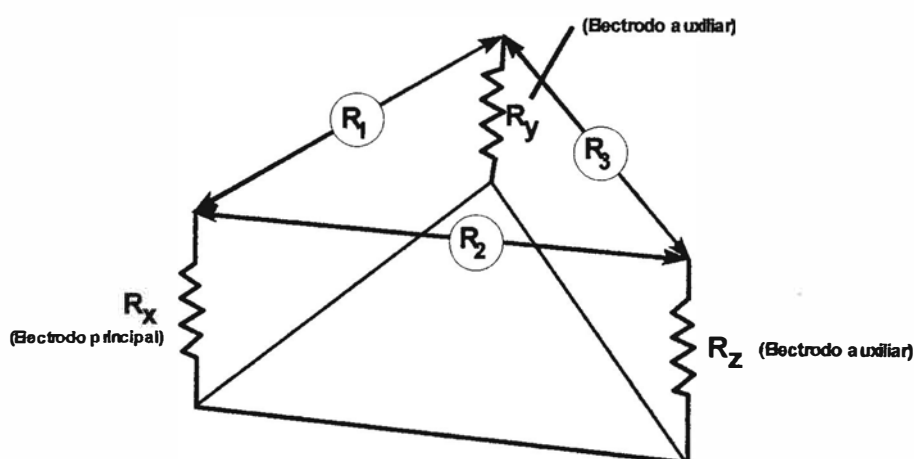


Fig. 3.9: configuración para el método de tres puntos

Usando un Ohmetro, se miden las resistencias: R_1 , R_2 y R_3 , como se muestra en la Fig. 3.9 las resistencias están conectadas en serie por medio del suelo

Los valores de R_1 , R_2 y R_3 serán:

$$R_1 = R_x + R_y + 0 \quad (3.10)$$

$$R_2 = R_x + 0 + R_z \quad (3.11)$$

$$R_3 = 0 + R_y + R_z \quad (3.12)$$

Desarrollando las ecuaciones 3.1; 3.2 y 3.3 se obtiene:

$$R_x = (R_1 + R_2 - R_3) / 2 \quad (3.13)$$

Si se quiere obtener mejores resultados, se debe buscar que los electrodos auxiliares sean de Resistencia similar al electrodo en estudio y la distancia entre los electrodos sea 8m o mas, de modo tal no se solapen las áreas de influencia cada electrodo. Este método es poco utilizado porque puede alterarse por la presencia de objetos metálicos enterrados y no es tan efectivo para valores de Resistencia bajos; además que considera que el suelo es homogéneo. Sin embargo, resulta útil cuando existen limitaciones de espacio y se quiere tener valores aproximados.

D. Método de caída de Potencial

Este método es el más usado y recomendado. Consiste en inyectar corriente a través del electrodo de corriente y medir la caída de tensión mediante el electrodo de potencial. La Resistencia se obtiene por la ley de Ohm.

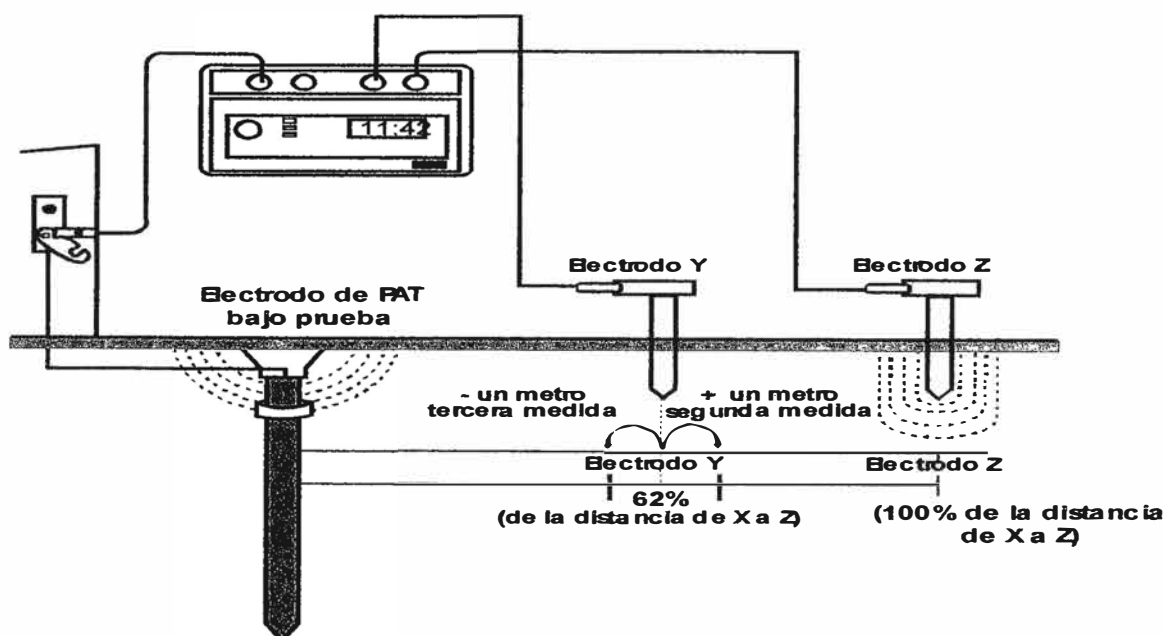


Fig. 3.10 disposición de electrodos para el método de caída de potencial

Los tres electrodos se mantienen en una línea recta, el electrodo de potencial se ubica como se indica en la Fig. 3.10; al 62% de la distancia del electrodo de corriente al Electrodo de PAT.

- **Pasos a seguir para la medición de la Resistencia de un electrodo.**

Como el valor del potencial medido varía respecto a la separación del electrodo de potencial a la toma de Tierra, se recomienda el realizar una gráfica de R en función de la distancia. Asimismo se recomienda los siguientes pasos:

- Desconectar del sistema, la Puesta a Tierra en estudio.
- Conectar el equipo de medición a la barra o electrodo en cuestión.
- Colocar el electrodo de corriente a una distancia conocida de la barra o electrodo bajo prueba.
- Realizar varias mediciones de Resistencia para diferentes ubicaciones del electrodo de potencial, sin mover el electrodo de corriente, como se indica en la figura 3.10.
- Realizar un grafico de Resistencia en función de la distancia de separación entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de potencial.
- Repetir lo anterior hasta obtener una curva con una porción plana bien demarcada.
- Dos o tres lecturas constantes y consecutivas pueden asumirse como representativas del valor de resistencia verdadera.
- Para registrar las mediciones, se sugiere usar el cuadro IV (ver anexo A)

La figura 3.11 muestra una gráfica típica de resistencia contra distancia del electrodo de voltaje (P). La curva muestra como la resistencia es cercana a cero cuando (P) se acerca al sistema de puesta a tierra y se aproxima al infinito hacia la localización del electrodo de corriente (C). El punto de inflexión en la curva corresponderá a la resistencia de puesta a tierra del sistema bajo estudio. Las líneas punteadas del grafico muestran la medición realizada en dirección opuesta.

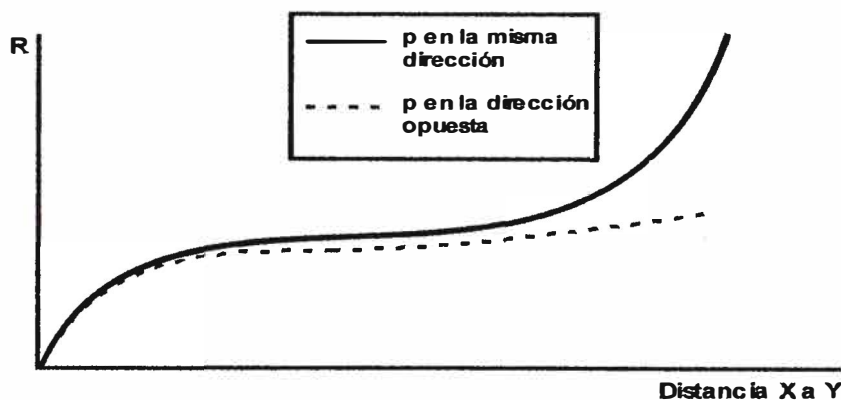


Fig. 3.11 grafico de resistencia obtenida según el método de caída de potencial

- **Efecto de los gradientes de Potencial.**

La medición de la RPT por éste método genera gradientes de potencial en el suelo producto de la inyección de corriente por Tierra a través del electrodo de corriente. Si los electrodos se encuentran muy cercanos entre si, ocurrirá un solapamiento de los gradientes generados por cada electrodo; resultando una curva en la cual el valor de la Resistencia medida se incrementará con respecto la distancia, tal como se muestra en Fig. 3.12

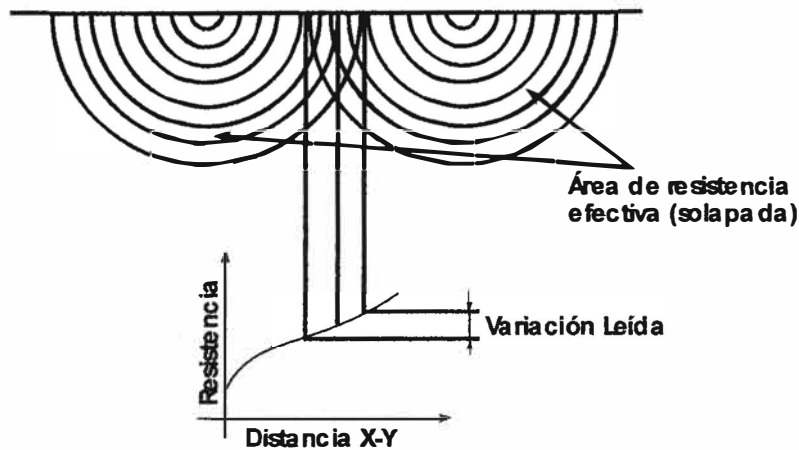


Fig. 3.12 efecto del traslape cuando los electrodos están muy juntos

En cambio si esta distancia es lo suficientemente alejada, no se producirá este solapamiento entre los gradientes de cada electrodo, originándose entonces una curva como la mostrada en la Fig. 3.13

En esta figura se observa existe una porción de la curva que permanece casi invariable, el cual será mas prolongado o corto como la separación de los electrodos de corriente (Z) y electrodo bajo prueba (X). El valor de Resistencia asociados a este sector de la grafica será el valor correcto de la toma del sistema de Puesta a Tierra. Este punto se conoce como zona de equilibrio.

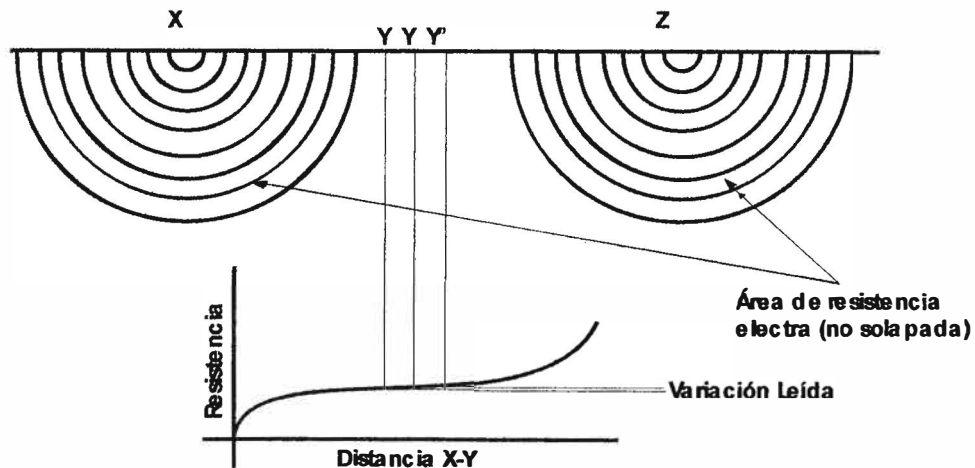


Fig. 3.13 la lectura de resistencia se mejora al separar más los electrodos.

- **Distancia entre de los electrodos de prueba. [5]**

Debido a que las condiciones del suelo son muy variables, no hay un método para determinar con exactitud la distancia requerida entre el electrodo de Tierra y el de corriente. En suelos muy conductivos, la Resistencia del volumen alrededor del electrodo es comparativamente pequeña y se pueden realizar mediciones aceptables con una separación de tan sólo unos 8 metros.

A medida de que las condiciones del suelo empeoran, y/o las especificaciones del electrodo bajan (valor de Resistencia), el área de influencia del electrodo crece. Entonces, distancias mucho más grandes pueden ser requeridas para salir del área de influencia del electrodo que se esta probando.

En general, basado en numerosas pruebas, se utiliza una distancia entre el electrodo bajo estudio y el electrodo de corriente igual a cuatro o cinco veces la longitud de la máxima dimensión del electrodo bajo prueba (algunos recomiendan diez veces). Por ejemplo. Estas son distancias aproximadas para realizar un primer intento. De no lograrse mediciones coherentes se debe repetir el proceso, variando la distancia, hasta lograrlo.

En el caso de un área pequeña o de un electrodo simple, se puede colocar el electrodo de corriente a unos 30 metros del electrodo bajo estudio (si el espacio permite llevar el electrodo de corriente a esa distancia) ya que a esta distancia se presume despreciable la influencia de uno respecto al otro. El electrodo de potencial se coloca a media distancia y se inicia el proceso de medición de Resistencia como se describió anteriormente.

En cuanto a la distancia óptima para el electrodo de potencial para hallar el punto en que se estabiliza la curva de Resistencia en función de la distancia del electrodo de potencial respecto al de Tierra, se tiene que generalmente este punto de equilibrio se encuentra al 62% de la de la distancia entre el electrodo de Puesta a Tierra bajo prueba y el electrodo de corriente; por lo que el método de caída de potencial también se conoce como método del 62%.

Para comprobar la exactitud de los resultados se cambia de posición el electrodo de potencial un metro o mas y un metro menos de punto "Y". Si el valor medido se mantiene constante, las distancias entre los electrodos están bien. Si hay un cambio significativo en el valor de Resistencia (30%) se debe incrementar la distancia entre el electrodo bajo prueba y los electrodos de potencial y corriente hasta que el valor de Resistencia medido se mantenga casi invariable el mover el electrodo de potencial hacia un lado u otro una distancia de uno o dos metros y realizar una nueva medida.

Una limitación del método del 62% es que asume condiciones ideales, pues el suelo rara vez es completamente homogéneo y en zonas bajo construcción se verá particularmente afectado .

La ventaja del método del 62% sin embargo, esta en que una vez que se ha verificado las distancias adecuadas para la medición de Resistencia es sencillo y rápido realizar nuevas mediciones en sitio con fines de mantenimiento.

E. Método Selectivo con uso de pinza.

Algunos fabricantes [15] proponen la utilización de transformadores de corriente en forma de pinzas para realizar mediciones de Resistencia mediante métodos parecidos al de caída de potencial.

Este método permite medir electrodos individuales en todos los tipos de sistemas de Puesta a Tierra incluyendo mallas que son comunes en subestaciones, torres de alto voltaje con cableado a Tierra e instalaciones comerciales con Tierras múltiples. Al medir el flujo de corriente a través de un electrodo usando un transformador de corriente en forma de pinza, los efectos de Resistencias paralelas son eliminados del proceso de medición y por tanto no afectan los resultados de la medición. Las reglas para la colocación de los electrodos de prueba son las mismas que las utilizadas en el método de caída de potencial. En la figura 3.14 se muestra un dibujo de montaje requerido para aplicar este método.

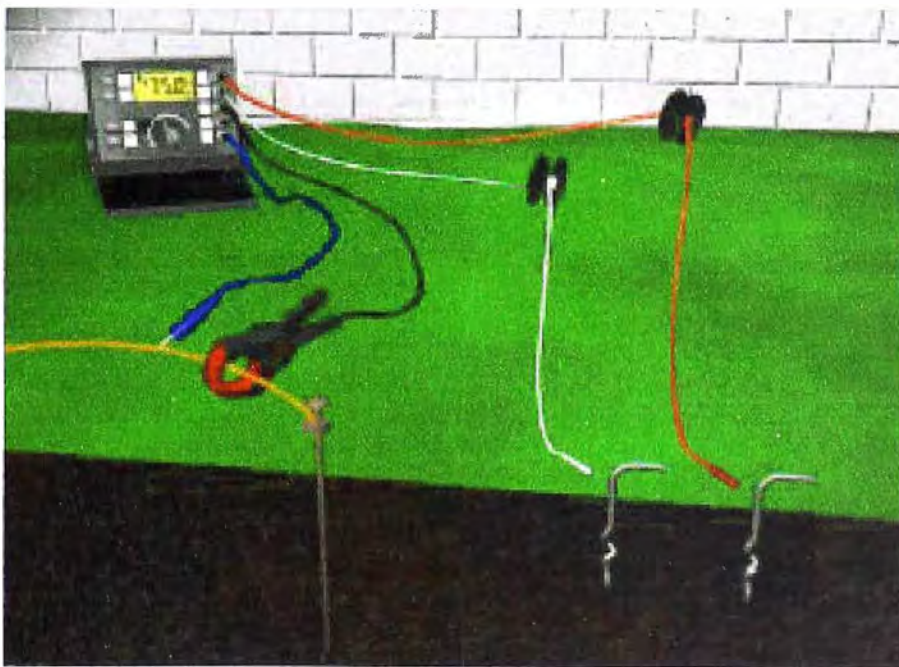


Fig. 3.14 Método Selectivo con uso de pinza

Como se observa, el electrodo bajo prueba no tienen que desconectarse para realizar la medida. El terminal X, C1 o E (dependiendo del fabricante) del equipo se conecta aguas arriba de la pinza, pero aguas abajo de cualquier conexión en paralelo de otros electrodo de Puesta a Tierra (interconexión de Tierra o metal del edificio o estructura). La pinza debe estar sobre el suelo, sin ninguna interconexión aguas abajo de la misma. Al iniciar la medición se obtendrá la medida de Resistencia de ese camino individual a Tierra. Este es el valor de Resistencia del electrodo en estudio en un sistema múltiple de Puesta a Tierra. De esta forma se puede medir cada electrodo de Puesta a Tierra sin necesidad de desconectar cada uno de ellos para realizar la medición.

Para verificar los resultados y asegurarse de que los electrodos de prueba están fuera de las esferas de influencia de los demás electrodos se realiza una nueva medición colocando el electrodo de voltaje , Y, P2 o S (dependiendo del fabricante), un metro hacia el electrodo bajo prueba o el electrodo de corriente. Si el valor de la Resistencia permanece constante, las distancias entre los electrodos es suficiente. Si el valor de la Resistencia varia considerablemente (30%), la distancia entre los electrodos debe ser aumentada y se repite el proceso hasta que el valor de la Resistencia permanece constante al reubicar el electrodo de potencial y repetir la medición.

Algunos equipos disponen de un sistema de control automático de frecuencia que selecciona la frecuencia de prueba con la menor cantidad de ruido y evita que las corrientes de Tierra y sus armónicos afecten la medición.

F. Variante del método selectivo con el uso de pinza

Se debe disponer de pinza capaz de medir en el rango de los microamperios.

Esta variante, como se ha mencionado antes, se utilizara cuando la Tierra en estudio esta en paralelo con otro sistema de Puesta a Tierra. De estar aislada la Puesta a Tierra bajo estudio no hace falta utilizar este método; bastaría el método de caída de potencial.

En éste método se instala el equipo para realizar una medición bajo el método de caída de potencial y se obtiene una primera medición. Después se coloca el amperímetro en dos lugares: 1) Alrededor del cable del circuito de corriente del equipo de medición que va hasta el electrodo bajo estudio (I_T) y 2) en algún lugar por encima de la Tierra bajo estudio y en el cableado que va hacia la fuente (I_E). Este esquema se muestra en la Figura 3.15. Así se conoce la corriente total que

entra a todo el sistema de Puesta a Tierra ($I_L = I_T \cdot I_E$). luego se calcula la caída de potencial debido al suelo, con el electrodo de potencial.

Con esta corriente y el voltaje calculado; según la ley de Ohm se obtiene la Resistencia de la Puesta a Tierra bajo estudio.

Una técnica similar, denominada técnica ART se expone en el anexo D- artículo II

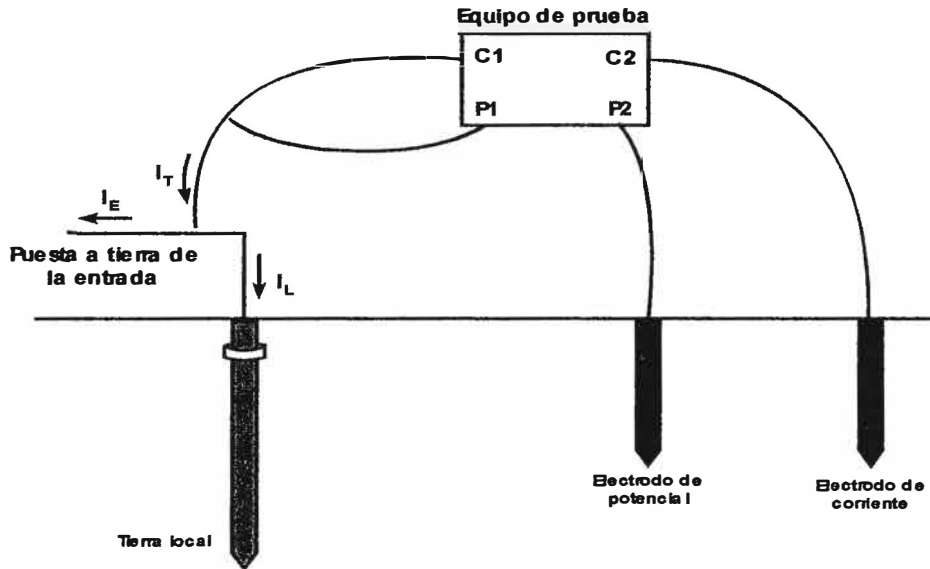


Fig. 3.15 Variante del método selectivo con el uso de pinza

3.3.3 Recomendaciones finales

- Se recomienda realizar mediciones ortogonales en los casos siguientes:
 - si en el área en medición hay objetos metálicos enterrados (cabillas, tubería, etc.)
 - cuando hay líneas energizadas de alta tensión en sus cercanías y puedan producir interferencia.

Se recomienda para lograr resultados satisfactorios abrir los electrodos de potencial y corriente unos 90° como se muestra en la figura 3.16. [7]

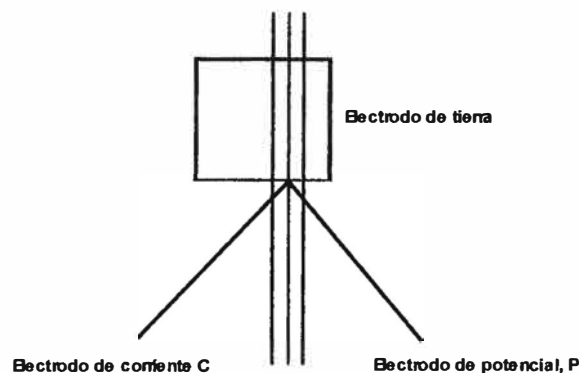


Fig. 3.16 ubicación de electrodos en caso de líneas energizadas

- El ruido excesivo puede interferir con la medición debido a la gran longitud de los cables de los electrodos de prueba. Para medir el ruido se puede conectar un voltímetro entre los terminales de sus salidas de tensión.
- Para evitar la presencia del ruido excesivo, se sugiere trenzar los cables que van hasta los electrodos de prueba; para cancelar los voltajes de modo común entre los dos conductores. (Fig. 3.17)

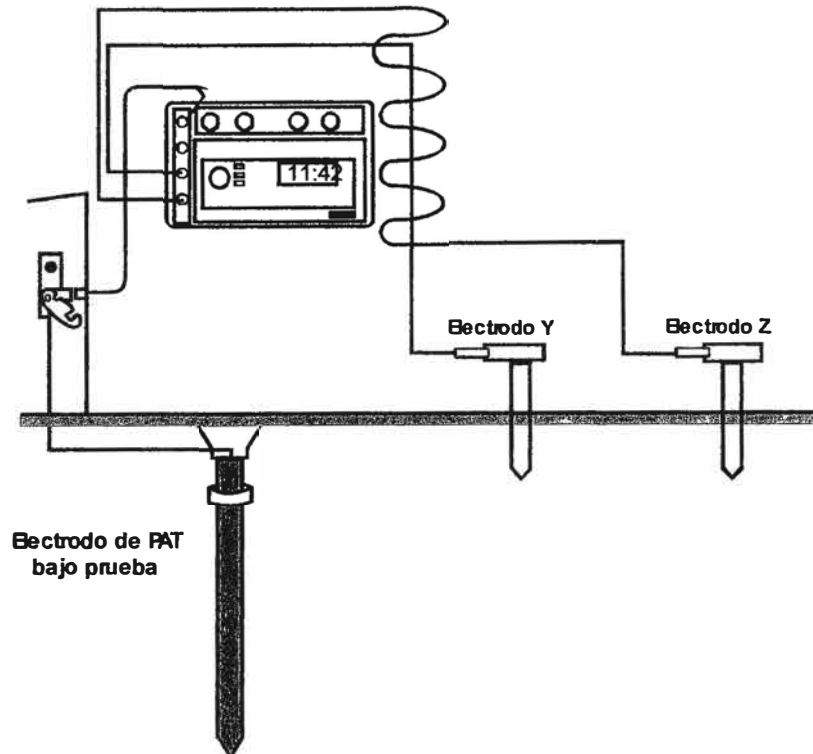


Fig. 3.17 conexión del voltímetro, para medir el ruido eléctrico

- En caso de que el terreno este muy seco, es recomendable humedecer los electrodos de los extremos especialmente (los de corriente), para disminuir la Resistencia del electrodo de Tierra.
- Un mal contacto de los electrodos de prueba con el suelo, puede producir una excesiva Resistencia de los electrodos. En estos casos, se recomienda compactar la Tierra que rodea a los electrodos de modo que se elimine capas de aire entre los mismo y la Tierra. Si el problema es la Resistividad, se puede mojar el área alrededor del electrodo, con lo que esta disminuirá. Incluso se podrían utilizar varios electrodos de potencial y corriente para disminuir la Resistencia de contacto con el suelo.
- Algunas veces el electrodo bajo prueba está instalado en cemento, concreto o cualquier superficie en la que no es fácil la colocación de los electrodos de prueba. En estos casos, dependiendo de la sensibilidad del equipo. Puede bastar colocar los

electrodos sobre la superficie y mojar dicha área. Si el equipo tiene una gran tolerancia a grandes Resistencias de contacto- sin embargo, si esto no es suficiente y el equipo de medición presenta alarmas de alta Resistencia, se pueden utilizar mallas o pantallas metálicas y agua como se muestra en la figura 3.18, para disminuir la Resistencia de contacto de los electrodos con el suelo. La distancia a la cual se colocan estas pantallas es calculada de igual forma que con los electrodos.

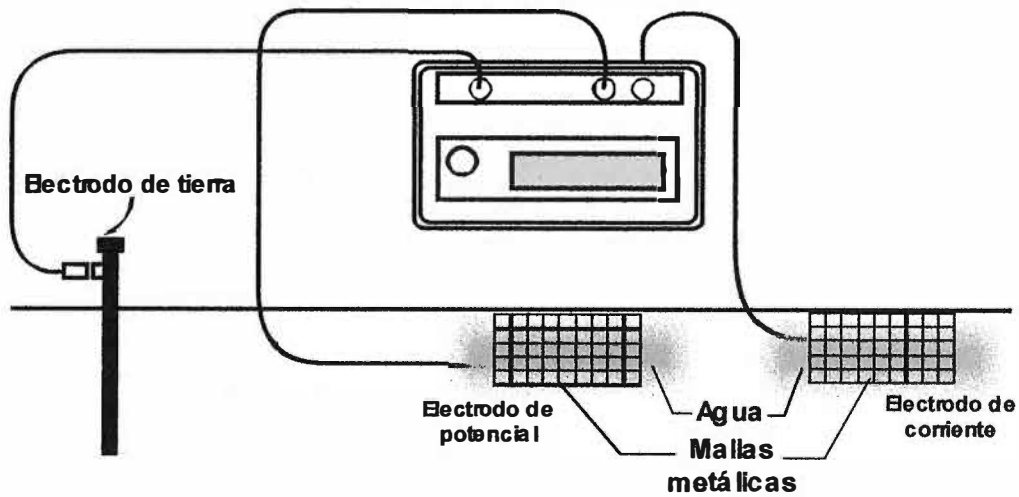


Fig. 3.18 uso de mallas metálicas como electrodos de prueba

CAPITULO: IV

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

- Entre los componentes principales que participan en una puesta a tierra, tenemos:
- Electrodo de puesta a tierra
- Conductores de puestas a tierra
- Conductores de protección
- Puntos de puesta a tierra o barras equipotenciales
- Conectores de puestas a tierra
- Conductores de enlace de electrodos de tierra
- El suelo o terreno

Adicionalmente podría considerarse

- Relleno para el tratamiento del terreno

Entre las sustancias, principalmente metálicas que se usan en las PAT; tanto en los electrodos como en sus accesorios; tenemos al cobre, Hierro, Zinc, Cromo, Aluminio, grafito, etc. En éste capitulo analizaremos respecto de la conveniencia o no de usar estas sustancias.

4.1 ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

4.1.1 ELECTRODOS REGLAMENTADOS POR EL CNE

El CNE considera electrodos a las configuraciones siguientes:

- A.** Un sistema de tuberías metálicas de agua que tenga continuidad de conducción eléctrica y que se encuentre enterrada por lo menos a 60 cm bajo el piso terminado, y se extienda no menos de 3 m más allá de los extremos del edificio que recibe alimentación eléctrica
- B.** Un entubado metálico de pozo de agua que no sea menor de 7,5 cm de diámetro y se extienda al menos 15 m debajo de la cabeza del pozo.
- C.** Un electrodo artificial de puesta a tierra.

En este caso se considera electrodos artificiales a las configuraciones siguientes:

- a.** Electrodo incrustado en concreto.
- b.** Electrodo de varilla.

c. Electrodo de placa

La descripción de los electrodos artificiales los veremos en la sección 4.1.3

4.1.2 MODELOS DE ELECTRODOS NO REGLAMENTADOS POR EL CNE

Algunas normas o estándares, consideran también electrodos de puestas a tierra, a las siguientes configuraciones:

A. La estructura metálica del edificio.

La estructura o armazón metálica del edificio puede considerarse como electrodo cuando hace contacto con el suelo en forma efectiva y también debe conectarse al sistema de electrodos presentes en la instalación.

