

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE ACUERDO AL ESTUDIO DE
SUELOS PARA LINEAS DE TRANSMISIÓN Y SUB ESTACIONES DE
MEDIA Y ALTA TENSIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

CÉSAR ARTURO ALZA ARAUJO

PROMOCIÓN 1995-II

LIMA-PERÚ

2005

**SISTEMA DE PUESTA Á TIERRA DE ACUERDO A CARACTERÍSTICAS
DEL SUELO PARA LINEAS Y SUB ESTACIONES DE MEDIA Y ALTA
TENSIÓN**

Que Dios nos de la serenidad
para aceptar las cosas
que no podemos cambiar,
la valentia para cambiar
lo que si podemos
y la sabiduría para reconocer
la diferencia

SUMARIO

El presente Informe trata de dar a conocer que el sistema de tierra no solo es un cálculo matemático si no que, esta es parte de un entorno de criterios, apreciaciones asi como del concurso de otras disciplinas como la geología y otros.

Se trata de dar a conocer ciertas particularidades del suelo sus características componentes, las corrientes que circulan por el; asi mismo como el suelo dependiendo de sus características puede volverse un aliado o enemigo de la puesta a tierra instalado en el, ya que la corrosión es una condición a tomar en cuenta en cualquier diseño de puesta a tierra .

El capítulo I y II trata de las definiciones y condiciones del suelo considerando los aspectos Geológicos, Geofísicos y Geotécnicos.

El capítulo III trata a cerca de los métodos de medición de resistividad, criterios a considerar y equipos

El capítulo IV trata del análisis de estratificación del suelo contando con el método de dos capas, Pirson y Yokogawa.

El capítulo V trata de intensidad de corriente de falla, efectos de la corriente en el cuerpo humano, asi como de la tensión de paso y contacto.

El capítulo VI trata de las diversa configuraciones existentes para el diseño de un sistema de tierra estos pueden contener electrodos y contrapesos.

El capítulo VII y VIII trata de la medición de la resistencia de puesta a tierra así como de los elementos constitutivos de una puesta a tierra.

El capítulo IX trata de los diferentes tipos de corrosión que enfrenta los electrodos de puesta a tierra.

Como corolario del presente informe, se presentan las conclusiones a fin de evaluar lo realizado.

Este informe es sólo un paso en el proceso de análisis de la información que pueda dar mas luces al proceso de investigación y desarrollo de la puesta a tierra materia fundamental cuyo fin se basa en posibilitar la detección de defectos a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo, así el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas.

Para finalizar, vale un reconocimiento a todas las personas involucradas en nuestra formación profesional que aportaron sus conocimientos y ética profesional así como su paciencia para atender nuestras consultas.

Un reconocimiento especial a mi madre Adelaida por su cariño, apoyo y empuje a mis hermanos que hoy están conmigo Miguel y Guillermo por su apoyo a Juan y Javier que partieron tempranamente al encuentro con nuestro creador, a mi compañera Angelica Guillén que me apoyo siempre a mis amigos Enrique, Alejandro, Hermes, Irma entre otros que me apoyaron desinteresadamente.

ÍNDICE

PRÓLOGO	01
CAPÍTULO I	
INGENIERÍA DE PUESTA A TIERRA	03
1.1. Fundamentos de la ingeniería de la puesta a tierra	04
1.2. Naturaleza de las Corrientes Telúricas Características	05
1.3. Orígenes de las corrientes telúricas.	05
1.4. Transporte de electricidad a través de la tierra.	06
1.5. Importancia y trascendencia de las corrientes telúricas.	07
1.6. Ámbito de Corrientes de Tierra Artificiales.	07
1.7. Concepto y definición de Puesta a Tierra.	08
1.8. Problemática de la Ingeniería de Puesta a Tierra	10
CAPÍTULO II	
CONDICIONES DEL SUELO	11
2.1. Consideraciones del Suelo para Puesta a Tierra	12
2.2. Resistividad de Terreno.	13
2.3. Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno.	14
2.4. Aspectos Geológicos y Geotécnicos	17
2.5. Aspectos Geológicos Generales	17
2.6. Minerales Formadores de Roca	20

2.7.	Procesos de formación básicos	21
2.8.	Estructuras Geológicas	22
2.9.	Rasgos Topográficos	23
2.10.	Índices de Material Rocoso y Masa Rocosa	24
2.11.	Mapas Geotécnicos	25
2.12.	Aspectos Geofísicos	25
2.13.	Potenciales Eléctricos	26
2.14.	Conductibilidad Eléctrica	28
2.15.	Constante dieléctrica	29
2.16.	Permeabilidad magnética	30
2.17.	Análisis de la resistividad de rocas y minerales	31
2.18.	Enfoque Macroscópico de Suelos	32
2.19.	Descripción de los suelos	32
2.20.	Integrantes físicos y naturales del suelo.	33

CAPÍTULO III

MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELO	44	
3.1.	Mediciones en el terreno	45
3.2.	Mediciones referenciales por los métodos Wenner , Schlumberger	46
3.3.	Criterios de Aplicación del Método de Medidas de Resistividad	47
3.4.	Criterios para la Medición de la Resistividad Aparente	48
3.5.	Equipo de Medición de Resistividad de Terreno	49

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO	50
4.1. Modelo del suelo de dos capas	50
4.2. Configuración de Wenner	52
4.3. Método de dos Capas Usando Curvas	53
4.3.1. Descripción del metodo	54
4.4. Metodo de Pirson	56
4.4.1. Criterio de Hummel	56
4.4.2. Descripción del metodo	59
4.5. Método Grafico de Yokogawa	61
4.5.1 Descripción del metodo	63

CAPÍTULO V

CORRIENTE - TENSION DE PASO Y CONTACTO	66
5.1 Circulación de intensidades de Corriente en el Terreno	66
5.2 Efectos fisiológicos de la Corriente Eléctrica	68
5.3 La corriente a travez del cuerpo humano	69
5.4. Criterios de duración de las corrientes accidentales.	71
5.5. Potenciales anormales	72
5.5.1. Tensión de paso	72
5.5.2. Tension de contacto	75
5.6. Mejora de aislamiento - uso de grava	77
5.7. Potenciales en malla de puesta a tierra	78

5.7.1.	Tensión de paso en una malla	78
5.7.2.	Tensión de contacto en una malla	79
5.7.3.	Tensión de contacto en una malla con cerco perimetral	81
5.8.	Utilización de electrodos en bordes de la malla	82
5.9.	Verificación de potenciales máximos	83
5.10.	Longitud del Conductor de la Malla de Puesta a Tierra	83
5.11.	Limitaciones de la ecuación del potencial de paso en la malla	83
5.12.	Consideraciones en la medida de potenciales	83
5.13	Consideraciones en las medidas de tensión de toque y paso	85
5.14	Medidas de Potencial en Subestaciones Eléctricas de MT / BT.	87

CAPÍTULO VI

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA COMPUESTOS	89	
6.1.	Método básico solución de sistemas compuestos	89
6.2.	Sistema de dos electrodos en paralelo	90
6.3.	Electrodos múltiples	93
6.4	Electrodos Dispuestos en Arreglo Circular	94
6.5	Electrodos tipo jabalina dispuestos en malla –método de Schwarz	95
6.6	Sistemas de Contrapesos	96
6.6.1.	Conductor dispuesto en forma horizontal	97
6.6.2.	Conductores en paralelo dispuestos en forma horizontal	97
6.7.	Resistencia eléctrica de malla reticulada	98
6.7.1.	Fórmula de Schwartz	99

	X	
6.7.2	Fórmula de Sverak	100
6.7.3	Fórmula de Laurent	100
6.7.4	Fórmula de Dwight	101
6.8.	Resistencia eléctrica sistema compuesto – Método de Schwartz	101
6.9.	Resistencia total	102
6.10	Determinación de la sección del conductor de puesta a tierra.	102
 CAPÍTULO VII		
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA		105
7.1	Método Clásico	105
7.2	Método de Oposición	107
7.3	Distancias para la medidas de resistencias de P.A.T.	109
7.4	Determinación de la distancia mínima (d) (para error < 5%)	109
7.5	Medición de resistencia de puestas a tierra puntuales	111
7.6	Medición de resistencia de puesta en tierra a aterramientos medianos	112
7.7	Medición de resistencia de puesta a tierra en aterramientos grandes	114
7.8	Método de medida por puntos de la Resistencia de Puesta a Tierra.	115
7.9	Medida Precisa de la Resistencia de Puesta a Tierra.	116
7.10.	Condiciones para medición de parámetros eléctricos del suelo.	118
7.10.1	Instrumentos de medición de parámetros eléctricos del suelo	119
7.11	Consideraciones de los equipos de medición.	121
7.12	Ejecución de Medidas de Resistencia de Puesta a Tierra	122

CAPÍTULO VIII**ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA** 124

8.1 Materiales utilizados como electrodos 125

8.2 Cambio de terreno 127

8.3 Tratamiento químico del suelo 128

8.4 Características principales de los tratamientos químicos 129

CAPITULO IX**CORROSIÓN** 132

9.1 Velocidad de corrosión 133

9.2 Pasividad 133

9.3 Tipos de Corrosión 135

9.4 Corrosión en los metales básicos 135

9.5 Los potenciales de electrodo de los metales 137

9.6 Representación de la Corrosión de los Metales 138

9.7 Diagramas de *POURBALX* 1399.8 Diagramas de *POURBAIX* - Metales Básicos 140

9.9 La Corrosión en el Suelo 142

9.10 Celda de micro corrosión 142

9.11 Celdas de macro corrosión 143

9.12 La corrosividad del suelo 144

9.13	Las corrientes que producen corrosión	145
9.14	Corrosión de los materiales de las tomas de tierra	146
9.15	Actividad de las celdas de corrosión	147
9.16	Comportamiento de los electrodos de puesta a tierra	147
9.17	Corrosión Bacteriana	148
9.18.	Cinética de la corrosión en el suelo	150
9.19.	Exigencia del funcionamiento de la puesta a tierra	151
CONCLUSIONES		153
ANEXO A:	Aplicación	155
ANEXO B:	Efectos de la corriente en el cuerpo humano	165
ANEXO C:	Contacto de personas con los medios eléctricos	167
ANEXO D:	Evaluación de parámetros eléctricos del suelo	
	Metodos de Wenner – Schlumberger	169
ANEXO E:	Equipos de medición	176
ANEXO F:	Nivel de resistencia de puesta a tierra para cada tipo de servicio	180
ANEXO G:	Definiciones de reacciones químicas	182
ANEXO H:	Corrosión en electrodo tipo jabalina	185
BIBLIOGRAFÍA		189

PRÓLOGO

El tratamiento de las puesta a tierra de instalaciones eléctricas con frecuencia han supuesto un reto para su solución, dado que son elementos de interacción de las instalaciones con algo tan variable y muchas veces impredecible como lo es la propia naturaleza.

Por ello en las sociedades modernas tanto la protección del medio (ecología) como la protección en el trabajo contra accidentes, son acciones recurrentes.

Ello ha llevado a buscar soluciones, muchas veces empíricas y pocas veces basadas en modelos ajustados a las circunstancias reales; por eso se puede mantener que la definición de soluciones para las puestas a tierra es un arte, en el que se combinan tecnología, modelos, experiencia e intuición lo que precisa tener una visión creativa para seleccionar de la enorme cantidad de posibilidades existentes, que exigen conocimiento del experto en gran parte derivado de la práctica.

En instalaciones eléctricas de alta tensión la puesta a tierra es la medida técnica directa esencial de protección para las personas (junto con el sistema de protección con relés en el caso de redes con neutro puesto a tierra directa o indirectamente) respecto a estas instalaciones la *puesta a tierra de servicio* debe satisfacer los requisitos de la *puesta a tierras de protección*.

Dentro del termino *eficiencia en el funcionamiento* se engloban requisitos que una instalación debe tener con relación al servicio por prestar, tales son:

- a.- Garantizar una suficiente continuidad en el suministro de energía.

b.- Proporcionar una protección selectiva en caso de falla.

c.-Garantizar una protección suficiente contra los peligros de la electricidad (contactos accidentales de las personas con partes normalmente en tensión o con partes normalmente aisladas pero que pueden quedar en tensión por fallas en el aislamiento).

Una subestación eléctrica es un conjunto de máquinas, aparatos y circuitos que tienen la función de modificar los parámetros de la potencia eléctrica (tensión y corriente) y de proveer un medio de interconexión y despacho entre las diferentes líneas de un sistema.

A continuación se presenta un cuadro con la clasificación de una subestación:

SEGÚN SU NIVEL DE TENSIÓN	
Tensión	Valores de tensión
Baja	1000V en C.A. y 1500 C.C.
Media	10 KV a 60 KV
Alta	138 KV a 220 KV
Extra Alta	220 KV a 800 KV.

Cuadro 1:1

La subestación tipo intemperie se construye en terrenos expuestos y requiere de un diseño, aparatos y máquinas capaces de soportar el funcionamiento bajo condiciones atmosféricas adversas, por lo general se adoptan en los sistemas de alta y extra alta tensión.

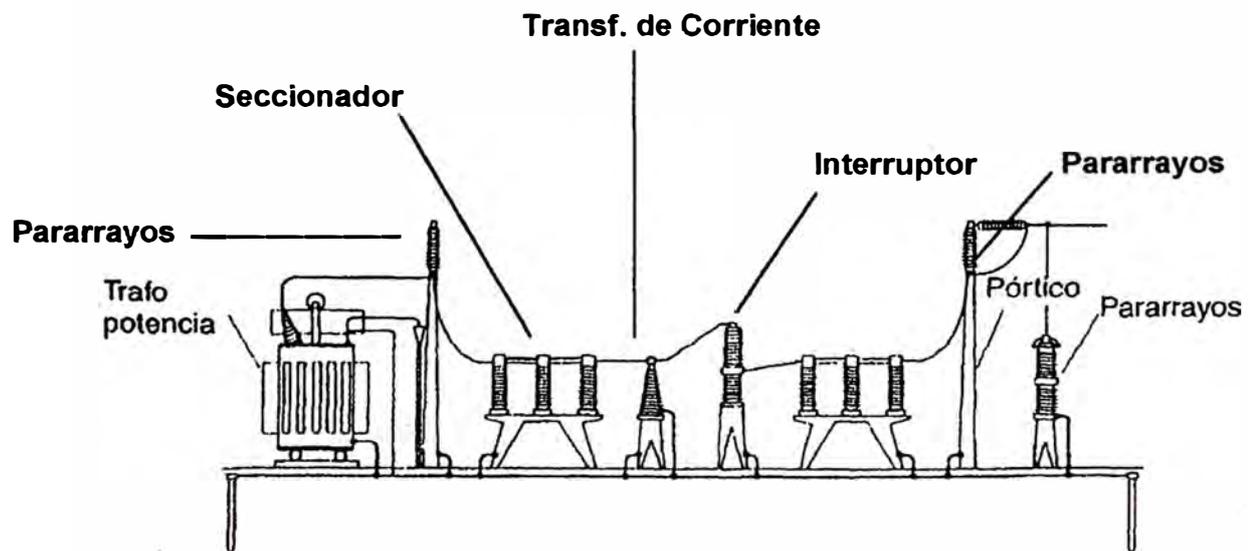


Fig. 1:1

CAPÍTULO I

Ingeniería de Puesta a Tierra

La ingeniería de puesta a tierra es la tecnología de la acción que se ocupa de la aplicación de conocimientos científicos y tecnológicos sustantivos, pero también de conocimientos empíricos comprobados dirigidos hacia la eficiente, segura y económica utilización de la tierra como elemento eléctrico para fines diversos

Su trascendencia radica en procurar seguridad para los seres vivos, personas y animales, que se encuentren en las cercanías de un sistema de puesta a tierra de una instalación eléctrica durante un eventual traspaso de corriente hacia tierra, pero también en beneficio sobre el grado de eficiencia de los procesos técnicos involucrados y asimismo en el monto de los recursos necesarios para la realización de la instalación de puesta a tierra.

El sistema debe ser planeado tomando en cuenta las exigencias de seguridad (voltaje de contacto y de paso por ejemplo) basadas principalmente, en las recomendaciones de la electrofisiología del trabajo, así como en los reglamentos y normas establecidos al respecto.

Si bien durante las tres primeras décadas del siglo pasado se llegó a conformar la masa crítica de la técnica de la puesta a tierra, tal materia sigue ocupando el interés de un sinnúmero de investigadores hasta la actualidad.

El instituto de ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) reporta alrededor de 300 papers (papeles técnicos) sobre el tema de puesta a tierra. No obstante lo anterior es

evidente y hasta contradictoria la aguda escasez de información científica y tecnológica fundamental (libros) a nivel internacional sobre la materia.

Transportando dichas condiciones a nuestro país, es válido asumir que prácticamente de aquella clase de información; todo aquel cúmulo de reportes técnicos difícilmente puede ser aprovechado para tratar de conformar un núcleo de conocimientos sólidos al servicio del ingeniero electricista.

En aquellas condiciones ya de por sí desfavorables propician el oscurantismo en la problemática de la técnica de la puesta a tierra, es decir, influye negativamente en la capacidad de percibir e identificar el problema de algún tipo y en el interés de investigarlo en cierta dimensión o nivel.

1.1 Fundamentos de la Ingeniería de Puesta a Tierra.

La ingeniería de Puesta a Tierra es una tecnología de la acción ubicada dentro de la electrotecnia; sin embargo como toda tecnología de la acción, esta constituida con base en un estudio científico muy sólido estructurado con conocimientos tecnológicos sustantivos y de la acción.

El cuerpo de conocimientos científicos comprende elementos de disciplina que caen dentro del dominio de las llamadas ciencias de la tierra y precisamente en la geología en sus ramas : geofísica y geoquímica.

La geofísica es la que participa con mayor peso con algunas de sus disciplinas que son el geomagnetismo, la geoeléctrica y la electricidad atmosférica.

La geoeléctrica se ocupa del estudio de todo lo relacionado con la circulación de la electricidad dentro de la tierra y de los fenómenos eléctricos y magnéticos involucrados

1.2 Naturaleza de las Corrientes Telúricas

Las corrientes de tierra son las corrientes que se propagan a través de la tierra; pueden ser distinguidas según su naturaleza eléctrica como sigue:

- **Estacionarias** (corriente continua); un análisis con buen nivel involucra el manejo de alrededor de 691 funciones fisico-matemáticas
- **Casi estacionarias** ó alternas lentas (corriente alterna de 50/60 Hz); el análisis riguroso de esta temática requiere del manejo de aproximadamente 300 funciones fisico-matemáticas relacionadas.
- **Corrientes de contacto** con tierra originadas por un defecto en el aislamiento de líneas aéreas de Corriente Alterna trifásica; el análisis involucra el manejo de mas ó menos 160 funciones fisico-matemáticas relacionadas.
- **Alternas rápidas** o de alta frecuencia (utilizadas en las telecomunicaciones); en el análisis riguroso de esta temática en cuestión se deben manejar alrededor de 130 funciones fisico-matemáticas.
- **Corriente que se propagan como ondas electromagnéticas de impulso** (corriente de rayo); este estudio involucra el tratamiento de 171 funciones fisico-matemáticas.

1.3 Orígenes de las corrientes telúricas.

Las corrientes telúricas pueden ser causadas por fenómenos naturales o bien por el funcionamiento de ciertos sistemas técnicos creados por el hombre.

Dentro de las primeras se tiene a las corrientes que son originadas por:

- Campos variables en el tiempo; debido a las oscilaciones en el tiempo del campo magnético de la tierra, se inducen en su masa corrientes parásitas a escala global.

- Fenómenos meteorológicos transitorios; entre la atmósfera y la masa de la tierra originan el establecimiento de corriente eléctrica entre ellos (rayo).

Dentro de los sistemas creados por el hombre, en ciertos casos, por razones de operación y en otros por circunstancias accidentales, se derivan corrientes eléctrica hacia el suelo o bien se utiliza como polo eléctrico.

1.4 Transporte de electricidad a través de la tierra.

En principio, la circulación de la corriente eléctrica a través de la tierra es posible gracias a su conductividad natural; siendo esta de naturaleza microscópica ya que su magnitud depende varios factores:

- Clase de roca
- Propiedades fisicoquímicas y eléctricas
- Contenido de humedad
- De la fisiografía, entre otros

En consecuencia, la conductividad de la tierra puede variar entre muy amplios límites, aun tratándose de la misma naturaleza geológica y/o dentro de una zona delimitada de terreno.

En cuanto a las propiedades eléctricas de las rocas, una cuestión fundamental es el proceso por medio del cual se realiza el transporte de electricidad a través de ellas los mecanismos básicos son los siguientes:

- Conducción electrónica.
- Conducción electrolítica.
- Conducción dieléctrica.

1.5 Importancia y trascendencia de las corrientes telúricas

El hecho de que la tierra conduzca corriente eléctrica es de suma importancia para los sistemas eléctricos que se construyen e implementa; ya que los efectos eléctricos, magnéticos, térmicos y fisiológicos que se originan durante el proceso del traspaso y circulación de la corriente dentro de la tierra son trascendentes pues repercuten en la eficiencia y economía del sistema.

Teniendo en cuenta que existen corrientes telúricas que se originan por las oscilaciones del campo terrestre en el tiempo, debido a la diferencia de temperatura dentro de la masa de la tierra y por la acción del campo terrestre; nos permite identificar las diversas clases de rocas, minerales y fluidos que existen dentro de la masa de la tierra.

Con base en los resultados de tales investigaciones se elaboran los mapas geotécnicos para diferentes fines (corte geoelectrico).

Si bien existen diversos métodos para la prospección de minerales y fluidos en la geofísica aplicada (gravitacional, magnético, electromagnético, sísmico, radiactivo, etc) el método eléctrico basado en la geoelectrica es muy utilizado para tal fin.

En particular el proceso electroquímico que se presenta en la frontera de dos medios de distinta naturaleza es trascendente en cuanto a que su efecto, la corrosión, afecta no solo la longevidad de ciertos elementos de las instalaciones de puesta a tierra, sino también de otros elementos metálicos ubicados en su cercanía.

1.6 Ámbito de Corrientes de Tierra Artificiales

El campo tecnológicos de las líneas aéreas de transporte de electricidad es uno de los mas trascendentes como el caso del transmisión de corriente continua en alto voltaje donde se pueden usar dos opciones:

- Utilizar un conductor metálico para el circuito de ida de la corriente; y para el circuito de retorno de la corriente, usar la tierra..
- La utilización de dos conductores metálicos en operación normal y en el caso de una falla de aislamiento en una de las vías, se utiliza la tierra como circuito de retorno de la corriente, conduciendo entonces por supuesto, sólo la mitad de la potencia (esta es una de las ventajas de la líneas de corriente continua en comparación con las trifásicas de corriente alterna).

En los sistemas modernos de suministro de energía eléctrica en corriente alterna de alta tensión, una falla de aislamiento origina la conexión a tierra de cuando menos uno de los conductores activos, dando por resultado el traspaso de la corriente de defecto a la tierra, que servirá entonces como circuito hacia la fuente de la misma.

La corriente de retorno puede llegar a alcanzar magnitudes muy elevadas, en particular cuando se trata de redes del tipo estrella con neutro a tierra directa o indirectamente.

Tal hecho causará disturbios en la distribución de potencial entre fases del sistema y a toda la operación de la línea, originando la salida de servicio de la misma.

1.7 Concepto y definición de Puesta a Tierra.

Una instalación de puesta a tierra es aquella instalación eléctrica que tiene como misión derivar corriente hacia tierra, o bien establecer contacto con ella; las corrientes involucradas pueden ser de naturaleza: estacionaria, casi estacionaria, de alta frecuencia o electromagnética en forma de impulso; corrientes que pueden ser originadas durante el funcionamiento del sistema eléctrico ó causado por un fenómeno natural.

Las instalaciones de puesta a tierra en subestaciones estarán constituidas por varios electrodos enterrados y unidos entre si y asimismo la línea de tierra que conecten dichos electrodos a los elementos o equipos que deban quedar puestas a tierra.

En las líneas de tierra deberán existir los suficientes puntos de puesta a tierra que faciliten las medidas de comprobación del estado de los electrodos y la conexión a tierra de la instalación.

1.7.1 Línea de Tierra: Es el conductor o conjunto de conductores que une(n) al electrodo de tierra con una parte de la instalación que se haya de poner a tierra, siempre y cuando los conductores estén fuera del terreno o colocados en él pero aislados del mismo.

1.7.2 Punto de Puesta a Tierra : Esta situado generalmente fuera del terreno, que sirve de unión de las líneas de tierra con el electrodo, directamente o a través de líneas de enlace con él.

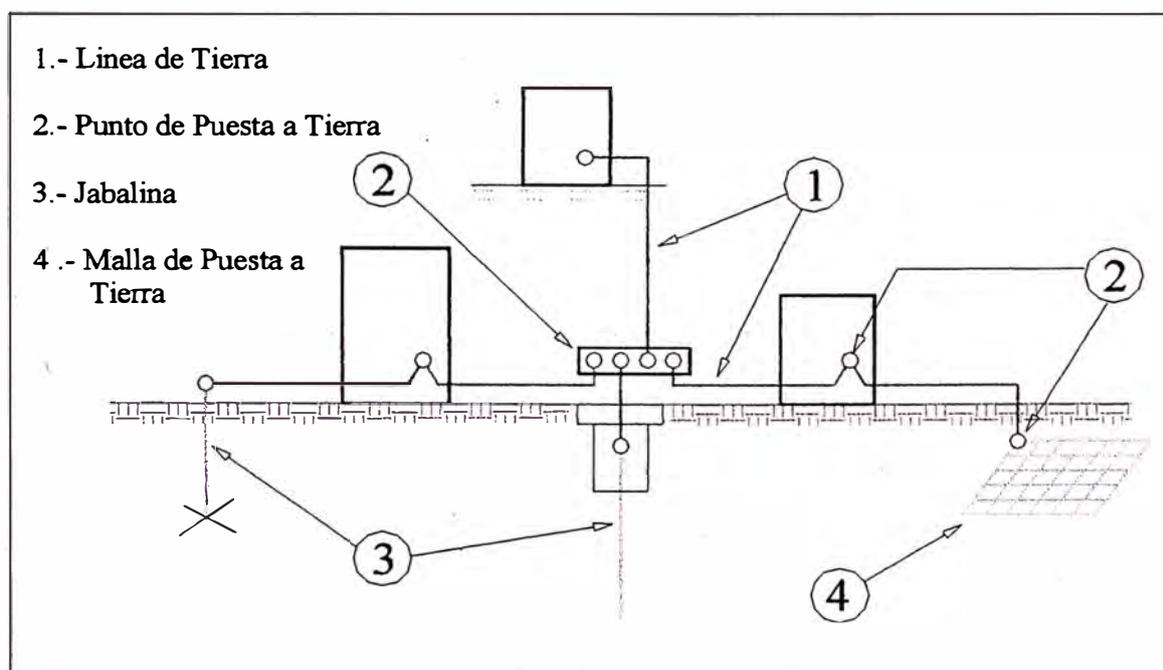


Fig. 1:2

1.8 Problemática de la Ingeniería de Puesta a Tierra

La ingeniería de Puesta a Tierra pone en evidencia que se trata de una tecnología nada trivial como a simple vista suele parecer que por el contrario, es complicada y difícil de comprender correctamente cuando se le quiere ver a la ligera.

No es trivial, ya que sus fundamentos científicos y tecnológicos sustantivos no están muy divulgados, no son comunes, ni tampoco están al alcance de la generalidad .

Es complicada ya que es una tecnología muy enmarañada por estar integrada por cierto número de elementos pertenecientes a diversas ciencias y tecnologías, es decir, conforma todo un sistema problemático de alto nivel.

En resumen la comprensión y dominio de esta problemática demanda tiempo de estudio de los diferentes campos que la conforman, pero también siguiendo una metodología adecuada fundamentada en la ciencia y/o método científico y no en creencias y en técnicas empíricas no comprobadas es posible lograr resultados aceptables.

CAPÍTULO II

CONDICIONES DEL SUELO

La tierra, como elemento eléctrico desempeña varias funciones

1. Circuito de retorno de corrientes eléctricas es decir para cerrar circuitos
2. Para disipar corrientes eléctricas hacia el seno de la tierra por ejemplo las corrientes de los rayos
3. Polo eléctrico (telecomunicaciones)

Dentro de la electrotecnia esas tres funciones son por igual importantes y trascendentes, así en el primer de los casos, dentro de la técnica de la energía eléctrica, la tierra hace la función de un conductor, operando en paralelo con los conductores metálicos y por ello dentro del ámbito tecnológico de las líneas aéreas se le designa “cuarto conductor”.

Uno de los tres factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un Sistema de Puesta a Tierra es la condición del terreno a través del cual va a circular las líneas de corriente; ello involucrara entonces no solo al volumen de terreno sobre el cual se emplazara la instalación de tierra sino también el de sus alrededores.

En realidad el terreno debe ser considerado como un sistema geológico y geoelectrico; el cálculo de la resistencia a la propagación de todo electrodo (sencillo o múltiple) se realiza con base a un cierto valor de resistividad del terreno, el cual es variable en un amplio rango según sus condiciones geológicas y geofísicas; Ver fig 2,1

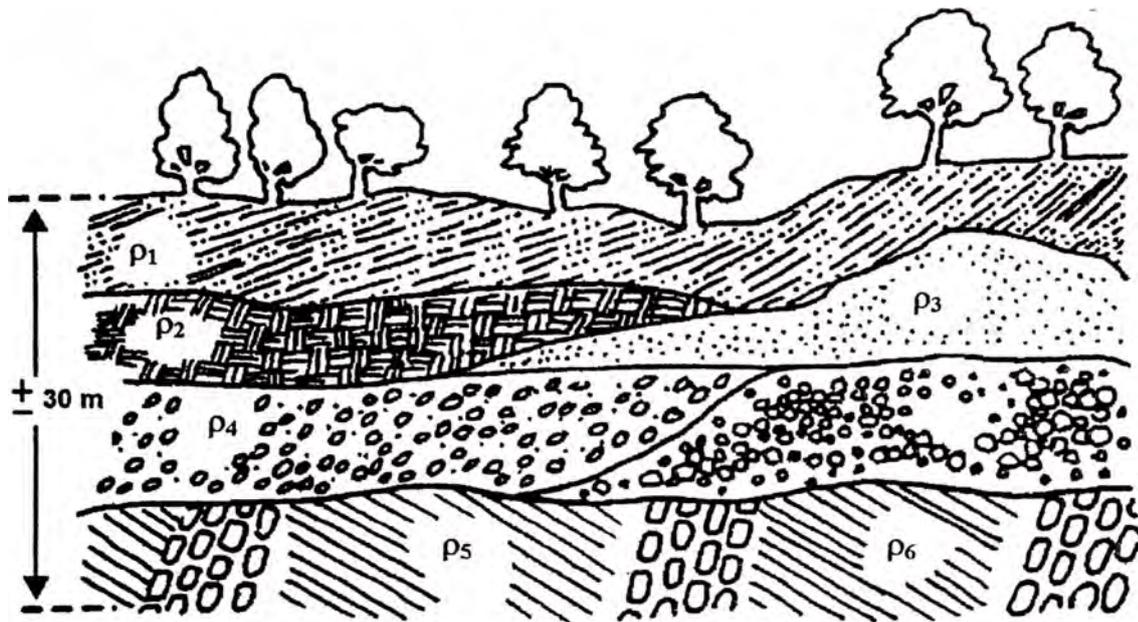


Fig.2,1 Sistema Geológico Compuesto con: (ρ_1), suelo temporizado; (ρ_2), tilita; (ρ_3), arena; (ρ_4), grava; (ρ_5), lutita; (ρ_6), basalto

En la práctica se puede identificar a alrededor de once clases de heterogeneidades (estratos) que se presentan en determinados casos en los terrenos; algunas de ellas originan sólo pequeñas modificaciones de comportamiento del cálculo homogéneo, las cuales bien pueden ser ignoradas.

Pero algunas de ellas si dan lugar a variaciones importantes que ya no deben ser despreciadas.

Por supuesto los efectos de tales heterogeneidades tienen consecuencias diferentes sobre el comportamiento del sistema de electrodos, según se trate una instalación de Puesta a Tierra de pequeña, mediana o gran dimensión.

2.1 Consideraciones del Suelo para Puesta a Tierra

Durante el calculo del sistema de puesta a tierra para una extensa subestación (Extra Alta Tensión) es imprescindible una investigación minuciosa del subsuelo del terreno en

que se emplazara, pero también de sus alrededores; no hacerlo puede dar lugar a un dimensionamiento erróneo.

Es decir, que resulte sobredimensionado o por el contrario, ineficiente (técnicamente) influyendo por supuesto, en su costo.

La investigación de las condiciones del terreno involucra la indagación de las características geotécnicas, para ello se deberá realizar mediciones de resistividad que nos permitan determinar las resistividades de las diversas capas del terreno (en caso de que se trate de un terreno estratificado) sobre el cual estará emplazada la subestación.

A partir de ello se puede entonces determinar la conductividad microscópica del volumen de terreno que mas trasciende en el cálculo de la resistencia de la propagación del sistema de electrodos, en el cual deberá realizarse con base en la conductividad efectiva.

En principio, los resultados de tal indagación pueden ser tres:

- Que la conductividad no varíe (terreno homogéneo).
- Que la conductividad aumente con la profundidad (subsuelo mejor conductor).
- Que la conductividad disminuya con la profundidad (subsuelo menor conductor).

Por lo tanto en la práctica de la ingeniería de puesta tierra es necesario realizar exploración eléctrica (medición de resistividad de terreno) y el método basado en el dispositivo Wenner es actualmente, uno de los mas utilizados aunque presenta ciertas limitaciones

2.2 Resistividad de Terreno.-

La resistividad del terreno depende de su naturaleza, estratigrafía (capas de distinta composición), contenido de humedad y temperatura.; la resistividad de un terreno se ve afectada por las variaciones estacionales.

Por otro lado, a medida que aumenta el tamaño de las partículas aumenta el valor de la resistividad, por ello la grava tiene mayor resistividad que la arena, y esta mayor resistividad que la arcilla.

La resistividad se ve asimismo afectada por el grado de compactación, disminuyendo al aumentar esta así como por otros factores..

2.3 Factores que Influyen en la Resistividad del Terreno.

Uno de los factores decisivos para el dimensionamiento y comportamiento de un Sistema de Puesta a Tierra es la condición del terreno a través del cual van a circular las líneas de corriente; ello involucra entonces no solo al volumen de terreno sobre el cual este emplazada la instalación de tierra, sino también el de sus alrededores.

Si bien los componentes más importantes del terreno son en estado seco, aislante (Óxido de Silicio, Óxido de Aluminio etc.), su resistencia disminuye rápidamente en presencia de sales solubles y de la humedad.

Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera notable los siguientes factores:

➤ Estado Higrométrico del Terreno

El contenido de agua ó grado de humedad del terreno influye, de forma apreciable sobre la resistividad Su valor no es constante, ya que varía con el clima, época del año, naturaleza del subsuelo, la profundidad considerada y la situación del nivel freático pero rara vez es nulo, incluso al referirse a zonas desérticas.

➤ Granulometría

Es un elemento importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos, incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos.

Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que esta supere al de la arcilla.

➤ **Temperatura**

La resistividad aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se acusa mucho al alcanzarse los 0 °C, hasta el punto que a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos que como se sabe influyen decisivamente en la resistividad del terreno.

➤ **Estratigrafía**

La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea imperceptible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o nivel freático.

La verdadera distribución de corriente, se ve afectada por la estratificación de la tierra en capas de diferentes resistividades, luego cuanto mas cerca del electrodo, la atenuación de la densidad de corriente puede ser mayor o menor según la relación inversa del cuadrado de la distancia a las capas del subsuelo.

➤ **Compacidad**

La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuye al aumentar éste.

➤ **Calentamiento del Suelo por Circulación de Corrientes Elevadas**

El calentamiento del suelo tiende a aumentar su conductividad mientras no vaya acompañado de desecación .

La cantidad de calor que se genera en un electrodo puede considerarse que se divide en dos partes

- La acumulada en el volumen de terreno en contacto directo con el mismo.
- La que absorben las capas circundantes más frías circulando a través del terreno.

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

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

Pueden evitarse que se produzca la desecación si las protecciones de la red eliminan la corriente de defecto inicial en un tiempo t (máximo 3 segundos por criterio de seguridad), tal que limiten la corriente, I evacuada y se proteja al conductor de tierra cuyo sección es calculada por:

$$S = \frac{I_F}{1973 \sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33t}}} \text{ mm}^2 \quad (2,1)$$

donde :

I_F : Corriente de falla a ser dispersada

T_m : Máxima temperatura permisible en °C (200 °C Norma VDE)

T_a : Temperatura ambiente en °C = 30 °

t : Tiempo de eliminación de la falla (apertura de reles).

Cuando el contacto entre un electrodo y el terreno es mediocre pueden establecerse en condiciones de circulación de corriente de defecto

2.4 Aspectos Geológicos y Geotécnicos

La Geología es la ciencia que trata de la estructura de la tierra, de la formación de las rocas y terrenos, así como la evolución de los mismos desde sus orígenes.