Entre algunos inconvenientes se tiene:

- Su resistencia es variable en el tiempo debido a efectos de corrosión.
- En algunos casos los cimientos no hacen contacto franco con el suelo debido a que los cimientos están sobre capas de arena o tienen materiales plásticos, que son usados como barreras de vapor.

B. Anillo de tierra:

se da ésta denominación al modelo consistente en un cable desnudo usualmente de cobre, colocado alrededor de cierta estructura o planta o edificio. Estándares como el del NEC consideran debe tener una longitud mínima de 6m y 35mm² de sección. Este conductor debe estar en contacto directo con el suelo a una profundidad no menor de 76,2cm [1]

4.1.3 ELECTRODOS ARTIFICIALES:

El CNE considera:

A. electrodo incrustado en concreto.

Consiste en una o mas varillas en contacto directo con el suelo y cubierto de concreto. Este sistema también es conocido como la "Tierra Ufer".

El Ingeniero Herb Ufer (EE.UU.); en la década de los sesenta, comprobó que mediante varillas de refuerzo de 5.8cm y enterradas en cimientos de concreto de los edificios, consiguió obtener valores de resistencias de hasta 5 Ohm o menos. [1]

Estos electrodos pueden estar instalados con:

- Conductor de cobre desnudo o
- una placa metálica

En las normas técnicas peruanas NTP 370.056:1999, indica según el gráfico respecto de la forma en que irá instalado el conductor de cobre.

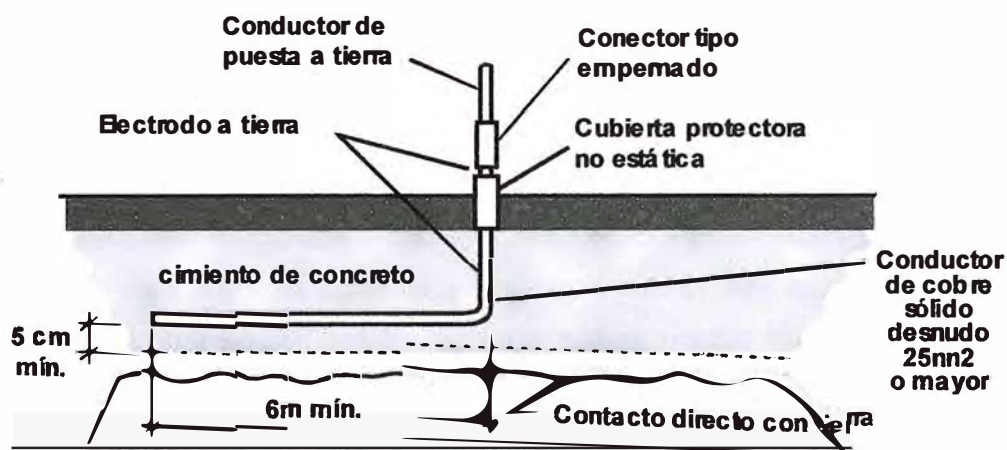


Fig.4.1 Electrodo incrustado en concreto

En este tipo de electrodos presenta también ciertos inconvenientes como:

- El concreto puede dañarse por efectos de corrosión de la varilla o por corrientes de falla altas.
- El acero puede expandirse hasta dos veces su volumen original, cuando se corroe
- una corriente de falla alta sería capaz de convertir la humedad presente en el concreto en vapor de alta presión, por lo que podría provocarse fisuras en el concreto.

Las dimensiones mínimas se indican en la tabla resumen de la sección 4.1.3.4

B. Electrodo de varilla.

Este es el tipo de electrodo típico al que nuestro estudio principalmente está dirigido. De acuerdo al CNE. Debe Ser de cobre o de acero revestido con cobre.



Fig.4.2 Electrodo de varilla

Esta es la forma más común de electrodos debido a su fácil instalación y su costo relativamente barato. Usualmente de forma cilíndrica y normalmente se introducen en el terreno de forma vertical, ya sea por hincado, o enterramiento progresivo.

Están construidas también de hierro o acero galvanizado o revestidos con una capa de cobre; la que debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente; esto último asegura que el cobre no se deslice al enterrar la barra.

El acero da la rigidez necesaria, para que puedan ser enterradas fácilmente con martinets manuales, mecánicos o neumáticos o con cualquier otro método conveniente. En condiciones de suelo más agresivo, por ejemplo cuando hay alto contenido de sal, se usan barras de cobre sólido. Las barras de acero inoxidable son más anódicas que el cobre y se usan ante riesgo de corrosión galvánica. Sin embargo, debe considerarse el hecho que el acero inoxidable tiene baja capacidad de transporte de corriente en comparación con el cobre. Indicaciones respecto de su instalación y medidas también pueden encontrarse en la figura 4.3, extraída de las NTP 370.056:1999.

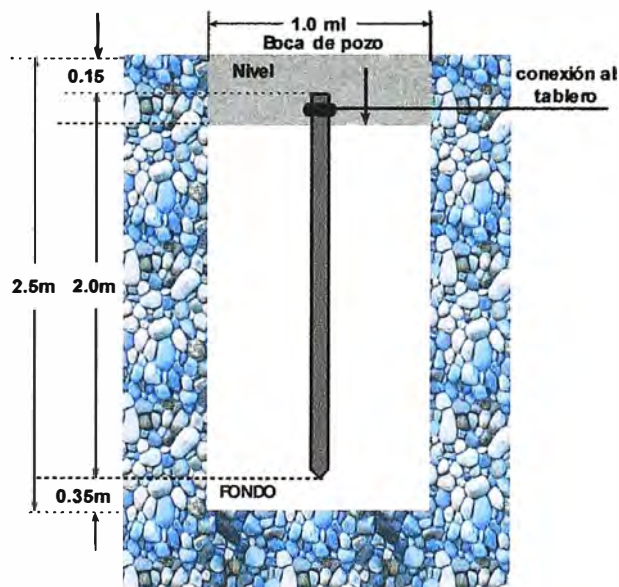


Fig.4.3 Instalación de un electrodo vertical, según NTP 370.056:1999

Las dimensiones mínimas según el CNE se indican en la tabla resumen de la sección 4.1.3.4

C. Electrodo de placa:

Estos deben ser sólidos y de tamaño sustancial normalmente de forma rectangular o cuadrada y ofrecer una gran superficie de contacto con el terreno en relación a su espesor. (Figura 4.4).

Justamente debido a su gran área de contacto es recomendado en terrenos que tengan alta resistividad; el código no indica la forma vertical u horizontal en que deben ser instalados.

Otros estándares indican, sean enterradas verticalmente, de modo que su arista superior quede, como mínimo, a 50cm debajo la superficie del terreno. Cuando se usan varias planchas, deben instalarse a cierta distancia para prevenir una interacción. Esta distancia es mínimo de 2 m extendiéndose hasta 9 m.



Fig.4.4 Electrodo de placa

El código establece ciertas medidas mínimas como se vera en la tabla de la sección:

4.1.3.4

D. Tabla resumen de medidas de los electrodos artificiales, según el CNE

La longitud, diámetro y profundidad y el área indicadas; se refiere a valores mínimos.

Tabla 4.1: Electrodo embutido en concreto

tipo	material	long(m)	Sección(mmm2)	Área(m2)	Espesor (mm)
Conductor	Cu	6	Ver tabla 43 (CNE)	X	X
placa	Fe o acero	X	X	0.4	6
	No Fe	X	X	0.4	1.5

Tabla 4.2: Electrodo de varilla

material	Diámetro	Longitud.	Profundidad
Cu	16mm	2m	2.5m
Acero-Cu	13mm	2m	2.5m

Tabla 4.3: Electrodo de placa

material	Área(m2)	Espesor (mm)	Profundidad
Fe o acero	0.2	6	2.5m
No Fe	0.2	1.5	2.5m

4.1.4 METALES USADOS EN LOS ELECTRODOS ARTIFICIALES:

El CNE recomienda que los metales a usarse sean: cobre o acero con cobre; Sin embargo en el mercado se pueden encontrar de otros materiales como: hierro, zinc, cromo, grafito etc. Respecto del aluminio, su uso no está recomendado.

Los electrodos de tierra pueden ser utilizados en forma individual o varios interconectados entre sí; en este caso se recomienda sean del mismo material, para evitar problemas de corrosión por par galvánico.

El cobre en las puestas a tierra

El conductor de cobre es la primera elección para construir sistemas de puesta a tierra. El cobre tiene una excelente conductividad eléctrica, disipa rápidamente la energía térmica.

El cobre y las aleaciones con alto contenido de cobre se usan para minimizar la corrosión galvánica con los conductores a tierra de cobre, para aumentar la longevidad en aplicaciones con bajo nivel de corrosión y para soportar los rigores de repetidas corrientes de falla.

Es importante por ejemplo en el caso de conectores que el 80% sea de cobre, y haya pasado la prueba de corriente de falla, si se usa en el enterramiento directo; por efectos de corrosión.

Finalmente, el cobre puro y las aleaciones con elevada concentración de cobre rinden muy bien en la mayoría de condiciones de terreno (Norma 467 de UL para Puestas a Tierra y Conexión Equipotencial)

4.1.5 ELECTRODOS ARTIFICIALES COMERCIALES.

Además de los electrodos reglamentados por el CNE, se pueden encontrar en el mercado, otras variedades de ellas, en diferentes tamaños, formas y características. Estos electrodos deben principalmente soportar la corrosión y tener una adecuada resistencia mecánica. Entre ellas:

- A. Barras metálicas sólidas (picas o jabalinas).
- B. Picas desmontables.
- C. Conductor desnudo multifilar.
- D. Cintas metálicas (pletinas).
- E. Tuberías metálicas.
- F. Placas metálicas.
- G. Mallas.
- H. Electrodos no convencionales

A. Barra metálica sólida (pica o jabalina).

Se encuentran con nombres comerciales o denominaciones como:

a.- Varillas Copperweld y Conduweld Lisas.

Es una de las más usadas, por su bajo costo. Entre sus características:

- Su longitud y diámetro es variada
- Conexión cobre con cobre en la parte superior
- Están hechos de acero y recubierto de una capa de cobre
- se recomienda sea de 14mm de diámetro y con un espesor de cobre de al menos 2mm. De esta forma al hincar la pica en el terreno no se descamisará [4]

b.- Varillas multiformes de acero galvanizado.

Entre sus características

- usada con frecuencia en suelos corrosivos
- usualmente presentan área de contacto más grande que la varilla copperweld, por lo que no necesitan mucha longitud.
- Se forma por un perfil de acero galvanizado, y puede ser en forma de cruz, de ángulo recto o en "T".

c.- Electrodo profundo.

Este tipo de electrodo no es más que una varilla Copperweld unida a un conductor de cobre desnudo de gran longitud. Este electrodo es utilizado en terrenos donde haya mucha roca, se hace una perforación vertical profunda hasta encontrar las capas húmedas de la tierra, ya que la humedad aumenta la conductividad.

d.- Recomendaciones importantes

En caso de terrenos rocosos. Cuando la roca está a menos de 2,40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical. Pero, si no es este el caso, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para el caso a 80 cm. de profundidad por lo menos. [4]

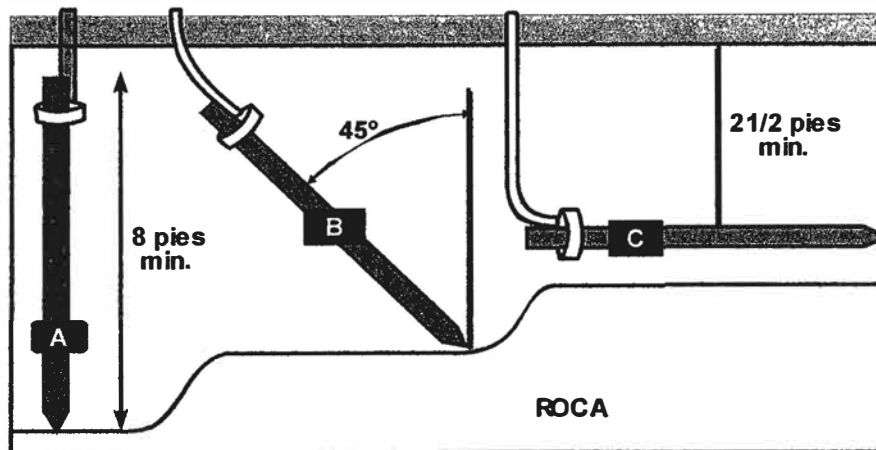


Fig.4.5 forma como pueden instalarse los electrodos en caso de rocas

- La profundidad a que deben introducirse las varillas no debe ser menor de 2,5 m para cualquiera que sea el tamaño o número de varillas que se utilicen [10]
- Si se instala un electrodo vertical y a una profundidad menor de 1,2m, se encuentra roca; entonces la varilla debe ser enterrada horizontalmente a una profundidad mayor a 60cm. [10]
- Asimismo si la roca se encuentra a una profundidad mayor de 1.2m, la recomendación es que la varilla alcance el fondo de la roca y el resto sea enterrado horizontalmente a profundidad no menor de 60cm. [10]
- Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre de 10 milésimas dura un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas dura hasta 45 años. En cambio, una varilla de acero galvanizado tiene una vida estimada de 15 años. [4]
- Cuando hay varios electrodos estos deben estar interconectados y se permite usar conductores de 16mm². [10]

B. Picas desmontables o seccionables

Están especialmente diseñadas para puestas a tierra profundas. Se encuentran en el mercado de cobre o acero recubiertos de cobre, de 14 o 16 mm de diámetro y de 200 cm. de longitud empalmables. Consta de la siguientes partes: sufridera manguito de acoplamiento, electrodos.

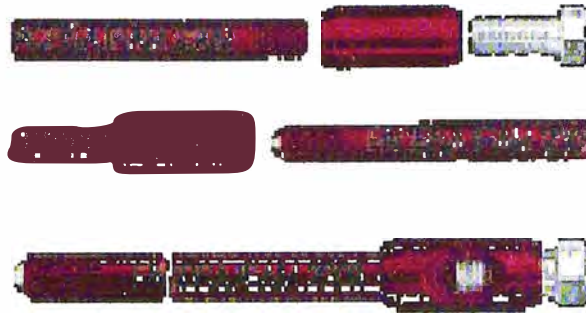


Fig.4.6 Picas desmontables o seccionables

Además de tener una rosca laminada en cada extremo para poder unir las entre sí. Esta unión se efectúa con manguitos de acople.

Los manguitos de acople están hechos de bronce resistente, roscados, para calzar justo en las jabalinas acoplables. De esta manera se pueden hacer puestas a tierra más profundas colocando una jabalina a continuación de otra.

Las sufrideras se usan para resistir los golpes del martillo al ser enterradas, evitando la deformación de la rosca.

C. Conductor desnudo multifilar

Esta configuración es generalmente usada cuando el electrodo es colocado en configuración horizontal. Lo más recomendable es usar conductores de cobre temple semiduro o blando, desnudo. Se sugiere sea de cobre de al menos 35 mm^2 de sección, o cables de acero galvanizado de un mínimo de 2.5 mm de diámetro. Se deben enterrar a una profundidad no inferior a los 50 cm. (Estándares Españoles) o 75cm (norma NTP 370.056)

Según la forma como se instale puede ser:

- **Cable rectilíneo:** si el tendido es horizontal
- **Cable enterrado en bucle:** si el tendido del cable tiene conectado el principio y el final. No es necesario aunque si muy recomendable, que se coloquen forma circular. Se puede colocar en zanjas paralelas en forma de elipse más o menos alargada. La única precaución a seguir es que la distancia mínima entre los ejes de las zanjas sea de 5m para evitar interferencias.
- **Cable enterrado en zig- zag:** se recomienda que la curvatura del cable no sea mayor a 180° . A efectos de cálculo la longitud será la del cable enterrado más de la zanja construida.

- **Conexión en espiral:** Cable de cobre desnudo en espiral de diferentes diámetros y enterrados a diferentes profundidades para hacer contacto con las diferentes capas de la tierra.
- En el grafico siguiente tomado de la NTP 370.056:1999, se establecen el esquema de conexionado de un conductor rectilíneo y otro en zig-zag.

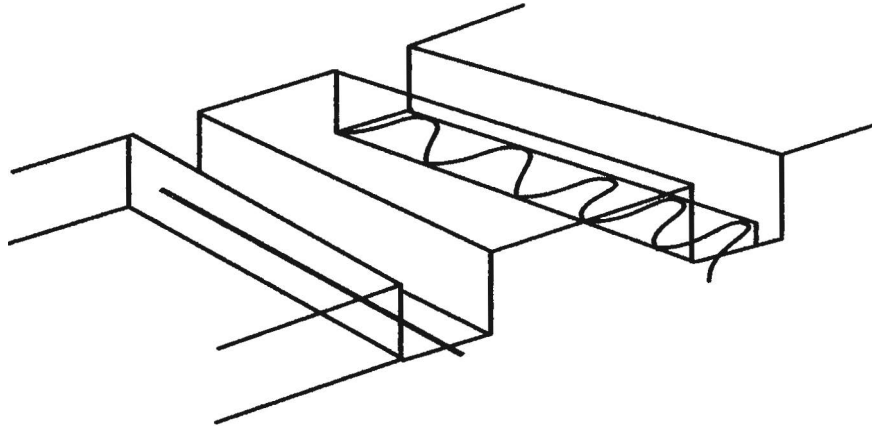


Fig.4.6 zanjas con conductores enterrados en forma horizontal y zig-zag

D. Cintas metálicas (pletinas horizontales).

Las pletinas usualmente son de Cobre, existen en el mercado a partir de 3.0 m de longitud, con secciones diferentes; la más adecuada puede ser (0.003 m x 0.04 m); para su conexión se taladra un hueco de 0.013 m. en uno de los extremos. [12]

E. tubo metálico.

Este tipo de electrodo puede ser la tubería metálica del agua. El diámetro debe ser de mínimo 19mm, si el tubo es de acero o hierro tiene que tener una cubierta de otro metal para que lo proteja de la corrosión, la tubería debe estar enterrada por lo menos 3m.

También hay tubos de acero zincado de 60 mm de diámetro mínimo, o de cobre de 14 mm de diámetro [1]

F. placas metálicas.

Según el CNE la sección mínima debe ser de 0.2m²; sin embargo Suelen encontrarse 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 más utilizadas son las de 0.5mx1m y las de 1mx1m.

Las planchas de hierro fundido tienen un mínimo de 12 mm de espesor y son cuadradas de 91,5 ó 122 cm por lado; también hay de hierro zincado de al menos 4 mm de grosor, y una superficie útil nunca inferior a 0.5 m². [4]

Cuando la placa esta enterrada horizontalmente; la denominación usual es la de electrodo tipo plato. Figura 4.7



Fig.4.7 electrodo tipo plato

- **Placas metálicas tipo Rehilete.**

Este electrodo se forma de dos placas de cobre cruzadas, las cuales van soldadas. Este tipo de electrodo es bueno para terrenos donde es difícil excavar, ya que tiene mucha área de contacto.

- **Electrodo tipo placa-estrella**

Este tipo de electrodo es una placa que tiene varias puntas en su contorno, esta se conecta por medio de una barra atornillable. Su principal ventaja es que ayuda a que se disipe la energía a través de sus puntas. [20]



Fig.4.8 Electrodo tipo placa-estrella

G. Mallas.

La malla se hace armando una red de conductores, Los cables empleados son: acero, acero inoxidable, acero galvanizado, y cobre. Para evitar la corrosión galvánica en terrenos de baja resistividad, algunos proyectistas, desde el diseño utilizan en sus mallas de tierras, cable de cobre estañado. Las mallas se diseñan para obtener bajas

resistencias de PAT, con el fin de minimizar los riesgos al personal de la tensión eléctrica de paso y de contacto.

La malla consta de una red de conductores enterrados a una profundidad que usualmente varía de 0,30 a 1,0 m, colocados paralela y perpendicularmente con un espaciamiento adecuado a la resistividad del terreno y preferentemente formando retículas cuadradas.

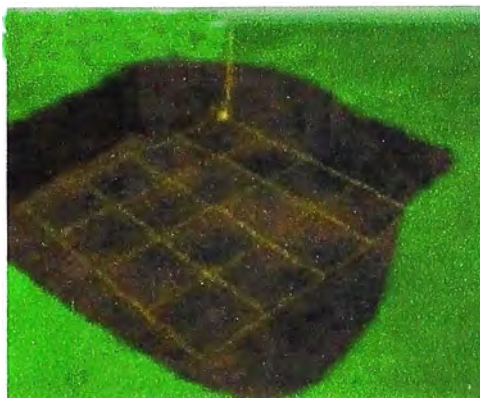


Fig.4.9 red mallada

El cable que forma el perímetro exterior de la malla debe ser continuo de manera que encierre toda el área

En cada cruce de conductores de la malla, éstos deben conectarse rígidamente con soldadura exotérmica entre sí y en los puntos donde se conectan los equipos que pudieran presentar falla o, en las esquinas de la malla, los conductores deben conectarse a electrodos de varilla o tubo de 2,4 m de longitud mínima, clavados verticalmente. En las normas de la IEEE std 80 se da mayores pautas para su diseño

4.1.6 ELECTRODOS NO CONVENCIONALES

Este tipo de electrodos no están establecidos en las normas peruanas pero algunos estándares como los europeos lo aceptan. Entre ellos tenemos:

A. Electrodos de grafito rígido [20]

Tiene ventajas comparativas con respecto a los anteriores sistemas. No sufre degradación como en el caso de los convencionales. No son contaminantes, como en el caso del electrodo químicamente activado. Tienen mayor tiempo de vida. Se utiliza en zonas rocosas.

La conformación del electrodo de grafito rígido en forma de ánodo, con un activador-conductor de relleno para la mejora de la intimación con el terreno, hacen que este

sistema de puesta a tierra, sea de alta fiabilidad. Al tratarse de un electrodo constituido enteramente por grafito, no se encuentra afectado intensamente por la corrosión a diferencia de lo que ocurre con los metales.

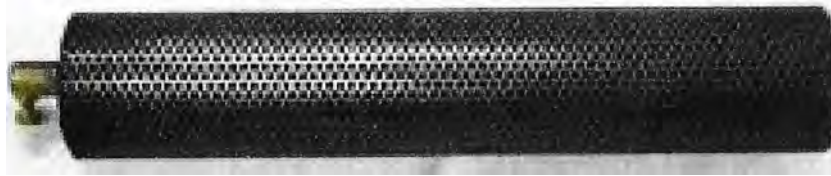


Fig.4.10 Electrodo de grafito rígido

En cuanto a los valores de resistencia de puesta a tierra en suelos de diferentes resistividades, su comportamiento es muy similar o incluso mejor al de las placas estrella, y mucho mejor al de las jabalinas convencionales. Paralelamente, la evolución de estos valores con el paso del tiempo, es inmejorable dada su baja velocidad de desgaste por corrosión, y por tanto su vida útil es en principio ilimitada en comparación con los sistemas tradicionales.

Así, la propia naturaleza del electrodo, sus dimensiones y el activador conductor envolvente, hacen que este no necesite ningún mantenimiento (regado o mineralizado) tan frecuente en los demás sistemas.

Por todas estas características, el electrodo de grafito rígido es el ideal para puestas a tierras superficiales y profundas ya que garantizan su larga durabilidad y un rendimiento más que aceptable.

B. picas de zinc [20]

Las picas de Zinc constituyen una solución ideal para la protección catódica contra la corrosión de los sistemas de puesta a tierra cuando éstos están constituidos por conductores de acero galvanizado. Previenen además los pares galvánicos tan frecuentes en sistemas de puesta tierra de estructuras de acero (tanques enterrados, o bases de tanques aéreos) frente a conductores de cobre desnudo. Las recientes normas MIE-ITC-01 y MIE-ITC-02 (estándares españoles), obligan a la instalación de puestas a tierra con conductor de acero galvanizado (o cobre aislado) y picas de Zinc en refinerías y parques de tanques de almacenamiento de combustibles. Estas consideraciones técnicas son extensibles a instalaciones como gasolineras (MIE-ITC-04), plantas químicas, etc.



Fig.4.11 electrodo de zinc

Las principales características de estas picas son;

- a) Buen rendimiento por su baja resistencia eléctrica
- b) Gran superficie de dispersión y buena intimación con el terreno ya que se presentan con saco relleno de activador-conductor en base bentonítica
- c) Fácil manipulación y fácil instalación por cualquier usuario
- d) Posibilidad de determinar su estado de degradación sin desenterrarlas

C. Electrodo de Picrón [20]

Los electrodos de PICRÓN han sido diseñados para sistemas de puesta a tierra de altas prestaciones, especialmente para puestas a tierra profundas, en terrenos pantanosos, con niveles freáticos altos (zonas deltaicas) e incluso en aguas muy agresivas (ambientes marinos o directamente en agua de mar), para instalaciones eléctricas de alta y baja tensión, pararrayos, y equipamientos informáticos o de robótica.

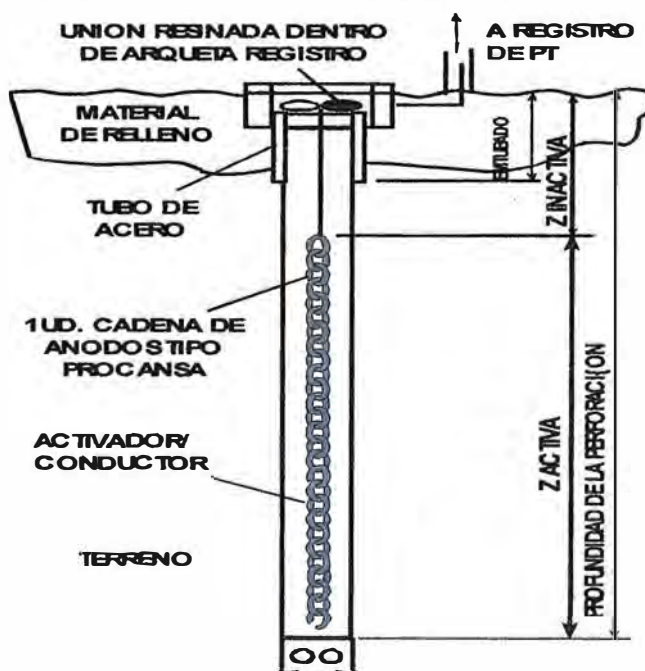


Fig.4.12 esquema de un electrodo de picron

Los electrodos de PICRÓN pueden considerarse el sistema de puesta a tierra de mayor garantía y estabilidad del mercado.

Sus principales características son:

- a) Duración ilimitada (vida >30 años), debido a su mínima degradación por corrosión
- b) Pueden utilizarse bajo forma de electrodos únicos o electrodos en cadena, para instalación en perforaciones verticales desde diámetros de 160 x 3000 mm, o bien pueden instalarse directamente depositados sobre sedimentos marinos
- c) Nulo mantenimiento, pues no requieren regados periódicos para establecer su conductividad

D. Electrodos “secundarios” o “activos” [4]

Son electrodos especialmente preparados, es una variación de los electrodos tipo jabalina, pero en forma de tubo. Un ejemplo de electrodo secundario consiste de un tubo de cobre de 50 mm de diámetro, disponible en longitudes de hasta 6 metros. El cañón interior se llena parcialmente con sales metálicas en bruto y los extremos superior e inferior del tubo se sellan con tapas. Se perfora el tubo en la parte superior para ventilación y también para drenaje en la parte inferior. El material de relleno recomendado es Bentonita.

El dispositivo funciona del siguiente modo:

Producto de los cambios en la presión atmosférica y del movimiento natural del aire, se bombea aire a través de los huecos de ventilación, en la parte superior del tubo. La humedad existente en el aire absorbido entra en contacto con la sal y se forman gotas de agua vía un proceso higroscópico.

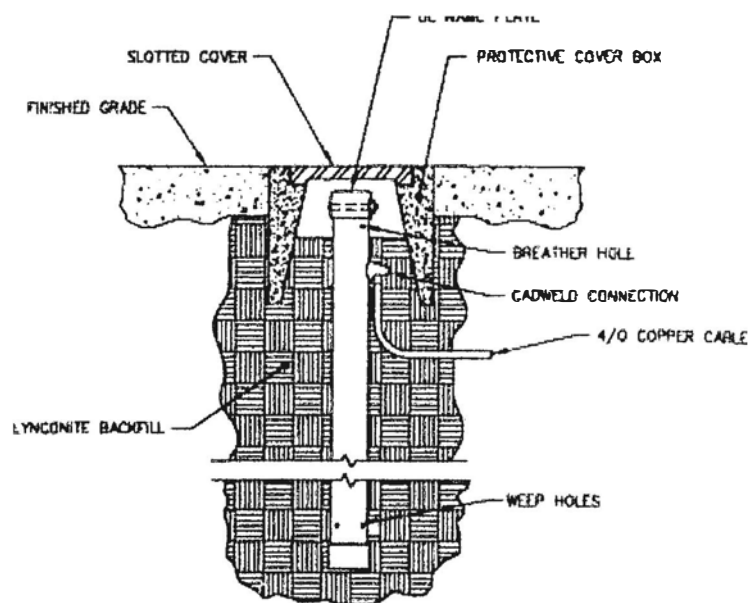


Fig.4.13 Electrodos “activos”

Al acumularse la humedad, se forma una solución electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo. Con el tiempo se forma suficiente electrolito el cual fluye a través de las perforaciones inferiores de drenaje hacia el suelo circundante, mediante osmosis. De este modo, el electrolito forma “raíces” en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.

4.1.7 DIMENSIONES MÍNIMAS DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA, TOMADOS DE OTROS ESTANDARES.

Respecto de las normas del CNE, estas difieren en ciertos valores mínimos, como puede observarse en el anexo A cuadro V.