2.5 Aspectos Geológicos Generales

La geología es la ciencia que trata de la estructura de la tierra, de la formación de las rocas y terrenos así como de la evolución de los mismos desde sus orígenes y se le clasifican en :

- La geología general es la que incluye a la petrografía, la paleontología, la geología dinámica, la geología histórica y la geología experimental
- La geología aplicada es la que utiliza los conocimientos de la geología general para descubrir y explotar minerales, petróleo así como para hallar agua subterránea y determinar las características del terreno antes de construir presas y centrales hidroeléctricas.

Desde el punto de vista geológico la tierra es un cuerpo aproximadamente esférico compuesto de varias capas concéntricas de material rocoso:

- La corteza (Con una profundidad aproximadamente de 30 Km.)
- El Manto Superior (situado entre 30 y 700 Km. de profundidad)
- El manto inferior (ubicado entre 700 y 2900 Km. de profundidad)
- Las cuales envuelven a un núcleo central con un radio aproximado de 3741 Km.

La tierra no es un cuerpo rígido y estático sino que se encuentra en continuo estado de cambio, tanto en el interior como en la superficie. Así fuerzas internas actúan creando nuevas rocas, mientras que en la superficie otras destruyen las del pasado.

Al producto de tales fuerzas destructivas se le denomina suelo que es de hecho un nuevo material en geotecnia la palabra suelo significa cualquier material sin consolidar en la superficie.

La geofísica calcula que la densidad relativa (peso / volumen) promedio de la tierra es de 5.5 y que la de las rocas es de aproximadamente 2.7; por consiguiente, el interior debe ser mas denso; sin embargo los estudios de ondas (sismológicas) indican que hay cambios relativamente bruscos de la densidad relativa a profundidades de entre 36 y 2900 Km. en geofísica se llama a estos cambios “discontinuidades”.

En geotecnia se usa también el término discontinuidad pero con diferente significado para señalar fracturas y cavidades en las rocas los métodos de exploración en la geotecnia pueden determinar las densidades relativas de las rocas bajo la superficie como parte de un programa de investigación para predecir el comportamiento de las rocas sobre las cuales se va a construir.

El término utilizado para describir el proceso de desintegración de las rocas es “intemperismo” y erosión es el proceso por el cual las rocas intemperizadas son transportadas por ríos, vientos y hielo a otros lugares de nivel inferior o al mar.

En consecuencia, el material rocoso esta en continuo movimiento y durante éste sufre cambios; se puede decir entonces que el ciclo completo de las rocas es : formación, intemperización y erosión

Los movimientos generan fuerzas de compresión y tensión dentro de la grandes masas rocosas y los esfuerzos que se originan en ellas ocasionan deformaciones e incrementos en las energías que producen.

Cuando la roca alcanza el límite elástico, se produce la fractura y la súbita liberación de energía en forma de ondas sísmicas. A la fractura de las rocas se le llama “falla”.

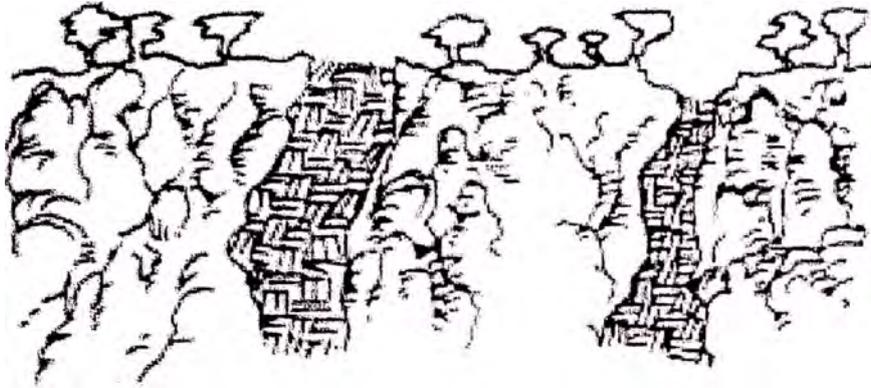


Fig 2.2 Fractura en la Roca (Falla)

El movimiento ascendente produce fracturas de tensión en las rocas duras en la superficie o cerca de ella; las fracturas abiertas por lo general, se aprecian sólo en los últimos diez metros de la roca.

El examen de las rocas en una excavación profunda muestra que la profundidad de las discontinuidades por unidad de volumen decrece con la profundidad de la roca y la más sólida parece ser la roca más profunda. (excepto la caliza que, como puede ser disuelta por el agua de la superficie contiene muchas fisuras).

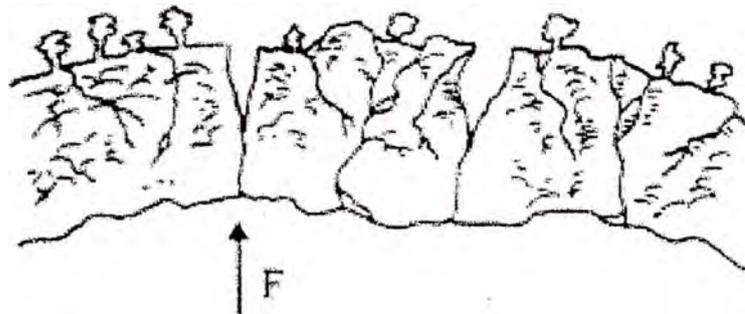


Fig. 2.3 Fractura por Movimiento. Ascendente

Todos esos procesos de formación, movimiento y desintegración de las rocas hacen que las que se encuentran en la superficie (los afloramientos), sean de tipos diferentes y que tengan propiedades físicas definidas.

La tendencia natural de las rocas a fragmentarse cerca de la superficie (afloramiento) es debido a que exponen mayor área por unidad de volumen a la intemperie entonces el agua puede penetrar en las discontinuidades, lo cual en climas húmedos acelera el grado de descomposición de las rocas superficiales.

Algunas propiedades geotécnicas importantes son por ejemplo

- Densidad relativa
- Permeabilidad
- Comprensibilidad
- Grado de intemperismo
- Resistencia mecánica
- Resistividad.

2.6 Minerales Formadores de Roca

Las corrientes eléctricas de tierra circulan a través de la corteza terrestre que es la capa superficial de la misma constituida por rocas ligeras con un espesor de alrededor de 30 Km. en general, tales corrientes circulan a una profundidad relativamente pequeña, es decir prácticamente por el denominado suelo en la geotecnia y en casos especiales circulan por el fonda y/o lecho marino.

Así, desde el punto de vista geológico que por supuesto es el fundamental, las rocas se describen con base en la composición y textura química, así como de su origen mineral (cómo se han originado) teniendo así la primera clasificación de rocas:

- Sedimentarias
- Metamórficas
- Ígneas.

Las rocas están formadas por diversas clases de minerales, principalmente por compuestos de sílice (silicatos) en cuyo caso cuando contienen:

- Más de 65% de tal mineral se les denomina *rocas ácidas*
- Menos del 55% se les llama *rocas básicas*.

Por lo general alrededor del 95% de una roca esta constituida por tres o cuatro clases de mineral, pero el 5% restante puede contener hasta veinte clases diferentes de minerales.

La composición química de algunos minerales es variable, debido a que determinados elementos pueden ser sustituidos por otros en la estructura. El análisis químico de las rocas que se encuentran en las capas superiores de la corteza terrestre indica que casi todas se componen de los elementos siguientes citados en orden de importancia: oxígeno, sílice, aluminio, hierro, potasio, sodio, calcio, magnesio, titanio y fósforo.

Los primeros cuatro minerales constituyen 80% de la composición media de las rocas, siendo considerados como elementos raros los siguientes metales: plomo, zinc, cobre, manganeso, estaño, oro, plata y platino.

2.7 Procesos de formación básicos

A partir de los minerales formadores de roca, las rocas y masa rocosa se forman por medio de tres procesos fundamentales: Sedimentarias, Metamórficas e Ígneas.

- *Las rocas ígneas* se forman debido a la cristalización del material fundido de silicatos en la corteza.
- *Las rocas sedimentarias* se forman bajo el agua, en mares y lagos y en depósitos de arena y polvo transportados por el viento o el hielo. Cuando se forman bajo el agua estos sedimentos tienen cantidades variables de dos componentes

- Detritus producto de la erosión transportados al mar por los ríos principalmente con cuarzo, mica, arcilla y fragmento de roca.
- Minerales precipitados a partir de soluciones de agua, primordialmente carbonatos de calcio y magnesio, sulfuros y óxidos e hidróxidos de hierro y sílice en forma de cuarzo. Las rocas sedimentarias comunes incluyen capas de arcilla, lodo, arena y grava.
- *Las rocas metamórficas* se forman a partir de las rocas ígneas o sedimentarias que han sido afectadas por el calor y/o presión, pudiéndose llegar a verse sometidas a ulteriores procesos metamórficos; se tiene entonces el llamado proceso
 - *Metamórfico Dinámico* cuando sólo la presión ha sido el agente metamórfico.
 - *Metamórfico térmico* cuando se produce por el calentamiento de la roca cercana a una intrusión ígnea que ha penetrado en rocas formadas con anterioridad.
 - *Metamórfico dinamotermal o regional* toma forma cuando se origina por altas presiones y altas temperaturas sobre la roca madre.

2.8 Estructuras Geológicas

El termino estructura geológica se emplea para describir las masas rocosas, considerando las tres dimensiones.

Las estructuras geológicas de la corteza terrestre son muy diversas, ya que varían desde estructuras de grandes dimensiones como una placa continental hasta elementos tan pequeños como un plano de estratificación en un fragmento de roca que puede sostenerse en la palma de la mano.

Las estructuras principales están compuestas por un conjunto de otras pequeñas las cuales han sido formadas por los procesos de sedimentación, intrusión magmática, derivada continental, así como por ascensos y descensos del nivel de la superficie terrestre en diferentes lugares.

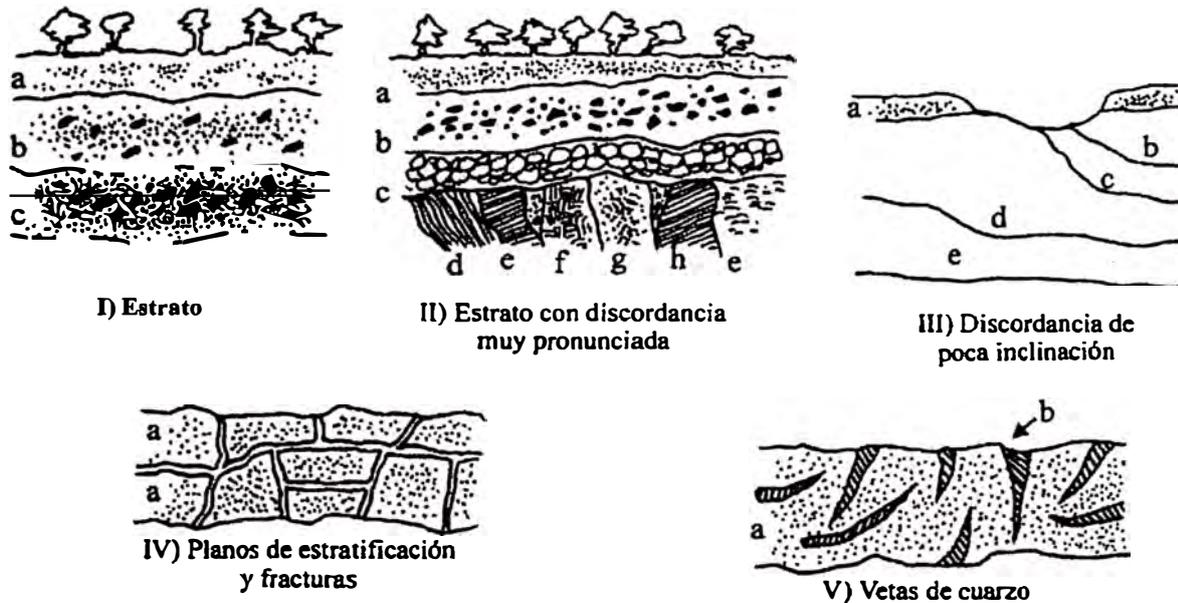


Fig. 2.4 Estructuras Geológicas Diversas

2.9 Rasgos Topográficos

Se define como unidades de forma notable de la superficie, como montañas y valles, estuarios etc. Se puede considerar que un conjunto de rasgos topográficos reciben el nombre de paisaje o fisiográfica.

Existe estrecha relación entre la forma de la estructura de las rocas y las propiedades de intemperismo de la misma que se encuentra bajo la superficie

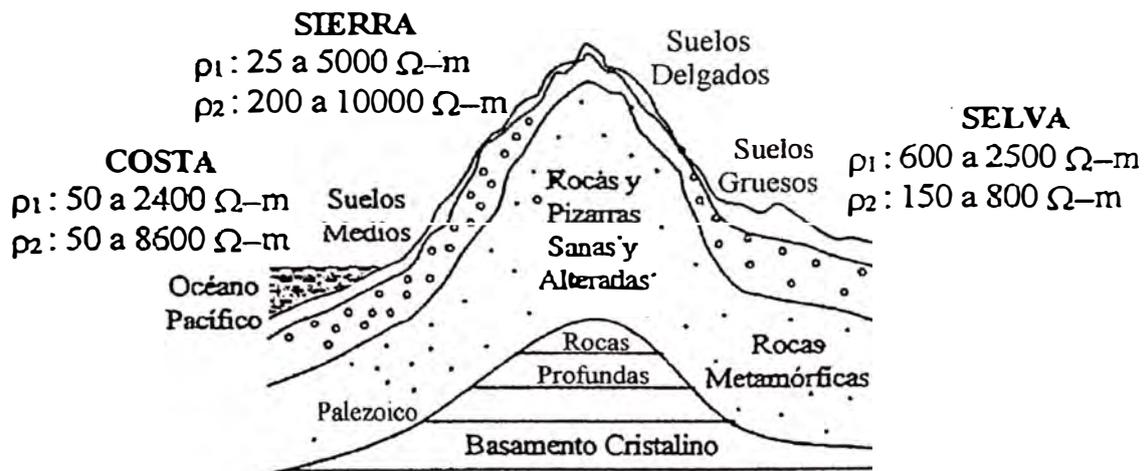


Fig. 2.5 Rasgo Topográfico

2.10 Índices de Material Rocoso y Masa Rocosa

Los índices más importantes utilizados para denotar las propiedades geotécnicas del material rocoso y la masa rocosa son los siguientes:

- Para el material: variedad de la roca, dimensiones del grano, resistencia mecánica, dureza, conductibilidad, porosidad, densidad y la permeabilidad primaria.
- Para la masa rocosa: Las variedades del material rocoso, así como las discontinuidades tales como Estratificación, fracturas, brecha de falla, discontinuidades interconectadas, discontinuidades onduladas en las capas y rugosidades

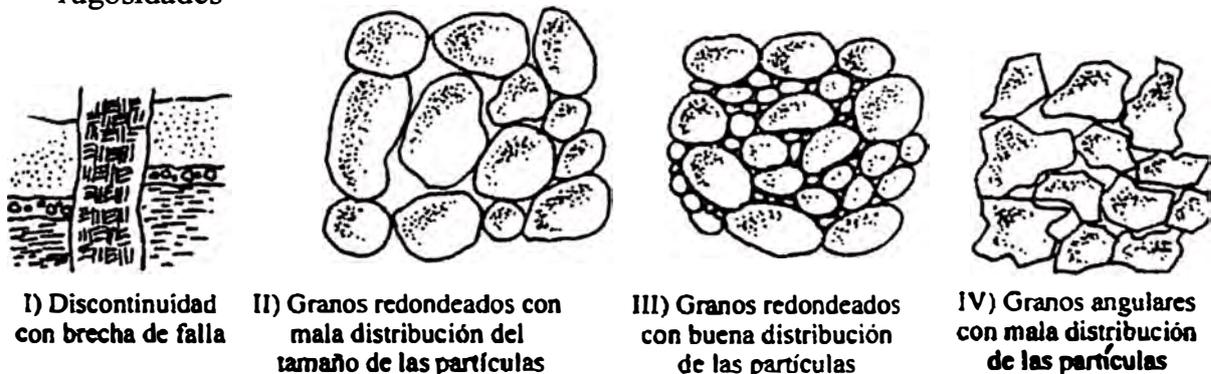


Fig. 2.6 Índice de Material Rocoso

2.11 Mapas Geotécnicos

En los mapas geotécnicos se registran la información mas útil para la ingeniería civil, la prospección eléctrica, obras de electrotecnia entre otras.

En estos casos es más importante tener información acerca de las propiedades físicas, mecánicas, eléctricas e hidráulicas de las rocas y suelos.

Los mapas geotécnicos mas relacionados con la ingeniería de puesta a tierra son:

- Mapas hidrológicos
- Grado y profundidad del intemperismo.
- Profundidad de la cabecera de la roca.
- Resistencia porosidad y permeabilidad.
- Distribución del tamaño de la partícula.
- Relleno.
- Mapas geoeléctricos.

2.12 Aspectos Geofísicos

Los índices del material rocoso son de suma importancia dentro del geotecnias en general así como sus propiedades eléctricas y magnéticas las cuales son importantes y trascendentes.

El estudio detallado y profundo del magnetismo de rocas y minerales es de la mayor importancia para la técnica de exploración eléctrica (Puesta a Tierra)

Las propiedades generales magnéticas y eléctricas son : Susceptibilidad Magnética y Eléctrica, Permeabilidad Magnética, Polarización Magnética y Eléctrica, Potenciales Eléctricos, Constante Dieléctrica y Resistividad.

Sin embargo, los esenciales para la técnica de la Puesta a Tierra son: La Conductividad Eléctrica, Los Potenciales Eléctricos, La Constante Dieléctrica y La Permeabilidad.

2.13 Potenciales Eléctricos

Aunque en los sistemas de puesta a tierra los potenciales determinantes son originados por las corrientes introducidas al suelo ya sea de manera deseada o indeseada, no se debe ignorar los potenciales eléctricos naturales dentro de la masa rocosa **menospreciar**

Ciertos potenciales naturales o espontáneos que ocurren en la costa, en la cercanía de la superficie son originados por actividad electroquímica y mecánica en todos los casos el factor integrante es el agua subterránea.

Tales potenciales están asociados con la descomposición de cuerpos minerales sulfurosos, variaciones en las propiedades de las rocas (contenido mineral) en contactos geológicos actividad bioeléctrica de materiales orgánicos, corrosión, gradientes térmicos y presión en fluidos subterráneos

Existe cuatro mecanismos principales que producen tales potenciales :

- Uno de naturaleza mecánica
- Tres son de origen químico.