4.2 CONDUCTORES DE CONEXIÓN A LA PUESTA A TIERRA

4.2.1 EFECTOS ADICIONALES DE LA CORRIENTE DE FALLA SOBRE UN ELECTRODO

La primera tarea de un sistema de puesta a tierra, conducir de forma segura las corrientes de falla a tierra; pero debe tenerse en cuenta que los elementos conductores deben soportar un elevado choque térmico debido al paso de ésta corriente. Dependiendo de cómo los electrodos del sistema de puesta a tierra son dimensionados, las temperaturas en el conductor pueden alcanzar de 250°C (para el cobre en aplicaciones de tensiones) hasta encima de los 600°C. El conector debe ser capaz de manejar estas temperaturas extremas sin pérdida de su integridad Asimismo debido a la presencia de campos electromagnéticos y el conductor con corriente, se producirá un esfuerzo mecánico.

La magnitud y dirección de la fuerza mecánica se relaciona al camino de conducción, a la proximidad del conductor y a la magnitud de la corriente de falla.

4.2.2. CONDUCTORES DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA.

El calibre de estos conductores se calcula con ayuda de la tabla 3-X del CNE, esta se muestra en la tabla siguiente.

Es preciso que el conductor que conecte del puente de unión principal al sistema de tierra sea de una sola pieza, sin empalmes, excepto con aquellas uniones logradas mediante procesos irreversibles, como son los procesos de soldadura exotérmica o los conectores de comprensión.

Tabla 4.5 conductor de puesta a tierra para sistemas de corriente alterna.

TABLA 3 – X (CNE)	
CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA PARA SISTEMAS DE CORRIENTE ALTERNA.	
Sección nominal del conductor mayor de la acometida o su equivalente para conductores en paralelo (mm ²)	Sección nominal del conductor de puesta a tierra (cobre) (mm ²)
35 o menor sección	10
50	16
7	25
95 a 185	35
240 a 300	5
400 a 500	7
Más de 500	95

este conductor, si es de calibre 25mm² o mayor, no requiere de protección, excepto en casos donde este expuesto a daño físico severo . Los calibres menores, deben correr siempre por tuberías conduit.

En el caso de las tuberías conduit , estas deben ser eléctricamente continuas; esto es, deben estar conectadas a tierra en ambos extremos.

4.2.3 CONDUCTORES DE PROTECCIÓN.

Es un conductor separado instalado con cada circuito y está presente para asegurar que parte o toda la corriente de falla regrese a la fuente a través de él. Puede ser un conductor individual, la cubierta metálica exterior de un cable o la estructura de un ducto metálico.

Estos conductores aseguran que las partes conductivas expuestas (tales como carcasas metálicas) permanezcan aproximadamente al mismo potencial durante condiciones de falla eléctrica. Las dos formas de conductores de conexión son:

- Conductores de conexión equipotencial principales, que conectan entre si y a tierra partes conductivas expuestas que normalmente no llevan corriente, pero podrían hacerlo bajo una condición de falla.
- Conductores de conexión suplementarios, para asegurar que el equipo eléctrico y otros ítems de material conductivo en zonas específicas estén conectados entre si y permanezcan sustancialmente al mismo potencial.

Es esencial, para ambos tipos de conductores que el calibre escogido de conductor sea capaz de llevar el valor total de la corriente de falla estimada, por la duración estimada, sin perjuicio para el conductor o para sus uniones.

El dimensionamiento de los conductores de protección, deben calcularse conforme al valor de la corriente que circule por ellos. La sección mínima pueden determinarse por **la fórmula de Onderdonk**. [8];[24]

$$I = \frac{1973,55.S}{\sqrt{33t}} \cdot \text{Log}\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right) \quad (4.1)$$

Donde:

- I : Corriente en Amperios.
- S : Sección transversal en mm²
- t : Tiempo, en segundos, durante el cual se aplica la corriente I
- T_m : Máxima temperatura admisible, en °C
- T_a : Temperatura ambiente en °C

Normalmente sin embargo, razones mecánicas determinan una dimensión mayor.

El CNE determina que la sección de los conductores de protección, no deberá ser menor que los valores indicados en la Tabla 3 – XI, del CNE (tabla 4.6) y se basa en la capacidad nominal de corriente de los dispositivos de protección contra sobre corriente que protegen a los conductores del circuito, por otra parte también señala que cuando los conductores del circuito se dimensionan para compensar la caída de tensión, los conductores de protección deberán ser dimensionados proporcionalmente en la misma proporción.

El CNE señala que no deberá colocarse ningún interruptor o disyuntor en el conductor de protección de una instalación interior.

Tabla 4.6 Sección mínima de los conductores de protección

TABLA 3 – XI (CNE)	
SECCION MINIMA DE LOS CONDUCTORES DE PROTECCION	
Capacidad nominal o ajuste del dispositivo automático de sobrecorriente ubicado antes del equipo, tubería, etc. No mayor de (A)	Sección nominal del conductor de protección (cobre) (mm ²)
15	2
20	3
60	5
100	8
200	16
400	25
800	50
1000	7
1200	95
2000	120
2500	185
4000	240
6000	400

4.3 CONECTORES DE PUESTA A TIERRA

Consiste en unir dos o más conductores, ya sea por medios mecánicos o por fusión; para ponerle continuidad a un circuito eléctrico. La selección de las mismas se debe hacer con un adecuado criterio técnico, deben satisfacer requerimientos de estándares aplicables, porque estarán sometidos a impactos mecánicos, eléctricos y térmicos; en consecuencia son factores importantes también el diseño, tamaño y material usado.

En conclusión la selección centra en tres criterios fundamentales: seguridad, confiabilidad y costo, para la aplicación específica.

En lo posible se sugiere sea el mismo cobre, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global.

4.3.1 ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LA ELECCION DEL CONECTOR

En ocasiones durante el mantenimiento, se han encontrado conexiones con resistencia de más de 20 Ohm. [8] Claramente, esto perjudica el comportamiento del sistema de electrodos. Por eso es importante tomar en cuenta los aspectos que se detallan a continuación.

A. Resistencia eléctrica en los contactos del conector

si se hace un análisis microscópico del contacto entre conductores (conector y cable) en los electrodos, encontraremos “picos y valles” (figura 4.14). En los puntos en contacto franco (puntos “A” de la figura); la resistencia entre una superficie y otra es teóricamente cero, luego tampoco habrá una caída de tensión.

A mayor cantidad de picos y valles, La resistencia aumenta; luego el conector debe maximizar los puntos de contacto y mantener ese contacto por todo el tiempo de vida deseado para esa conexión.

Entre los factores en contra están: los contaminantes de superficie o corrosión, la fatiga térmica que puede aflojar al conector y el esfuerzo mecánico y la corrosión de largo plazo.

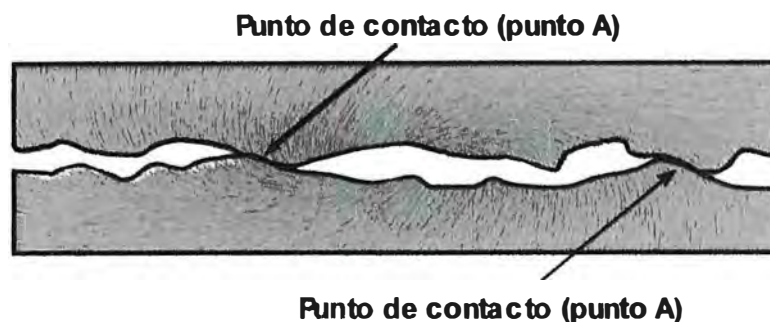


Fig.4.14 Vista Microscópica de las asperezas entre dos superficies

B. Efecto de la corrosión en los conectores

En ambientes por encima del nivel de corrosión, el grado de corrosión ocurre principalmente a través de la acción galvánica. Este tipo de corrosión es más pronunciada cuando el material del conector difiere significativamente del material del conductor en su nobleza (referido a los metales nobles).

En la presencia de una solución electrolítica, se forma una celda electrolítica; entonces fluye la corriente corrosiva del material anódico al material catódico.

En ambientes por debajo del nivel de corrosión también expondrán a una conexión a condiciones que ocasionarán una corrosión galvánica (Figura 4.15). Además, las conexiones por debajo del nivel de corrosión están sujetas a una corrosión acídica. Las condiciones del terreno pueden variar en gran medida de un lugar a otro, y el pH del terreno variará proporcionalmente. Los terrenos acídicos pueden ser extremadamente severos en aleaciones.

Por ejemplo, el bronce con elevada concentración de zinc generalmente tiene un pobre rendimiento en terrenos acídicos. Por otro lado, el cobre puro y las aleaciones con

elevada concentración de cobre rinden muy bien en la mayoría de condiciones de terreno.

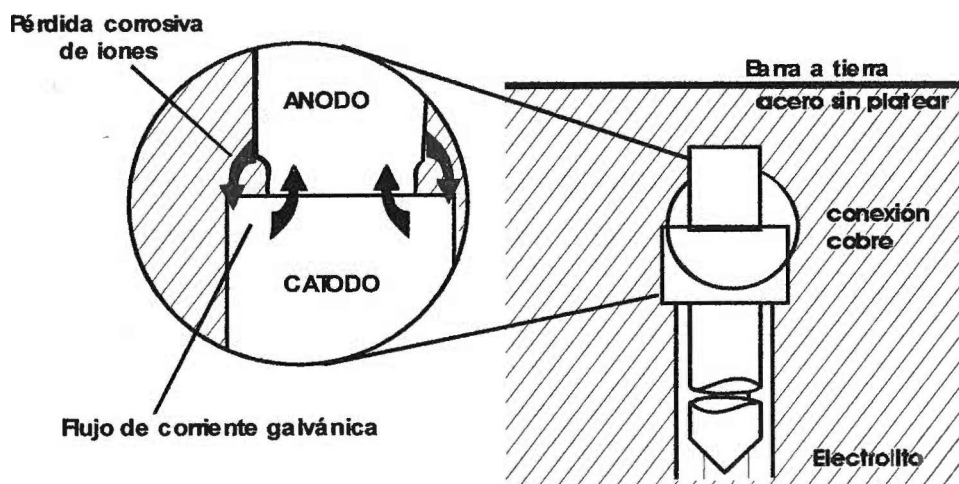


Fig.4.15 efecto de la corrosión en los conectores

4.3.2 TIPOS DE CONECTORES

Los tipos de conectores desarrollados a lo largo de los años caen generalmente dentro de dos categorías:

- mecánicos
- de fusión (soldadas)

A. Conexiones mecánicas

Son los conectores típicos y pueden ser de conexión apernada o de presión; dependiendo si electrodo es del tipo varilla o de pletina respectivamente.(fig 4.16)

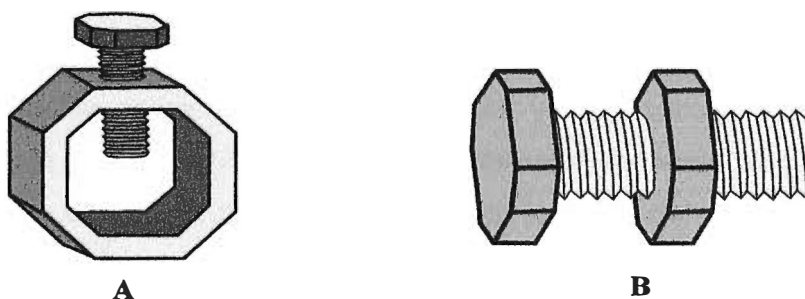


Fig. 4.16 A) Borne simple de conexión a presión y B) Perno pasante de bronce con tuerca

Cuando se apernan entre sí cintas de cobre, debe tenerse cuidado con el tamaño de las perforaciones efectuadas para acomodar el perno. Si son demasiado grandes, la capacidad de transporte de corriente de la cinta se perjudicará.

Cuando se apernan metales diferentes (por ejemplo cintas de cobre y aluminio), las superficies deben ser minuciosamente limpiadas y protegidas por un inhibidor de óxido.

Una vez efectuada la conexión, el exterior debe ser cubierto por pintura bituminosa u algún otro medio para proteger contra el ingreso de humedad. Cuando se une cobre y aluminio, el cobre primero debe ser estañado.

Para unir distintos tipos de conductores, por ejemplo, barras de tierra a cinta o cable, se dispone de abrazaderas apropiadas. Estas deben tener un alto contenido de cobre. No deben usarse bandas metálicas. En alguna oportunidad se usó uniones de tipo estañado y remachado. La cinta de cobre se perforaba, luego era estañada y remachada. Sin embargo, los remaches algunas veces se rompen y sueltan debido a vibración, etc. Este método de unión claramente no es recomendado para tratar los altos valores de corriente de falla encontrados ahora.

B. Conexiones por fusión

Entre las más comunes están:

a. Conexiones bronceadas (soldadas en fuerte)

La técnica de unión por soldadura de bronce es efectiva y de bajo costo, empleada primariamente para realizar uniones en terreno (por ejemplo en trabajos con tuberías de cobre).

En esta técnica clásica, se usa bronce como metal de relleno para formar un enlace superficial entre las partes de cobre.

La técnica emplea alta temperatura y un material de relleno que es el que más se ajusta al cobre.

A pesar de que la soldadura de bronce puede usarse para conectar cobre a metales ferrosos, esto normalmente no se cumple para puestas a tierra.

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y aleaciones de cobre. Este método tiene la ventaja de proporcionar una baja resistencia de unión la cual no se corroe. Actualmente, es el método preferido descrito por los estándares para conectar cintas de cobre en el interior de subestaciones.

Sin embargo, es esencial que el bronceado sea efectivo. Puede ser difícil hacer una buena unión en terreno, particularmente donde están involucradas grandes áreas de sección transversal. Son esenciales las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado generalmente no fluyen como la soldadura. Existe así la posibilidad de conexiones adecuadas sólo en los puntos de contacto, pero con vacíos importantes que quedan sin llenar. Para este trabajo es esencial una buena fuente de calor, particularmente para conectores grandes.

b. Conexiones soldadas en forma autógena

Cuando necesita unirse componentes de cobre de mayor medida, entonces se usa soldadura autógena en ambiente gaseoso. El arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área en torno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón, helio o nitrógeno. Esto reduce la oxidación que toma lugar durante el proceso de soldadura. El nitrógeno se usa ampliamente como el "gas inerte" cuando se suelda cobre. Se requieren materiales de relleno especialmente desarrollados, que son reconocidos por su buen comportamiento al soldar cobre.

El aluminio puede ser soldado vía arco de gas inerte de tungsteno o arco de gas inerte de metal. La soldadura en frío a presión se usa algunas veces para unión entre aluminio.

c. Uniones exotérmicas

Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro en torno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito. Si se ocupa y mantiene adecuadamente, cada molde puede usarse para realizar entre 50 y 70 uniones.



Fig. 4.17 esquema de molde para soldadura exotérmica [8]

Este tipo de unión asegura los siguientes beneficios:

- Proporciona una unión permanente, de baja resistencia eléctrica y resistente a la corrosión.
- La técnica empleada no requiere adiestramiento, relativamente.
- Puede operar a alta temperatura, permitiendo eventualmente reducir el calibre del conductor.

Este tipo de unión actualmente no es siempre permitida para conectar cobre y aluminio en subestaciones. Los metales que pueden conectarse son acero inoxidable, bronce, cobre, acero con recubierta de cobre, acero galvanizado, bronce y riel de acero. Hay algunos aspectos de seguridad involucrados con este tipo de unión, pero la técnica se ha desarrollado rápidamente para controlarlos, por ejemplo, reduciendo la emisión de gas.

4.3.3 CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE CORRIENTE DE FALLA

El tipo de unión puede influir en el tamaño del conductor usado debido a las diferentes temperaturas máximas permisibles para las distintas uniones.

Por ejemplo, la máxima temperatura permisible para uniones apernadas es 250° C, para uniones bronceadas es 450°C y 750 °C para uniones soldadas, según la norma británica BS 7430 1991 Code of Practice for Earthing. Por tanto, si considerásemos una corriente de falla de 25KA y una duración de 1 segundo, se requerirían los siguientes calibres de conductores según cada tipo de unión:

Tabla 4.7 cuadro resumen

Conexión	Apernada	Bronceada	Soldada
Temp. Máxima	250°C	450°C	750°C
Calibre Conductor	152 mm ²	117 mm ²	101mm ²

Claramente el método de unión empleado permite reducir costos mediante el uso de conductores de menor sección. Note, sin embargo, que la reglamentación adoptada debe revisarse en cuanto a que pueden citarse diferentes valores de la temperatura máxima permisible.

CAPITULO V

TRATAMIENTO DEL SUELO Y CORROSION EN PUESTAS A TIERRA

5.1 ACERCA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

El estudio de las características de los suelos es muy importante, para la toma de decisiones en el diseño de una PAT. Dependiendo de ella se decidirá sobre el material a usar en los electrodos; asimismo realizada las mediciones de su resistividad se decidirá sobre la sustancia adecuada a usar en el tratamiento del suelo. Algunos proyectistas, consideran que en casos de sistemas de PAT en baja tensión no es necesario el estudio detallado del suelo y se realizan aproximaciones en base a tablas típicas; sin embargo ésta estimación en caso de buscar mayor precisión podría llevar a resultados incorrectos; por lo que obligaría al proyectista a realizar correcciones y realizar así un trabajo innecesario. Por eso lo recomendable sería realizar un análisis de ingeniería del suelo.

5.1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA TIERRA

Su composición es diversa y compleja según el sitio, la cobertura superficial limítrofe con la atmósfera, contiene y/o favorece formas de vida. Entre más de 90 elementos caracterizados, predominan ocho (como muestra la tabla 5.1); de los cuales tres son los mas representativos: el oxígeno; el Silicio y el Aluminio están presentes en forma de óxidos hidratados.

TABLA 5.1 Composición de la corteza terrestre [24]

ELEMENTO	PORCENTAJE
Oxígeno	46,60
Silicio	27,72
Aluminio	8,13
Hierro	5,00
Calcio	3,63
Sodio	2,83
Potasio	2,59
Magnesio	2,09
Otros	1,41

5.1.2 PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE LOS SUELOS.

En el estudio de suelos es necesario tener en cuenta sus propiedades eléctricas y magnéticas y el comportamiento de los mismos cuando se producen corrientes transitorias o de falla; esto además serviría para modelar el esquema circuital que presenta su comportamiento en ese momento.

La tierra (suelo, subsuelo) tiene propiedades que se expresan fundamentalmente por medio de tres magnitudes físicas que se definen como:

- La Resistividad eléctrica (ρ) o su inversa la Conductividad (σ).
- La Permitividad dieléctrica (ϵ)
- La Permeabilidad magnética (μ)

5.1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DE SUELOS.

La resistividad del suelo depende de varios factores entre los que describiremos a continuación:

A. Naturaleza del suelo:

Los suelos en función de su naturaleza pueden ser considerados buenos, regulares o malos conductores de la electricidad. El conocer naturaleza del suelo es el primer paso para el diseño de una adecuada toma de tierra.

La tabla 5.2 indica valores de resistividad para suelos de diferente naturaleza.

Tabla 5.2 resistividad según el tipo de suelo (ASTM:G57)

Tipo de Suelo	r (Ohm-m)
Limos, Arcillas, Suelo Vegetal y de Cultivo	10 – 100
Tierra Fina, Turbas, Concreto Húmedo (suelo)	100 – 300
Tierra Aluvial, Arenas firmes, suelo seco	300 – 800
Arena Eólica, Lecho de Río, Cascajo	800 – 3000
Rocas Estratificado, Fracturadas, Monolíticas	3000 – 10000
Suelos de Feldespatos, Micas, Cuarzos	5000 – 30000
Concreto Normal Exterior (seco)	10000 – 50000

Como se puede observar: a medida que la roca es más compacta y más antigua, su resistividad se hace mayor.

B. Granulometría

La porosidad del suelo nos indica en que medida éste es capaz de retener la humedad; asimismo la calidad que tendrá el contacto con el suelo. Significa entonces Los suelos de grano fino son mejores conductores que los de grano grueso.

- Arcilla (greda)
- Arena finísima
- Arena fina
- Arena gruesa
- Cascajo grava
- Piedra suelta
- Roca



C. Humedad.

El agua pura o destilada es mal conductor de la corriente pero si ésta tiene electrolitos como el agua potable, entonces se convierte en buen conductor.

En el subsuelo el agua no está pura por eso mismo la humedad que presente un terreno o su estado higrométrico será también un factor influyente en su carácter conductivo (Fig. 5.1)

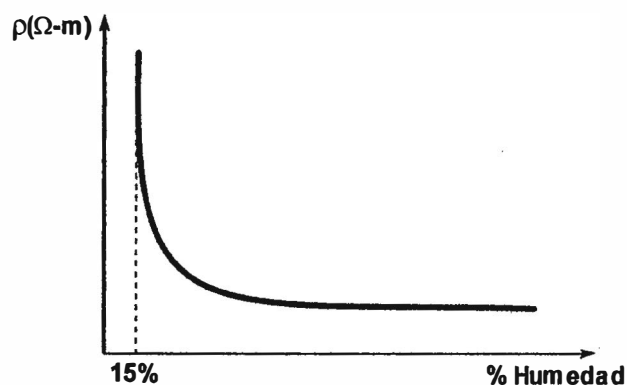


Fig.5.1 Resistividad de suelos disminuye con la humedad [8]

En un suelo húmedo se presentan dos situaciones inconvenientes:

La primera ocurre cuando está "saturado de agua", es decir cuando todos los Espacios vacíos están llenos de agua y debido a la gravedad, ésta se va hacia abajo quedando estos inter-espacios ocupados por aire en el interior de los agregados.

La segunda cuando está "saturado de humedad"; esto ocurre cuando la fuerza de capilaridad es mayor que la gravedad, luego El agua contenida en ellos no se mueve y en estas circunstancias, Por efecto de la evaporación natural de la superficie del suelo se produce un empobrecimiento del agua contenida en los agregados, fenómeno que se propaga lentamente desde la superficie hacia los estratos más profundos. Este fenómeno tiene más importancia cuanto más seco sea el clima del lugar y cuanto más superficial es la colocación del electrodo de tierra.

D. Temperatura.

La Resistividad es inversamente proporcional con la temperatura del suelo como puede notarse en el grafico.

Cuando la temperatura del suelo se enfría por debajo de 0 °C (Fig.5.2), la resistividad aumenta muy rápidamente, esto porque el agua que contiene se congela. Recordemos que el hielo es aislante desde el punto de vista eléctrico pues la movilidad de los iones del suelo a través del agua se ve detenida al congelarse ésta.

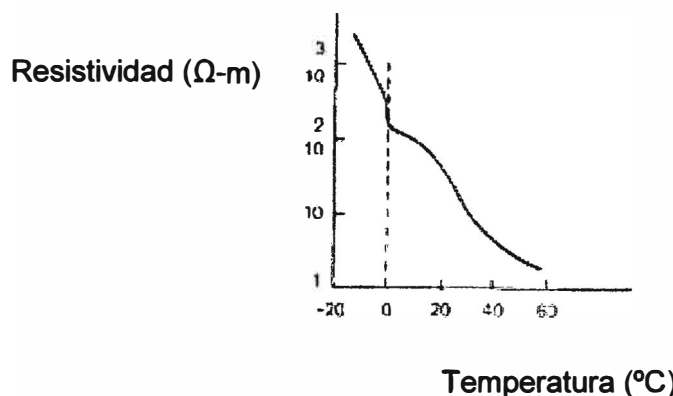


Fig.5.2 Resistividad del suelo vs Temperatura [8]

Por esta razón, en las zonas con clima continental (inviernos fríos y veranos calurosos); se sugiere instalar los electrodos de tierra a mayor profundidad

E. Salinidad

Como se sabe la sal disuelta en agua es buen conductor de la corriente. Significa que un suelo puede mejorar su valor conductivo incluso puede hacerse bueno, simplemente añadiéndole sales. La figura 5.3 nos indica esta característica.

El método mas utilizado para la mejora de la resistividad del suelo es añadir sal en las arquetas de los puntos de puesta a tierra o cerca de los electrodos si son accesibles, y después regar.

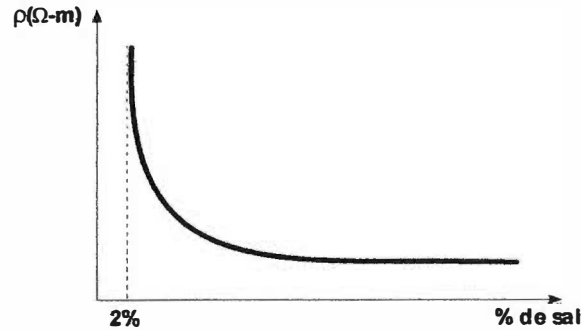


Fig.5.3 resistividad del suelo vs Salinidad [8]

No olvidar que el agua presente en el suelo hace que las sales penetren hacia la parte profunda o hacia la capa de depósito. un riego exagerado o unas lluvias excesivas “lavarían el suelo” y arrastrarían la sal que rodea los electrodos a otros lugares aumentando así la resistividad.

Como veremos luego la presencia exagerada de salinidad provoca corrosión en los electrodos y algunas sales resultan nocivas al medio ambiente.

F. Estratigrafía

La Tierra presenta una formación en capas o estratos; es decir según su profundidad presentan capas de diferentes agregados, por lo tanto de diferentes resistividades. La resistividad media o resistividad aparente será una combinación de las resistividades de todas las capas que componen el suelo. Es importante entonces conocer la resistividad de las capas para una medición correcta.

No se puede extrapolar el resultado de la capa superficial pues la variación de la composición del suelo en capas inferiores pueden presentar situaciones como las que aparecen reflejadas esquemáticamente en la figura 5.4:

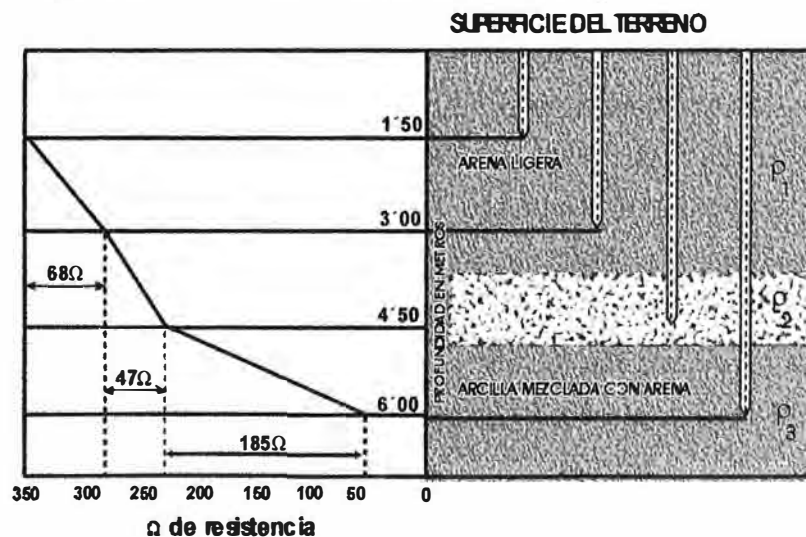


Fig.5.4 Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del suelo [2]

G. Variaciones estacionales.

A lo largo del año se presentan variaciones estacionales que inciden cuanto mas próximo a la superficie del suelo se encuentra el electrodo.

En épocas de lluvias el nivel freático se aproxima a la superficie del suelo. Presentando éste una resistividad menor que en el periodo de sequía. Estas variaciones también están asociadas a otros factores como la humedad, temperatura y salinidad, descritas anteriormente.

Para conseguir mantener el valor de la resistividad lo mas uniformemente posible a lo largo del año, es conveniente instalar profundamente los electrodos en el suelo y proteger lo mas posible el suelo de las inclemencias del tiempo; esto porque en el verano la resistividad es mayor que en invierno.

Las evaluaciones periódicas de las instalaciones deben hacerse en las épocas más desfavorables para el suelo.

H. Factores de naturaleza eléctrica

Existen varios factores de naturaleza eléctrica que pueden hacer que cambie el carácter resistivo de un suelo; entre ellos:

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

El primero afecta al suelo cuando el gradiente de tensión alcanza un valor crítico, de algunos kV/cm. Lo que puede originar la formación de pequeñas áreas eléctricas en el suelo que hacen que el electrodo se comporte como si fuera de mayor tamaño.

El segundo, la magnitud de la corriente de defecto a tierra, puede también modificar el comportamiento del electrodo de tierra si su valor es muy elevado, bien por provocar gradientes excesivos, o bien por dar lugar a calentamientos alrededor de los conductores enterrados que provoquen la evaporación del agua.

Otro fenómeno que hay que tener muy en cuenta es el deterioro mas o menos significativo de los electrodos o del conjunto de la puesta a tierra, en el caso de un cortocircuito franco o la caída de un rayo que se canalice a través de la puesta a tierra del edificio. En estos casos es reglamentaria la comprobación de la red de tierra de la instalación y que puede llegar a deteriorarse o a fundirse si la intensidad es muy elevada (cientos o miles de amperios).

I. Compactación del suelo.

Cuando la compactación del suelo es grande disminuye la resistividad (figura 5.5). Siempre que se coloquen electrodos de pica, la vibración de la maquina de penetración dejara una separación entre la pica y el suelo por lo que habrá que compactar para que se produzca un buen contacto pica-suelo. Se aconseja también la compactación alrededor de los electrodos de placa y los electrodos de conductor enterrado.

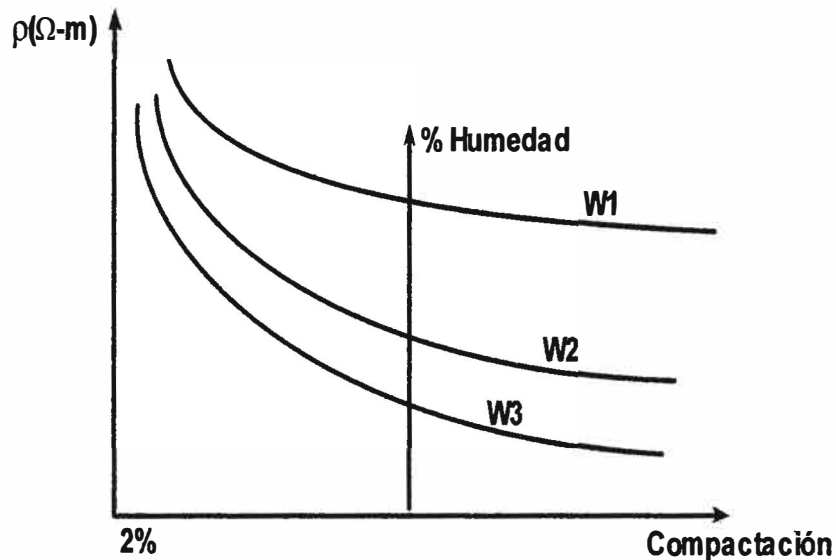


Fig.5.5 La resistividad y la compactación del suelo [8]

5.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO PERUANO.