Es conocido que el potencial electrocinético es aquella diferencia de potencial *que resulta al forzar a una solución de cierta resistividad eléctrica y viscosidad a través de un medio capilar poroso* y se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$E_{\kappa} = \frac{-\phi \cdot \Delta P \cdot \epsilon \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (2,2)$$

En la cual :

ρ : Resistividad eléctrica de la solución

ϕ : Potencial de absorción

ΔP : Diferencia de Presión

ε : Constante dieléctrica de la solución

El potencial por difusión, también conocido como potencial por unión de líquidos, se origina por la diferencia en movilidad de varios iones en soluciones de diferentes concentraciones y se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$E_d = -\frac{R\theta(Ia - Ic)}{Fn(Ia + Ic)} \log \left[\frac{C_1}{C_2} \right] \quad (2,3)$$

En la cual :

R = Constante del gas F = Constante de Faraday θ = Temp. Absoluta

n = Valencia Ia, Ic = Movilidad de iones y cationes

C_1, C_2 = Concentración de las soluciones

El potencial de Nernst se origina cuando dos electrodos metálicos idénticos son sumergidos en una solución no homogénea, es decir diferente, el cual se puede determinar por medio de la siguiente expresión :

$$E_s = -\frac{R\theta}{Fn} \log \left[\frac{C_1}{C_2} \right] \quad (2,4)$$

A los potenciales por unión de líquidos y de Nernst combinados se les conoce como Potenciales Electroquímicos o Estáticos.

El potencial de mineralización se presenta entre dos electrodos de material diferente que son sumergidos en una solución homogénea; este potencial de contacto electrolítico,

junto con el estático; esta asociado indudablemente entre las causas principales de los grandes potenciales que se aprecian en ciertas zonas donde existen minerales.

Estos potenciales alcanzan magnitudes mucho mayores que los anteriores, en particular en zonas en la que existen sulfuro, grafito y magnetita; la caída de potencial del orden de algunos cientos de milivolt son comunes. Pero en zonas donde predomina la existencia de grafito y alunita el potencial esta arriba de un Volt.

Se deduce de las expresiones (2,3) y (2,4) que el potencial depende de la temperatura; este efecto es análogo a la diferencia de presión en el potencial electrocinético (2,2) y de menor importancia.

En la corrosión metálica de electrodos de puesta a tierra, cables con cubierta metálica etc, existe una fuente local de potencial electro cinético.

Corrientes a tierra a gran escala inducidas por la ionosfera y tormentas originan también pequeños potenciales erráticos de tierra.

Existen corrientes de origen bioeléctrico que fluyen de las raíces de las plantas son también una fuente de potencial natural de tierra, habiéndose reportado potenciales negativos de 100 mV. Al pasar de tierra despejada a zonas arboladas o con vegetación.

2.14 Conductibilidad Eléctrica

La corriente eléctrica puede ser propagada en las rocas minerales por medio de tres mecanismos

- **Conducción Electrónica:** es el mecanismo normal que se presenta en los materiales que contienen electrones libres, tales como los metales.
- **Conducción Electrolítica:** El transporte de electricidad se realiza por medio de conducción iónica (por moléculas que tienen un exceso o una deficiencia de electrones) puesto que en general de las rocas son malas conductoras de

electricidad, sus resistividades deberían en principio, ser muy elevadas, pero como generalmente contienen poros que se llenan de líquidos no resulta siempre así y su resistencia entonces varía con la movilidad, concentración y grado de asociación de sus iones lo cual depende de la constante dieléctrica de los solventes

- **Conducción dieléctrica:** es el resultado de cambio electrónico, iónico o molecular por la polarización causada por el campo eléctrico alternante.

La corriente de desplazamiento que tiene lugar en aisladores o conductores pobres, cuando el campo eléctrico externo cambia con el tiempo; entonces bajo la influencia de la variación externa del campo, los electrones se desplazan ligeramente respecto a sus núcleos; esta relativamente ligera separación de cargas negativas y positivas *es conocida como polarización dieléctrica del material.*

2.15 Constante Dieléctrica

La constante dieléctrica de rocas y minerales, como ya se ha mencionado, antes, es una medida de la polarización resultante de la aplicación de un campo eléctrico.

Esta puede ser:

- **Electrónica:** característica de los conductores.
- **Iónico :** Ocurre en muchas rocas formadas por minerales.
- **Molecular:** Ocurre únicamente en el agua y los hidrocarburos

El parámetro significativo en la conducción dieléctrica es la constante ϵ que a veces es llamado *capacidad inductiva específica del medio.*

Debido a la relativamente lenta movilidad de los portadores de carga, la polarización molecular, el mayor de los tres efectos y la polarización iónica insignificantes a muy altas frecuencias.

La constante dieléctrica, la cual es proporcional al grado de polarización, varía inversamente con la frecuencia. Esto también es indicativo de la cantidad de agua presente ya que el agua tiene constante dieléctrica de 80 a bajas frecuencias.

Los valores típicos de constante dieléctrica de algunas rocas a una frecuencia de 100 kHz se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 2.1

Materiales	Constante Dieléctrica
Galena	18,0
Basalto	12,0
Calcita	7,80 a 8,50
Yeso	5,00 a 11,5
Arena Compacta (seca ó húmeda)	2,90 a 105,00
Suelo (seco ó húmedo)	3,90 a 29,40
Agua (a 20 °C)	80,36

Para frecuencias mas bajas los valores se pueden incrementar en un 30% aproximadamente.

2.16 Permeabilidad Magnética

Es una propiedad del material y así cuando se emplean fuentes electromotrices el voltaje inducido en un conductor bajo la superficie varía no solo en la relación del campo magnético, sino también con la permeabilidad magnética del conductor de la ecuación de Maxwell tenemos :

$$\nabla \times E = \frac{-\mu \partial H}{\partial t} \quad (2,5)$$

se desprende que las corrientes inducidas en la tierra son multiplicadas por el factor:

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ en H/m.} \quad (2,6)$$

Algunos valores típicos de permeabilidad de materiales de rocas se muestra a continuación

Tabla 2.2

Materiales	Permeabilidad Magnética
Magnetita	5,00
Pirrotita	2,55
Hematita	1,05
Pirita	1,005
Calcita	0,999987
Cuarzo	0,999985

2.17 Análisis de la Resistividad de Rocas y Minerales

La resistividad de minerales, rocas y suelos presentan variaciones muy grandes, por ejemplo se pueden presentar resistividades tan pequeñas como $1\Omega.m$ y tan grandes como $10^7\Omega.m$. Un rango de variación mayor se tiene en la plata, pues la plata nativa presenta una resistividad de $1,6 \times 10^{-8}\Omega.m$ pero en el sulfuro puro llega a $10^{16}\Omega.m$

Al conductor se le puede definir como el material que presenta una resistividad menor de $10^{-5}\Omega.m$, mientras que el aislador tiene una resistividad mayor a $10^7\Omega.m$

Entre tales límites se tiene a los elementos semiconductores. Dentro de esta agrupación, los metales y el grafito son todos conductores; contiene un gran número de electrones libres, cuya movilidad es muy grande. Los semiconductores también conducen corriente por medio de electrones pero tienen pocos de ellos.

Los aisladores se caracterizan por el enlace iónico, así que los electrones de valencia no son libres de moverse.

Otra diferencia entre conductores y semiconductores es su respectiva variación con la temperatura, la primera varía inversamente con ella y puede tener alta conductividad en

la región de 0° K. Los semiconductores por otro lado, son prácticamente aisladores a bajas temperaturas.

2.18 Enfoque Macroscópico de Suelos

La mayor limitante en el diseño de Sistema de Puesta a Tierra la representa el hecho de no poder manejar valores precisos de las propiedades del terreno en los cálculos.

Conviene por ello analizar un poco el comportamiento microscópico de los suelos al paso de la electricidad, y detectar claramente los integrantes fundamentales de variación de sus propiedades así como el grado de influencia de cada uno de ellos.

Aunque tal cuestión representa en si un amplio y muy particular campo de la geotecnia, es necesario contar con nociones fundamentales para el tratamiento de la tecnología de la puesta a tierra.

2.19 Descripción de los suelos

Si bien como ya se ha mencionado existe definiciones geológicas y geotécnicas de suelo existen varias clases de suelo los cuales son:

Ordinario, arenoso, calcáreo, arcilloso, de grava, etc.

Los principales componentes del suelo son :

- La Arena que representa un papel físico y es el más abundante de todos
- La Caliza, la cual al ser disuelta por las aguas cargadas de gas carbónico juega un papel no solo físico sino también químico.
- La arcilla formada por granos de menos de dos milímetros con todos los materiales orgánicos del suelo que sirve de cementante a los demás elementos del mismo y que a la vez fija silicatos y otras sustancias minerales.
- Materias orgánicas consistentes en detritos de plantas microorganismos y animales en descomposición o ya descompuestos en cuyo caso constituye el mantillo que,

según la proporción en que se encuentre mezclado a la arcilla, influye sobre el poder absorbente del suelo.

Tabla 2.3
Característica y presentación del agua

Agua	Resistividad ($\Omega\text{-m}$)
Meteórica	30 \rightarrow 1000
Superficial (en rocas ígneas)	100 \rightarrow 3000
Superficial (en rocas sedimentarias)	10 \rightarrow 100
Natural (en rocas ígneas)	0,5 \rightarrow 150
Natural (en sedimentos)	1 \rightarrow 100

2.20 Integrantes físicos y naturales del suelo.

➤ El esqueleto mineral

La manera en la que están dispuestas las partes constituyentes de la roca influye en el valor de su conductividad o resistividad.

Con base en ello se les distingue como rocas isótropas y rocas anisótropas.

En la roca isótropas sus poros están orientados en el suelo de una manera desordenada, por cuya razón el valor de la resistencia mecánica y eléctrica será la misma en cualquier dirección.

La roca anisótropa tiene un esqueleto mineral y poros en forma alargada por ello en esta clase de rocas las condiciones de paso de corrientes serán diferentes. Presentaran una mayor resistividad cuando sean recorridas en la dirección del eje transversal y menor en el caso de ser recorridas en dirección del eje longitudinal.

A la relación entre la máxima y la mínima resistividad se le conoce como coeficiente de anisotropía (λ_μ) :

$$\lambda_\mu = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad (2,7)$$

donde :

ρ_n = Es la resistividad en el sentido normal

ρ_t = Es la resistividad en el sentido longitudinal en la roca anisótropa

entonces se tiene que $\rho_n > \rho_t$

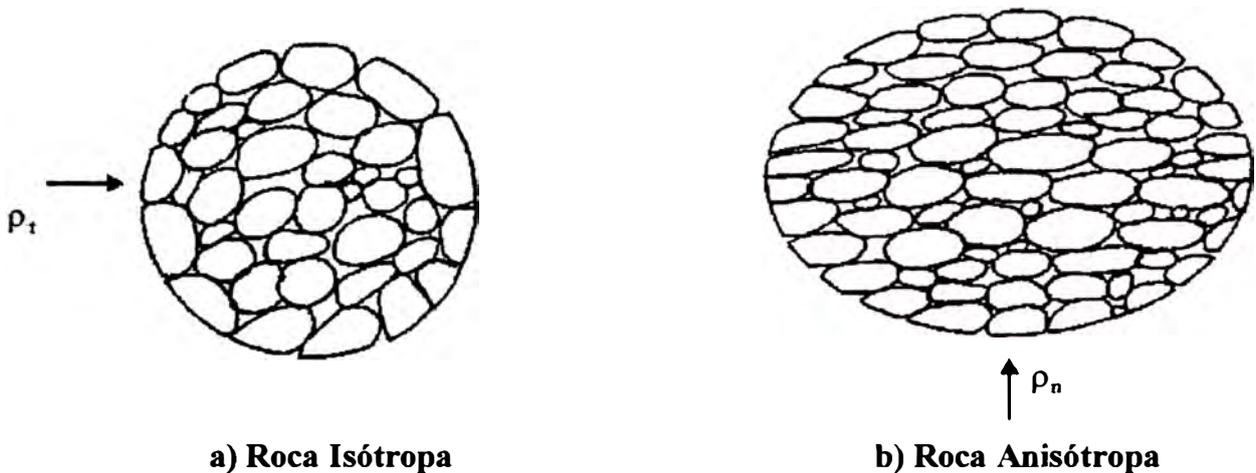


Fig. 2.7

Este coeficiente (λ_μ) generalmente varía entre 1 y 2 en las rocas isótropas (piedra caliza, pizarra, riolita, entre otras).

➤ Porosidad de la roca

La porosidad, es decir los huecos que quedan entre las fibras, granos o partículas constituyentes de la materia sólida, es un factor determinante en la creación de los potenciales electrocinéticos y por lo tanto de su conductividad.

Los poros de las rocas se pueden considerar como sistemas complejos de capilares en cada uno de los cuales se producen tales procesos químicos.

Tal proceso de formación de las capas binarias es muy importante ya que la conductancia de las rocas crece a medida que aumenta la extensión de la superficie de separación entre las fases sólida y líquida, debido a que, en los límites de esa

capa, el líquido de los poros normalmente tiene una mayor concentración de iones y por lo tanto de conductividad eléctrica.

En condiciones, las rocas finamente dispersas, en particular las arcillas, conducen normalmente mejor la electricidad que las rocas de grano grueso. La diferencia de potencial electrocinético que se produce en cada capilar considerado aisladamente, se integra en un campo eléctrico general que comprende tanto al acuífero como a las capas circundante.

En un primer caso se originan las corrientes de difusión, a causa de que la movilidad de los iones de distintos signos es diferente en el electrolito, en el proceso de nivelación de las concentraciones de iones de mayor movilidad, produciéndose a un lado del contacto la acumulación de iones principalmente de signo contrario.

En un segundo caso, también se produce la separación de los iones de mayor movilidad y la acumulación correspondiente de cargas contrarias a cada lado del límite de contacto de las soluciones. Una nueva distribución de los iones conduce asimismo a la creación de un campo eléctrico.

En el medio geológico, las fuerzas electromotrices de naturaleza electroquímica se presentan en aquellos casos en que las rocas del medio poseen conductividad iónica y existe acumulación de minerales buenos conductores con conductancia electrónica; en tales circunstancias el cuerpo mineral junto con las rocas circundante forman un elemento galvánico natural, originándose entonces la capa eléctrica binaria caracterizada por un salto de potencial cuya magnitud y signo depende de los factores determinantes de potencial

➤ **La textura de la roca**

Los factores básicos determinantes del potencial son:

- La composición química de las aguas subterráneas que circulan en las rocas e impregnan el cuerpo mineral.
- La composición mineral
- La característica de textura es decir la disposición de los distintos elementos de que consta (textura granular, textura vítrea etc).
- La estructura del cuerpo mineral.

La influencia de estos factores se manifiesta en su dependencia de las condiciones físico-geológicas, tales como la resistividad de las rocas y suelos la velocidad de circulación de aguas subterráneas e interacción de tales aguas en primer lugar , y su grado de oxidación y contenido de iones de sulfuro de hidrógeno y de hierro.

➤ **Los fluidos saturadores**

La resistividad de los fluidos que saturan a las rocas pueden variar entre amplios límites; en la mayoría de los casos tales líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, entre las que juegan un papel importante el cloruro de sodio.

Se conoce que la resistividad del agua que rellena los poros de las rocas está en relación inversa con la concentración de la solución de la sal diluida.

En condiciones naturales las aguas profundas fuertemente mineralizadas y las aguas marinas poseen la resistividad mínima, la cual es de $1 \Omega.m$ o menos; la resistividad de las aguas subterráneas varía según su grado de mineralización entre 10^{-2} a $10^2 \Omega.m$

Por otro lado la temperatura influye en el valor de la resistencia del agua que rellena los poros de las rocas. La relación entre ellas se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho_t = \frac{\rho_{18^\circ C}}{1 + \alpha(t - 18^\circ C)} \quad (2,8)$$

en la cual :

ρ_t = Resistividad de la solución a la temperatura T °C

$\rho_{18^\circ C}$ = Resistividad de la solución a 18° C.

α = Coeficiente de temperatura de la conductividad eléctrica
(0,025 /°C)

Los poros de las rocas pueden estar rellenos de también de petróleo, por lo que la resistividad de tales rocas resulta elevada y puede llegar a ser del orden de 10^{16} $\Omega.m$.

➤ **La Humedad y la porosidad**

La humedad es un factor integrante muy trascendente en la resistividad de una roca, con pocas excepciones la corriente eléctrica circula únicamente por el electrolito que rellena sus poros; y como la conductividad eléctrica de las rocas es esencialmente electrolítica, la resistividad esta fuertemente influenciada por la humedad.

La expresión empírica siguiente permite calcular la resistencia de las rocas para una determinada humedad:

$$\rho_{kv} = k_v^{-3,15} \rho_v \quad (2,9)$$

donde:

ρ_v = Resistividad de la roca totalmente saturada de humedad

k_v = Coeficiente igual a la relación del volumen de la parte del espacio poroso ocupado por la humedad con el volumen total del espacio poroso.

El valor absoluto de la humedad queda determinado por la porosidad de la roca consecuentemente, en condiciones naturales las rocas porosas presentan resistencias bajas en comparación con otro tipo de rocas cuando yacen bajo el nivel de las aguas subterráneas, también por su elevado contenido de humedad presentan variantes importantes como:

- Las arenas secas que tiene una elevada resistencia.
- Los sedimentos hidroquímicos compactos y de baja porosidad, como son el yeso y la anhidrita, son de baja resistencia (alrededor de 10 $\Omega.m$).

Las arcillas poseen generalmente menor resistividad que las arenas, lo cual se debe, por una parte, a la considerable influencia del agua vinculada a la superficie de separación de las fases sólida y líquida las aguas subterráneas se estancan y aumenta la mineralización por las sales minerales preexistentes en el esqueleto sólido de la roca.

Las rocas congeladas presenta mayor resistividad que las mismas rocas desheladas y así la resistividad de las rocas friables congeladas durante muchos años oscila entre varios millares y algunos decenas de millares de $\Omega.m$.

Las rocas ígneas tienen los valores más altos de resistividad (8 decenas de miles de $\Omega.m$), ya que tienen una porosidad propia muy pequeña en comparación con la de

otras rocas, según sean compactadas o fisuradas, cuando las fisuras actúan como vías para la circulación de las aguas subterráneas presenta menor resistividad que las mismas rocas en estado masivo.

Las rocas metamórficas, su resistividad presenta valores intermedios entre las rocas sedimentarias y las endógenas (ígneas) su resistividad será mayor cuando mayor sea su grado de metamorfismo pues la porosidad y humedad de tales rocas depende de aquello.

Así la resistividad de los neises (roca de estructura pizarrosa e igual a la composición que la del granito) muy metamorfizados se mide por miles de $\Omega.m$.

Entre las rocas metamórficas de baja resistividad, se tiene a las rocas grafitizadas y carbonificadas principalmente esquistos; en ellos la resistividad se reduce a causa de la presencia del grafito y al material carbonoso disperso fuertemente metamorfizados (del orden de décimas de $\Omega.m$).