Debido a su formación geológica, el suelo peruano presenta peculiares características en sus tres regiones. Los suelos tienen conformación estratificada, con capas superpuestas de características conductivas propias producto de su proceso de formación geológica; es decir debido a la meteorización, transporte y acumulación de productos sólidos, ha dado lugar a que la costa y Selva baja sean gruesos y laminares y en la sierra y selva alta sean delgados e irregulares. Por lo anterior la característica de su suelo no será del todo favorable cuando se busque instalar puestas a tierra.

En la practica en gran parte del suelo de nuestro país dado que la profundidad a que se entierran los electrodos es casi 3 o 4 metros como máximo entonces se ha podido comprobar que la cantidad de estratos es usualmente de dos; a los que se les denomina estratos: superficial y subyacente, a las partes superior e inferior respectivamente. La tabla siguiente nos muestra ese resumen.

Tabla 5.3 Características de la resistividad del suelo peruano.

		Region		
		Costa	sierra	selva
estrato	superficial	Limosa o arenosa seca	Limosa o arenosa húmeda	Limosa o arenosa húmeda
	subyacente	Conglomerados finos y pedregosos	Conglomerados rocosos y pedregosos	Conglomerados rocosos y pedregosos

5.2 TRATAMIENTO DEL SUELO

En el capítulo II aprendimos algunas técnicas teóricas para la reducción de la resistencia de una PAT, considerando las dimensiones geométricas de los electrodos; sin embargo no es la única forma de reducir la resistencia de una PAT. Entre otras posibilidades, tenemos:

- El cambio del suelo existente por otro de menor resistividad.
- La construcción de mallas o zanjas de interconexión con cambio de tierra y tratamiento químico.
- El tratamiento químico electrolítico del suelo.

La primera posibilidad implica dos cosas: cambio del lugar de la PAT, por ejemplo de una zona seca a otra que esté más cerca de una zona húmeda o podría ser un mejoramiento del suelo, por ejemplo mediante el zarandeo de la tierra.

La segunda posibilidad no será tratada en este informe debido que no está dentro de los alcances de la misma y análisis de mallas en las puestas a tierra necesita de un estudio más completo y riguroso.

La tercera posibilidad es la que será tema de descripción y análisis en éste informe y estará dirigido a la instalación electrodos verticales u horizontales.

En muchos países incluido el nuestro, las normas y/o reglamentos técnicos, respecto del relleno a usar para disminuir el valor de la resistencia de puesta a tierra; es somera y en otros casi no se le da la importancia debida. Sin embargo en gran parte de las instalaciones de puestas a tierra su uso se hace necesario, salvo la naturaleza del suelo se muestre favorable en el valor de su conductividad.

Debido a la informalidad que existe en nuestro medio, algunas empresas dedicadas al rubro ofrecen productos para el tratamiento de suelos; productos que son solo temporales y duran unos pocos años; provocan corrosión y desgaste en los electrodos. En otros

provocan toxicidad, depredación de suelos o contaminación en el medio ambiente; asimismo la poca información y la presencia de "recetas para instalar PAT", ha llevado al mecanicismo y empirismo en muchos proyectistas.

El objetivo de tratar el suelo consiste en que ésta presente características apropiadas para mejorar su conductividad. El grado de mejoramiento depende principalmente del valor de resistividad original del suelo, de su estructura y también del sistema de electrodos.

Es importante conocer las características iniciales del suelo; porque muchas veces se eligen elementos químicos que son solubles, y estos continúan diluyéndose progresivamente por agua de lluvia o movimiento de agua a través del área. La resistividad del suelo entonces aumentará, hasta eventualmente retornar a su valor original.

5.2.1 REDUCCION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Los suelos debieran ser cambiados en su totalidad, por suelos rico en sales naturales; cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito, etc., que son suelos de muy alta resistividad y deberían cambiarse parcialmente cuando el suelo está conformado por componentes de alta y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de alta resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad; uno de estos procedimientos es el zarandeo del suelo donde se desechan las piedras contenidas en el suelo.

El porcentaje de reducción en estos casos es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del suelo natural, resistividad del suelo de reemplazo total ó parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo, pero puede darse una idea porcentual más o menos en función al tipo de suelo y al cambio total ó parcial.

Para suelos de alta resistividad, donde se cambie el suelo de los pozos en forma total, el porcentaje puede estar entre 50 a 70 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para suelos de media resistividad, donde se cambie el suelo de los pozos en forma parcial ó total, el porcentaje de reducción puede estar como sigue:

- Cambio parcial de 20 a 40 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.
- Cambio total de 40 a 60 % de reducción de la resistencia eléctrica resultante.

Para suelos de baja resistividad, donde se cambiará el suelo de los pozos en forma parcial, el porcentaje de reducción puede estar entre 20 a 40 % de la resistividad natural del suelo.

De acuerdo a lo establecido en la IEEE-142 la resistividad del suelo podrá ser reducida por cualquier tipo de tratamiento químico desde 15% hasta 90%, dependiendo del tipo y textura del suelo circundante [24]

5.2.3 CONSIDERACIONES PARA EL TRATAMIENTO QUÍMICO DEL SUELO

Para elegir el tratamiento químico de un sistema de PAT se deben considerar los siguientes factores:

- Alto % de reducción inicial
- Facilidad para su aplicación
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del sistema de PAT)
- Facilidad en su reactivación
- Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)
- Costo de mantenimiento
- Conflicto con la protección del medio ambiente

Las sustancias que se usan para un eficiente tratamiento químico deben tener las siguientes características:

- Higroscopicidad - Alta capacidad de retener el agua por buen tiempo.
- De un tamaño de partícula relativamente pequeño
- No ser corrosivas - Alta conductividad eléctrica.
- Químicamente estable en el suelo - No ser tóxico.
- Inocuo para la naturaleza.
- De un tamaño de partícula relativamente pequeño
- El suelo debiera tener un índice de pH entre 6,0 (ácido) y 10.0 (alcalino)
- Tratememos brevemente algunos de los aspectos mencionados anteriormente.

A. Efecto corrosivo de los insumos utilizados.

Este aspecto es de vital importancia puesto que está directamente relacionado con la vida útil de los electrodos y ésta a su vez con el valor de la impedancia de puesta a tierra. En el caso de las sales por ejemplo; su carácter corrosivo es conocido en materiales como el hierro o acero; por lo que se deben tomar las precauciones del caso. En el caso del cobre el carácter anticorrosivo no es tan incidente; las varillas coperwell que describimos anteriormente han sido fabricadas con esa intención.

También, si bien es cierto que la sal un gran reductor de resistividad advertimos que si la ubicación del sistema estuviera cerca de los cimientos o paredes de un edificio podría ocasionar brotes salitrosos en el edificio.

Entre otros materiales que no debieran ser usados como relleno incluyen arena, polvo de coque, ceniza, muchos de los cuales son ácidos y corrosivos.

El efecto de la corrosión para mayor precisión, será tratada posteriormente.

B. Efecto contaminante de los insumos usados

Algunas sustancias químicas que se agregan para el tratamiento de suelos, pueden resultar tóxicas tanto para los suelos como para las personas.

En algunos países preocupados por la ecología se han prohibido algunos "Geles"

Por ser contaminantes potenciales del agua en el subsuelo. Algunas sales como el Sulfato de Cobre son tóxicas y no deben exponerse pues una dosis como un gramo puede ser letal para un niño. Otras sales como las que frecuentemente se encuentran en suelos salinos, el $MgSO_4$ y Na_2SO_4 , son tóxicas para las plantas, siendo la primera mucho más. [24]

5.2.4 SUSTANCIAS USADAS PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS

A pesar de que los suelos usualmente presenten sus sales en forma natural, los aditivos se han venido usando desde buen tiempo para resolver los problemas de puesta a tierra, incluso las normas de la IEEE80 e IEEE142, establecen que los mejoradores de suelo son determinantes para optimizar el voltaje de paso y corriente de toque; cuando se trata de la instalación de mallas de subestaciones de energía.

Los elementos químicos recomendados y usados tradicionalmente fueron cloruro de sodio (sal común), sulfato de magnesio (sales de Epsom), sulfato de cobre, bicarbonato de sodio (soda de lavar) y cloruro de calcio. En la mayoría de los casos se usaron los elementos químicos más baratos. Se esparcían en torno a los electrodos y se disolvían agregando agua antes del relleno o se dejaba que el flujo de agua natural (lluvia, etc.) los disolviera.

Así por ejemplo, usando bicarbonato de sodio, la nueva resistividad puede bajar a $0,2\Omega$ -m y usando sal común a $0,1\Omega$ -m. asimismo no es necesaria una concentración particularmente alta de sales disueltas para ver una reducción apreciable en la resistividad. Por ejemplo en agua destilada, se comprobó que: [24]

- 1,2 gramos/litro de sal común tiene una resistividad de 5Ω -m
- 6 gramos/litro de sal común tiene una resistividad de 10Ω -m

Sin embargo como se mencionó previamente, la tierra tamizada fina o tierra de moldeo normalmente es un material de relleno apropiado para rodear el electrodo enterrado.

La arcilla dura no es un material de relleno conveniente ya que si es fuertemente compactada, puede llegar a ser casi impermeable al agua y podría permanecer relativamente seca. También puede formar grandes terrones que no se afianzan alrededor del conductor.

Las sustancias usadas para el tratamiento de suelos son variadas, en la mayoría de casos se realizan combinaciones entre ellas, entre las más comunes citaremos a:

- Sales
- Carbón vegetal
- Bentonita
- Marconita
- Geles
- Cemento conductivo.

5.2.5 DESCRIPCIÓN DE SUSTANCIAS USADAS COMO RELLENOS

A. Tratamiento con sales [24]

El procedimiento de usar sales para combinar con la tierra, ha sido una de las primeras maneras de mejorar la resistividad de los suelos. Teóricamente ninguna sal en estado seco es conductiva, para que los electrolitos de las sales conduzcan corriente, se deben convertir en soluciones verdaderas o en seudo soluciones, por ejemplo: el cloruro de sodio en agua forma una solución verdadera lo mismo que el azúcar, el mismo cloruro de sodio disuelto en benceno formara una seudo solución o dispersión coloidal como también se le conoce. Entre las sales más usadas se tienen:

- Cloruro de Sodio (ClNa) “Sal de cocina”
- Cloruro de Sodio + Carbón Vegetal
- Cloruro de Calcio (CaCl_2)
- Sulfato de Magnesio heptahidratado ($\text{Mg SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) “Sales de Epsom”
- Nitrato de Potasio (KNO_3) compuesto de Salitre.

Toda medida que se tome para mejorar la conductividad del suelo circundante será beneficiosa. Estas sales se consiguen en cualquier droguería industrial y se mezclan con tierra o se esparcen de acuerdo a la técnica a usar.

Debe hacerse notar que las frecuentes lluvias irán "lavando" progresivamente estas sales del suelo por lo que habrá que reponerlas en períodos de dos a tres años.

En la figura 5.6, está reflejada la variación de resistencia de PAT en función del tiempo, tanto para un electrodo tratado con una sal y otro similar no tratado.

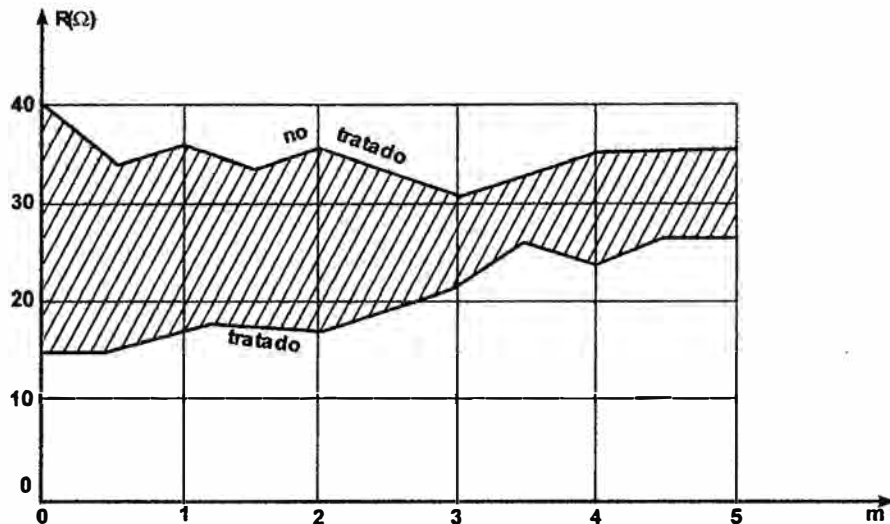


Fig. 5.6 Evolución en el tiempo de la resistencia de un electrodo tratado con sal [2]

También se hace necesario entender que el principal problema de la contaminación del suelo por sulfatos es la salinización de suelos. Los sulfatos son una de las sales que con mayor facilidad se forman como consecuencia de la meteorización de la corteza terrestre, acumulándose en las depresiones fisiográficas dando suelos salinos. Finalmente el problema más serio es la corrosión que provocan en los electrodos metálicos, este tema debe tratarse mediante técnicas adecuadas.

B. Tratamiento con cloruro de sodio y carbón vegetal [25]

El Cloruro de Sodio forma una solución verdadera muy conductiva que se precipita fácilmente junto con el agua por efecto de la percolación, capilaridad y evapotranspiración; la solución salina tiene una elevada actividad corrosiva con el electrodo, reduciendo ostensiblemente su tiempo de vida útil. Si bien es cierto que el cloruro de sodio disuelto en agua no corroe al cobre (por ser un metal noble) no es menos cierto que la presencia de una corriente eléctrica convertirá al sistema, Cobre - solución cloruro de sodio, en una celda electrolítica con desprendimiento de cloro y formación de hidróxido de sodio en cuyo caso ya empieza la corrosión del cobre.

El objetivo de la aplicación del carbón vegetal molido (cisco de carbonería) es aprovechar la capacidad de éste para absorber la humedad del medio, (puesto que el carbón vegetal

seco es aislante) y retener junto a ésta algunos de los electrolitos del cloruro de sodio que se percolan constantemente.

Es una práctica equivocada utilizar carbón mineral porque éste no absorbe (retiene) el agua salada, y sería como tratar de mejorar la resistividad del suelo agregando pequeños trozos de material conductor.

Entre las desventajas debe mencionarse lo que ocurre después de una descarga; pues parte del agua salada absorbida por el carbón se “seca” y el carbón absorbe más agua, por lo que cada vez el carbón tendrá agua menos salada. Además con el pasar del tiempo y debido a la misma humedad, el carbón se desintegra y permite que se lave la sal.

Finalmente la otra desventaja de que si el suelo es altamente rocoso, entonces es prácticamente imposible su aplicación.

C. Tratamiento con bentonita [24]

Las bentonitas constituyen un grupo de sustancias minerales arcillosas que deben su nombre al hecho de haberse descubierto el primer yacimiento cerca de Fort Benton, en los estratos cretáceos de Wyoming en 1848.

Es una arcilla color pardo, de formación natural, levemente ácida, con un pH entre 8 y 10.5; tiene baja resistividad, aproximadamente 5 ohm - metro y no es corrosiva. Humedad 300%.

Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí en lo que respecta a sus propiedades respectivas, es posible clasificarlas en dos grandes grupos:

- **Bentonita Sódica.**- En las que el ión sodio es permutable y cuya característica más importante es una marcada tumefacción o hinchamiento que puede alcanzar en algunas variedades hasta 15 veces su volumen y 5 veces su peso.
- **Bentonita Cálcica.**- En las que el ión calcio es permutable, tiene menor capacidad para absorber agua y por consiguiente solo se hinchan en la misma proporción que las demás arcillas.

Según lo anterior se concluye que para nuestros propósitos la bentonita sódica será la que se use como relleno.

La componente principal de la bentonita es la montmorillonita (pudiendo llegar al 80%) por lo que determina las propiedades fundamentales de ésta. Lo más importante de la estructura de la montmorillonita es que está formada por tres planos de mallas. Éstos planos elementales se superponen paralelamente y forman una especie de tejido de capas. Entre estas capas hay espacios vacíos llamados huecos intercristalinos que tienen la propiedad de absorber diversas sustancias, en especial el agua. Por lo anterior

se concluye que para nuestro caso, la propiedad más importante de la montmorillonita y por ende de la bentonita, es la facilidad intercrystalina de dilatación.

Básicamente el procedimiento de mejoramiento de puesta a tierra a base de bentonita, consiste en rellenar las grietas naturales, aberturas y huecos libres que existen en el suelo mediante una masa que envuelve las partículas de suelo y las une eléctricamente, formando una gran superficie buena conductora de electricidad.

La Bentonita es de carácter tixotrópica y por lo tanto se encuentra en forma de gel en estado inerte.

Por lo anterior también se utiliza bentonita en suelos de baja resistividad específica, de acción corrosiva ácida en los que se pretende proteger el electrodo o conductor de tierra contra la corrosión (por ejemplo suelos con aguas subterráneas ácidas).

Entre los inconvenientes que suelen presentar las bentonitas molidas, es que la rapidez con que pierden las moléculas del agua es mayor respecto a la que las absorben, debido a la sinéresis provocada por un exiguo aumento en la temperatura ambiente, al perder el agua pierden conductividad y restan toda compactación lo que deriva en la pérdida de contacto entre el electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo ostensiblemente, una vez que la Bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua es casi nula; esto implica que la bentonita necesita de agua para mantener sus características favorables

En un ambiente totalmente seco la mezcla se puede contraer y agrietarse y de esa manera puede perder contacto con el electrodo o suelo y aumentar la resistividad

D. Tratamiento con Marconita [24]

Es esencialmente un concreto conductivo en el cual un agregado carbonáceo reemplaza el agregado normal usado en la mezcla del concreto. Tiene algunas propiedades similares a la bentonita, es decir, provoca poca corrosión con ciertos metales y tiene baja resistividad. Fue desarrollada como un proceso que se inició en 1962 cuando ingenieros de Marconi descubrieron un material que conducía por movimiento de electrones más bien que de iones. Contiene una forma cristalina de carbón y el material global tiene bajo contenido de sulfato y cloruro.

Normalmente se considera que la Marconita tiene una resistividad de 2 ohm-metro; pero cuando ésta se mezcla con concreto, su resistividad puede bajar tanto como a 0,1 ohm-metro. Mantiene su humedad aún bajo condiciones muy secas, de modo que ha sido usada en los climas más cálidos como una alternativa a la Bentonita.

Se ha declarado que hay algo de corrosión de materiales ferrosos y de cobre mientras la Marconita está en forma ligosa, pero también se ha sugerido que forma una capa

protectora delgada. Cuando el concreto ha fraguado, se dice que la corrosión cesa. Idealmente, en el punto de ingreso a la estructura Marconita, el metal debe pintarse con bitumen para prevenir la corrosión en ese punto. El aluminio, el acero galvanizado o con una capa de estaño, no deben instalarse en Marconita.

En países como gran bretaña, su aplicación estuvo dirigida a instalaciones en espacios en interior de rocas y para prevenir el robo del cobre.

E. Tratamiento con yeso [24]

Algunas veces, el sulfato de calcio (yeso) se usa como material de relleno, ya sea sólo o mezclado con Bentonita o con el suelo natural del área. Tiene baja solubilidad, por lo tanto no se desprende fácilmente lavándolo y tiene baja resistividad (aproximadamente 5-10 ohm-metro en una solución saturada). Es virtualmente neutro, con un valor de pH entre 6,2 y 6,9. Se presenta en la naturaleza en forma natural, de modo que su uso generalmente no provoca dificultades ambientales. Se asegura que no causa corrosión con el cobre, aunque algunas veces el pequeño contenido de SO₃ ha causado preocupación por su impacto en estructuras de concreto y fundaciones (cimientos). Es relativamente barato y normalmente se mezcla con el suelo para formar un relleno alrededor del electrodo de tierra.

El tamaño de las partículas es similar al de la arena gruesa. Se asegura que ayuda a mantener una resistividad relativamente baja durante un largo período de tiempo, en áreas donde las sales existentes en la vecindad se disuelvan rápido por movimiento de agua (lluvia, etc.). Sin embargo, el hecho de que el material no se disuelva fácilmente moderará los beneficios obtenidos, ya que no penetrará difundiéndose en la tierra. Esto significa que el efecto beneficioso estará localizado digamos en una área excavada en torno a un electrodo enterrado. Esto a su vez significa que la reducción en el valor de la resistencia del electrodo no será dramática, pero será razonablemente sustentable.

F. Tratamiento por abonado electrolítico [2]

Consiste en aumentar la cantidad de electrolitos en disolución de agua del suelo aumentando el poder de retención del agua. Se utilizan para ello electrolitos a base de sulfato de calcio convenientemente tratado y estabilizado, cuya solubilidad es muy pequeña, pero que son susceptible, con poca concentración de multiplicar considerablemente la conductividad del suelo. Esta conductividad será tanto mayor cuanto mayor sea la resistividad inicial del suelo.

A los productos bases (anhidrita, etc.) se añaden:

- Productos capaces de engendrar, por acción muy lenta sobre los componentes del suelo, otros electrolitos que complementan la acción de los electrolitos base.
- Productos que engendran hidro-suelos que se fijan sobre las paredes de las partículas neutras del suelo confiriéndose un mayor poder de absorción.
- Productos que aumentan el poder de retención de la humedad del suelo (coloide hidrófilos, minerales y orgánicos).
- La agresividad de los electrolitos, sobre las estructuras de hormigón armado que se encuentran en la proximidad, es nula si estos tienen mas de un año, puesto que la cal libre que contiene está carbonatada y es inatacable.

G. Tratamiento con gelatinas. [8]

Consiste en tratar el suelo con dos soluciones simultáneamente cuya combinación forma un Gel. Al realizarse el tratamiento se disuelve cada uno de los productos en l cantidades de agua requerida en los diferentes depósitos (información dada por el fabricante). Las soluciones se aplican a continuación, una después de la otra, por encima del suelo a tratar. Estos compuestos se caracterizan también por ser higroscópicos y tienen un pH ligeramente básico. Su aplicación logra reducir la resistencia del sistema de PAT pero necesita un mantenimiento permanente; las recomendaciones de la misma también las da el fabricante.

En éste caso, el arrastre del producto por las aguas, de lluvia es mucho mas lento que en el caso de las sales y eficacia del tratamiento alcanza en zonas de poca lluvia de 10 - 12 años y en zonas lluviosas de 6 – 8 años.

Los electrolitos se introducen por inyección alrededor de los electrodos.

En el mercado peruano, se promocionan algunos Geles, las más conocidas llevan firmas como: Thor-gel, erico-gel, protegel, etc; siendo la primera la mas promocionada. Su composición química es el hexacianoferrato (II) de Cobre (II) y sus fabricantes aseguran que no es toxica ni corrosiva, y sus características eléctricas no se pierden hasta en 4 años e incluso están reconocidas en algunos estándares internacionales. En el anexo describiremos sus cualidades y técnicas de aplicación.

Contraproducentemente algunos especialistas indican que esta demostrado que el Gel oxida el cobre por lo que debe tomarse precauciones para un adecuado mantenimiento.

Aunque se afirma ofrece mejores bondades frente a otros productos [4]

H. Uso del cemento conductor [13]

El concreto como un medio circundante del electrodo para tener una buena resistencia de puesta a tierra es referenciado en la IEEE 80, IEEE 142, ANSI/IEEE C2 NESC y la ANSI/NFPA 70 NEC.

El NESC lo tiene como parte de un electrodo existente o cuando se hace necesario utilizarlo en nuevas instalaciones. Éste se puede utilizar en cualquier tipo de geometría del electrodo. El electrodo no debe estar aislado del suelo. La profundidad a la superficie del suelo no debe ser menor a 300mm y una profundidad máxima de 750mm. El electrodo debe estar embebido al menos 50mm de concreto.

Cuando el suelo es pantanoso (inestable) es recomendable usar el concreto con una resistividad de un rango entre 30 a 90 ohmios-metros. El concreto es un material higroscópico por naturaleza que tiende a absorber la humedad y retenerla máximo por 30 días en periodos secos o falta de lluvia.

El cemento conductor utilizado debe ser de buena conductividad tal como lo establece la tabla 1 de la ASTM C1202 . El cemento es del tipo PORTLAND el cual contiene óxido de calcio que combinado con el agua no permite formaciones arcillosas o sales. El cemento conductor cuando está bien saturado de agua tiene una resistividad de 20 a 50 ohmios-cm y los fabricantes aseguran que presenta pH variables entre 7 y 12.

Últimamente la técnica de usar el cemento conductor se está haciendo cada vez más común entre los proyectistas las razones las exponemos con la información técnica de algunos productos que se vienen usando en el mercado peruano. [23]

- Reduce la Resistencia de puesta a tierra hasta un 50%.
- Reduce de forma notable baja impedancia a las sobretensiones transitorias de los rayos.
- Ofrece seguridad al medio ambiente.
- Mejora la conducción del Sistema de Puesta a Tierra. Proporciona un contacto ideal con el suelo adyacente al electrodo de tierra
- Mejora las condiciones de Seguridad Personal.
- Reduce la corrosión en los conductores del sistema de tierra.
- Es una herramienta de Puesta a Tierra fácil de instalar.
- Con el mejoramiento del sistema de tierra, ayuda a mejorar el comportamiento de disipación de energía de los supresores de picos.
- Es el sistema más eficiente entre los sistemas disponibles de Puesta a Tierra y su mantenimiento es prácticamente nulo.

Este sistema previene el robo de conductores de cobre y de varillas de tierra.

I. Pruebas a realizar a los rellenos usados para la Resistencias de Puesta a Tierra [13]

Existen diversas pruebas que se realizan a los rellenos, sin embargo citaremos a las que nos proporciona el organismo de normalización americano la ASTM (American Society for Testing Materials).

a. Prueba de resistividad eléctrica

Este ensayo consiste en medir la resistividad del suelo mejorado o el suelo artificial en una caja de madera tal como lo establece la figura 5.7(A) y 5.7(B) de la norma ASTM G57 y compararlos con los valores garantizados por el fabricante.

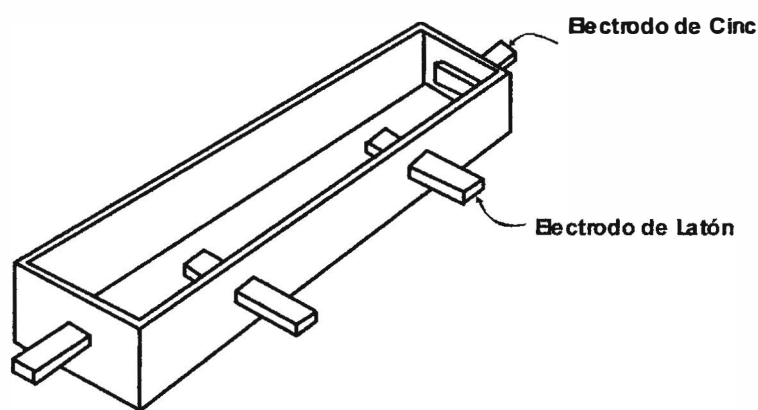


Figura: 5.7 (A) Caja para ensayos de suelos

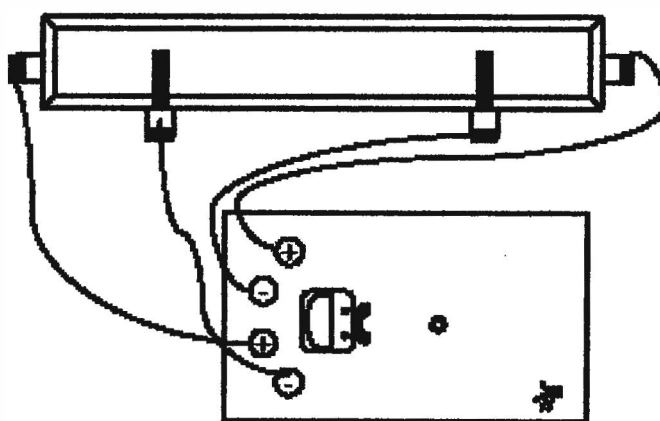


Figura: 5.7 (B) procedimiento de medición

A la medición de resistividad de la muestra del suelo mejorado o el aditivo, se le hará el ensayo en laboratorio en estado volumétrico seco y húmedo, de acuerdo con lo establecido en las normas de procedimiento ASTM D2216 ó D4643. Se medirá la resistividad eléctrica con temperaturas de 5°C, 10°C, 20°C, 30°C y 40°C. Estos valores se contrastarán con los suministrados por el fabricante.

b. Prueba de no corrosión con los electrodos

A todos los aditivos o rellenos de suelos se les realizara la prueba de no corrosión y propiedades ambientales con el electrodo de acuerdo con uno de los métodos planteados en las normas ASTM G162 o ASTM G31.

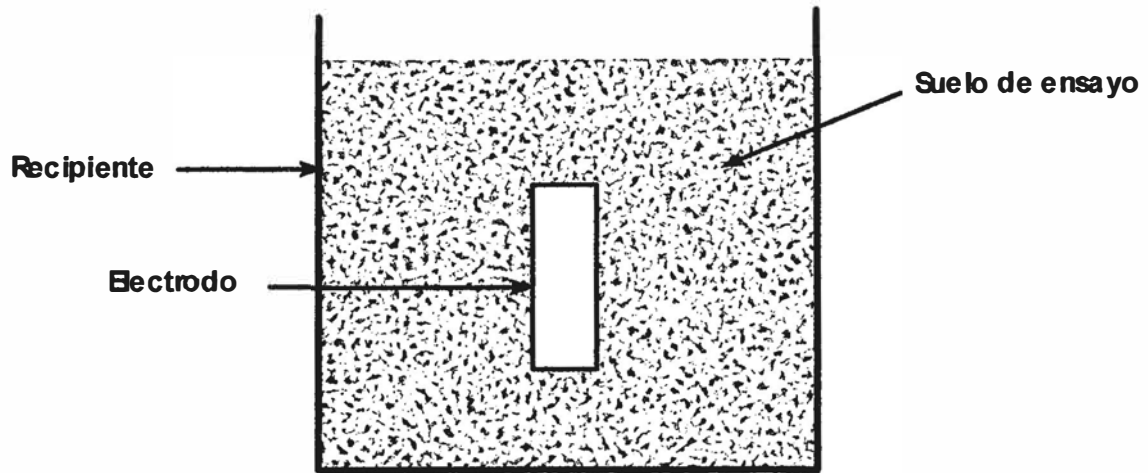


Figura: 5.8 Procedimiento para ensayo de Corrosión de suelo según ASTM G162

c. Prueba de capacidad de absorción de la bentonita

La bentonita en cuanto a su capacidad de absorción de agua deberá cumplir con lo estipulado en la ASTM- E 946- 92. El dispositivo de ensayo será de acuerdo como se indica en la figura 5.9:

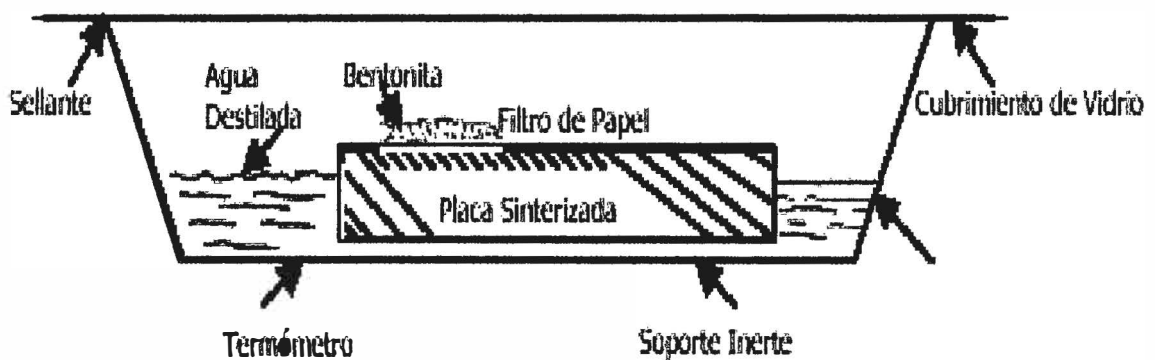


Figura 5.9 Montaje para el ensayo de absorción de agua

Para determinar el peso de la bentonita hidratada se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{Absorcion}\% = \frac{(W_w - W_d)}{W_d} \cdot 100 - K(T_a - T_r) \quad (5.1)$$

Donde:

Absorción %: Absorción de agua(peso en %) a 20° C/18h

W_w : Peso neto de la bentonita hidratado en g.

W_d : Peso neto en seco de la bentonita seca en g

T_a : Temperatura promedio inicial y final del agua en °C.

T_r : Temperatura de referencia a 20°C

K : Coeficiente de temperatura (peso, %/°C)

d. Prueba de conductividad del cemento conductivo

El ensayo para ver su conductividad consiste en monitorear la corriente eléctrica que pasa a través de un cilindro de 55mm de radio por 102mm de largo durante un periodo de 6 horas aplicándole un tensión de 60V en CC tal como lo establece la norma ASTM C1202.

En la figura 5.10, referenciada en la norma IEEE 80, muestra el comportamiento de los electrodos que son embebidos en el concreto. Conocida la corriente que circula por el material y su respectiva resistencia calculada; se puede interpolar en la grafica para calcular su valor de resistividad o su inversa la conductividad.

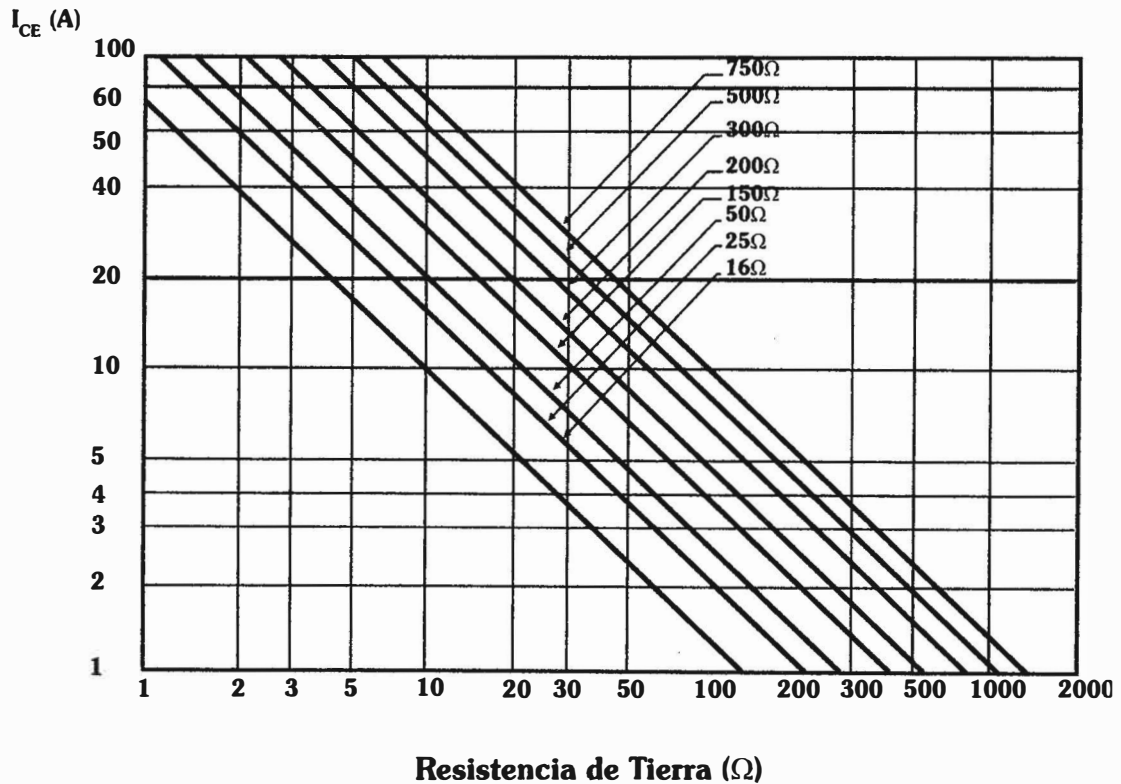


Figura 5.10 Capacidad de corriente de corto tiempo de electrodos embebidos en concreto

Para conocer el comportamiento del concreto como un mejorador de puesta a tierra están los estudios de las referencias 6 a 9 del numeral 4 de esta especificación.

J. Radio óptimo del relleno a usar

Los elementos químicos necesitan extender el volumen efectivo del electrodo en forma significativa para tener un efecto notable. Al adicionar la sustancia química es como si se estuviera aumentando el diámetro del electrodo; sin embargo debe cuidarse cuando se introduce la barra en el suelo, los movimientos laterales aumentarán el ancho del hueco por el cual penetra la barra. El espacio entre la superficie de la barra y el suelo comprimido a su lado introducirá una gran resistencia de contacto que será evidente cuando se pruebe la resistencia de la barra.

La cantidad de material de relleno requerido esta determinado en muchos casos por el volumen de interfase y por los principios del cilindro critico. Un electrodo de tierra establece una conexión a tierra afectando solamente un cierto volumen del suelo, llamado volumen de interfase. En el caso particular de una varilla de tierra, la conexión completa esta contenida dentro de un radio el cual es 2.5 veces la longitud de la varilla. La mayoría de las conexiones a tierra ocurren en un cilindro cercano al electrodo, llamado cilindro critico. [13]

Estudios realizados sobre la influencia del suelo dentro del volumen de interfase, demuestran que 15 centímetros de suelo en cualquier dirección radial establecen hasta el 52% de la conexión a tierra, y 30 centímetros establecen el 68% de esta influencia. Para 60 centímetros, la influencia es muy poca y por la tanto se recomienda como cilindro critico el que esta dentro de un diámetro entre 30 y 60 centímetros. En lo que respecta a los contrapesos rellenos (lecho relleno) con cementos conductores, el ancho recomendado es de 30 centímetros y el espesor de 5 centímetros. Su longitud esta determinada por la resistencia objetivo y la resistividad calculada del suelo. [13]

Para otros proyectistas el relleno se debe encontrar en un radio contorno aproximado de hasta 0.5 m, para tratamientos con sales y bentonita básicamente. En caso de usar cemento conductivo el diámetro puede ser de 0.5m.

K. Esquema circuital de las resistencia de puesta a tierra, considerando el relleno para tratamiento.

Cuando se a adicionado el relleno para el tratamiento como se indicó líneas arriba, el radio del conductor aumenta; por tanto la resistencia de dispersión total (R_T); también se ha modificado. En la figura 5.11 se muestra éste detalle.

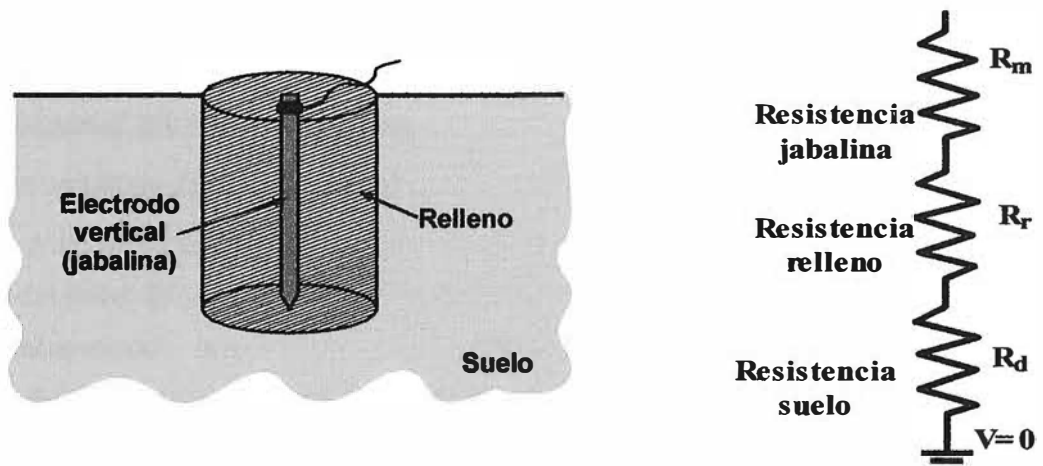


Fig. 5.11 resistencia de dispersión total considerando el relleno

$$R_T = R_m + R_r + R_d \quad (5.2)$$

Donde:

R_m : Resistencia propia del metal del electrodo; en caso de tratarse de electrodos puntuales ($R_m \approx 0$). En caso sea enmallado puede tener cierto valor significativo.

R_r : Resistencia propia del relleno en la zanja o el pozo, depende de la resistividad (ρ_r) de la mezcla usada y se considerara como un conductor cilíndrico de radios r y R .

R_d : Resistencia de dispersión del conjunto instalado electrodo-relleno, depende de la resistividad del estrato y del tratamiento del suelo, para su calculo se usa la expresión clásica propia.

Nota:

En casos de pozos de cualquier forma de excavación o en caso de zanjas de sección trapezoidal o rectangular; se aproximara al de un círculo de radio R .

Expresiones corregidas para el cálculo de la resistencia total de dispersión

- Para electrodos puntuales verticales

$$R_j = \frac{\rho_r}{2\pi L} \ln \frac{R}{r} + \frac{\rho}{12\pi L} \ln \frac{2L}{R} \quad (5.3)$$

- Para electrodos puntuales horizontales

$$R_j = \frac{\rho_r}{2\pi L} \ln \frac{R}{r} + \frac{\rho}{12\pi L} \ln \frac{L^2}{3,7Rh} \quad (5.4)$$

Donde:

R_j : Resistencia d dispersión (Ohm)

ρ_r : Resistividad del relleno. (Ohm-m)

ρ : Resistividad de diseño. (Ohm-m)

L: longitud del electrodo. (m)

R: radio del pozo (m)

r: radio del electrodo (m)

h: profundidad de enterramiento (caso de electrodos horizontales) (m)

L. Procedimientos y dosificación

Los insumos que se adicionan son diversos, dependiendo del tipo de suelo u objetivo a conseguir; por lo que cada uno de ellos debe ser tratado de manera particular.

A continuación describiremos los procedimientos más comunes

a. Procedimiento con sales [2]

Se entierra en una excavación poco profunda alrededor del electrodo (placa, pica o conductor enterrado) una sal (cloruro sódico, carbonato de sosa, sulfito de cobre, sulfito de magnesio, etc.). Se riega la tierra alrededor de la toma y la lluvia al caer realiza la infiltración.

El objetivo en este caso es que la sal no entre en contacto directo con la varilla, para evitar los efectos corrosivos.

La figura 5.12, Muestra el tratamiento realizado en el caso de una pica. Para longitudes normales la cantidad de sal puede oscilar entre 25 y 45 Kg.

En periodos lluviosos el arrastre de la sal por las aguas de lluvia hace que al menos cada dos años como máximo, el tratamiento deba realizarse de nuevo.

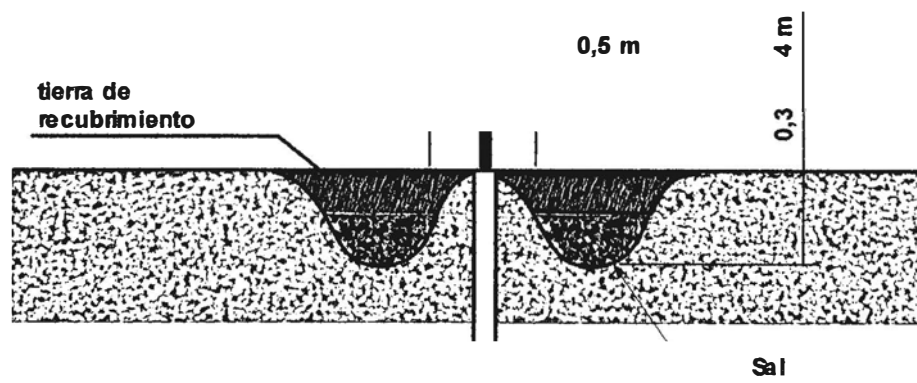


Fig. 5.12 tratamiento con sales

b. Procedimiento con bentonita y sal [12]

- **Caso de una varilla vertical:**

Supongamos la varilla a instalar es de longitud, $L = 2.50\text{m}$

Se realiza el pozo de más o menos 1m de diámetro; se realiza un zarandeo para separar la tierra fina se separa de los conglomerados gruesos.

La profundidad del pozo se hace 30cm más del tamaño del electrodo.

En el lecho profundo se vierte la solución salina de sal y agua (25kg de sal +150 litros de agua) y se espera a que sea absorbida.

El rellenado se hará por etapas: se hecha en el fondo una porción de sal industrial (15kg aprox.); luego se agrega la mezcla (tierra fina con bentonita), con abundante agua, de modo este como una argamasa y se planta la varilla.

Se hace esto hasta cierta altura; y se realiza el proceso anterior se hecha la solución salina y otra cantidad de sal industrial en forma de collar.

El objetivo de poner la sal en forma de collar, sería que ésta no entre en contacto directo con el electrodo porque podría provocar su corrosión.

- **Caso de varilla horizontal o pletina**

El procedimiento en este caso es similar y se usara las mismas proporciones:

En el fondo (85 cm aproximadamente) se hecha la solución salina. Y luego se esparce la sal industrial, luego la mezcla (bentonita + tierra cernida) con abundante agua hasta formar una argamasa; se coloca la varilla, cable o pletina y se agrega nuevamente el relleno. Se agrega la solución salina, luego una capa delgada y se procede con el rellenado final

c. Procedimiento Ledoux [2]

Este procedimiento consiste en la utilización de electrolitos a base de sulfato calcico (yeso y anhidritos) convenientemente tratados y estabilizados, cuya solubilidad es muy pequeña, pero que son susceptible de multiplicar la conductividad del suelo por un coeficiente que oscila entre 3 y 20.

La Dosificación será de acuerdo a la diversidad de los suelos existentes (que hemos reducido a cuatro). Se presentan cinco dosificaciones que tienen una duración de tratamiento eficaz de unos diez años.

- **Composición A 62 SA.**

Para suelos arenosos, rocosos, graníticos, gres descompuestos y arenas arcillosas de los ríos. Dosificación media: 7 a 8 kg/m²

Si el suelo es permeable en profundidad la dosis debe aumentarse a 10kg/m^2 ó mas . Si existe una capa impermeable por encima de la cual la infiltración de las aguas es lenta como en el caso de los granitos descompuestos, debe reducirse esta dosificación a 6 kg/m^2

- **Composición B 80 ARF**

Esta composición es adecuada para suelos arcillosos fuertes, casi desprovistos de cal: arcillas miocénicas, granitos descompuestos, poco profundos y ricos en arcilla, suelos pantanosos, etc.

Dosificación media: 5 a 6 kg/m^2

- **Composición C 85 ARC.**

Esta composición es adecuada para suelos calizos, arcillas fuertes ricas en cal, arcillas de descalcificación sobre basamento calcáreo.

Dosificación media 6 a 8 kg /m^2

- **Composición D 55 CA.**

Esta composición es adecuada para suelos descarnados o recubiertos por una ligera capa de tierra de labranza.

Dosificación media: 7 a 8 kg/m^2

- **Composición E 92 GR.**

Esta composición es complementaria. Se utiliza para relleno de los intersticios de los suelos que presentan cavidades, con el fin de asegurar un buen contacto entre los electrodos de las tomas de tierra y el suelo. Esta composición sólo se utiliza en las inmediaciones de los electrodos para hacer mas compacto el suelo.

Si las tierras son magras o de acarreo ésta composición puede sustituirse por arcilla mezclada con un 50% de las composiciones anteriores según el tipo de suelo.

Dosificación media: de 50 a 100kg para una toma de tierra sencilla

M. Realización práctica de los procedimientos, dependiendo de la forma física del suelo: [2]

a. En suelos de cultivo o vegetación natural

Espaciar la composición con una pala, según las dosificaciones, como si se tratase de abono, sin ninguna precaución especial. Si el suelo es inclinado enterrar la composición, como indica la fig 5.13.

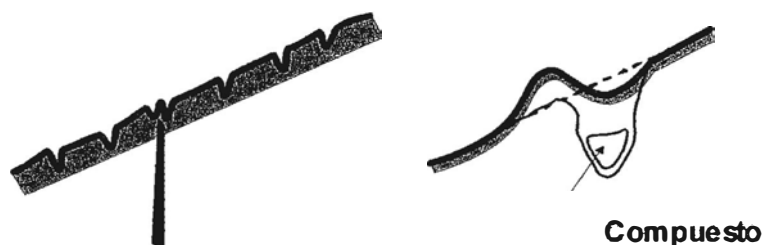


Fig. 5.13 procedimiento en suelos inclinados

b. Suelo descarnado.

Este procedimiento consiste en practicar alrededor de la toma de tierra a tratar surcos concéntricos de 10 a 20 cm de profundidad a una distancia entre ellos de unos 60cm. Se coloca la composición en el fondo y se rellena como se especifica la fig 5.14.



Fig. 5.14 procedimiento en suelos descarnados

Si las tomas de tierra se realizan en zona urbana, la composición se coloca en el fondo del hoyo, recubierto de tierra, encima una capa de piedras y encima se colocan adoquines para reconstruir la superficie existente.

Al penetrar el agua entre los adoquines disuelve los electrolitos y satura el suelo: como el agua infiltrada es una pequeña parte de las precipitaciones, las dosis de las composiciones pueden ser algo inferiores Fig. 5.15

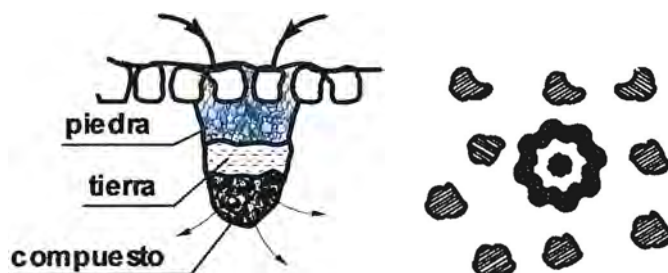


Fig. 5.15 adoquines para colocar compuesto químico

c. Suelo cultivable.

Deberán practicarse surcos a 40cm de profundidad para colocar la mezcla debajo de la siembra (figura 5.16)

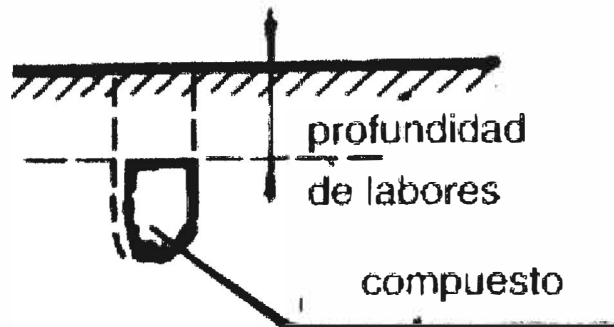


Fig. 5.16 tratamiento en caso de suelo cultivable

Para que la efectividad del electrolito sea idónea, deberán aumentarse las dosificaciones medias en la proximidad de los electrodos disminuyéndolas en las periferia.

Si se trata de nuevas tomas de tierra (placas o picas conectadas en estrella o bucle) es conveniente esparcir cierta cantidad de composición en el fondo de la excavación una vez cubiertos los electrodos con una pequeña capa de tierra, y tratar la superficie del suelo de forma normal (Fig. 5.17)

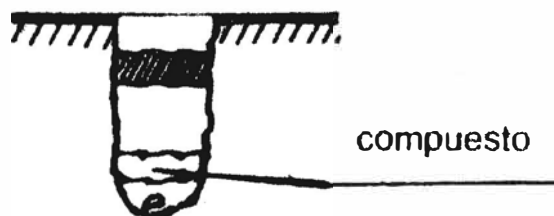


Fig. 5.17 tratamiento en caso de nuevas tomas de tierra

d. Procedimiento con cemento conductivo

Las técnicas anteriormente mencionadas están referenciadas principalmente cuando se instalaran electrodos y el tratamiento se hace con los rellenos típicos (bentonita, sales, Geles, etc). La técnica de enterramiento de electrodos con cemento conductivo difiere en algunos aspectos como se describirá a continuación:

- **caso de contrapeso o pletina horizontal [21]**
 - El cemento es instalado generalmente como un polvo seco que rodea al conductor de PAT en una zanja. Puede también ser mezclado con agua y ser aplicado como mortero si es necesario. Después de que la zanja se rellene con el suelo natural el cemento absorberá la humedad del medio y se endurecerá para convertirse en un electrodo sólido cuya área superficial, es muchas veces mayor que el del conductor o electrodo instalado
 - la longitud de la zanja es definida por la resistividad natural del suelo y la resistencia necesaria del sistema. La profundidad de la zanja debe ser por lo menos 0.5m y el fondo debe ser lo mas plano posible. Una vez que se haya cavado la zanja, el conductor que pone a tierra se coloca en el fondo del foso, el cemento entonces se extiende por y alrededor del conductor. La profundidad del polvo debe ser cerca de una pulgada alrededor del conductor de modo que pueda ser encajonada y disminuir totalmente a una profundidad de cerca de un cuarto de pulgada en los bordes del foso.
 - Usualmente se usa una bolsa de 25kg de cemento por 4 o 5 metros lineales del conductor en éste diseño típico. Después que el cemento haya estado instalado, se cubre cuidadosamente con cerca de 10cm de suelo y después se apisona hasta ser sellado firmemente. a este punto del foso se rellena para terminar la instalación. Para lugares muy fríos es deseable que el electrodo y el cemento estén instalados debajo del punto de congelamiento del suelo
- **Caso de electrodos verticales**
 - El cemento puede también usarse en electrodos verticales sobre todo cuando el espacio es limitado y la resistividad del suelo permite alcanzar la resistencia de PAT requerida.
 - El agua que se hubiese acumulado en el fondo del agujero se bombea hacia fuera y el electrodo de cobre coloca en el centro. Pueden ser usadas también pletinas o cierto conductor de cobre.
 - Una mezcla o un mortero es preparado con cemento cuando se mezcla con agua, esta mezcla se vierte en le agujero para rodear el electrodo de puesta a tierra. Este proceso da lugar a un electrodo de mayor diámetro que además realiza un contacto con el medio más eficiente que el electrodo de cobre.

N. Decisiones a tomar respecto de los rellenos usados en los sistemas de PAT

Debido a que la información que se maneja es básicamente comercial, mucho se especula respecto de los insumos a usar como relleno en las puestas a tierra. Buscando ser imparciales, respecto de uno u otro aditamento; en ésta primera parte de las conclusiones indicare algunos aspectos generales:

- La adición de sales aumenta la conductividad, por lo que su presencia merece importancia; sin embargo trae inherentemente el aspecto de la corrosión por lo que no deberían estar en contacto directo con el electrodo; luego la técnica del regado periférico es lo mas recomendable.
- La adición de Geles disminuye la resistividad del sistema de PAT; sin embargo para conservar esos valores se necesita estar suministrándosele agua de modo permanente. Asimismo el efecto de corrosión puede estar aumentando la resistencia del sistema de PAT.
- La adición de bentonita se muestra también favorable a la disminución de la resistividad; sin embargo al igual que el uso de geles se debe de estar permanentemente agregando agua, pues a falta de ella se observa un aumento en su resistividad. La presencia exagerada de la misma y un pobre mantenimiento con agua produce “cuarteamientos” en su superficie.
- Las resistencias de puesta a tierra tratadas a partir de sal común y carbón vegetal, pueden considerarse soluciones Temporales, porque al paso del tiempo, las aguas lavan la sal y su resistividad va en aumento.
- El tratamiento con sulfato de calcio (yeso) puede recomendarse mezcladas con otros aditivos como la bentonita en zonas donde no hay presencia de estructuras de concreto, sin embargo debido a que ésta no se disuelve fácilmente, la reducción de PAT no es tan considerable.
- El tratamiento con cemento conductivo merece especial atención, además de conseguir reducir la resistencia de PAT; se ha observado que el valor de la misma se conserva relativamente más tiempo que otros tratamientos y puede instalarse en diferente tipos de suelos como en zonas poco accesibles como las rocosas y se conserva con mínimo mantenimiento.
- El tratamiento con marconita es similar al del cemento conductivo, combinándola con bentonita, da resultados favorables pero su uso no es muy difundido en nuestro medio.
- Una técnica recomendada por muchos profesionales es la instalación de los “electrodos activos”, referenciada en la Pág. 74; en su diseño incluye sales

conductoras y bentonita. Otros no muy difundidos pero efectivos son los electrodos Grafito rígido y Zinc (Pág. 71 y 72)

- Luego de esos discernimientos breves viene la premisa: ¿cual tratamiento debe recomendarse?; pues bien ciertamente ninguno de los productos es malo al extremo de ser exageradamente dañino y contaminante, al contrario cada uno de ellos tiene características particulares importantes y éstas se usaran dependiendo del estado particular inicial del suelo. Asimismo, como veremos posteriormente es necesario conocer los valores de pH y los potenciales de las sustancias participantes, en aspectos como la corrosión.
- Finalmente si no tomamos en cuenta el aspecto económico que demanda su instalación; el cemento conductor se perfila como la mejor alternativa

5.3 INFLUENCIA DE LA CORROSION EN LAS PUESTAS A TIERRA.

El estudio de la corrosión en las PAT, merece toda la importancia del caso porque esta relacionada directamente con el tiempo de vida de los electrodos y por ende de su efectividad. Sin embargo es común en muchos proyectistas no tomar en cuenta el aspecto, muchas veces porque eleva el costo del proyecto y en otras por puro desconocimiento del tema. Para entender como se desarrolla este proceso, describamos éste fenómeno.

5.3.1 GENERALIDADES SOBRE LA CORROSIÓN.

La corrosión, puede definirse como el conjunto de procesos de deterioro que sufre un material metálico bajo el efecto de las acciones físicas químicas o electroquímicas del medio gaseoso o liquido que lo envuelve.

El mecanismo de la corrosión es muy complejo, es la consecuencia de la reacción entre el metal base y un agente de oxidación en circunstancias muy diversas, en las que pueden intervenir factores tales como la concentración la humedad, la temperatura, la composición química del metal, su pureza, su estructura etc.

En el caso de la puesta a tierra consiste en el deterioro que presenta un electrodo cuando es enterrado en contacto directo con el suelo natural o sobre el relleno usado para su mejoramiento conductor.

5.3.2 EXPLICACION DEL FENOMENO

La corrosión es tratada como un fenómeno electroquímico y para que ocurra la misma es necesaria la presencia de cuatro elementos indispensables:

- Presencia de un Ánodo y un Cátodo.
- Una diferencia de Potencial Ánodo - Cátodo.
- Una Conexión directa Ánodo - Cátodo.
- Un medio común de Inmersión Ánodo - Cátodo. (electrolito)

En la figura 5.18 puede observarse como ocurre éste fenómeno. La celda elemental consta de dos electrodos inmersos en una solución, conectados externamente; el Ánodo con exceso de electrones (cargas negativas), envía por un lado Iones metálicos Positivos (+) hacia el Cátodo, a través del Electrolito, y por otro lado, Electrones Negativos (-) hacia el mismo Cátodo, a través de la conexión directa; cuando los Electrones y los Iones Positivos se encuentran en el Cátodo, se neutralizan mutuamente (Reducción) dando lugar al fenómeno de corrosión localizado en el Ánodo.

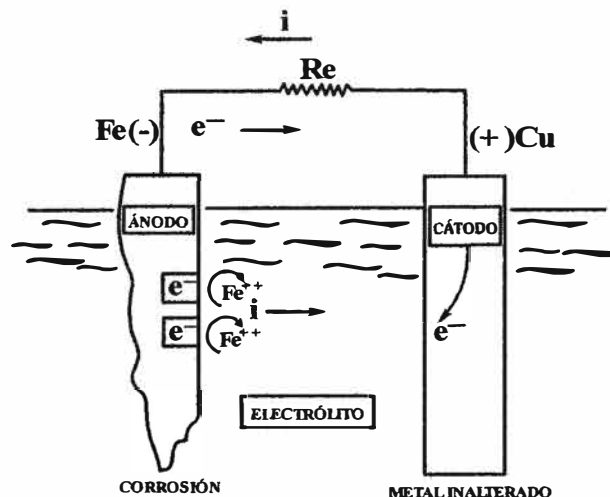


Fig. 5.18 celda electroquímica galvánica

Como puede verse en la figura 5.18 en los metales diferentes, el más catódico pasivo o (Noble) prevalece a costa del deterioro permanente hasta su desaparición, del Metal Anódico (Activo); y cuando se trata de un mismo metal y diferentes concentraciones de un mismo Electrolito, las partes en deterioro son aquellas que sufren el mayor flujo de corriente continua saliendo hacia el electrolito (Suelo húmedo). Dichos procesos espontáneos y permanentes, obedecen a la existencia de Diferencias de Potencial de hasta cientos de milivoltios, asociados a la presencia de los metales.