➤ De las menas

En cuanto a las menas o minerales metalíferos, en el valor de su conductividad influye decisivamente el contenido de minerales buenos conductores (pirita, galena, calcopirita etc.), así como sus interrelaciones de estructura y textura con los minerales malos conductores.

Las piritas masivas y las menas polimetálicas, poseen la mayor conductancia; sus resistividades oscilan entre centésimas partes y unidades de $\Omega.m$. _____

Las menas piriticas masivas que contienen espalerita que es un mal conductor, cuando esta envuelve en forma de película los granos de pirita y calcopirita, en cuyo caso la resistividad del mineral puede alcanzar cientos de $\Omega.m$.

La resistividad de los minerales de impregnación o filón-impregnación depende de la relación espacial de los componentes minerales metálicos y no metálicos. Así cuando los minerales malos conductores rellenan el espacio entre los metálicos individuales la resistencia de los minerales de impregnación se diferencia poco de la resistencia de las rocas circundantes Fig. 2,8.

Cuando los minerales metálicos cementan un contorno compuesto por minerales no metálicos entonces su resistividad es mucho menor Fig 2,9.

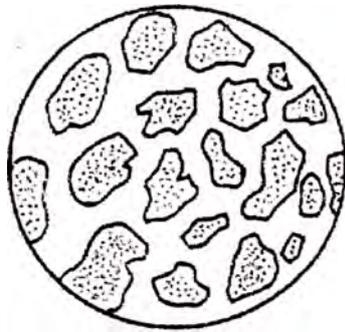


Fig 2,8 No metálica; el cemento es mal conductor

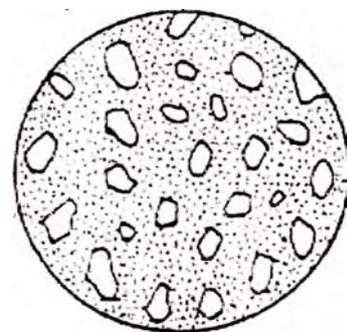


Fig. 2,9 Metálica; el cemento es el buen conductor

➤ **Del suelo de grava**

Un suelo cubierto con cantidad de piezas de piedra una al lado de la otra forma lo que se llama una capa de cascajo o de grava, cuya conductividad eléctrica macroscópica no sólo depende de la forma, tamaño y estructura mineralógica de las piezas unitarias.

Sino también y decididamente del mecanismo de contacto entre cada una de las piezas presionadas.

La grava es un material que se utiliza mucho como piso terminal (como medida de seguridad indirecta) en las instalaciones de transformación y de distribución (subestaciones) de alta tensión.

Adoptando un modelo de contacto entre piedras, en la cual las piedras 1 y 2 (Fig. 2,10) se representa por semiesferas de radio R_1 y R_2 y están comprimidas por la fuerza de presión F , de tal manera que se amoldan al permanecer en estrecho contacto, en una superficie circular de radio A y suponiendo que $R_1 = R_2 = R$ se llega a la relación :

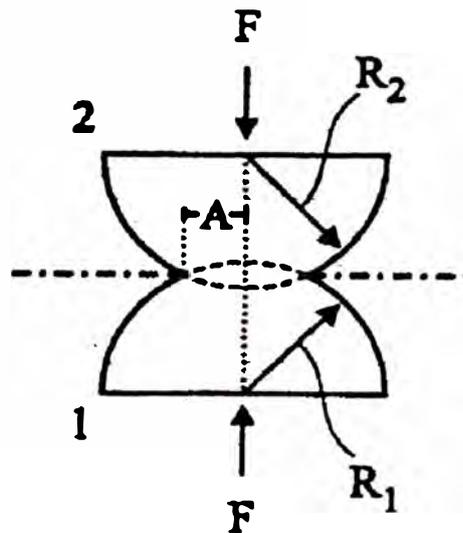


Fig. 2,10

$$A = 0,881 \sqrt[3]{\frac{RF}{E}}, \text{ para } A \ll R \quad (2,10)$$

en la cual E es el modulo de elasticidad uniforme de la piedra.

Suponiendo una *conductividad eléctrica unitaria* (γ) para ambas piedras, se describe la resistencia a la propagación con base en la expresión correspondiente al electrodo de placa circular siguiente:

$$R_0 = 0,25 \cdot \gamma \cdot A \quad (2,11)$$

Y por lo tanto la resistencia de paso del contacto resulta:

$$R_{Op} = 2R_0 = \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot A} \quad (2,12)$$

Cuando se sustituye cada piedra por una esfera de radio R y se presupone que las piedras después de un cierto tiempo de compresión están prensadas tan estrechamente como para formar un “paquete de esferas” como se puede apreciar a continuación en el grafico siguiente.

Se infiere que el triangulo equilátero cuyos vértices están en cada una de las esferas vecinas ocupa la superficie:

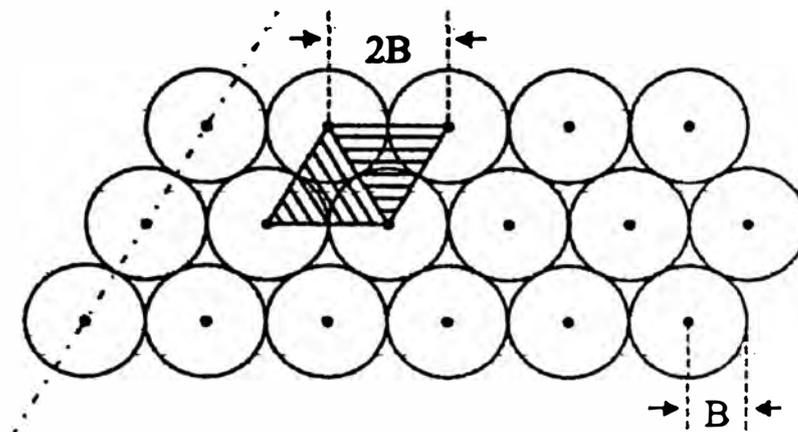


Fig. 2,11

$$S = \sqrt{3}R^2 \quad (2,13)$$

Siempre dos de ellas se coordinan para formar sobre otra un rombo de triángulos unidos. Se construye sobre uno de tales triángulos una pirámide regular, de altura:

$$h = 2R \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2,14)$$

La concentración de las piedras en cada unidad del cascajo se expresa por medio de

$$n = \frac{1}{2Sh} = \frac{1}{\left[\sqrt{2}R\right]^3} \quad (2,15)$$

La dependencia de la resistencia a la presión queda expresada por medio de la siguiente formula :

$$R_0 = \frac{R}{4\gamma} \frac{\sqrt[5]{2}}{0,881} \sqrt[3]{\frac{p}{E}} \quad (2,16)$$

donde : "p" representa la presión.

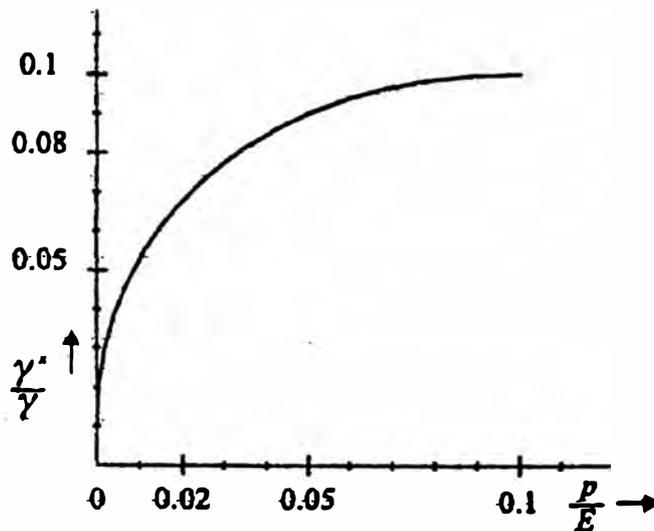
La resistencia de paso R_{op} de las piedras resulta así:

$$R_{op} = \frac{2}{3} R_0 \quad (2,17)$$

entonces, la conductividad macroscópica del cascajo queda expresada así:

$$\gamma^* = \gamma \cdot 0,881 \cdot \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{5}{4}} \sqrt[3]{\frac{p}{E}} \quad (2,18)$$

Cuya curva característica se puede apreciar en el siguiente grafico.



CAPÍTULO III

MEDICION DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

La realización de una instalación de puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del terreno.

Para que según las características de los estratos, espesor de los mismos nos pueda facilitar la elección de la disposición de los electrodos de tierra que mejores resultados de factibilidad técnico-económico proporcione y poder prever las características eléctricas del sistema de puesta a tierra.

Los métodos de medición son el resultado del análisis práctico de las ecuaciones de Maxwell de electromagnetismo aplicado al suelo la localización de un sistema de puesta a tierra depende de la posición ocupada por los equipos del sistema eléctrico a instalar.

La localización de la subestación eléctrica debe ser definida considerando lo siguiente:

- Centro geométrico de cargas
- Local con terreno disponible
- Terreno accesible económicamente
- Local seguro de inundaciones
- No comprometer la seguridad de la población
- Estabilidad geológica del suelo

3.1 Mediciones en el Terreno.

Definida la ubicación de la instalación del sistema de puesta a tierra debe efectuarse el levantamiento de la información a través de mediciones, para obtener la información necesaria para elaborar el proyecto.

El levantamiento de los valores de resistividad a través de mediciones en el terreno utilizándose métodos de prospección geoelectrico dentro de los cuales el mas conocido y utilizado es el método de los cuatro electrodos dentro de ellos están los métodos de

➤ Método de Wenner.

Es un caso particular del método de cuatro electrodo; se basa en la separación equidistante de los electrodos de medición, es el mas utilizado para determinar la resistividad del terreno en función de la profundidad ($0,75 a \leq h \leq a$); la evaluación de parámetros eléctricos en el suelo se puede hacer a partir de la medida de Corriente y Potencial. (ver Anexo. D)

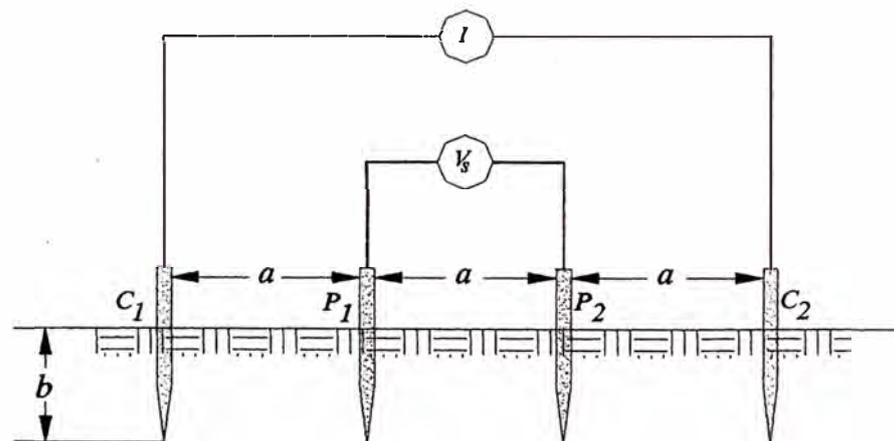


Fig. 3,1 Distribución de los cuatro electrodos equidistantes

➤ **Método de Schlumberger.**

Es otro caso particular del método de cuatro electrodo; se basa en que los electrodos de potencial son fijos y los de corriente móviles (separación proporcional e idéntica), es utilizado para determinar también la resistividad del terreno; la evaluación de parámetros eléctricos en el suelo se puede hacer a partir de la medida de Corriente y Potencial. (ver Anexo. D)

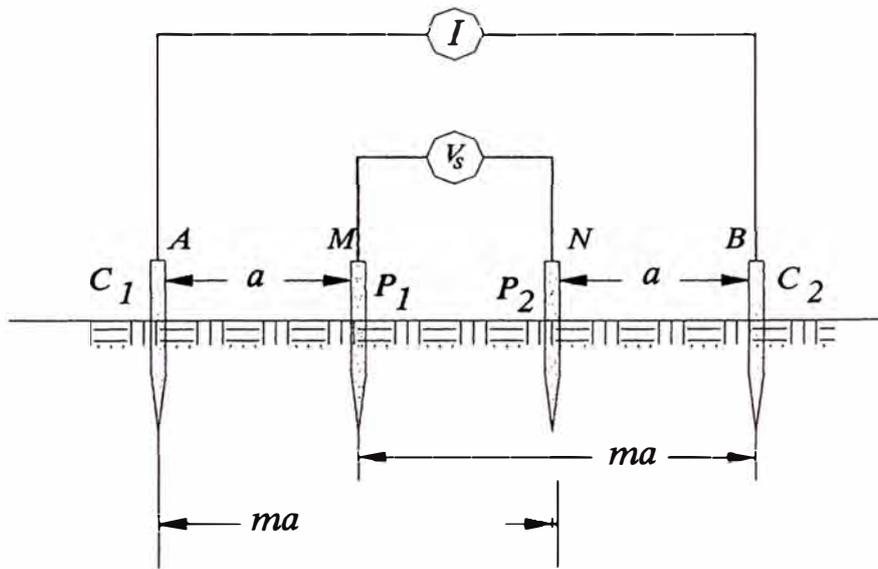


Fig. 3,2

3.2 Mediciones referenciales por los métodos Wenner , Schlumberger

Las distancias aplicables en medidas de campo para sistema de puesta a tierra de corriente alterna, no se requieren grandes profundidades de sondeo.

Tabla 3.1

Método Wenner

ELEMENTO	DISTANCIAS ENTRE ELCTRODOS a (m)							
SUB-ESTACION	0,5	1	2	3	4	6	8	12
LINEAS TRANSM.	--	1	2	--	4	--	8	---

Tabla 3,2
Método de Schlumberger
SS.EE. – LL.TT.

Constante de Medida (K)							
AB/2 MN	1,5 m	2,0 m	3,0 m	4,0 m	5,5 m	8,0 m	11,0 m
0,5 m	13,7	24,7	56,1	100	190	402	760
1,0 m	6,3	11,8	27,5	49,2	200	379	803

El mínimo número de sondeos por cada línea es cuatro, debido a que cuatro (04) puntos determinan una directriz.

3.3 Criterios de Aplicación del Método de Medidas de Resistividad

➤ Método de Wenner (según recomendación (ASTM : G57-78))

- No exige alta sensibilidad de los instrumentos de medida.
- Es aplicable para despliegues cortos, de pequeña profundidad.
- Las variaciones laterales del suelo distorsionan la precisión sólo en sondeos de gran profundidad que no se usan para PAT en corriente alterna.
- Facilita el procesamiento simplificado de las medidas de campo.

➤ Método de Schlumberger (Para Geofísica de gran profundidad)

- Exige alta sensibilidad de los Instrumentos de medida
- Es ideal para despliegues amplios y sondeos de gran profundidad que no son necesarios para los sistemas de PAT de uso eléctrico en corriente alterna.
- Las variaciones laterales del suelo (fallas) afectan menos la precisión.
- Impone mayor dificultad en el procesamiento de los datos.

Para el diseño de aterramientos de uso eléctrico las profundidades de enterramiento de los electrodos rara vez superan los 4 m, lo cual impone sondeos exploratorios de resistividad del suelo hasta profundidades medias de ocho metros ($a = 8\text{m}$).

Según lo cual el método de medidas que más se adecua a dicha necesidad y que permite una mejor y más eficiente caracterización del suelo superficial, será el método Wenner

Los sondeos a mayor profundidad ($a = 10, 12, 16, 20\text{ m}$) son complementarios, para apreciar la tendencia de las resistividades de los estratos bajos.

Cuando se desea alcanzar estratos profundos de muy baja resistividad (para sistemas de puesta a tierra de corriente continua), no hay límite en la profundidad de exploración, en cuyo caso el método de sondeo que más se adecua puede ser el de Schlumberger.

3.4 Criterios para la Medición de la Resistividad Aparente

- Cuando el área está próxima a instalaciones de Alta Tensión (líneas de transmisión ó subestaciones eléctricas) se optará por un alejamiento perpendicular mínimo de 50 m respecto de ellos.
- Para líneas de Transmisión o P.A.T. simples en cada punto se traza una línea de medida.
- Para subestaciones eléctricas se trazan dos líneas de medidas ortogonales por punto.
- En cada línea de medidas se hacen sondeos sucesivos para diferentes espaciamientos de “a”.
- La cobertura de una línea de medidas tiene diámetro medio igual a $3a$ ($d = 3a$)
- Los resultados en suelos planos puede abarcar mayor cobertura.
- Los resultados en suelo accidentados pueden abarcar menor cobertura.

3.5 Equipo de Medición de Resistividad de Terreno

El aparato de medida es un telurómetro clásico, siendo los dos electrodos extremos los de inyección de la corriente de medida I y los dos centrales, los electrodos de medida de potencial entre las marcas mas comunes tenemos:

- Yew Yokogawa
- Megger modelo DET -3
- Megger modelo DET - 5

Una posible causa de perturbaciones durante las medidas de resistividad del terreno puede tener relación con las características del equipo de medida utilizado pues, generalmente se emplea un telurómetro que funciona con corriente alterna de inyección para las medidas de resistividad de los terrenos.

La corriente alterna permite, en efecto eliminar el efecto parásito de polarización de los electrodos producido por la corriente continua y resulta insensible a las corrientes telúricas y vagabundas, pero a causa del efecto pelicular, penetra menos profundamente en el suelo que la corriente continua, efecto que es tanto más acusado cuanto más elevada sea la frecuencia de la corriente de la corriente y débil la resistividad del terreno.

Se hace uso del *terminal de guarda* cuando se realizan mediciones en terreno muy secos y rocosos, ya que al encontrarse resistencias altas, éstas pueden originar corriente de fuga dentro del instrumento que producen una pequeña desviación de la sensibilidad del galvanómetro y así originar lectura errónea.

Este terminal permite eliminar esta fuente potencial de error y sirve como paso a tierra a las corrientes de fuga a través de la estaca de guarda sin afectar el galvanómetro.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO

Considerando las características que normalmente presenta los suelos en virtud de su propia formación geológica a lo largo de los años formando capas estratificadas, y siendo estos estratos paralelos a la superficie del suelo plano y teniendo resistividades ρ_1 , ρ_2 se pueden analizar por tres métodos:

- Método de estratificación de dos capas
- Método de Pirson
- Método Grafico

4.1 Modelo del suelo de dos capas

Usando las teorías de electromagnetismo en un suelo de dos capas horizontales es posible desenvolver un modelo matemático que con auxilio de medidas efectuadas por el Método de Wenner posibilita encontrar la resistividad del suelo para la primera y segunda capa, también su respectiva profundidad.

Una corriente eléctrica I entrando por el punto A en un suelo de dos capas genera potenciales en la primera capa que debe satisfacer la ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (4,1)$$

V = Potencial de la primera capa del suelo.