La corrosión denominada Electroquímica Galvánica puede también ocurrir con algunas variantes, pero bajo un mismo principio. Así se denomina:

- **Galvánicas:** cuando dos metales diferentes están en un mismo Electrolito.
- **Electrolíticas:** cuando un mismo metal está inmerso en diferentes Electrolitos.
- **De Concentración:** cuando un mismo metal está inmerso en diferentes concentraciones de un mismo Electrolito.

5.3.3 CORROSIÓN EN LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

Para el caso de los Electrodo de Puesta a Tierra, esta se corroen por Electrolisis; Es decir implican movimientos de electrones desde las zonas Anódicas, (donde tiene lugar la Oxidación), a las zonas Catódicas (donde ocurre la Reducción) a través de las partes del metal no involucradas en la reacción, cerrándose el circuito por el Electrolito, (Suelo húmedo) que es una Solución caracterizada por su Conductividad Iónica

Estando la varillas de puesta a tierra, en un mismo suelo; la corrosión aparece como consecuencia de la formación de diferencias de potencial entre diferentes puntos del metal en su superficie de separación del metal solución, como puede verse en la figura 5.19.

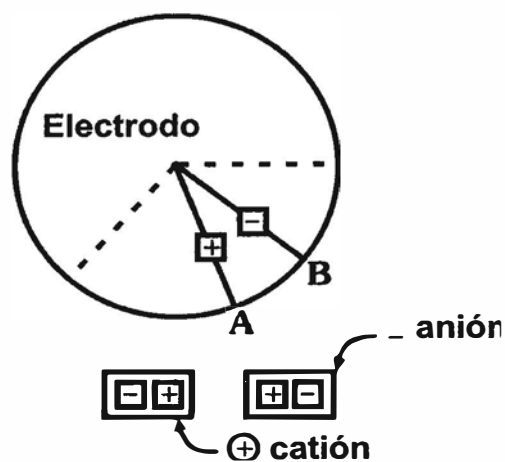


Fig. 5.19 Formación de diferencias de potencial entre diferentes puntos de metal en la superficie

5.3.4 POTENCIALES PROPIOS DE LOS METALES

El potencial propio de los metales es una característica intrínseca de los metales. Su estudio merece la importancia del caso porque en una celda electrolítica, es posible conocer cual de los metales puede sufrir la degradación en su masa.

En la tabla 5.4 se establece los potenciales de los metales (electrodos), basadas en la reducción del hidrogeno (H_2/H^+) a la que arbitrariamente se le asigna el Potencial Cero.

Asimismo puede notarse como los metales Nobles producen menos electrones que el Hidrógeno, y por lo tanto presentan un Potencial de Electrodo más positivo.

El Oro que es un metal noble encabeza la Serie con aproximadamente $V = + 1.5$ Voltios, mientras que los metales Alcalino Téreos, presentan Potenciales negativos mayores, el Litio cierra la lista con casi $V = - 3.0$ Voltios.

TABLA 5.4 Potencial de algunos metales [12]

Electrodo				Potencial (V)	
Au+++	+ 3e-	=	Au	Metales	+ 1.42
Ag	+ 1e-	=	Ag	Catódicos	+ 0.7996
Fe+++	+ 1e-	=	Fe++	(Nobles)	+ 0.770
Cu++	+ 2e-	=	Cu		+ 0.3402
2H+	+ 2e-	=	H ₂		0.000
Pb++	+ 2e-	=	Pb		- 0.1263
Sn++	+ 2e-	=	Sn		- 0.1364
Ni++	+ 2e-	=	Ni		- 0.230
Fe++	+ 2e-	=	Fe		- 0.409
Cr+++	+ 3e-	=	Cr		- 0.74
Zn++	+ 2e-	=	Zn		- 0.7628
Al+++	+ 3e-	=	Al	Metales	- 1.706
Mg++	+ 2e-	=	Mg	Anódicos	- 2.375
Li+	+ 1e-	=	Li	(Activos)	- 3.045

Una aplicación de la misma puede verse en la figura 5.18 en la cual estando los metales hierro y cobre conectados, el hierro que tiene menor potencial respecto del cobre es quien se corroe. Éste principio es fundamental cuando se quiere plantear el criterio de protección catódica, que será tratada brevemente al final de este capítulo.

5.3.5 VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Para saber la rapidez con que un metal se está corroyendo es básico el conocimiento de las leyes de Faraday, ésta plantea que la cantidad de metal que se corroe es mayor cuanto mayor es el flujo de corriente circulante:

$$P = K \cdot I \cdot t \quad (5.5)$$

P = Peso de metal corroído

K = Equivalente electroquímico

I = Intensidad de corriente (A)

t = Tiempo (s)

A partir de la misma se establece la ecuación 5.6; en la cual se Indica la rapidez en que se está perdiendo el peso del material debido ala corrosión en el tiempo. [2]

Así la velocidad de corrosión se expresa:

$$\frac{mm}{año} = 0,033 \times e \times \frac{i}{d} \quad (5.6)$$

mm: masa de la sustancia que se corroe

e = peso equivalente (químico) del metal.

i = densidad de corriente de corrosión A/cm³

d= densidad del metal gr/cm³

Entender también que no sólo la corriente continua antes indicada provoca corrosión, sino también las llamadas corrientes parásitas. La corriente alterna a comparación de ellas prácticamente no provoca corrosión.

En la tabla 5.5 nos ilustra las perdidas de masa en algunos materiales, debido a corrientes parásitas en el suelo.

TABLA 5.5 perdida de masa de metales [12]

Metal	Peso Atómico	Estado Oxidación	Pérdida Kg / A - AÑO
ALUMINIO (Al)	26.98	3	2.99
COBRE (Cu)	63.57	2	10.48
HIERRO (Fe)	55.85	2	9.25
PLOMO (Pb)	207.20	2	34.27
MAGNESIO (Mg)	24.32	2	4.00
ZINC (Zn)	65.38	2	10.85

5.3.6 AGRESIVIDAD DEL ELECTROLITO.

La velocidad de penetración de la oxidación en el metal está ligada al grado de agresividad del electrolito frente al electrodo utilizado.

La agresividad se mide cuando se conoce el potencial de disolución del metal del electrodo en el medio considerado y del pH de acidez real del electrodo.

En el nomograma de la figura 5.20, están representados los potenciales de disolución de algunos metales en medios de diferente agresividad.

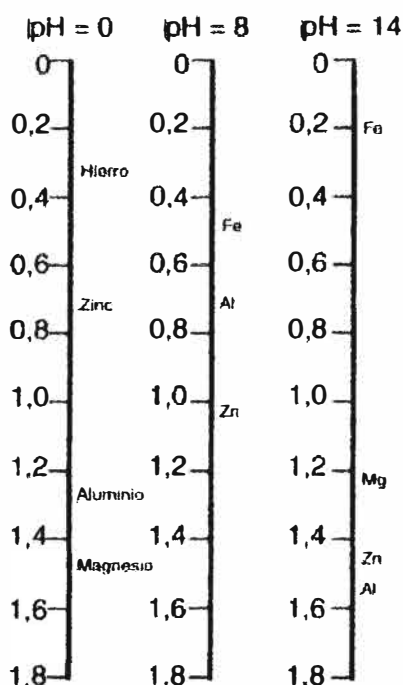


Fig. 5.20 Potenciales de disolución de algunos metales [2]

5.3.7 CORROSIÓN DE LOS METALES EN ATERRAMIENTOS

a) Corrosión de cobre

Resiste la corrosión en casi todos los tipos de suelos, a excepción de los suelos alcalinos o en medios amoniacales (agua de estiércol); también le atacan las cenizas y escorias.

b) Corrosión de hierro.

En el hierro galvanizado suelen corroerse más las partes enterradas en profundidad que las superficiales, y de éstas, la zona inmediata bajo la superficie mas rápidamente que la que se encuentra al aire libre.

c) Corrosión del aluminio

La corrosión del aluminio suele ser rápida en suelos alcalinos, su utilización como toma de tierra debe hacerse con reservas, y previo detallado análisis del suelo.

d) Corrosión del plomo

En suelo de gran resistividad, su corrosión suele ser rápida, aunque puede paliarse dando a las partes enterradas un potencial negativo por medio de un dispositivo adecuado de protección catódica.

5.3.8 CORROSIÓN BACTERIANA.

En 1923 Von Wolzogen – Kuhr puso en evidencia el mecanismo electroquímico del ataque del hierro por los microorganismos sulfuroreductores.

Los microorganismos que trabajan únicamente al aire se llaman “aerobios”, otros no soportan de forma alguna el oxígeno y se llaman “anaerobios”, hay otros que se aclimatan a cualquier circunstancia y se denominan “aerobios-anaerobios”. La corrosión microbiana, se define como el proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales.

Las ferrobacterias se desarrollan a partir de la transformación de sales ferrosas en férricas que pueden transformarse en los hidróxidos y carbonatos de ese ión, debido a la presencia de O_2 y CO_2 disueltos.

Las sulfatoredutoras son microorganismos anaerobios que desarrollan su actividad bajo capas de herrumbre que se hallan en contacto con el metal y donde no puede llegar el oxígeno.

El desarrollo de las bacterias será más fácil en suelos ricos en sales minerales nitratos sulfatos etc. Y con un alto grado de humedad.

Corrosión anaerobia: Esta corrosión originada por el desulfovibrio, se observó hacia 1923 en los países Bajos, comprobando la efectividad de estas bacterias para corroer el hierro y el acero, originando sulfuro ferroso como producto de la corrosión. Para que exista corrosión y se forme “herrumbre” deben estar presentes: hierro metálico, humedad y oxígeno.

Corrosión aerobia: Este tipo de bacterias también pueden originar fuertes corrosiones sobre todo en suelos piritosos.

Los valores óptimos del potencial redox-PH para el desarrollo de las bacterias serán:

Hierro o acero: Las bacterias actúan como activadores, para valores de pH^* entre 5 y 7 y para potenciales redox ** entre 0.4 y -0.6V. Para valores de pH superiores a 8 la vida microbiana es imposible.

Zinc: Para pH pequeños sólo es posible la vida autotrofa; el pH óptimo para el desarrollo de bacterias heterótrofas se encuentra entre 5 y 8 y el potencial redox entre 0,6V y 0,7V. Con CO_2 el pH está entre 5 y 6 disminuyendo la actividad microbiana.

Níquel: Los microbios se desarrollan para pH entre 5 y 9 y potenciales entre 0.6 y -0.4 V. para pH pequeño sólo es posible la vida autótrofa y para pH grandes no es posible la vida microbiana.

Cobre: Aquí el pH está comprendido entre 4,5 y 6 y el potencial redox entre 0.3 y 0,8V. Desde que las partículas cargadas de microbios se depositan en la superficie de los metales formando una fina película microbiana, las bacterias entran en actividad provocando la disminución del potencial redox y el inicio de la corrosión se produce en espacio de días.

La medida del potencial redox sirve para poder predecir el riesgo de corrosión anaerobia que puede sufrir una estructura enterrada. En general cualquier suelo cuyo contenido en sulfatos no sea despreciable, con un potencial redox de + 200 mV o menos está probablemente en camino de hacerse anaerobio y debe considerarse sospechoso (corrosión por bacterias).

TABLA 5.6 Agresividad del suelo según su potencial redox [2]

Potencial redox (mV)	Riesgo de corrosión anerobia
<100	Severo
100 - 200	Moderado
200 - 400	Ligero
> 400	Nulo

5.3.9 LOS SUELOS Y LA CORROSIÓN.

La corrosión es más importante en suelos poco aireados, reductores, suelos muy ácidos o que contiene grandes concentraciones de sales solubles. Suelen encontrarse en zonas bajas o planas, mal desecadas que corresponden a suelos de pequeña resistividad en la superficie.

Bandas ligeramente colocadas en el subsuelo de arcilla compacta son señal de un suelo reductor muy corrosivo. Se ha observado que las resistividades de los suelos muy corrosivos son inferiores a $70\Omega.m$.

Las arcillas son nefastas para la corrosión del acero.

En suelos heterogéneos en los que la resistividad de las diferentes capas es muy variable debe desecharse el empleo de acero galvanizado.

El problema se complica cuando el electrodo de tierra es de cobre y existen estructuras o canalizaciones metálicas enterradas construidas a base de metales más electronegativos unidas a la toma de tierra de cobre. El riesgo de ataque de

los metales más electronegativos depende naturalmente de la importancia relativa de aguante del metal mas noble con relación al de otros metales. A mayor superficie de metal noble, mayor es el riesgo de corrosión de los demás metales.

Las tablas 5.7 y 5.8 nos ayudaran a entender como relacionamos el grado de corrosión con la resistividad, lo mismo para el pH.

TABLA 5.7 Grado de corrosión de los suelos según su resistividad. [2]

Resistividad ($\Omega \times \text{cm}$)	Característica de los Suelos (grado de corrosion)
0-900	Altamente corrosivos
900 – 5.000	Severamente corrosivos
5.000 – 10.000	Moderadamente corrosivos
10.000 – 20.000	Ligeramente corrosivos
> 20.000	Muy poco corrosivos.

TABLA 5.8 Criterios de pH y corrosividad. [2]

pH	Medio	Agresividad
<4.0	Ácido muy fuerte	Muy agresivo
4.0 - 4.5	Muy ácido	
4.5 - 5.0	Ácido	
5.0 - 6.0	Moderadamente ácido	
6.0 – 6.5	poco acido	agresivo
6.5 - 7.5	Neutro	No agresivo
7.5 - 8.5	Poco alcalino	
> 8.5	Alcalino	Condicionado

5.3.10 CAUSAS QUE ORIGINAN CORROSIÓN EN LAS PUESTAS A TIERRA

La Corrosión ocurre en un mismo electrodo, cuando entre dos partes cualesquiera de éste, aparece una Diferencia de Potencial, lo cual puede ocurrir de varias maneras; entre las más comunes

a.- Por diferencia de concentración de Oxígeno.

Origina una Celda de Aeración Diferencial, que esta relacionada a la existencia de zonas desprovistas de Oxígeno (Anódicas), y otras con abundante Oxígeno (Catódicas)

b.- Por Existencia de Solicitaciones Permanentes.-

Origina una Celda de Tensión Permanente, que está relacionada a la existencia de zonas con tensión mecánica de Tracción que presentan un comportamiento (Anódico) y otras con sollicitación mecánica de Compresión que se comportan como (Catódicas)

c.- Por diferencia de Resistividad del Suelo.

Origina una Celda de conductividad Diferencial, a partir de la existencia de Rellenos no homogéneos o estratos del suelo con diferente Resistividad

5.3.11 PROTECCIÓN CATÓDICA.

Se basa en la existencia de un potencial de inmunidad al cual es suficiente llevar el metal a proteger para detener la corrosión (Diagrama de Pourbaix).

A. Protección por ánodos de sacrificio.

La estructura por proteger se pone en contacto electrolítico con un metal o aleación de potencial mas bajo, que se corroe.

Así por ejemplo, Podrán proteger al Fe, todos los metales situados en la serie electroquímica de los metales, por encima de él (tabla 5.9); habrá que elegir aquellos que tengan una fuerte sobretensión de hidrogeno y tendencia muy débil a la pasividad (Fig. 5.21)

Así el hierro será anódico con relación al cobre y catódico con relación al zinc. El metal que actúa de ánodo se sacrifica en favor del metal que actúa de cátodo, por eso el sistema se conoce como protección catódica por ánodo de sacrificio.

TABLA 5.9 Serie electroquímica de los metales [2]

Ión en solución	E ₀
Li ⁺	-302
Rb ⁺	-292
K ⁺	-292
Ca ⁺⁺	-287
Na ⁺	-271
Mg ⁺⁺	-186
Al ⁺⁺⁺	-167
Zn ⁺⁺	-076
Cr ⁺⁺	-071
Fe ⁺⁺	-044
Cd ⁺⁺	-039
Ti ⁺	-033
Co ⁺⁺	-029
Ni ⁺⁺	-022
Sn ⁺⁺	-014
H ⁺	±000
Bi ⁺⁺⁺	+022
Cu ⁺⁺	+034
Te ⁺⁺⁺⁺	+056
Hg ⁺⁺	+080
Ag ⁺⁺	+080
Pt ⁺⁺	+120
Au ⁺⁺⁺	+142

B. Diagrama de Pourbaix [2]

Un diagrama de Pourbaix es un gráfico que muestra, no solamente cómo varía el potencial de un par con el pH sino también las especies reales que existen a cada pH y los posibles pares redox en los que participan. Las regiones en el diagrama indican las condiciones de pH y potencial bajo las cuales una especie en particular es estable

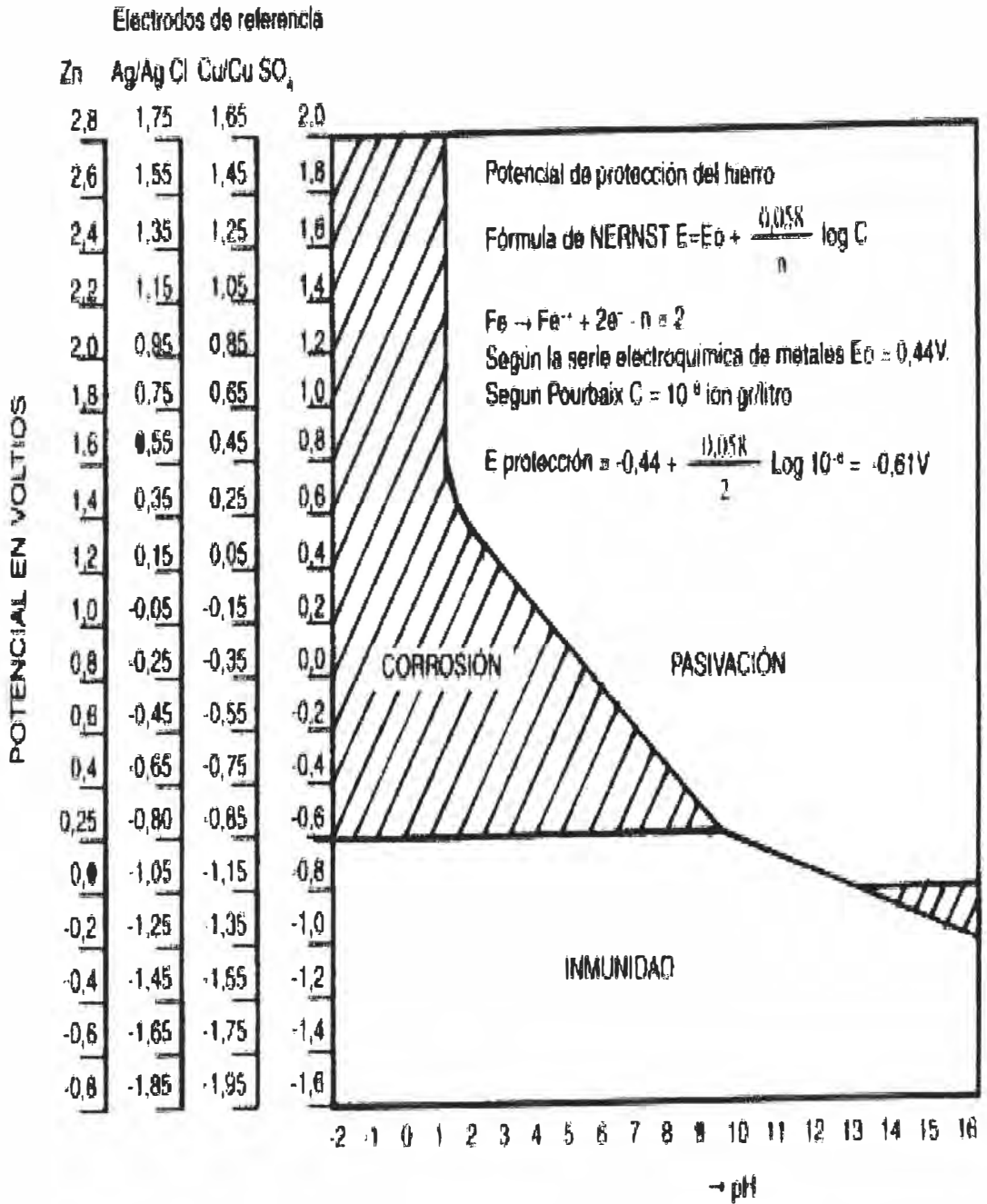


Fig. 5.21 Diagrama de Pourbaix

5.3.12 SUGERENCIAS RESPECTO DEL EFECTO DE CORROSIÓN.

A. Para el control de la corrosión en el suelo, hay que tener en cuenta que no es posible minimizar las corrientes de corrosión (corrientes que abandonan el electrodo), porque ésa es su función. Entonces quedan como alternativas viables para la preservación de los electrodos de aterramiento:

- Usar materiales altamente resistentes a la corrosión, tales como el cobre, acero inoxidable o aleaciones de níquel o titanio, quedaría descartado los metales (activos) y los metales (anfóteros).
- Usar en los lechos de instalación, rellenos estables de (pH) neutro y a la vez conductivos e impermeables a la migración de sales corrosivas; entre los geles y la bentonita lo recomendable es ésta última.
- Usar protección catódica. Esta posibilidad es más factible en sistemas grandes; porque en caso de pequeños sistemas de puesta a tierra esta posibilidad resultaría costosa; por lo que finalmente quedarían como opciones reales para nuestros propósitos las dos primeras posibilidades.

B. Debido que presenta el cobre presenta finalmente corrosión, se debe buscar materiales que respondan técnica y económicamente. El que más se acerca a ella es el acero inoxidable; éste tiene el inconveniente de que sólo tiene buen desempeño en la atmósfera, debido a que dispone del oxígeno requerido para mantener su capa protectora de óxido; si se quisiera tener aterrado necesitaría estar inmerso en un electrolito (relleno) especial que actúe en permanencia como oxidante.

C. En el caso del cobre, la capa protectora de óxido es dura y resiste al ataque corrosivo de las sales comunes del suelo, excepto de los compuestos fertilizantes que contienen amoníaco o de los sulfuros; por ello debe corregirse la práctica equivocada de usar tierra agrícola la cual generará corrosión aunque sea lenta.

D. Las varillas copperwell, pueden sufrir una violenta corrosión interna y destrucción total, debido al uso de sales conductoras (Gels) aplicadas directamente sobre el electrodo. Ésta usualmente ocurre en las partes más débiles y a pocos años de instalada [12]

E. toda instalación de puesta a tierra, debe compatibilizar exigencias que por naturaleza son favorables al fenómeno de corrosión, con otras que son contrarias y que están orientadas a la preservación de los electrodos y su correcto funcionamiento.

F. Finalmente se concluye: el metal que más se adecua a nuestra conveniencia es el cobre aislado y como relleno neutro y conductivo: lechos de sal y Bentonita. En caso se use cemento conductivo el electrodo también será de cobre.

CAPITULO VI

DISEÑO EJECUCIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA BASICA

Las puestas a tierra suelen a veces puede tener sus complicaciones sobre todo cuando estas corresponden a PAT extensas o puntuales de características especiales (edificios, oficinas de cómputo, subestaciones, etc.); así por ejemplo sería muy difícil conseguir valores pequeños de resistencia con un sólo electrodo puntual, cuando la resistividad del suelo bordea los 800 ohm-m

El objetivo en ésta capitulo será describir a modo resumen un procedimiento alternativo en el diseño, ejecución y mantenimiento de una puesta a tierra básica; entendiéndose que la misma se trata de la instalación de un electrodo puntual (varilla vertical o pletina horizontal).

El diseño de la misma apuntara a cumplir con las normas del CNE en el valor de su resistencia (menor de 25 Ohm) asimismo supondremos la resistividad del terreno (en cierta zona urbana en la ciudad) esta entre los 300 Ohm-m.

Asimismo por lo confiable y practica; usaremos como “paper” de consulta y referencia las publicaciones prácticas que promueve la empresa Pro-cobre. [12]

6.1 DISEÑO DE UNA PUESTA A TIERRA.

El paso inicial para el diseño de una puesta a tierra, consiste en realizar una visita en sitio para así tener claro las condiciones reales de la misma; Asimismo se debe realizar las coordinaciones con otras áreas involucradas: civiles, sanitarias, etc.

En situaciones suele ocurrir que están designadas sólo ciertas áreas para la instalación de la puesta a tierra, en ese caso se recomienda la zona de mayor humedad o la que se muestre favorable a las condiciones de PAT (Pág. 85).

En caso no fuese así, el paso primordial es conocer las características del suelo porque junto al material metálico a usar como electrodo y el relleno deben

compatibilizar con los valores de pH adecuados, los potenciales propios y los niveles de corrosión que existirán cuando se instale la puesta tierra. Resumiremos los pasos más importantes:

6.1.1. DETERMINACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

La técnica de Wenner, es la que más se ajusta a nuestro objetivo. Las estacas (electrodos de exploración) estarán a un mínimo de 10cm de profundidad y espaciados igual distancia "a" .

Tomaremos mediciones en mínimo 4 puntos (a_i); obteniéndose 4 valores de resistividad (ρ_i); luego se procesa las mediciones en una grafica resistividad vs distancia, obteniéndose el perfil de resistividad del suelo.

De acuerdo a la grafica, en caso de tratarse de un sólo estrato la resistividad aparente se determina del promedio aritmético de los valores de las medidas; en caso sea de dos capas usaremos el método de Tagg (ver anexo F).

Para dos estratos, la resistividad equivalente puede determinarse también por la expresión adjunta.

$$\rho_e = \frac{\rho_2 L}{(\rho_2 - \rho_1)h + \rho_1 L} \quad (5.7)$$

ρ_e : Resistividad equivalente

ρ_1 : Resistividad del primer estrato

ρ_2 : Resistividad del segundo estrato

L: longitud del electrodo

h: espesor del estrato superficial

6.1.2. ELEMENTOS DE LA PUESTA A TIERRA.

Los elementos y accesorios de ésta puesta a tierra básica serán:

- Electrodo Metálico.
- Conductor de Conexión.
- Conectores mecánicos de Grapa Desmontable.
- Relleno Conductor en base a bentonita básicamente.
- Lechos de Sal.
- Registro con Tapa (Opcional).

6.1.3. ELECCION DE LA FORMA EN QUE IRA INSTALADO EL ELECTRODO

Dependiendo de la forma como se presente las características físicas del terreno, la instalación puede ser vertical u horizontal.

- **Si es electrodo vertical**

Esta será nuestra primera opción, pues se necesita menos espacio, respecto de otra horizontal. En este caso, es posible conseguir resistencias de dispersión entre 6 y 12 Ohm. La varilla a usar será de cobre; por las razones expuestas en el desarrollo del informe.

- **Si el electrodo es horizontal**

En caso las condiciones del terreno no permiten excavar a profundidad, la opción será abrir una zanja para colocar la pletina de cobre. Puede conseguirse resistencias de dispersión entre 7 y 14 Ohm.

6.1.4. SELECCIÓN DEL ELECTRODO.

Dependiendo de factores como: espacio, singularidades del suelo, capacidad de mantenimiento, etc. Elegimos el electrodo: cobre macizo, de diámetro (d). El diámetro del relleno será (D); siendo $d=2r$ y $D=2R$

A) Caso de electrodos Verticales

Existe en el mercado, varillas de Cobre Temple duro, ya cortadas en longitudes Estandarizadas elegimos el tamaño más comercial que tiene 2.5 m. de longitud (2.44 real) con 0.013 o 0.019 m. de diámetro; el cual puede optimizar con el relleno en el pozo según el modelo analítico

$$R_{rj} = \frac{\rho_r}{2rd} \ln \frac{R}{r} \quad (5.8)$$

B) Caso de Electrodo Horizontales

Las pletinas de Cobre, existen en el mercado a partir de 3.0 m de longitud, con secciones diferentes; la más adecuada será (0.003 m x 0.04 m); En caso no se encuentre podría ser un conductor de Cobre desnudo de 100 mm² temple Semi Duro o Blando. El modelo también puede ser optimizado con el relleno en una zanja, la ecuación a usar será la misma. Los valores R y r, serán obtenidas por un valor de radio equivalente

C. Evaluación de la resistencia de dispersión total

La dispersión de corrientes en el Suelo mediante Electrodo de gran superficie (circular, Cuadrangulares, Esféricos Ortogonales, etc.), puede ser igualada con Electrodo simple y económicos de geometría optimizada, mediante una instalación que aproveche las excavaciones para incluir Rellenos y tratamientos del Suelo.

En caso se necesite conseguir resistencias mas bajas se pueden realizar conexiones en paralelo.

El modelo matemático será lo indicado en el capítulo V (ecuación 5.2); es decir:

$$R_T = R_m + R_r + R_d \quad (5.9)$$

6.1.5. ESTIMACIÓN DE PRESUPUESTO.

Al estimar el presupuesto debe tenerse en cuenta que los materiales ofrezcan calidad y garantía, tratándose de mano de obra que ofrezcan garantía y seguridad.

6.2. EJECUCIÓN DE LA PUESTA A TIERRA.

6.2.1 INSTALACION DE LA PUESTA A TIERRA

- Se inicia con la ubicación del punto o línea del suelo donde se realizara el trabajo.
- Se toma las precauciones de las herramientas y equipos necesarios para empezar la obra.
- El personal debe estar capacitado en la labor a realizar, tanto a nivel de dirección como a las de los operarios.
- Es preferible usar la misma tierra del suelo, pero ésta debe estar cernida; la que será mezclada con los aditivos.
- Como usaremos bentonita y sal como rellenos; la forma como procederemos la instalación de la misma será tal como se indica en la Pág. 108.

6.2.2. MEDICION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La medición de la resistencia de puesta a tierra se realizara por el método de caída de potencial o del 62%. Y los instrumentos a usar deben estar perfectamente calibrados y que cumplan requisitos mínimos en su certificación. Los telurómetros digitales pueden también usarse en caso se use alguna de las técnicas alternativas. Asimismo si las condiciones del piso no permiten clavar las estacas puede procederse mediante alguna técnica artificiosa mencionada en el capítulo 3.