Desarrollando la ecuación de Laplace relacionando al potencial V de cualquier punto P de la primera capa del suelo a una distancia r del punto de corriente A se llega a la siguiente expresión:

$$V_P = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2n \cdot h)^2}} \right] \quad (4,2)$$

Donde:

V_P = Potencial de un punto P cualquiera de la primera capa en relación al infinito.

ρ_1 = Resistividad de la primera capa.

ρ_2 = Resistividad de la segunda capa.

h = Profundidad de primera capa.

r = distancia del punto P al punto de corriente A .

K = Coeficiente de reflexión definido por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad (4,3)$$

Se verifica que la variación del coeficiente de reflexión esta limitada entre :

$$-1 < K < +1 \quad (4,4)$$

asimismo si :

Tabla 4,1

Resistividad	Coeficiente de Reflexión (K)
$\rho_2 > \rho_1$	+
$\rho_2 < \rho_1$	-
$\rho_2 = \rho_1$	0
$\rho_2 = \infty$	+1
$\rho_2 = 0$	-1

4.2 Configuración de Wenner

La expresión (4,2) será aplicada a la configuración Wenner sobre un suelo de dos capas. En esta configuración la corriente I entra al suelo por el punto A (C_1) y retorna al instrumento por el punto D (C_2). Los puntos B (P_1) y C (P_2) son puntos de potencial.(ver Fig. 3.1)

El potencial en el punto B será consecuencia de la circulación de la corriente eléctrica suministrada por A y recogida por D.

Usando la expresión (4,2) se tiene:

$$V_B = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (4,5)$$

haciendo la misma consideración para el potencial en el punto C tenemos:

$$V_C = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (4,6)$$

La diferencia de potencial entre los puntos B y C esta dado por:

$$V_{BC} = V_B - V_C \quad (4,7)$$

$$V_{BC} = \frac{I \cdot \rho_1}{2\pi} \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n \frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n \frac{h}{a})^2}} \right) \right] \quad (4,8)$$

La expresión $\frac{V_{BC}}{I}$ representa el valor de la resistencia eléctrica (R) indicada por el

instrumento.

$$2\pi.a.R = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right] \quad (4,9)$$

Sabiendo que la resistividad eléctrica del suelo para un espaciamiento “a” de las varillas de medición esta dada por $\rho(a) = 2.\pi.a.R$ sustituyendo en la ecuación anterior tenemos:

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right) \right] \quad (4,10)$$

Esta expresión es fundamental para la elaboración de la estratificación de un suelo de dos capas

4.3 Método de dos Capas Usando Curvas

Como sea observado la variación del coeficiente de reflexión K es pequeña y esta limitada entre -1 y $+1$. Se puede entonces trazar una familia de curvas de $\frac{\rho(a)}{\rho_1}$ en función de $\frac{h}{a}$ para una serie de valores de K negativos y positivos.

Las curvas para valores de K negativos (curva $\rho(a)$ x a descendente) ó valores de K positivos (curva $\rho(a)$ x a ascendente) se obtienen de la expresión (4,10).

Con una familia de curvas teóricas obtenidas a partir de la expresión (4,10) es posible establecer un método que se relacione con la curva $\rho(a)$ x a trazada a partir de los datos obtenidos por el método de Wenner.

4.3.1 Descripción del Método

➤ Paso 1

Trazar en **papel milimetrado** la **curva $\rho(a)$ x a** con los datos obtenidos de la medición de resistividad de terreno por el Método Wenner

➤ Paso 2

Se prolonga la **curva $\rho(a)$ x a** interceptando el eje de las ordenadas del grafico, el valor del punto de intersección será el valor de ρ_1 esta será la resistividad de la primera capa.

Para viabilizar este paso, se recomienda tomar varias lecturas por el método de Wenner para pequeñas distancias, esto se justifica porque la penetración de la corriente se da predominantemente en esta primera capa.

➤ Paso 3

Del cuadro de datos de resistividad obtenidos por el método de Wenner, se escogerá arbitrariamente un valor de espaciamiento a_1 de la cual obtendremos directamente el valor $\rho(a_1)$.

➤ Paso 4

Por el comportamiento del trazado de la **curva $\rho(a)$ x a** (ascendente ó descendente) según sea el caso se determina el signo del factor de reflexión **K**.

Si la curva es descendente, el signo de **K** será negativo y se efectuara el calculo de

$$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$$

Si la curva es ascendente, el signo de **K** será positivo y se efectuara el calculo de

$$\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$$

➤ Paso 5

Con el valor de $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1}$ ó $\frac{\rho_1}{\rho(a_1)}$ obtenido, se traza una línea paralela al eje de las abscisas en el grafico de las familias de curvas de **K** positivas ó negativas obtenidas a partir de la expresión (4,10)

Esta línea interceptara a las distintas curvas de **K**; luego se procederá a elaborar un cuadro con los valores especificaos de **K** é $\frac{h}{a}$ correspondientes.

➤ Paso 6

Al cuadro del Paso 5 se le adicionara una columna que contendrá los resultados del producto de $h = a_1 \times \frac{h}{a}$ el cuadro final quedara como se muestra:

Tabla 4,2

$a_1 =$; $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} =$		
K	$\frac{h}{a}$	h(m)

➤ Paso 7

Se escoge arbitrariamente un segundo valor de espaciamento $a_2 \neq a_1$ de la cual obtendremos directamente el valor $\rho(a_2)$, se repite el proceso desde el Paso 4 al Paso 6.

➤ Paso 8

Se trazan las curvas **K** Vs **h** y se tomara el valor del punto de intersección de ambas curvas lo que permitirá obtener directamente el espesor del primer estrato (h_1) y luego con el dato ρ_1 obtenido en el **Paso 2**, el valor de **K** y por medio de la formula:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2 - 1}{\rho_1}}{\frac{\rho_2 + 1}{\rho_1}} \quad (4,11)$$

se obtiene ρ_2 la resistividad del segundo estrato.

4.4 Método de PIRSON

El método de Pirson puede ser entendido como una extensión de el método de dos estratos.

Al dividirse la curva $\rho(\mathbf{a})$ x **a** en tramos ascendentes y descendentes evidenciando un suelo de varios estratos, puede ser analizado como una secuencia de un suelo de dos estratos.

Considerando un primer tramo como un suelo de dos estratos se obtiene ρ_1 , ρ_2 , e h_1 al analizarse el segundo tramo se debe primeramente determinar una resistividad equivalente para el tercer estrato.

Así se procura obtener la resistividad ρ_3 a la profundidad del estrato equivalente

4.4.1 Criterio de Hummel

El criterio de Hummel permite aplicar la característica del método de dos estratos a suelos que presentan tres (3) o mas estratos.

Se asume que los estratos (ρ_1) y (ρ_2) están conectados en paralelo formando un estrato medio equivalente de resistividad ($\rho_e = \rho_1' = \frac{2}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}$) con un espesor ($h_1' = h_1 + h_2$),

considerando las superficies (S_1) y (S_2) de los estratos (ρ_1) y (ρ_2) que tienen espesores (h_1) y (h_2) respectivamente se puede determinar sus resistencias (R_1) y (R_2) al paso de la corriente.

$$R_1 = \frac{\rho_1 \cdot h_1}{S_1} \quad R_2 = \frac{\rho_2 \cdot h_2}{S_2} \quad (4,12)$$

$$R_e = \frac{\rho_e \cdot h_1'}{S_e} \quad (4,13)$$

se sabe que :

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4,14)$$

Sea además que el tercer estrato subyacente (ρ_3) será determinado como ($\rho_2' = \rho_3$)

para el análisis se tratara como un suelo de dos estratos reemplazando y operando se tiene:

$$\frac{S_e}{\rho_e \cdot h_1'} = \frac{S_1}{\rho_1 \cdot h_1} + \frac{S_2}{\rho_2 \cdot h_2} \quad (4,15)$$

Sea:

$$S_1 = h_1^2 \quad S_2 = h_2^2 \quad S_e = (h_1')^2 \quad (4,16)$$

reemplazando se obtiene :

$$\frac{h_1'}{\rho_e} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} \quad (4,17)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_e} = \frac{\rho_2 \cdot h_1 + \rho_1 \cdot h_1' - \rho_1 \cdot h_1}{\rho_2 \cdot h_1'} \quad (4,18)$$

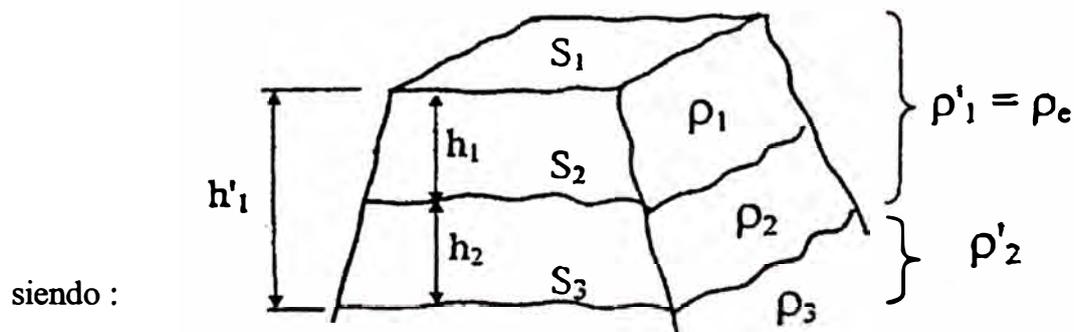
Invirtiendo ambos miembros y dividiendo los términos del segundo miembro entre ($\rho_1 \cdot h_1$) tenemos :

$$\frac{\rho_e}{\rho_1} = \frac{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cdot \left(\frac{h_1'}{h_1}\right)}{\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) + \left(\frac{h_1'}{h_1}\right) - 1} \quad (4,19)$$

Dicha expresión reemplazada en la ecuación (4,10) que origina la familia patrón Estándar, permite obtener con el mismo proceso, a la misma escala, la familia de curvas característica de patrón auxiliares.

La familia de curvas patrón auxiliar relaciona $\left(\frac{h_1'}{h_1}\right)$ con $\left(\frac{\rho_e}{\rho_1} = \frac{\rho_1'}{\rho_1}\right)$ para valores positivos y negativos del factor de reflexión básico $\left(K_0 = \frac{\rho_2}{\rho_1}\right)$

La familia patrón auxiliar reproducida en papel logarítmico transparente, permite la caracterización de las resistividades de suelos de tres o mas estratos al ser utilizadas complementariamente con la familia de curvas de patrón estándar.



$$\rho_e = \rho'_1 = \rho'_2 = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} \quad (4,20)$$

Las resistividades de los estratos $(\rho_2), (\rho'_2 = \rho_3), (\rho''_2 = \rho_4)$ se determinaran con las expresiones:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1' \cdot \rho_1 (h_1' - h_1)}{\rho_1 \cdot h_1' - \rho_1' \cdot h_1} ; \quad \text{donde : } h_1' = h_1 + h_2 \quad (4,21)$$

hallando el valor de la resistividad del tercer estrato ($\rho_2' = \rho_3$) se tiene:

$$\rho_2' = \rho_3 = \frac{\rho_1' \cdot \rho_1'' \cdot (h_1'' - h_1')}{\rho_1' \cdot h_1'' - \rho_1'' \cdot h_1'} \quad (4,22)$$

donde :

$$h_1'' = h_1' + h_2' \quad (4,23)$$

$$\rho_1'' = \rho = \frac{h_1' + h_2'}{\frac{h_1'}{\rho_1'} + \frac{h_2'}{\rho_2'}} \quad (4,24)$$

4.4.2 Descripción del Método

Como el análisis de Pirson se basa en el método de dos estratos; se deberá desarrollar previamente los Pasos del 1 al 7 de dicho método hasta hallar ρ_2 y h_1 para luego continuar con el método propiamente de Pirson que a continuación detallamos:

➤ Paso 1

Dividir la curva $\rho(\mathbf{a})$ x \mathbf{a} en tramos ascendentes y descendentes y hallar un punto de

inflexión \mathbf{a}_t donde $\frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{a}}$ es máxima; así mismo donde $\frac{\partial^2 \rho}{\partial \mathbf{a}^2} = 0$; este punto de

inflexión esta localizado donde la curva cambia de concavidad.

➤ Paso 2

Considerando un segundo tramo de la curva $\rho(\mathbf{a})$ x \mathbf{a} se debe estimar el espesor del segundo estrato d_2 para ello se hace uso del **Método de Lancaster – Jones**, esto es:

$$\hat{h}_1 = h_1 + d_2 = \frac{2 \cdot a_t}{3} \quad (4,25)$$

\hat{h}_1 : Profundidad estimada del segundo estrato

h_1 : Profundidad del primer estrato

d_2 : Espesor estimado del segundo estrato

a_t : Punto de inflexión, hallado en el Paso 1

➤ Paso 3

Calcular la resistividad media equivalente estimada (ρ_e) vista desde el tercer estrato utilizando la formula de Hummel que es una media armónica ponderada del primer y segundo estrato.

$$\rho_e = \rho_1' = \frac{h_1 + d_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2}} \quad (4,26)$$

➤ Paso 4

Del cuadro de datos de resistividad obtenidos por el método de Wenner, se escogerá arbitrariamente un valor de espaciamiento ($a_1 \geq a_t$) de la cual obtendremos directamente el valor $\rho(a_1)$.

➤ Paso 5

Por el comportamiento del trazado de la **curva $\rho(a)$ x a** Paso 1 (ascendente ó descendente) según sea el caso se determina el signo del factor de reflexión **K**.

➤ Paso 6

Se deberá considerar ρ_1' como la resistividad del primer estrato equivalente.

➤ Paso 7

Con el valor de $\frac{\rho(a_1)}{\rho_1^I}$ ó $\frac{\rho_1^I}{\rho(a_1)}$ obtenido, se traza una línea paralela al eje de las abscisas en el gráfico de las familias de curvas de **K** positivas ó negativas. Esta línea interceptará a las distintas curvas de **K**; luego se procederá a elaborar un cuadro con los valores específicos de **K** é $\frac{h}{a}$ correspondientes.

➤ Paso 8

Se escoge arbitrariamente un segundo valor de espaciamiento $a_2 \neq a_1$ de la cual obtendremos directamente el valor $\rho(a_2)$, se repite el proceso desde el paso 5 al paso 7.

➤ Paso 9

Se trazan las curvas **K** Vs **h** y se tomara el valor del punto de intersección de ambas curvas lo que permitirá obtener directamente el espesor del primer estrato equivalente (h_2), el valor de **K** y luego con el dato ρ_1^I se hallara la resistividad del tercer estrato ρ_3 mediante la siguiente formula:

$$\rho_2^I = \rho_3 = \rho_1^I \cdot \left(\frac{1+K}{1-K} \right) \quad (4,27)$$

4.5 Método Grafico de YOKOGAWA :

Este es un método gráfico presentado en el manual del instrumento de medición de resistividad de terreno Yokogawa.

Con este método se puede analizar la estratificación del suelo de varias capas horizontales con razonable acierto.

El origen del método se basa en tomar logaritmo de la expresión (4,10) obtenida del modelo de suelo de dos capas.

Así tomando logaritmo en ambos lados en la expresión (4,10) tenemos :

$$\log\left(\frac{\rho(a)}{\rho_1}\right) = \log\left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + (2n\frac{h}{a})^2}} \right)\right] \quad (4,28)$$

Haciendo el trazado de las familias de curvas teóricas en un gráfico con escala logarítmica esto es log-log se obtiene una curva patrón.

La expresión general anterior da origen a la familia de curvas de características estándar que relaciona $\left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right)$ é $\left(\frac{h}{a}\right)$ y se grafican para valores (+) y (-) del parámetro K,

estas están indicadas por su correspondiente $\frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Un suelo típico de dos capas esta caracterizado por los tres parámetros ρ_1 , ρ_2 e h. Haciendo las mediciones en este suelo por el método Wenner se puede trazar una **curva $\rho(a)$ x a** en escala logarítmica o sea en el formato típico de la curva patrón.

Para poder entender este proceso para suelos con varias capas se sigue la misma filosofía del método de Pirson, este método divide la **curva $\rho(a)$ x a** en tramos ascendentes y descendentes.

A partir del segundo tramo se deberá utilizar el valor de la **relación $\frac{\rho_2}{\rho_1}$** ; obtenida de la comparación del primer tramo de la **curva $\rho(a)$ x a** respecto de la Curva Patrón, el valor de esta **relación $\frac{\rho_2}{\rho_1}$** se ubicará en la grafica de la Curva Auxiliar lo que nos

permitirá identificar dicha curva, para seguidamente copiar la trayectoria de dicha curva en el papel logarítmico de la **curva $\rho(a)$ x a** lo que nos permitirá calcular la resistividad de las otras capas

4.5.1 Descripción del Método

A continuación se describe los pasos del método gráfico para la correcta obtención de las resistividades de un suelo de dos capas

- Paso 1.- Trazar en **papel milimetrado transparente** una **Curva $\rho(a)$ x a** con los datos obtenidos de la medición de resistividad de terreno por el Método Wenner en **escala logarítmica**.
- Paso 2.- Una vez trazada la **curva $\rho(a)$ x a** ubicar los puntos de inflexión (tramos ascendentes y descendentes).
- Paso 3.- Superponga la **curva $\rho(a)$ x a** sobre la Curva Patrón y ubique el primer tramo de la curva $\rho(a)$ x a (ascendente ó descendente) según sea el caso de tal forma que coincida con alguna de las curvas ahí mostradas esto nos da el valor de la **relación $\frac{\rho_2}{\rho_1}$** .
- Paso 4.- Después de haber hecho coincidir la gráfica de la **curva $\rho(a)$ x a** (ascendente ó descendente) con una de las mismas de la Curva Patrón, Se procederá sin desplazar la grafica de la **curva $\rho(a)$ x a** a ubicar y marcar en el grafico de la **curva $\rho(a)$ x a**, el punto origen ($\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$) existente en la Curva Patrón obteniéndose así un punto O_1 sobre el papel logarítmico transparente de la **curva $\rho(a)$ x a**.

- Paso 5.- Se traza desde el punto O_1 líneas perpendiculares a los ejes $\rho(\mathbf{a})$ y \mathbf{a} y se hallara el valor de $\rho(\mathbf{a})$ y \mathbf{a} pero se sabe que ($\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$) por lo tanto se obtendrá de manera indirecta ρ_1 y h_1 .
- Paso 6.- Se procede a calcular ρ_2 de la relación $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ obtenida en el Paso 3.
- Paso 7.- Para trabajar el tramo final de la curva $\rho(\mathbf{a})$ x \mathbf{a} , superponga nuevamente la grafica de la curva $\rho(\mathbf{a})$ x \mathbf{a} realizada en papel logarítmico transparente sobre la Curva Auxiliar, donde se deberá hacer coincidir el punto O_1 obtenido en el Paso 4, con el punto de origen ($\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$) de la Curva Auxiliar; seguidamente se trazará sobre el papel logarítmico transparente la trayectoria de la curva cuya relación $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ fue obtenida en el Paso 3.
- Paso 8.- Superponga nuevamente el papel logarítmico transparente (curva $\rho(\mathbf{a})$ x \mathbf{a}) sobre la Curva Patrón y ubique el segundo tramo de la curva $\rho(\mathbf{a})$ x \mathbf{a} (ascendente ó descendente) según sea el caso; de tal forma que coincida con alguna de las curvas ahí mostradas; esto nos da el valor de la relación $\frac{\rho_3}{\rho_a^2}$.

Siendo de importancia la consideración de que se deberá hacer coincidir en todo momento el punto de origen ($\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1$ e $\frac{h}{a} = 1$) de la Curva Patrón sobre el trazo de la curva auxiliar realizada en el Paso 7 y así ubicar el punto O_2 .

- Paso 9.- Se traza desde el punto O_2 líneas perpendiculares a los ejes $\rho(\mathbf{a})$ y \mathbf{a} y se hallara el valor de ρ_a^2 y \mathbf{a} pero se sabe que $(\frac{h}{a} = 1)$ por lo tanto se obtendrá de manera indirecta h_2 ; asimismo del Paso 8 se sabe el valor de $\frac{\rho_3}{\rho_a^2}$ por lo tanto se obtendrá de manera indirecta ρ_3 .

CÁPITULO V

TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO

Durante la construcción de las instalaciones de las Líneas de Transmisión así como de las Subestaciones de Transformación de Media y/o Alta tensión es una norma fundamental de seguridad que todas las partes metálicas que se encuentran accesibles al contacto con las personas se deben mantener siempre a un potencial bajo para que en caso de accidente no resulte de peligro para las personas.

Esto quiere decir que las instalaciones eléctricas deben estar diseñadas para prevenir el peligro de cualquier contacto accidental de las partes metálicas circundantes con los elementos que se encuentran bajo tensión, los cuales deben estar provistos de los apoyos y aisladores adecuados.

Aún con estas medidas de seguridad permanece el peligro de que estas partes normalmente aisladas puedan tener contacto con las partes que no están a tensión y se tenga un potencial con respecto al suelo (tierra) apareciendo un potencial anormal esto puede ocurrir por alguna causa accidental o defecto de aislamiento.

5.1 Circulación de Intensidades de Corriente en el Terreno

El terreno es un medio de tres dimensiones y frecuentemente heterogéneo. Un cálculo preciso de la distribución de las intensidades de corriente que lo recorren es complicado debido al imperfecto conocimiento que se tiene de la resistividad del terreno y de sus variaciones en superficie y en profundidad.

Estas circunstancias llevan a valoraciones simples, donde basta que el grado de aproximación esté en relación con las incertidumbres sobre los valores de los parámetros.

El diseño de la geometría del electrodo de tierra es a veces mucho más complicada, debido a las características del subsuelo que suele ser bastante imperfecto.

Alrededor de la toma de tierra, la corriente comienza a extenderse en todas las direcciones que se le ofrecen. Después, las líneas de corriente se desvían y tienden a concentrarse en una zona difusa subyacente.

Esta distribución resulta del juego de dos factores antagónicos; una gran difusión de los flujos de corriente reduce las caídas óhmicas.

De una forma general, la corriente alterna que se evacúa de una línea por una toma de tierra busca retornar a la red por los caminos que minimicen la impedancia del circuito.

La corriente tienden a penetrar tanto más profundamente en el terreno cuanto mayor es su resistividad y, por el contrario, a reunirse tanto más en la superficie cuanto más elevada es la frecuencia.

Las ondas de sobre tensión en las líneas de transmisión debida al impacto del rayo son de forma muy variable pero los registros en osciloscopios obtenidos durante las tormentas han mostrado que en conjunto pueden ser representado por una onda unidireccional de frente abrupto o escarpado amortiguada.

Siendo una onda cuya duración convencional de frente T_1 , es de $1.2 \mu s$ ($F = \frac{1}{T}$) y la duración convencional hasta el semi valor de su amplitud en la cola es de $50 \mu s$ conforme a la Norma UNE 21308

En definitiva, a 60 Hz la capa de líneas de corriente de retorno en el terreno puede asimilarse a un conductor difuso único situado a una profundidad que oscila desde alguna centenas de metros hasta mil o dos mil metros según la resistividad de los terrenos.

La gran profundidad a la que penetra las líneas de corriente de 60 Hz permite a menudo considerar que la zona donde ellas se abren radialmente alrededor de la toma de tierra se extiende hasta una gran distancia frente a las dimensiones físicas de éstas.

De una forma bastante general, la impedancia de una toma de tierra se reduce prácticamente a su resistencia.

Los efectos inductivos y capacitivos no intervienen más que para los frentes muy raídos de las ondas de corriente y solamente en el caso de conductores relativamente largos, intervienen los efectos inductivos, y en el caso de terrenos rocosos con resistividades extremadamente elevadas, intervienen los efectos capacitivos.

La circulación de la corriente de defecto en las tomas de tierra a masas en los centros de transformación de alta tensión provoca una elevación importante del potencial de estas masas con relación a tierra, cuyo valor depende de la intensidad de la corriente de defecto y de la resistencia de la toma de tierra de las masas del centro de transformación.

Uniando la carcasa del transformador a tierra tratamos de protegernos contra el riesgo de apariciones de tensiones peligrosas si se produce una cebadura entre la Alta Tensión y masa.

5.2 Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica

El establecimiento de los límites a partir de los cuales la corriente eléctrica resulta peligrosa presenta notables dificultades.

Puede dar idea de ello las dispersiones que aparecen en la determinación del umbral de sensibilidad sobre el paso de corriente eléctrica definido como el valor de la intensidad mínima que percibe una persona al hacer circular una corriente de mano a mano.

Mientras que algunos detectan la corriente con intensidad de 0,5 mA. otros no empiezan a percibir su paso hasta que ésta no alcanza valores cercanos a los 2 mA.

Se destaca que las mujeres tienen netamente una mayor sensibilidad sobre el paso de la corriente que los hombres.

5.3 La corriente a través del cuerpo humano.

El cuerpo humano por estar constituido de tejidos celulares cuyo elemento principal es el agua y diferentes sales conductivas, presenta siempre una vía fácil de conducción de corriente eléctrica.

La resistencia eléctrica del cuerpo humano varía en promedio entre 500 Ω y 1500 Ω , medidos entre las superficies de las manos y están en función del peso, la estatura..

No obstante tratándose de la circulación de corriente eléctrica de corta duración Admisible por el cuerpo humano con un tiempo de exposición mayor de 1seg. Y menor de 3 seg. las vías mas peligrosas resultan ser cuando los puntos de contacto ocurren entre manos y pies o entre manos, ya que dichos circuitos comprometen la mayor parte de órganos vitales incluyendo el corazón.

No así cuando la corriente circula entre ambos pies en que para tener peligrosidad similar debería ser casi 25 veces mayor o tener larga duración.

En el caso de intervalos superiores a un segundo o más una intensidad de corriente eléctrica de 1mA. Constituye el limite de una percepción humana; luego magnitudes superiores entre 9 y 25 mA.

Pueden ocasionar malestar y dolor con descontrol de músculos estriados; que eventualmente impide soltar un objeto energizado.

Esto puede afectar las grandes funciones fisiológicas, respiración y circulación y el paso de la corriente genera una detención respiratoria o circulatoria; y mas allá de dicho intervalo las corrientes producen contracciones en los músculos lisos, respiración difícil.

Finalmente hacia rangos de 50 a 100 mA. Produce fibrilación ventricular y muerte consecutiva si el tiempo de exposición es ≥ 3 segundos.

La trayectoria seguida por la corriente en función de los puntos de aplicación de la tensión es el primer factor importante, pues la densidad de corriente que atraviesa el corazón es muy variable según el recorrido.

Según la Norma IEC 479-84, indica los factores por los que hay que multiplicar la corriente (I_T) que atraviesa el corazón es:

$$(I_T = I.F) \quad (5,1)$$

cuando el trayecto es diferente del tipo – miembro superior derecho a miembros inferiores; el factor de corriente del corazón F se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1

Trayectoria de la corriente	F
Mano Izquierda – pie derecho	1
Mano izquierda – pie izquierdo	1
Mano izquierda – dos pies	1
Dos manos – dos pies	1
Mano derecha – mano izquierda	0,4
Mano derecha – pie izquierdo	0,8
Mano derecha – pie derecho	0,8
Mano derecha – dos pies	0,8
Mano derecha – espalda	0,3
Mano izquierda – espalda	0,7
Mano – derecha – pecho	1,3
Mano – izquierda – pecho	1,5

5.4 Criterios de duración de las corrientes accidentales.

Según pruebas de laboratorio, se ha establecido que niveles de corriente muy superiores a 100 mA. pueden ser tolerados sin ocasionar fibrilación si el tiempo de exposición es muy corto.

Las conclusiones de Dalziel muestran que el 99,5% de personas pueden soportar sin fibrilación ventricular, corrientes (I_K) de valor calculables a partir de la expresión, que toma en cuenta la constante de energía que pueda soportar el cuerpo humano.

$$I_K = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ Amp} \quad (5.2)$$

Es decir que puede ser tolerado 116 mA durante 1 seg o 367 mA durante 0,1 seg. (6 ciclos) de ello se puede desprender que elevados niveles de corriente pueden ser admitidos cuando se disponen de sistemas de protección rápidos que aclaran las fallas.

Resultando materia de análisis la decisión de utilizar los intervalos de accionamiento de los relés de alta velocidad de los relés de respaldo para el diseño de puesta a tierra; en todo caso siempre se estaría diseñando un sistema seguro para muchas situaciones de contingencia.

El accionamiento automático de cierre rápido de los interruptores modernos, pueden significar un segundo shock con un intervalo libre inferior a medio segundo de modo que dicho lapso permita a la víctima liberarse del contacto, ya que de no ser así el segundo shock aun siendo menos intenso podría ser mas peligroso y hasta ocasionar la muerte.

En conclusión, siendo muy poco frecuente y de muy corta duración las fallas en los sistemas de Alta Tensión, se debe examinar con detenimiento las mayores seguridades para el diseño de aterramiento de subestaciones y estructuras en zonas urbanas.

5.5 Potenciales Anormales

En base al criterio que relaciona magnitudes y duración de corrientes admisibles, establecidas por Dalziel, y tomando en cuenta los parámetros pasivos del circuito respectivo, se pueden calcular los potenciales netos que resultan del posible contacto del cuerpo humano con el suelo a través de los pies (Tensión de Paso) o con el suelo de la estructura puesta a tierra a través de pies y manos (Tensión de Contacto)

En realidad, este umbral no puede definirse por una sola cifra puesto que varía grandemente con las condiciones fisiológicas del sujeto y también con los parámetros físicos del accidente : tensión y tipo de contacto.

5.5.1 Tensión de Paso

Esta tensión ocurre cuando entre los miembros de apoyo (pies) aparecen diferencia de potencial, esto puede acontecer cuando los pies se encuentran sobre líneas equipotenciales diferentes.

La norma IEEE Standard 81 la define de la siguiente manera:

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

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

Se deben considerar dos situaciones

- Cuando las dimensiones de la toma de tierra son pequeñas el gradiente de tensión (G_x) respecto a una distancia x del lugar; este gradiente considerado, no dependerá más que de x e I .

En terreno homogéneo de resistividad $\rho(\Omega.m)$, el gradiente de tensión tiene por expresión:

$$G_x = 0,16 \cdot \frac{\rho \cdot I}{x^2} \text{ (V/m)} \quad (5,3)$$

- Cuando las tomas de puesta a tierra son de gran extensión y están constituidas generalmente por conductores enterrados horizontalmente y en este caso el gradiente de tensión (G_M) en la proximidad de un conductor depende, esencialmente de la corriente I que evacue por metro.

Este gradiente, es nulo en la vertiente del conductor y toma su valor máximo a uno y otro lado del mismo, a una distancia semejante a la profundidad de enterramiento h , teniendo como orden de magnitud :

$$G_M = 0,16 \cdot \frac{\rho \cdot I}{h} \text{ (V/m)} \quad (5.4)$$

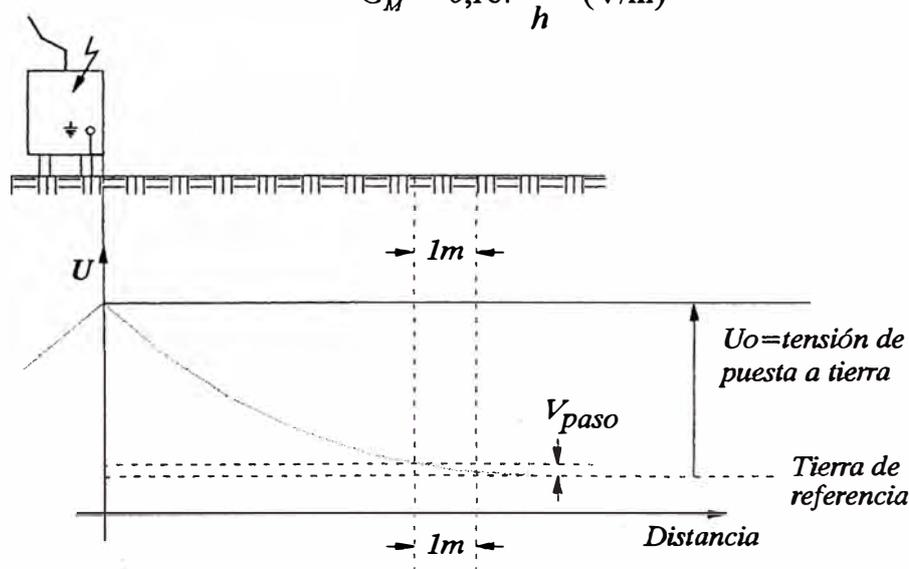


Fig. 5,1.- Perfil de potenciales en torno a un electrodo vertical de puesta a tierra

La elevación natural de potencial en lugares relativamente alejados de una toma de tierra por la que circule una fuerte corriente de falla puede ser importante; en el caso de una dispersión radial en terreno homogéneo, el potencial absoluto será:

$$U_x = 0,16 \cdot \frac{\rho \cdot I}{x} \quad (5,5)$$

De hecho los terrenos raramente son homogéneos y la propagación de la corriente cesa de ser radial a una cierta distancia de la toma de tierra, pero la fórmula anterior permite, no obstante fijar el orden de magnitud de las elevaciones de tensión.

Sin embargo debe ponerse atención a estos problemas cuando las corrientes evacuadas son muy elevadas principalmente en zonas de alta resistividad sobre todo cuando el terreno es heterogéneo y existen fallas geológicas húmedas y puedan concentrar la corriente.

El potencial de paso máximo :

$$V_{P_{MAX}} = (R_C + 2 \cdot R_T) \cdot I_K \quad (5,6)$$

donde :

R_C : Resistencia del cuerpo humano (1000 Ω)

R_T : Resistencia del terreno ($3\rho_S$)

I_K : Corriente accidental máxima admisible ($I_K = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$)

$$V_{P_{MAX}} = (1000 + 6 \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (\text{V}) \quad (5,7)$$

donde :

ρ_S : Resistividad del suelo ($\Omega\text{-m}$)

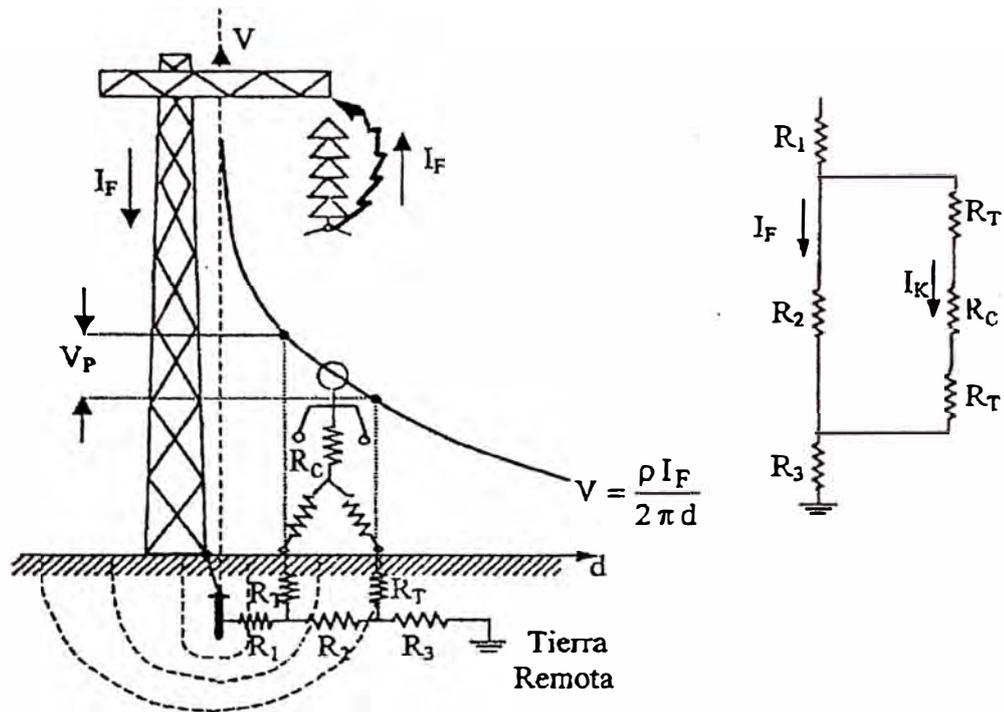


Fig. 5.2 Esquema de tensión de paso

5.5.2 Tensión de Contacto

En la mayor parte de los casos, el peligro más grande para las personas durante la circulación de una corriente de puesta a tierra no resulta de las tensiones de paso, sino del doble contacto del cuerpo por una parte, con una estructura unida a los electrodos de tierra por su superficie de apoyo o fijación y por otra al terreno a una distancia del orden de un metro.

Dicho potencial tendría una magnitud supeditada a la distancia del alejamiento entre los puntos a diferente potencial interceptado.