El procesamiento de la misma también se indica en el capitulo mencionado.

6.3 MANTENIMIENTO DE LAS PUESTAS A TIERRA

Las puestas a tierra por su ubicación y funcionamiento discreto, usualmente son olvidadas en el tiempo, lo cual no favorece a la permanencia de sus características y prestaciones, que muchas veces solo merecen una esporádica atención de conservación.

Las puestas a tierra deben recibir un mantenimiento permanente, éstas dependen del tamaño de la instalación, su función y su nivel de tensión; de sus condiciones y tipo de diseño tanto de sus elementos metálicos como de las sustancias usadas como relleno.

La frecuencia del mantenimiento que se recomienda es:

- En instalaciones domésticas no más de cinco años.
- En instalaciones comerciales no más de tres años.
- Los locales con acceso al público, protección de equipos electrónicos, Teatros, cines y lavanderías, inspección anual.

El mantenimiento de las puestas a tierra puede resumirse en cuatro puntos a la que hemos denominado el procedimiento "IECR", es decir: Inspección, evaluación, conservación y renovación.

Supongamos que cierta puesta a tierra presentó una resistencia de 6 Ohm en el momento de su instalación y que el valor limite es de 10 Ohm. Se evalúa su resistencia cada seis meses y se observa una tendencia en su crecimiento; se puede establecer una grafica como en la figura 6.1, entonces se establece pasada la recta del límite de diseño requerido, la puesta a tierra necesita de una renovación y puntos debajo de ella solo una conservación.

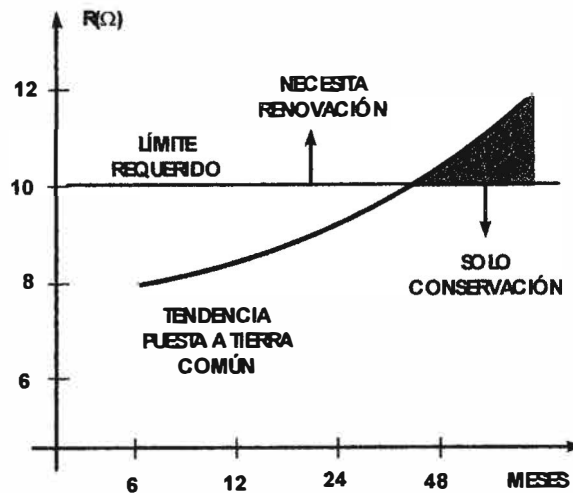


Fig. 6.1 Grafica temporal de registro de resistencias

6.3.1. INSPECCIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA.

La inspección de sistema de puesta a tierra en una instalación normalmente está asociada con la visita para otra labor de mantenimiento como mejoramiento del servicio, extensiones, etc. Se realiza una inspección visual de aquellas partes del sistema que pueden verse directamente, particularmente observando evidencia de desgastes, corrosión, vandalismo o robo.

El contratista eléctrico debe inspeccionar a conciencia y recomendar cambios donde observe que no satisface las normas correspondientes; verificar que la conexión entre los terminales de tierra del proveedor y del cliente es de dimensión suficiente para cumplir la reglamentación.

Para nuestro modelo de electrodo puntual debe procederse:

A. Puestas a tierra domésticas

En este caso debe retirarse el borne o la grapa de presión para su limpieza con trapo y después con escobilla metálica y lija fina. Luego, estando el electrodo libre; se mide la resistencia de dispersión.

Se compara dicho parámetro con las medidas anteriores o con la requerida por la instalación.

B. Puestas a tierra comerciales

Esta labor es idéntica a la anterior, se hace con el consentimiento de todos los usuarios y en los casos de servicios que no admiten la desconexión de tierra (comunicaciones, transferencia de datos, procesamiento, control, etc.); antes

de la inspección se deberá habilitar a una distancia mayor a 5,0 m; una puesta a tierra temporal alterna luego:

- Hacer un puente desde la puesta a tierra – temporal hasta el extremo del conductor de conexión a la puesta a tierra permanente.
- Desconectar de la puesta a tierra – permanente la extremidad con puente del conductor de conexión y proceder a la inspección, realizando la medición de resistencia de PAT.
- Finalizada la inspección, volver a conectar la extremidad con puente del conductor de conexión, a la puesta a tierra – permanente.
- Levantar el puente desconectado en sus extremos y retirar la puesta a tierra – temporal

6.3.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

La evaluación de un sistema de tierra normalmente es parte del sistema eléctrico en su conjunto. Consiste en una muy rigurosa y detallada inspección del sistema de tierra global. En particular, el examinador debe concluir si el sistema satisface las normas de puesta a tierra vigentes. Además, se deben realizar las siguientes pruebas:

A. Instalaciones domésticas y comerciales

se requieren dos tipos de pruebas independientes:

- Prueba de impedancia del circuito de tierra. Se dispone de instrumentos de prueba comerciales para este propósito.
- Prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual existentes en la instalación. Esta prueba debe ser independiente del botón de ensayo incorporado en el interruptor.

B. Fábricas

Se requieren las siguientes pruebas para el sistema de tierra:

- Una prueba de impedancia del circuito de prueba
- Una prueba de funcionamiento de todos los interruptores de corriente residual
- Una prueba de conexión de todas las partes metálicas ajenas al sistema eléctrico, es decir; tableros metálicos, gabinetes de control, distribuidores automáticos, etc. Esta prueba se realiza usando un

ohmímetro para medida de baja resistencia entre el terminal de tierra del cliente y todas las partes metálicas respectivas.

- Medida de resistencia del electrodo de tierra, si la instalación tiene su propio electrodo de tierra independiente y comparar con su valor de diseño.

6.3.3 CONSERVACIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA

Si es que en las instalaciones subterráneas, se usaron como aditivos: geles, bentonitas, sales, etc, la conservación óptima, se logra inundando con unos 30 litros de agua el interior de la caja de registro o el hoyo exterior, cada cuatro o seis meses; asimismo de ser necesario instalar los collares de sal deben instalarse.

Cuando son puestas a tierra instaladas con métodos diferentes, se procede según las respectivas indicaciones dadas por fabricantes de esa técnica.

6.3.4 RENOVACIÓN DE LAS PUESTAS A TIERRA

La utilización doméstica de computadoras y equipos electrónicos de alta fidelidad a precisión, requiere de resistencias de dispersión relativamente bajas, consecuentemente toda instalación que presente valores de resistencia, mayores que el límite requerido (Fig. 6.1) necesita renovación.

En estos casos al igual que en el proceso de conservación se comienza lijando completamente los electrodos y poniendo nuevos accesorios de conexión a presión. Probar la continuidad del conductor de conexión hasta el tablero eléctrico. Observar posibles efectos de corrosión en los electrodos Se sugiere colocar lechos de sal en forma periférica; renovar las capas de rellenos y tierra por otra nueva. Si aún así no se obtienen los valores recomendados, se hace necesaria una instalación adicional en paralelo, de contrapesos o nuevos electrodos verticales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Antes de exponer esta parte final del trabajo, debo mencionar que en cada parte de los capítulos expuestos, ya se han expresado las respectivas observaciones y conclusiones. Sin embargo mencionaremos algunas otras que merecen importancia.

Como pudo haberse notado el trabajo es básicamente una recopilación de informaciones sobre las técnicas y nuevos procedimientos referidas a las puestas a tierra. Considero, será fuente de información valedera quedando para posteriores trabajos su verificación experimental.

Respecto de los materiales usados como insumos para el mejoramiento de puestas a tierra, existen relativas investigaciones de organismos de normalización nacionales; salvo, las empresas que comercializan estos insumos o de forma particulares algunos proyectistas, que investigan para fines propios.

Se hace imprescindible como profesionales en la instalaciones eléctricas persuadir a los organismos relacionados con la normatividad y reglamentos, se den mayores alcances respecto del uso de insumos químicos usados en el tratamiento de las PAT ; para que así esto no sea un tema meramente comercial.

A continuación indicamos las observaciones y recomendaciones del caso:

1. Aun cuando una Red eléctrica de distribución lleve su sistema de PAT no garantiza la seguridad de las personas frente a una electrocución por contacto. Es imprescindible que los equipos eléctricos y toda parte metálica de las instalaciones estén conectados a tierra.
2. Cuando un recinto cuente con equipos eléctricos, electrónicos y de comunicaciones; estas deben tener sus respectivas puestas a tierra; asimismo estas deben estar interconectadas.
3. Los valores de resistencia de PAT, para equipos electrónicos sensibles o de comunicaciones o de computo; deben ser de valores muy pequeños, aun cuando los estándares nacionales no lo indican. Revistas especializadas de

fabricantes de equipos electrónicos sugieren las resistencias de PAT debe ser valores menores a 1Ω . Para su diseño se recomienda tener en cuenta el esquema circuital RLC de un sistema de PAT.

4. Las tensiones de toque y paso merecen tomarse en cuenta cuando las puestas a tierra están destinadas básicamente a media y alta tensión.
5. la optimización de una PAT, modificando sus dimensiones geométricas, no es recomendable desde el punto de vista económico.
6. Los electrodos tipo plato reducen la resistencia de PAT pero su costo es también oneroso. Asimismo las varillas enterradas en el interior en forma de "L", "T", estrella o pata de ganso son mas eficientes que los electrodos rectos como también mas costosos. En caso de instalaciones especiales es recomendable su diseño.
7. No debería colocarse exageradamente varillas en paralelo; puesto que existe una cantidad mínima necesaria a la cual se puede conseguir aproximadamente la resistencia mas baja.
8. Cuando se coloquen los "electrodos auxiliares" (alambres en forma de espiral, unidos entre borne y extremo del electrodo tipo varilla); debe tenerse cuidado en el sentido en que se realiza dicho espiralado; esto porque según las leyes de Faraday – Lenz, puede contradecir el proceso de dispersión propuesto en el diseño de la puesta a tierra.
9. Si se colocan varillas en paralelo, lo recomendable será que estas estén separados poco mas que el doble de la longitud del electrodo o radio de equivalente esto para evitar que el traslape de sus líneas equipotenciales pueda alterar su resistencia total. Este mismo criterio debe usarse en las mediciones de PAT.
10. El valor de la resistencia de PAT que se diseñe, a partir de la corriente nominal del dispositivo de protección; usualmente es de valores mas pequeños que la mínima permitida por el CNE. (25Ω). estos valores merecen consideración, pues se diseñan en base a valores reales. Se

recomienda el diseño se haga con el valor mas bajo de la comparación de las mismas.

11. Actualmente los telurómetros digitales (de 3 o 4 puntas) están siendo desplazados por los de tipo pinza; por lo mismo que no se necesita desconectar el circuito para hacer mediciones de PAT.
12. Es error común registrar lecturas de resistividad y resistencia, con instrumentos descalibrados o que no cumplen con estándares básicos. Es necesario la existencia de un centro de control obligatorio que supervise la calibración de dichos instrumentos; para todo aquel que realice trabajos relacionados con mediciones de PAT.
13. El método Wenner es lo mas optimo frente a otros métodos usados en la determinación de la resistividad de suelos; en caso de medidas de la resistencia de PAT lo recomendable es el método de caída de potencial (método del 62%)
14. Los electrodos de PAT recomendables deben ser de cobre. En caso sea una varilla "Copperwell" su capa de cobre no debería ser menos de 1,5mm.
15. Colocar electrodos mas largos que los estándares no garantiza una buena resistencia de PAT; es necesario conocer la estratigrafía del suelo.
16. Los electrodos no convencionales (de grafito, de picrón y de Zinc) ya se vienen usando con buenos resultados en países europeos.
17. La unión entre el electrodo y conductor de puesta a tierra, se recomienda sea por soldadura puesto que garantiza mejor la continuidad de la corriente; respecto de las conectores mecánicos. De los procesos por soldadura es mejor la aluminotermica.
18. En el diseño de los conectores es importante tener presente las temperaturas altas que podrían producirse debido a la presencia de corrientes intensas.

19. Cuando se hace el tratamiento de suelos con sal, esta no debe estar en contacto directo con la varilla; lo recomendable es que se hagan surcos concéntricos en sus proximidades para los respectivos lechos de sal y agua.
20. Erróneamente se ha venido usando la tierra de chacra como parte de su tratamiento. Esta claro que ésta corroe al cobre; además llevar de un lugar a otro significa su depredación.
21. Se recomienda realizar el diseño de la PAT para las condiciones mas desfavorables (clima, época del año, presencia de humedad , etc).
22. Cuando se decide agregar alguna sustancia química para el tratamiento de suelos, se recomienda conocer el valor del PH de la sustancia usada como insumo, para prevenir comportamientos futuros de corrosión en la varilla metálica y sus accesorios.
23. En el diseño de una PAT, debe tomarse en cuenta que los suelos que presentan menor resistividad, son los mas corrosivos.
24. La Bentonita es tal ves la sustancia mas económica y eficaz. Lo importante es realizar una dosificación óptima, siguiendo los procedimientos adecuados; asimismo un adecuado mantenimiento.
25. El cemento conductivo es también eficaz no necesita de mucho mantenimiento; pero por el momento resulta económicamente costoso.
26. Sustancias como los Geles o gelatinas resultan efectivas por un tiempo. Pueden conseguirse reducciones de resistencia de PAT; pero a se ha comprobado a pocos meses de Instalado suele aumentar esta resistencia si no se hace un mantenimiento permanente.

ANEXOS

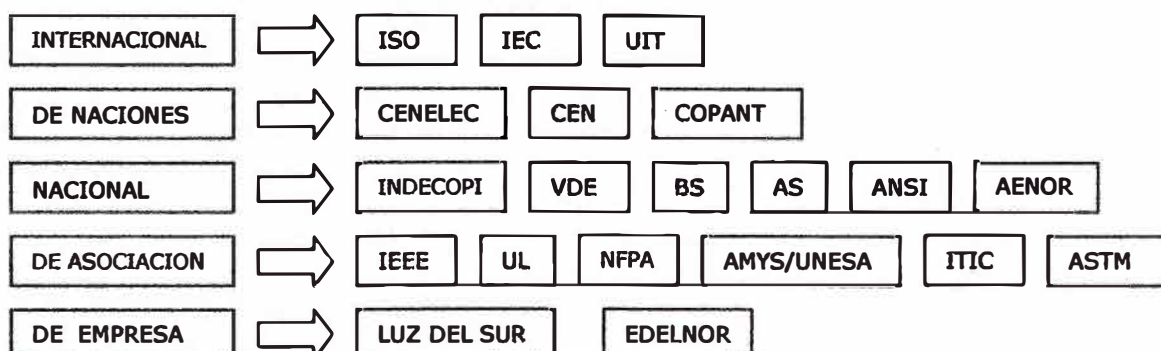
ANEXO A
CUADROS IMPORTANTES

CUADRO I
DIFERENCIA ENTRE NORMA Y REGLAMENTO

Norma técnica	Reglamento técnico
<ul style="list-style-type: none"> • Documento técnico voluntario. • Contiene especificaciones de calidad, terminología, métodos de ensayo, información de rotulado, etc. • Es elaborada por consenso entre las partes interesadas. (fabricantes, consumidores, ministerios, universidades, etc.) • Está basada en resultados de la experiencia y desarrollo tecnológico. • Es aprobada por un organismo de normalización reconocida; en este caso el Indecopi. • Está disponible al público 	<ul style="list-style-type: none"> • Documento técnico obligatorio. • Contiene requisitos, sea en forma directa o haciendo referencia o incorporando una Norma, Especificación Técnica o Código de Práctica. • Es aprobada por una autoridad de reglamentación, responsable de la preparación o adopción de Reglamentos. • La autoridad encargada de la aplicación no es necesariamente la autoridad de reglamentación

CUADRO II
DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y ANTECEDENTES

(Sugerencia en el orden de prioridades) [6]



CUADRO V

CUADRO DE DIMENSIONES MÍNIMAS, PARA ELECTRODOS.

(Tomado como referencia de las normas IEC 60364-5-54, BS 7430, AS 1768, UL 467, UNESA 6501F y NTC 2050) [23]

Tipo De Electrodo	Materiales	Dimensiones Mínimas			
		Díametro mm	Área mm ²	Espesor mm	Recubrimiento mm
Varilla	Cobre	12,7			
	Acero inoxidable	10			
	Acero galvanizado en caliente	16			70
	Acero con recubrimiento electrodepositado de cobre	14			100
	Acero con recubrimiento total en cobre	15			2000
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero inoxidable	25		2	
	Acero galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje	Cobre		50	2	
	Acero inoxidable		90	3	
	Cobre Zincado		50	2	40
Cable	Cobre	1,8 para cada hilo	25		
	Cobre estañado	1,8 para cada hilo	25		
Placa	Cobre		20000	1,5	
	Acero inoxidable		20000	6	

ANEXO B
DEFINICIONES IMPORTANTES

DEFINICIONES BÁSICAS SOBRE DENOMINACIONES EN SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

- **Tierra física.**

También llamado sistema de electrodo de tierra, puede consistir en la varilla o tubería u otro electrodo aprobado por el código y que debe tener un contacto directo con la tierra físicamente. A este electrodo van conectados los conductores que llegan de la denominada tierra de seguridad y de la tierra del equipo

- **Tierra de equipo o tierra de seguridad.**

Consiste en la interconexión de las partes metálicas de los equipos que usualmente no acarrean corriente, para mantenerlos a una referencia cero o plano equipotencial. En algunos lugares también lo conocen como la conexión a masa

- **Tierra del circuito**

Es el conductor conectado a tierra o conductor neutro, el cual tiene la función en caso de un cortocircuito o falla a tierra, de transportar la corriente de falla cedida por el conductor de tierra del equipo.

Es también la referencia a tierra del sistema

- **Tierra de protección contra rayos**

Este sistema es imprescindible en lugares donde hay presencia de rayos.

La función específica de este sistema es drenar la energía del rayo a tierra en forma controlada, por medio de la varilla pararrayos, un conductor bajante y un electrodo de tierra separado.

- **Tierra aislada**

Este sistema ofrece una tierra libre de ruido eléctrico para equipos electrónicos sensibles y se usa especialmente en salas de computadoras.

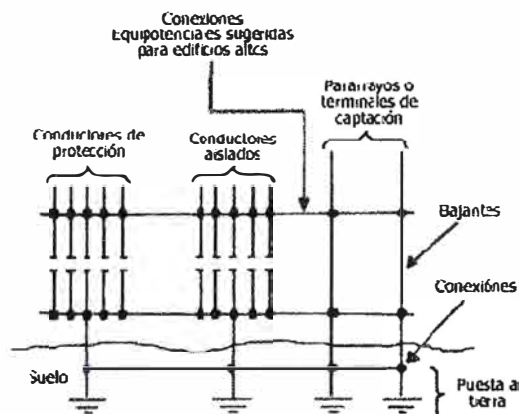
- **Tierra de referencia o de señal**

Vendría a ser el sistema de referencia cero para todos los equipos de señales digitales.

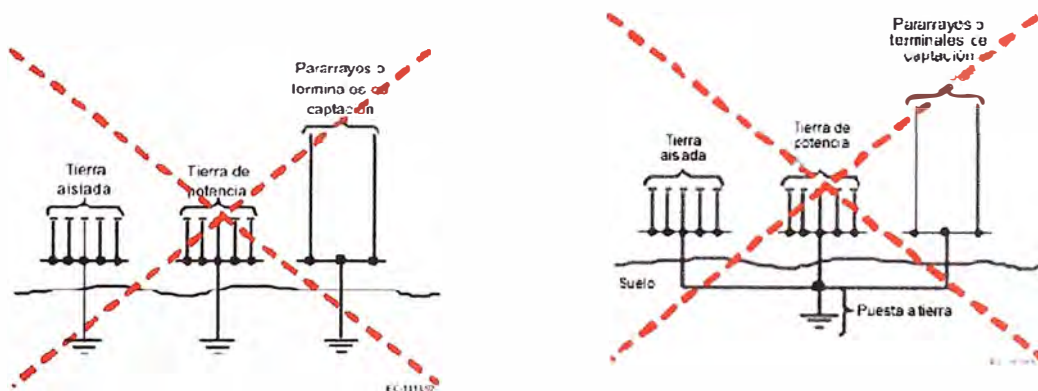
ANEXO C
INTERCONEXION DE PUESTAS ATIERRA

INTERCONEXIÓN EN LOS SISTEMAS DE TIERRA

1. Cuando por requerimientos de un edificio existan varias PAT, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente, según criterio adoptado de IEC-61000-5-2, tal como aparece en la Figura siguiente.



2. Igualmente, para un mismo edificio quedan expresamente prohibidos los sistemas de PAT que aparecen a continuación, según criterio adoptado de la IEC 61000-5-2



ANEXO D
RESUMENES DE ARTICULOS RELACIONADOS CON MEDICIONES DE PUESTA
A TIERRA CON PINZAS AMPERIMETRICAS

ARTICULO I

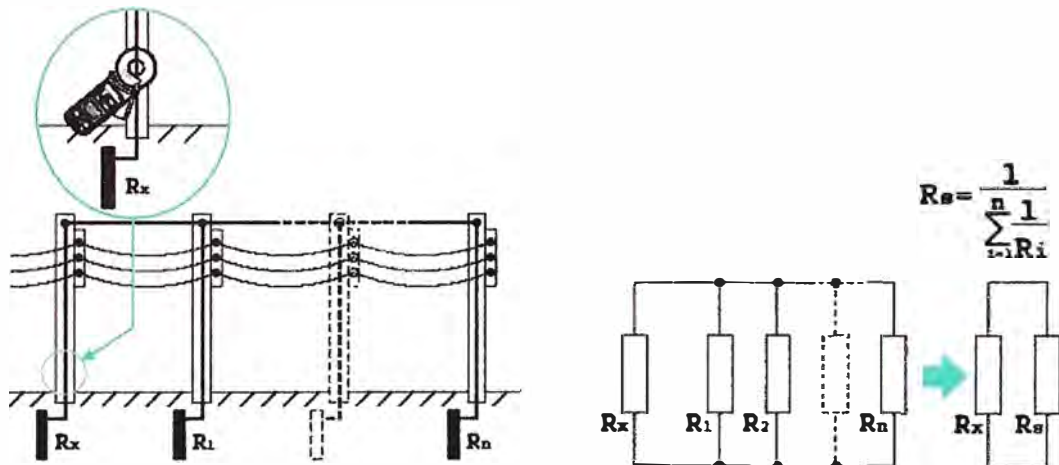
PINZA PARA MEDICIÓN DE PUESTA A TIERRA - KEW 4200

- Puesta a tierra sin electrodos ni contacto.
- True RMS.
- IEC 61010 Cat II 600V
- Mordaza de 35mm.
- R: 10mili Ohm a 1200 Ohm
- ICA: 0,1mA a 30A
- Memoria para 100 muestras



Principio de Funcionamiento

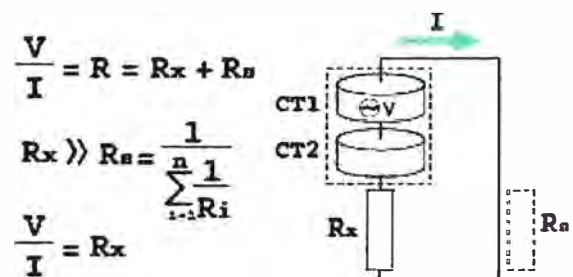
Se considera el hecho de que la instalación necesariamente tendrá muchas conexiones a tierra en paralelo.



El circuito equivalente será, muy aproximadamente, una serie entre la resistencia a medir y todas las otras puestas en paralelo.

El segundo término de la serie es despreciado, por ser mucho menor al valor buscado.

La pinza crea una FEM sobre el circuito y mide la corriente circulante de manera similar a otras pinzas, obteniendo la Resistencia buscada por Ley de Ohm.



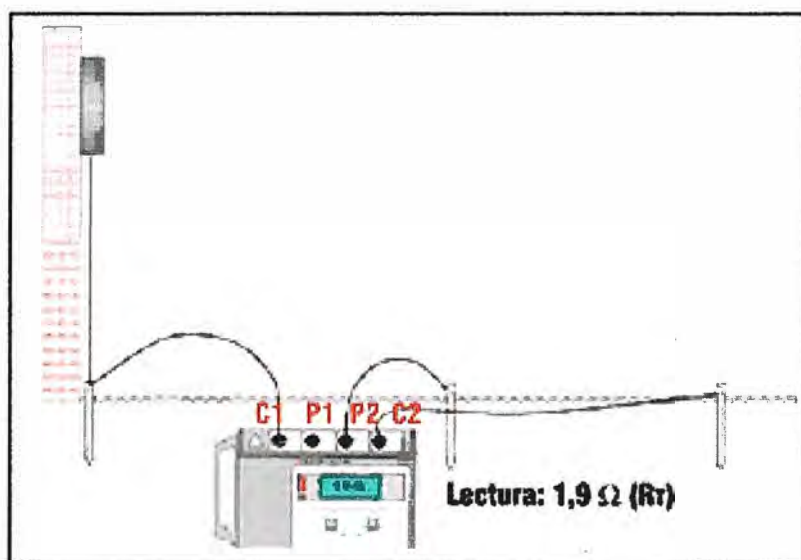
ARTICULO II

NUEVAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE PUESTA A TIERRA

TÉCNICA DEL ELECTRODO UNIDO ART (ATTACHED ROD TECHNIQUE)

Existen tres métodos para medir la puesta a tierra. El más común es el método de caída de potencial, extremadamente confiable y exacto, conforme a la norma IEEE 81 y da al operador un completo control sobre los ajustes. Sin embargo, es una prueba lenta que requiere desconectar la malla. Otra prueba se efectúa con tenazas de tierra, la cual es muy rápida y fácil, pero tiene algunas limitaciones: requiere un buen retorno de tierra, es susceptible a ruidos que reducen su precisión y no puede ser usada en tierras aisladas.

En cambio, la técnica del electrodo unido (ART, Attached Rod Technique) proporciona algunas de las ventajas de la prueba con la tenaza de tierra y del método de caída de potencial, ya que puede realizar sin desconectar el electrodo de tierra y adicionalmente mide la corriente de fuga. Por ejemplo, las figuras 1 y 2 indican las tres medidas que deben tomarse con los métodos tradicionales, que los hacen lentos y engorrosos.



El primer paso es medir la resistencia (RT) del sistema total usando una típica configuración de caída de potencial. En este ejemplo, la lectura para RT es 1,9 W.El

segundo paso involucra la medida de la corriente total (IT) inyectada al sistema desde el terminal del equipo C1. Para este ejemplo, IT es 9.00 mA. El próximo paso es medir la cantidad de corriente (IU) que circula al servicio.

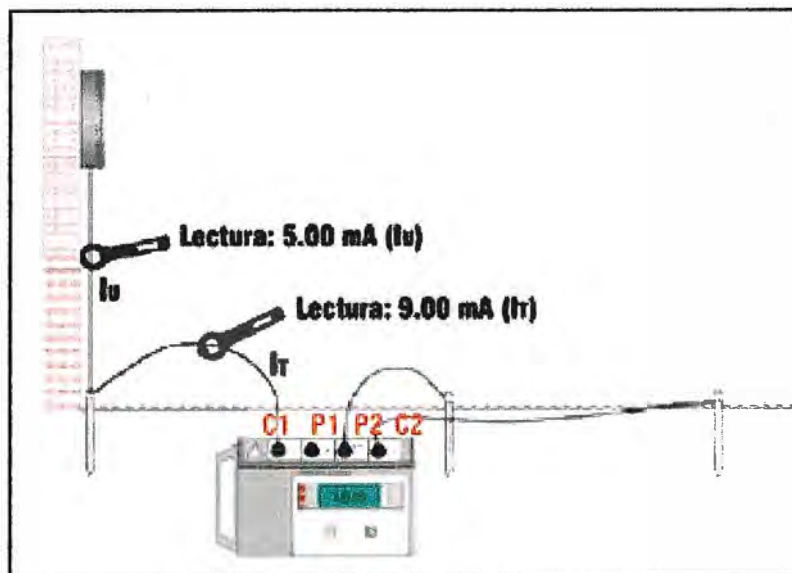


Figura 2: Medidas de corriente de fuga.

En este caso, I_U es 5 mA. Con estas medidas, la caída de tensión del volumen seleccionado de suelo en el punto del terminal P2 puede ser determinado como sigue:

$$V = I_T \times R_T$$

$$V = 0,009 \text{ A} \times 1,9 \text{ W}$$

$$V = 0,017 \text{ V}$$

La corriente a través del electrodo de tierra (I_G) puede también ser determinada:

$$I_G = I_T - I_U$$

$$I_G = 9.00 \text{ mA} - 5.00 \text{ mA}$$

$$I_G = 4.00 \text{ mA}$$

Usando la caída de tensión y la corriente a través del electrodo de tierra, la resistencia del electrodo (R_G) puede ser determinada:

$$R_G = V / I_G$$

$$R_G = 0,017 \text{ V} / 0,004 \text{ A}$$

$$R_G = 4.25 \text{ W}$$

Como se indicó anteriormente, éste es un acercamiento teórico que requiere condiciones perfectas. Cualquier corriente adicional fluyendo desde el servicio a través del electrodo de tierra reducirá la exactitud de la medida. La pinza medidora de corriente de fuga debe tener un filtro que sólo considere la corriente generada por el instrumento a través del terminal C1 asegurando la exactitud en la medida. Además, este acercamiento requiere que diversos cálculos matemáticos sean realizados.

La técnica del electrodo unido (ART) está basada en la técnica perfilada anteriormente y como se ve en la figura 3, simplifica la medida. Los probadores de tierra diseñados para realizar la técnica ART incluyen una pinza de corriente incorporada especialmente ubicada entre la conexión C1 y la tierra. Este tipo de instrumentos incluyen una protección de ruido y filtros digitales que dejan fuera de la medida todas las corrientes ajenas a la generada por el instrumento. El microprocesador incorporado realiza automáticamente todos los cálculos necesarios para generar una medición de resistencia para el electrodo o malla de tierra.

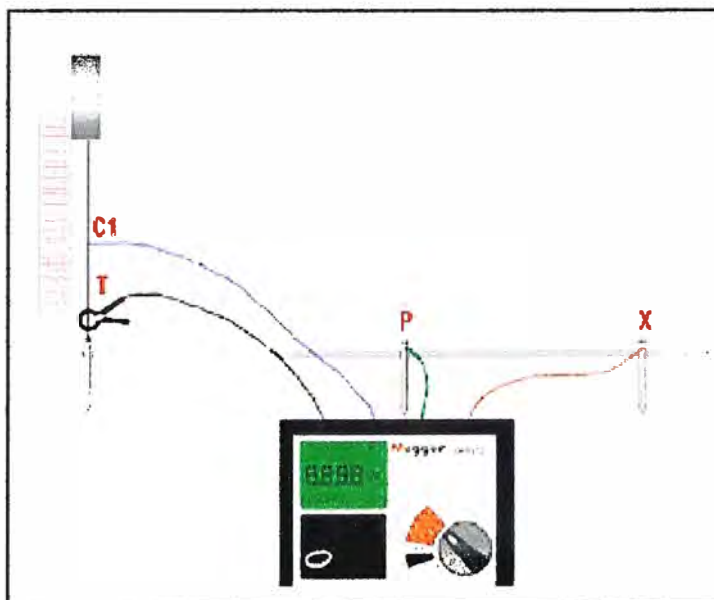


Figura 3: Medición de la técnica del electrodo unido (ART).

La prueba es una prueba de caída de potencial, si se aplican todas las reglas. Idealmente, el operador tomará 10 medidas y trazará los resultados para determinar la resistencia real. El espacio de la sonda apropiada sigue siendo un procedimiento crítico y los procedimientos de la caída de potencial deben seguirse. Como con una tradicional prueba de caída de potencial, los resultados pueden ser corregidos aumentando los espacios entre los electrodos de prueba. No obstante, la ventaja del método ART es que el electrodo o malla de tierra bajo prueba no tiene que ser desconectado del sistema.

Por Jorge Correa, Ingeniero de Comulga- Chile Octubre 2006

www.comulsa.cl

ANEXO E
SUSTANCIAS USADAS COMO MEJORADORES DE PAT; COMERCIALIZADAS
EN EL MERCADO PERUANO

A. THOR-GEL [25]

Es un compuesto químico complejo que se forma cuando se mezclan en el suelo las soluciones acuosas de sus 2 componentes. Es un gel de color marrón rojizo de hexacianoferrato (II) de Cobre (II), cuya fórmula es $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, formando una malla tridimensional, que facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la malla, de modo que pueden cruzarlo en uno u otro sentido; convirtiéndose en un excelente conductor eléctrico.

Tiene una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla manteniendo un equilibrio con el agua superficial que la rodea; esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero.

Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el suelo (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.

Thor-gel tiene el Ph ligeramente básico y no es corrosivo con el cobre, por lo que la vida media de la puesta a tierra con el producto será de 20 a 25 años, manteniéndola de vez en cuando si la pérdida de humedad es mayúscula y hay elevación de la resistencia eléctrica. En el grafico 5.18, ilustra los valores de resistencia tratando los suelos con diferente dosis de Thorgel

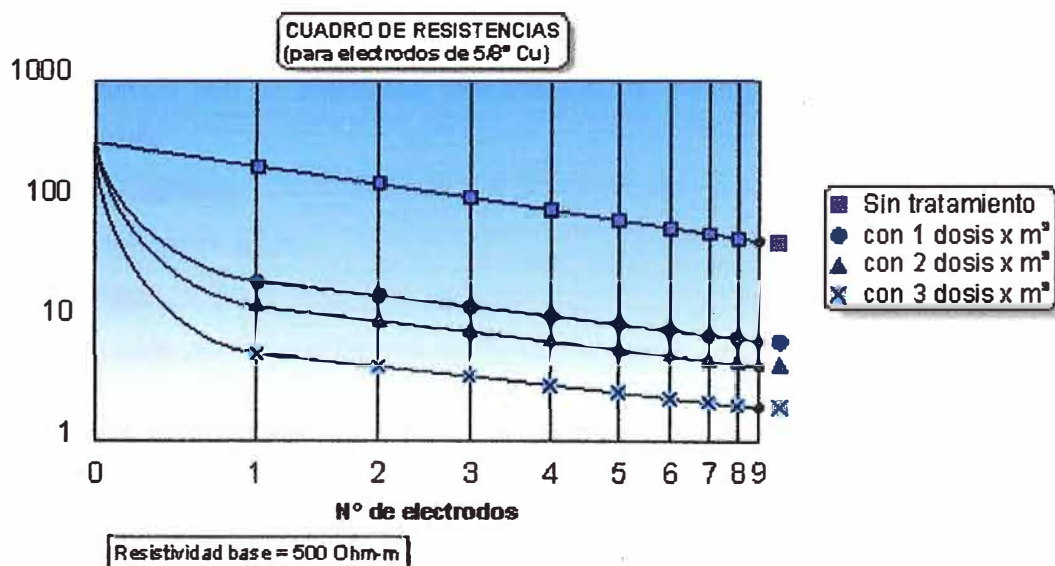


Fig. 5.18 Resistencias versus numero de electrodos y su tratamiento

Método de aplicación

El tratamiento consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel mejora la conductividad de la tierra y retenga la humedad en el pozo por un periodo prolongado de manera que se garantice una efectiva reducción de la

resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima.

La preparación del THOR GEL se realiza por reacción química directamente en el terreno, aplicando primero una solución acuosa de iones cobre (II) y luego otra solución acuosa de iones ferrocianuro, que al entrar en contacto forman el gel de hexacianoferrato (II) de Cobre (II).

La cantidad de dosis por metro cúbico de tierra del SPAT, varía de 1 a 3, y está en función a la resistividad natural del suelo.

Es usual en estas aplicaciones adicionar un conductor de cobre en forma de espiral. Entre los extremos inicial y final.

B. PROTEGEL [26]

Es un preparado químico con el que se consigue, a bajo costo, una notable reducción de la resistencia a tierra en suelos de elevada resistividad. Con la preparación adecuada, la dosis de Protegel se transforma en un material gelatinoso (GEL) altamente Higroscópico que se distribuye por el suelo en forma de ramificaciones reticulares, lo que le permite absorber grandes cantidades de agua. De esta forma, la superficie del electrodo estará en contacto con un suelo altamente conductor, con lo que la resistencia a tierra se ve notablemente reducida y, como consecuencia, el paso de la corriente del electrodo al suelo se realiza de una forma mucho más eficiente.

El Gel obtenido con la adecuada preparación de Protegel presenta las siguientes características:

- Estabilidad química.
- Insolubilidad en el agua.
- No corrosivo.
- No degradable por los elementos químicos del suelo.

Forma de aplicación:

En caso de encontrar suelo del tipo Cascajo, Arena o pedroso, recomendamos cernir en un Tamiz de ¼ y utilizar solo este tipo de suelo mezclando con tierra agrícola.

En caso de suelo No Apto debe reemplazarse por tierra agrícola tamizada.

Se mezcla la tierra con Protegel (una dosis de Protegel de 6kg, por cada m³ de tierra).

Se recomienda mantener húmedo el suelo en el pozo de puesta a tierra.

Ventajas que ofrece

Una puesta a tierra tratada con **Protegel** es más eficiente, con una adecuada utilización se logra una baja resistividad:

- A un menor costo.
- Con mayor seguridad
- Durante un periodo de tiempo más prolongado
- Con cada tratamiento de **Protegel** se mantiene las condiciones de baja resistividad durante un periodo de hasta 4 años.

Nota:

No se recomienda usar éste procedimiento, en PAT para protección de rayos.

Comentario:

La tierra de cultivo a pesar de tener buena resistividad, es nociva para los electrodos de cobre; sin embargo ésta firma recomienda su uso.

C. ECOGEL [27]

Ecogel es una arcilla en base a bentonita con alto contenido de sólidos especialmente formulada para proveer un sello conductivo alrededor del electrodo de puesta a tierra. Se caracteriza por su capacidad de retener humedad. Otro producto usado adicionalmente es la misma Bentonita, para reemplazar el volumen de las piedras que se extraen al momento de hacer la excavación del sistema de tierra, al ser mezclada la bentonita con la tierra cernida ésta mejorara sus propiedades conductivas y hará innecesario la compra de "tierra de Chacra" produciendo además un ahorro en el costo de evacuación de desmonte.

Propiedades:

- Baja la resistividad del suelo normal de 300 Ω - m a 0,76 Ω – m.
- Baja el requerimiento del numero de electrodos, así como el espacio requerido.
- Fácilmente compactable, no corrosivo y conductivo.
- Forma un sello resistente a la contaminación.
- Se transforma en una arcilla densa, de consistencia pastosa que se adhiere al electrodo y permanece estable a pesar de los cambios climatológicos.
- Por ser un producto natural, NO ES CONTAMINANTE.

Características.

Apariencia	Polvo de pardo a gris.
Humedad	8%
Conductividad	1,31 MHOS/Mt.
Resistividad	0,76 Ohm/Mt.

Presentación

Dosis de 8kg

Método para instalación (PAT básico en viviendas)

1. Se hace una excavación de 80 cm. De diámetro y de una profundidad mayor en 20cm. a la longitud del electrodo.
2. Se humedece el orificio y se adiciona el compuesto químico "SGM"(sal electrolítica)
3. Mezclar agua (18 litros) con "Ecogel", (una caja), batir de a pocos hasta lograr una mezcla uniforme
4. mezclar la tierra cernida con bentonita.
5. Ubicar el electrodo y colocar un tubo de plástico a su alrededor, procurando centrar el electrodo. Verter la mezcla obtenida del paso 3 en el interior del tubo hasta una altura de 50 cm. y batir la mezcla para evitar la permanencia de posibles burbujas de aire.
6. Rellenar el espacio entre las paredes del pozo y el tubo con la tierra tratada producto del paso 5 hasta una altura igualmente de 50 cm. Apisonar bien la tierra alrededor del tubo y agregar 50 litros de agua.
7. Levantar parcialmente el tubo y repetir la acción anterior hasta dejar descubierto solamente 30 cm. del electrodo
8. Retirar totalmente el tubo de plástico antes del apisonado final.

Recordar que esta propuesta de diseño es para lograr un sistema básico para viviendas con valor menor a 25 Ohms. Como se especifica en la NEC.

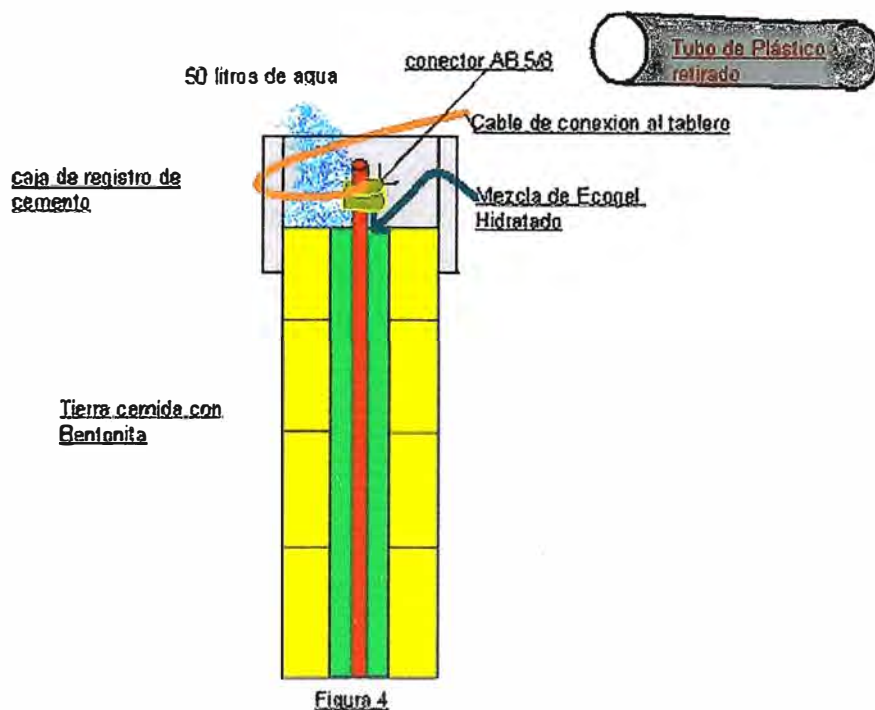


Fig. 5.19 forma de tratamiento con "ECOGEL"

Nota:

En caso de aplicarse el SGM, este se aplicara disuelto en el agua a usarse en el paso 3, Esto le permitirá llegar a valores equivalentes a la aplicación de cinco dosis de otros productos, con la salvedad que nuestro producto no será corrosivo para el electrodo y que los valores que obtendrá serán permanentes sin demanda de mantenimiento.

D. TECNOLOGÍA PERU GEM [22]

Tiene como principal característica, obtener bajas resistencias y garantizar larga vida a los sistemas de puestas a tierra. Es un producto ecológico y de larga vida.

A diferencia del Gel que necesita de agua y desaparece en poco tiempo la resistencia obtenida; con el cemento conductor PERU GEM éste problema ha sido largamente superado. Es libre de mantenimiento. No es toxico, por tanto no empobrece el suelo. En términos generales es un producto innovador.

PERU GEM es un cemento altamente conductor, que forma un electrodo compacto en unión con una varilla de cobre con amplia capacidad de absorber y aterrizar eficientemente corrientes tipo impulsionales, de falla, estáticas y fuga, el conjunto compacto posee una mayor área de contacto con la tierra ofreciendo una menor resistencia respecto a los demás productos, y años de duración sin alteraciones en las resistencia.

PERU GEM se utiliza a nivel Nacional en el diseño y construcción de puestas a tierras físicas para aplicaciones: industriales, telecomunicaciones, minería, salas de computación, industria de gas, Instituciones Publicas, Hospitales y donde el objetivo final sea obtener una resistencia baja.

PERU GEM se comercializa en presentaciones de 15 Kg. embolsado de fácil transporte y maniobrabilidad que directamente se utiliza en la puesta a tierra en polvo o mezcla con agua formando un lodo. La configuración y método de utilización depende del diseño elaborado.

E. HIIDROSOLTA [23]

Es una técnica novedosa cuyo objetivo fundamental es almacenar la energía en desbalance incorporando un circuito RC.

Entre características, tenemos:

- es el producto de mas baja resistividad disponible (0.4 Ohm- m)
- libre de mantenimiento.
- evita la corrosión catódica del cobre.

- bajo tiempo de carga-descarga μ seg.
- gran retenedor de agua, a 60°C retiene el 40% de humedad.
- único en su género para el dominio de energías transitorias.

Instalación

Ubique el área en la que instalará el sistema de puesta a tierra y escoja una de las dos formas de instalación dependiendo del espacio disponible.

Precaución: la Hidrosolta no se debe mezclar con otro tipo de elementos como tierra negra, azufre, carbón, etc. Puesto que anula ó disminuye su efectividad. Debe utilizarse disolviéndose solo con agua y la cantidad mínima por foso debe ser de 15 Kg.

Instalación Pozo Vertical

El dispositivo de puesta a tierra se coloca en el centro de foso vertical excavado, a continuación el cilindro de malla o núcleo se rellena de tierra compactándola un poco al final, en este momento el sistema se puede completar vertiendo la Hidrosolta mezclada con agua.

Para determinar la profundidad del foso y la cantidad de Hidrosolta, consulte la tabla de dimensiones del pozo vertical.

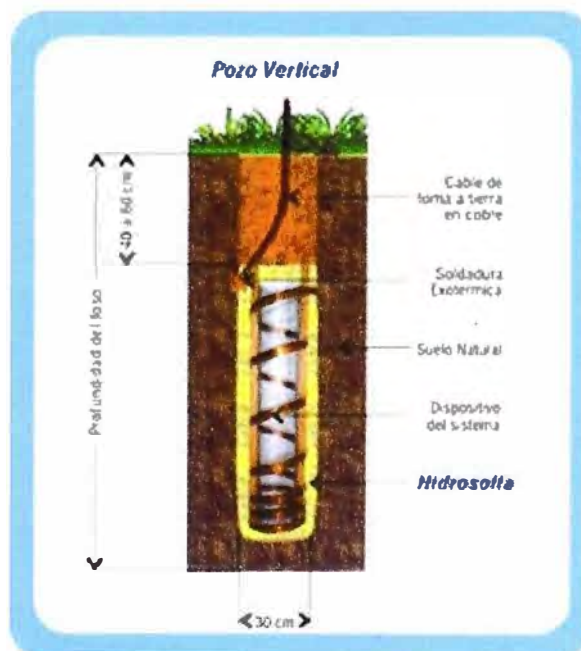


Fig. 5.20 instalación de electrodo vertical

Instalación Pozo Plano

En el foso horizontal excavado, se cubre en el fondo de la zanja con Hidrosolta mezclada con agua, a continuación se coloca la lamina de cobre cubierta

completamente de Hidrosolta mezclada con agua, luego se rellena con suelo natural, compactando únicamente cuando termine de tapar la zanja.

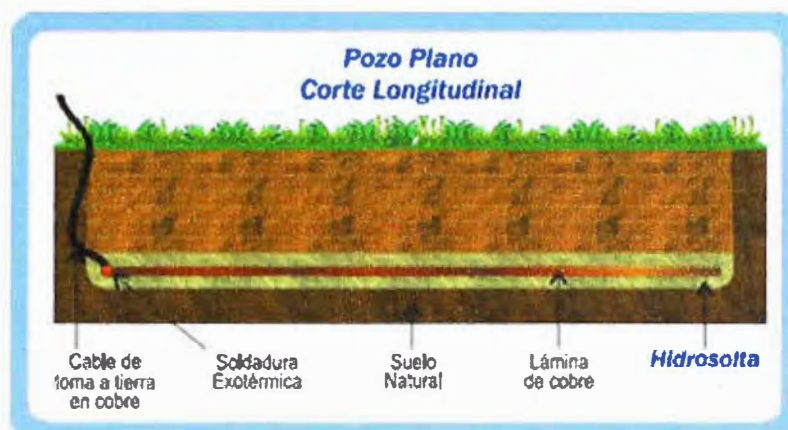


Fig. 5.21 instalación de electrodo horizontal

PRECIOS COMPARATIVOS EN EL MERCADO PERUANO DE PRODUCTOS MEJORADORES DE RESISTIVIDAD DE SUELOS

Marca	producto	Peso (kg.)	Costo(\$)
BENTONITA	natural	30	6.94
ECOGEL	gel	8	15
THORGEL	Gel	5	35
PROTEGEL	Gel	6	18
ERICOGEL	Gel	7	12
HIDROSOLTA	Cemento conductor	15	45
CONDUCRETE	Cemento conductor	25	60
ERICO GEM	Cemento conductor	11.5	39.95
SAN HEARTH	Cemento conductor	25	51
BLUE CRETE	Cemento conductor	25	47.81
FAVIGEL	Cemento conductor	25	87.5

ANEXO F

DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD DE SUELOS DE DOS ESTRATOS USANDO LA TECNICA DE TAGG

PROCESAMIENTO ANALÍTICO DE TAGG

Un Sistema de conducción eléctrica como el suelo estratificado, plantea dificultades para la determinación de sus parámetros eléctricos que forman un esquema desconocido del que sólo podemos obtener datos de Resistividad aparente con medidas desde la superficie.

En la figura 1 se observa el caso de un suelo de dos estratos, las cuales toman la denominación de superficial y subyacente.

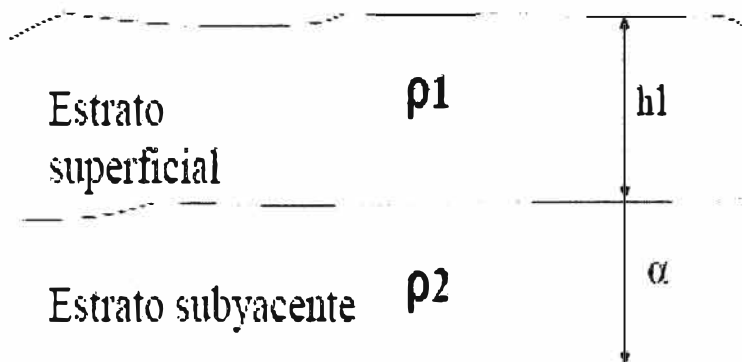


Fig. 1 Estratos superficial y subyacente

El método de TAGG brinda la solución a partir de un esquema de Dos Estratos, considerando que toda inyección de corriente, origina una respuesta, con la aparición de una serie infinita de imágenes que se reflejan en las interfases Estrato-Estrato (factor de Reflexión K) y Estrato-Aire ($K = 1$), definiendo una expresión analítica de convergencia, que permite determinar los parámetros del suelo a partir de la sucesión de puntos (ρ_a , a), de las Características de Resistividades del Suelo; obtenidas a partir del método de Wenner.

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{(1 + \mu^2)^{1/2}} - \frac{K^n}{(4 + \mu^2)^{1/2}} \right]$$

Donde:

$$\mu = \frac{2nh_1}{a} \quad ; \quad K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad ; \quad K_0 = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Siendo:

ρ_a : Resistividad aparente a una medida "a"

h_1 : Profundidad de la primera capa.

a: espaciamiento e los electrodos

PROCESAMIENTO COMPARATIVO GRÁFICO

Pese a ser más sencillo aplicar un programa de cálculo que puede ser cargado en una calculadora, la dificultad de no disponer de los datos precisos de las medidas de campo, conduce a resultados imprecisos. Por ello se opta por un procedimiento gráfico comparativo cuyo objetivo será determinar:

- Estrato Superficial de Resistividad (ρ_1)
- Estrato Subyacente de Resistividad (ρ_2)
- Espesor del Estrato Superficial: (h_1)

El procedimiento se detalla a continuación:

1. Teniendo como base los datos de campo, graficar en papel transparente y logarítmico las curvas de resistividad aparente en función de la distancia entre electrodos: " ρ_a " versus " a " (Fig. 2). Es recomendable un mínimo de cuatro puntos para la obtención de esta grafica, la que comúnmente es denominada "grafica CSG" y debe ser idéntica al de las curvas de patrón "patrón STD" (Fig. 3).

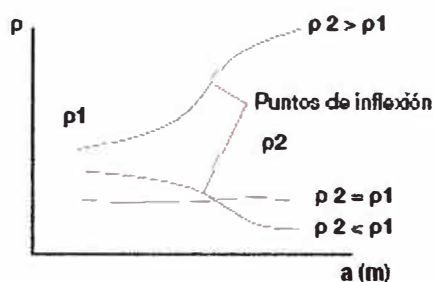


Figura 2: grafica " ρ_a " versus " a ".

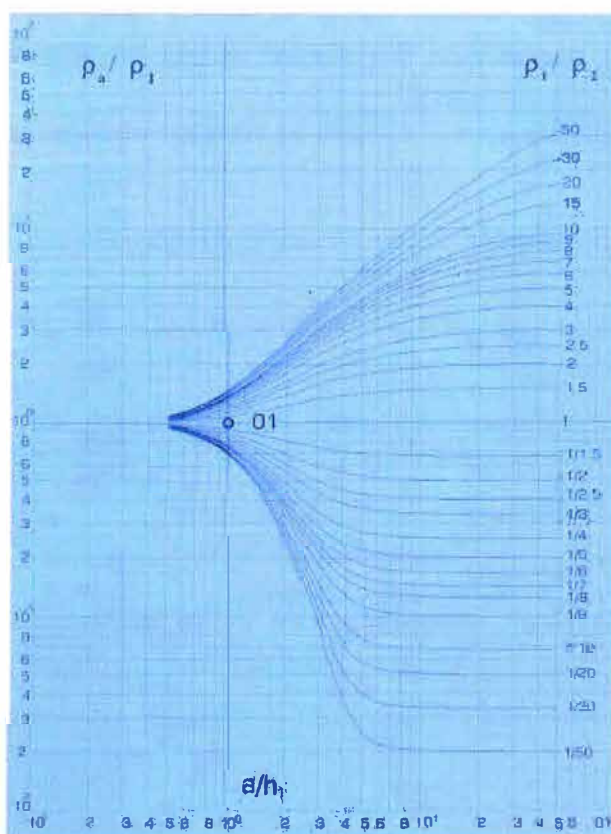


Figura 3: Familia de Características Estándar

2. Usando una ventana o mesa luminosa, superponer la curva experimental y una de las curvas patrón, hasta obtener una coincidencia la más perfecta posible. Durante este proceso deben mantenerse paralelos los ejes de ambos gráficos (Fig. 4). Si es posible un calce en tan solo una parte de la curva experimental, es señal que el modelo del suelo analizado corresponderá a más de dos capas (numero de estratos = numero de puntos de inflexión + 1)

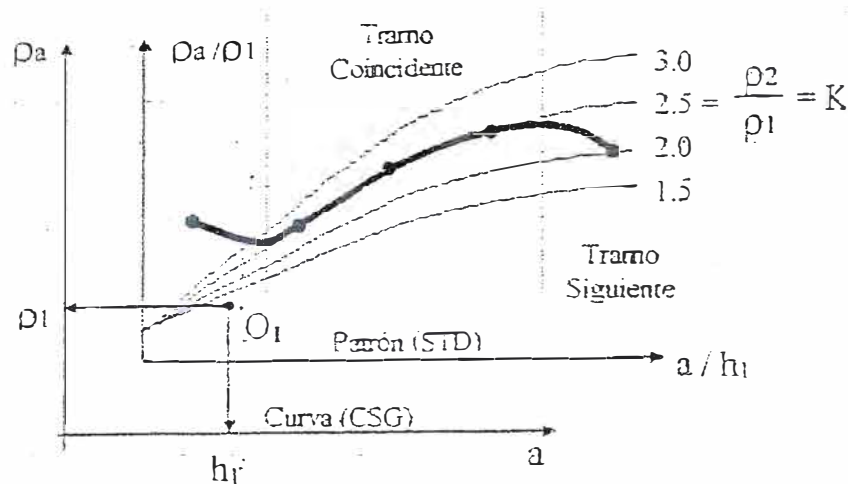


Fig. 4 Esquema de Procesamiento Gráfico para Suelo en Modelo de Dos Estratos [3]

3. Marcar en el papel con la curva experimental una cruz en el punto correspondiente al origen (O_1) del gráfico patrón.
4. La ordenada de la cruz marcada en el gráfico de la curva experimental indicará el valor correspondiente a la resistividad de la capa superior ρ_1 , mientras que la abscisa indicará el valor del espesor de la capa superior h_1 .
5. Leer el valor de ρ_2/ρ_1 de la curva patrón que calza con la curva experimental, a partir del cual se calcula ρ_2 conociendo ρ_1 encontrado en el paso 4.
6. El espesor de la segunda capa h_2 se supone que es infinito.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pablo Díaz. "Soluciones practicas para la puesta a tierra de sistemas Eléctricos de distribución"
Editorial McGraw-Hill – México, 2001
- [2] Juan J. Martínez Requena y José C. Toledano. "Puesta a tierra en edificios y en instalaciones eléctricas"
Editorial Paraninfo 3ra edición - España, 2000
- [3] Yanque Montufar Justo. "copias de curso de alta tensión"
Universidad nacional de ingeniería - Lima, 2004
- [4] Roberto Ruelas. "Teoría y diseño de sistemas de Tierras, según normas NOM e IEEE"
www.ruelsa.com, abril 2001
- [5] Ignacio Aguilero. "Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra en zonas urbanas"
<http://prof.usb.ve/mmlozano/DOCS/MMPAT.pdf>
- [6] Huayllasco Montalva Carlos. Normalización y redes de distribución
8vo programa de titulación profesional – Universidad Nacional de Ingeniería
- [7] Bernard Lacroix y Ronald Calvas. "esquemas de conexión a tierra en baja Tensión"
www.schneider-electric.com.ar
- [8] Tecsup - Curso virtual: Sistema de Puesta a Tierra
www.tecsup.edu.pe
- [9] Código Nacional de Electricidad – suministro
Ministerio de Energía y Minas – Lima 2001
- [10] Código Nacional de Electricidad – Utilización, sección 60
Ministerio de Energía y Minas – Lima 2006
- [11] INDECOPI. Normas Técnicas Peruanas "CTN 025 Seguridad Eléctrica. Sistemas de conexión a tierra"
www.bvindecopi.gob.pe 1999

- [12] Publicaciones de PROCOBRE. "Electroredes 98-2, 99-1, 2001-1, 2001-2, 2002-1, 2002-2, 2003-1
www.procobreperu.org
- [13] EEP de Medellín-Colombia- Normas de materiales para redes eléctricas
."Aditivos y rellenos usados para el mejoramiento de las puestas a tierra
www.eeppm.com/epm/documentos/institucional/pdf/n_aerea_271.pdf
- [14] Instituto de ingeniería eléctrica. "Puesta a tierra y conductores de protección"
Universidad de la republica del Uruguay-curso instalaciones eléctricas 2004.
ie.fing.edu.uy
- [15] "NOM-SEDE-001-2005 Instalaciones Eléctricas (utilización)". Estándar
Mexicano, Diario *Oficial de la Federación* 13 Marzo 2006.
- [16] Publicaciones técnicas colombianas en la Web: "PORTAL ELECTRICOS"
www.portalelectricos.com
- [17] Yanque Montufar Justo. "Consecuencia de las fallas eléctricas y criterios de
Protección en instalaciones MT y BT"
Seminario AEP – agosto 2002
- [18] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. "NTP 400: Corriente
Eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano"
http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_400.htm
- [19] "LEM technical grounding techniques"
www.leminstruments.com
- [20] Manuales técnicos de sistemas de PAT y protección catódica: PROCAINSA.
www.procainsa.com
- [21] Manual técnico de cemento conductor: SAN-EARTH.
www.sankosha.com
- [22] Manuales técnicos de protección contra rayos y sobretensiones: PROSAT.
www.prosat.com.pe
- [23] Manual técnico de cemento conductor: HIDROSOLTA.
www.hidrosolta.com
- [24] Pro cobre-chile- documento de referencia.
www.procobre.org
- [25] Manuales técnicos de geles: THORGEL
www.para-rayos.com

- [26] **Manual técnico de sales conductoras: PROTEGEL**
www.klk.es/home/port/puesta_a_tierra
- [27] **Manuales técnicos: ECOGEL**
www.camensa.com
- [28] **El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. "Guía técnica para la evaluación y prevención del riesgo eléctrico"**
www.mtas.es/Insht/practice/g_electrico.htm