Como un caso especial de las tensiones de toque deben considerarse los Potenciales Transferidos que corresponderían a los shock sufridos dentro de una subestación cuando una persona parada toca una estructura o carcasa puesta a tierra en un punto alejado de unos metros; un caso de sumo cuidado representa el contacto de un objeto conductor o estructura

conectada a tierra, estando fuera de la subestación, en estos casos la tensión de shock será de magnitud total a la ocasionada por la falla.

$$V_{T_{max}} = (R_C + \frac{R_T}{2}) \cdot I_K \quad (5.8)$$

donde :

R_C : Resistencia del cuerpo humano (1000Ω)

R_T : Resistencia del terreno ($3\rho_S$)

I_K : Corriente accidental máxima admisible ($I_K = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$)

$$V_{T_{max}} = (1000 + \frac{3 \cdot \rho_S}{2}) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ (V)} \quad (5.9)$$

donde:

ρ_S : Resistividad del suelo ($\Omega\text{-m}$)

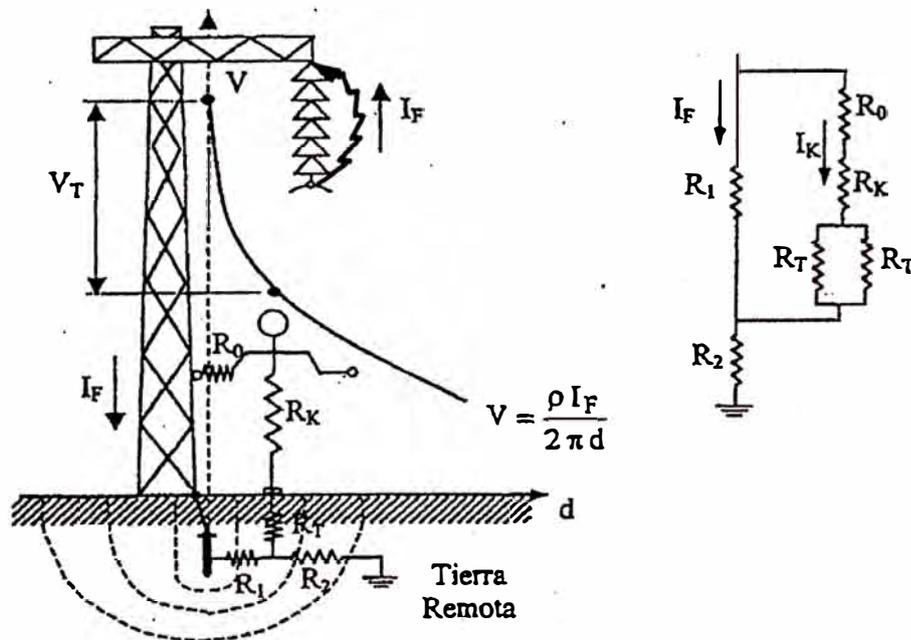


Fig. 5.3 Esquema de tensión de contacto

5.6 Mejora de aislamiento - uso de grava

Como el área de la subestación es mas peligroso; el suelo esta revestido por una capa de grava esta le confiere mayor calidad de aislamiento del contacto de los pies con el suelo.

Esta capa representa un estrato adicional como una capa superficial del suelo, por lo tanto debe hacerse una corrección a la resistividad del suelo ρ_s .

El factor de corrección esta dado por:

$$C_s = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + (2.n \cdot \frac{h_s}{0,08})^2}} \right] \quad (5.10)$$

donde:

h_s : Espesor de la capa generada por la piedra chancada (m)

$$K = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s} \quad (5.11)$$

ρ_a : Resistividad del terreno sin considerar la piedra chancada

ρ_s : Resistividad de la piedra chancada

$C_s = 1$; la resistividad de la grava es igual a la resistividad del suelo.

Por lo que :

$$V_{T_{max}} = (1000 + 1,5 \cdot C_s \cdot \rho_s) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (V) \quad (5.12)$$

$$(V) \quad (5.13)$$

5.7 Potenciales en malla de puesta a tierra

Definido como potencial de toque máximo; su aparición corresponde al comportamiento de la puesta a tierra, durante la dispersión de grandes corrientes (falla, rayo) y depende de parámetros activos del circuito

Aparece al circular una corriente elevada por la malla de puesta a tierra; dado que la misma, está desarrollada en un plano horizontal y es un sistema reticulado formado por conductores enterrados formando hileras longitudinales (horizontales) paralelas cuya distancia de separación es e_b .

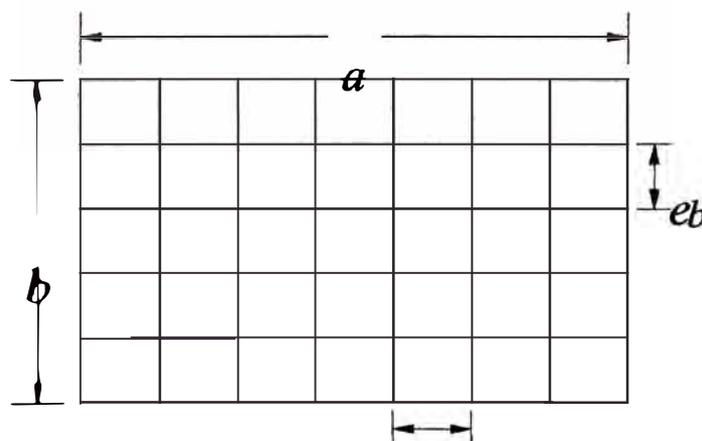
Así mismo también esta formado por conductores enterrados formando hileras transversales paralelas cuya distancia de separación es e_a .

Para comprobar si una malla de puesta a tierra cumple con proporcionar los parámetros máximos admisibles de tensión de paso y de toque en una malla se llevara a cabo una estimación de los mismos parámetros para el caso de dicha malla compuesta por hileras de conductores.

5.7.1 Tensión de paso en una malla

Puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$V_{P_{MALLA}} = K_S \cdot K_I \cdot \rho \cdot \frac{I_F}{L_C} \quad (\text{V}) \quad (5.14)$$



$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{e+h} + \frac{1-0,5^{(N-2)}}{e} \right] \quad (5.15)$$

K_s : Coeficiente que introduce en el calculo una mayor diferencia de potencial entre dos puntos distanciados 1m. Este coeficiente relaciona todos los parámetros de la malla que inducen tensiones en la superficie de la tierra.

N : Numero de conductores en paralelos a lo largo de los lados de la malla.

$$N = \text{Max.}(N_a, N_b)$$

$$N_a = \frac{a}{e_a} + 1 \quad N_b = \frac{b}{e_b} + 1 \quad (5.16)$$

e : Espaciamiento entre conductores paralelos a lo largo de la malla

$$e = \text{Min.}(e_a, e_b)$$

h : Profundidad de la malla

ρ : Resistividad del terreno

I_F : Corriente de falla

L_C : Longitud total del conductor de la malla

K_I : Coeficiente de irregularidad

$$K_I = 0,65 + 0,172.N \quad (5.17)$$

5.7.2 Tensión de contacto en una malla

Puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$V_{T\text{MALLA}} = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_I \cdot I_F}{L_C} \quad (\text{V}) \quad (5.18)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left[\frac{e^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_H}{K_h} \text{Ln} \left[\frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot N - 1)} \right] \right] \quad (5.19)$$

K_m : Coeficiente que agrupa la influencia que genera la profundidad de enterramiento de la malla (h), el diámetro del conductor (d) y el espaciamiento entre los conductores (e).

$$e = \text{Max.}(e_a, e_b)$$

h : Profundidad de la malla

d : diámetro del conductor de la malla (m)

N : Transformación de una malla rectangular a una malla cuadrada con N_x conductores paralelos en ambos lados

I_F : Corriente de falla

L_C : Longitud total del conductor de la malla

ρ : Resistividad del terreno

$$\boxed{\begin{aligned} N &= \sqrt{N_a \cdot N_b} \\ N_a &= \frac{a}{e_a} + 1 & N_b &= \frac{b}{e_b} + 1 \end{aligned}} \quad (5.20)$$

- Para mallas con electrodos instalados a lo largo de su perímetro ó unos cuantos instalados en la malla propiamente ó ambos.

$$K_H = 1$$

- Para mallas con algunos electrodos instalados a lo largo de su perímetro ó sin electrodos instalados en la malla propiamente.

$$K_{II} = \frac{1}{(2.N)^{\left(\frac{2}{N}\right)}} \quad (5.21)$$

K_h : Factor de corrección de profundidad

$$\text{donde: } h_0 = 1 \quad K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (5.22)$$

K_I : Coeficiente de irregularidad que agrupa los efectos de una distribución uniforme de la corriente por la malla.

$$K_I = 0,65 + 0,172.N \quad (5.23)$$

5.7.3 Tensión de contacto a cerca perimetral de una malla de puesta a tierra

Dependiendo del gran riesgo, localización y característica de la malla de puesta a tierra se debe decidir adecuadamente el modo como será cercada.

Usualmente se acostumbra a aislar la malla a través de un:

Muro de ladrillos.

Cerca metálica.

La cerca metálica es económica, pero existe un problema ya que está es sometida a tensiones originadas por la corriente de corto circuito de la subestación.

Así que cualquier persona que tenga contacto con la cerca metálica esta sujeto a una diferencia de potencial ó tensión de contacto que puede ser calculada por la siguiente expresión:

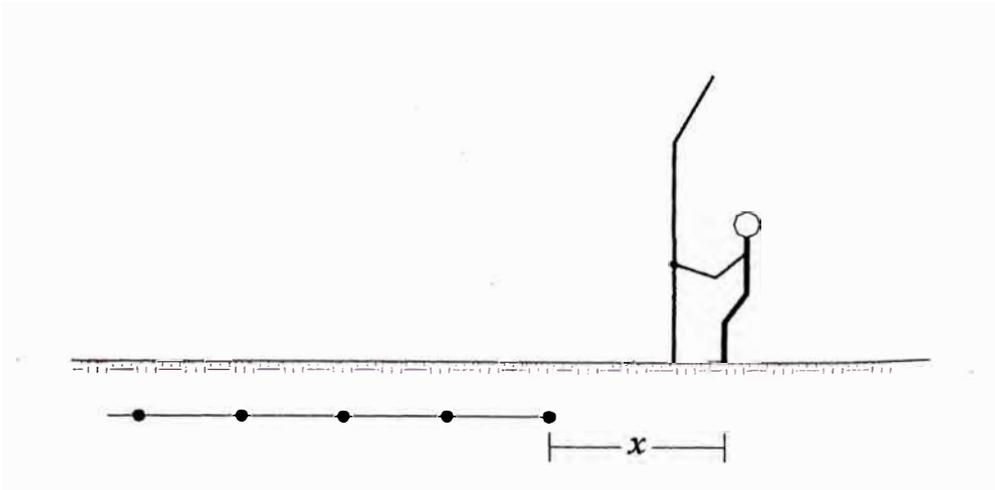
$$V_{T_{CERCA}} = \frac{\rho \cdot K_C \cdot K_I \cdot I_F}{L_C} \quad (V) \quad (5.24)$$

$$K_C = \frac{1}{2\pi} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{(h^2 + x^2) \cdot [h^2 + (e+x)^2]}{h \cdot d \cdot (h^2 + e^2)} \right] + 2 \text{Ln} \left\{ \left[\frac{2 \cdot e + x}{2 \cdot e} \right] \left[\frac{3 \cdot e + x}{3 \cdot e} \right] \dots \left[\frac{(N-1)e + x}{(N-1)e} \right] \right\} \right\} \quad (5.25)$$

donde :

x : Distancia desde la malla hasta el punto considerado (m)

$$N = \text{Max.}(N_a, N_b)$$



5.8 Utilización de Electrodo en los Bordes de la Malla

Modifica la ecuación del calculo de V_{PMALLA} por la siguiente :

$$V_{PMALLA} = \frac{\rho \cdot K_S \cdot K_I \cdot I_F}{L_C + 1,15 \cdot L_E} \quad (\text{V}) \quad (5.26)$$

Modifica la ecuación del calculo de V_{TMALLA} por la siguiente :

$$V_{TMALLA} = \frac{\rho \times K_m \times K_I \times I_F}{L_C + (1,15 \times L_E)} \quad (\text{V}) \quad (5.27)$$

Modifica la ecuación del calculo de V_{TCERCA} por la siguiente :

$$V_{TCERCA} = \frac{\rho \cdot K_C \cdot K_I \cdot I_F}{L_C + 1,15 \cdot L_E} \quad (\text{V}) \quad (5.28)$$

donde :

L_C : Longitud total del conductor

$$L_E = L_V \cdot n$$

L_V : Longitud de cada electrodo

n : numero de electrodos a usar

L_V : Longitud de cada electrodo

n : numero de electrodos a usar

5.9 Verificación de Potenciales Máximos

En todo diseño de una red de Puesta a Tierra uno de los parámetros importantes a ser verificados son los valores de potencial de toque y paso de una malla y deben cumplir lo siguiente:

$$V_{T_{MALLA}} \leq V_{T_{MAX}} \qquad V_{P_{MALLA}} \leq V_{P_{MAX}} \qquad (5.29)$$

5.10 Longitud del Conductor de la Malla de Puesta a Tierra

$$L_C \geq \frac{K_m \times K_I \times \rho_{EQ} \times I_F}{V_{T_{MAX}}} \quad (\text{m}) \qquad (5.30)$$

I_F : Corriente máxima de falla a tierra

t : Tiempo durante el cual fluye la corriente de falla

ρ_{EQ} : Resistividad equivalente del terreno ($\Omega\text{-m}$)

5.11 Limitaciones de la ecuación del potencial de paso en la malla

Las expresiones vistas para el calculo $V_{P_{MALLA}}$ tiene algunas limitaciones que deben ser consideradas para obtener valores confiables.

$$N \leq 25 \qquad d < 0,25h \qquad 0,25m \leq h \leq 2,5m \qquad e \geq 2,5m$$

➤ Para redes con mallas regulares $K_I \leq 2$

➤ Para Redes con mallas irregulares $2 \leq K_I \leq 2,5$

5.12 Consideraciones en la medida de potenciales

Dado que los potenciales peligrosos en las puesta a tierra transitables surgen con corrientes de falla o de rayo; para las medidas se requiere la inyección de corrientes

proporcionales según el parámetro de diseño (1% de I_{CC}); para ello se deberá considerar lo siguiente :

- La aplicación del mismo esquema de medición de resistencia de puesta a tierra; existirá un circuito de corriente donde (C_1 y C_2) permanecerán fijos; C_1 en la puesta a tierra y C_2 en una puesta a tierra auxiliar y los electrodos de potencial (P_1 y P_2) son los que se trasladan (ver fig. 5.4).
- La distancia de C_2 desde la puesta a tierra al igual que para medir (R), depende del valor de (r_0), cuanto mas grande sea, será mejor.
- Previamente se deberán trazar en el suelo las líneas directrices de medida y ubicar en ellos los puntos de toma de diferencia de potencial.
- La diferencia de potencial entre (P_1 y P_2) a intervalos de 1.0 m, en redes de puesta a tierra se obtienen sobre dos directrices ortogonales intermedias o simétricas a las hileras del cuadrillado de la red, cada configuración de puesta a tierra tendrá directrices propias.

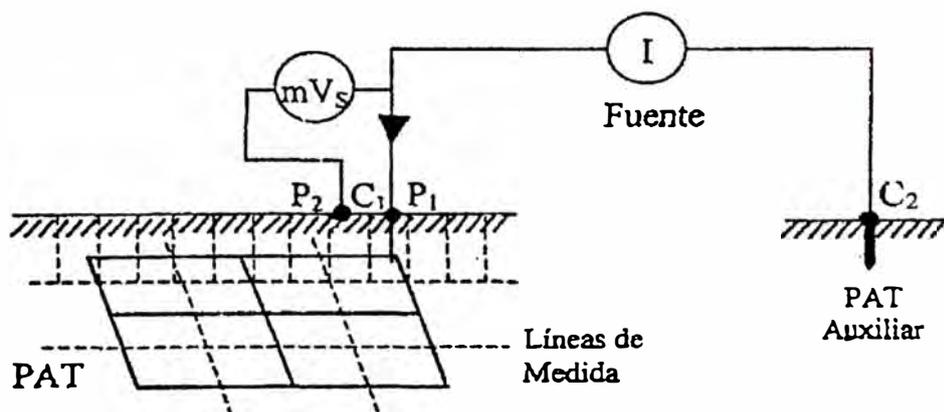


Fig. 5.4 Medición de potencial

- Los electrodos P_1, P_2 que simulan los pies (10 x 20 cm) serán planos ($S \geq 200 \text{ cm}^2$) con una interfase de optimo contacto con el suelo; soportando entre ambos un peso

mayor a 50 Kg. repartido en partes iguales.

- Las diferencia de potencial obtenidas con la corriente de medida (I), serán convertidas al valor real multiplicando por el *Factor de Proporcionalidad* ($k = \frac{I_{cc}}{I}$), relación entre la (I_{cc}) calculada para esa localización y la (I) de medida.

5.13 Consideraciones en las medidas de tensión de toque y paso

Las Puestas a Tierra de Protección, generalmente están conformadas por electrodos horizontales en forma de redes malladas o bien en otras formas mas simples, formando circuitos cerrados se verifican midiendo en el suelo las tensiones, susceptibles de aparecer en circunstancias de falla.

Las normas cubren los casos convencionales de puestas a tierra en suelos de resistividad que van de 100 a 600 Ω -m, dotados de humedad natural o recarga estacional; pero recomiendan:

- La aplicación del método de caída de potencial, con electrodos (P_1) y (P_2) sobre la superficie del suelo entre los cuales se conecta un *voltímetro de alta resistencia interna (1000 Ω)*; siendo esta mayor se adaptara una resistencia en paralelo.
- Las mediciones se hacen en el suelo. Las tensiones de toque a distancias de 1 m desde una masa, o bien desde la proyección del conductor enterrado y las tensiones de paso, entre intervalos sucesivos de 1 m.
- La aplicación de un peso mínimo de 25.5 Kg. sobre cada electrodo explorador plano, cuya base tiene un paño húmedo. En suelos de tierra se puede clavar una varilla de medición por cada pie a 0,2 m de profundidad.

- La aplicación de una corriente alterna no inferior al 1% de la corriente de diseño o no menor a 50 A (sistemas con neutro sólido a tierra) y 5 A (Sistemas con Neutro Aislado).

Las tensiones medidas se trasladan a valor real multiplicando por el *Factor de*

$$\text{Proporcionalidad } (k = \frac{I_{DISEÑO}}{i_{MEDIDA}}).$$

- En el caso de puestas a tierra no convencionales (suelo de alta resistividad mayores a 1000 Ω -m, sin recarga de humedad), la corriente de medida no debe superar los 15 A. para no desecar el suelo pues se incrementaría la resistencia de puesta a tierra de la Red.
- Las Medidas deben hacerse en tiempo mínimo sobre todo cuando la Resistividad del suelo es alta, para ello se prepara un mapa de puntos de medida concordante con la instalación, el cual se traslada al suelo.
- El mapa de puntos de medida, debe considerar como mínimo una trayectoria longitudinal y una transversal, en partes típicas o en una esquina libre o despejada de instalaciones de superficie.
- Cuando la red de aterramiento no tiene simetrías axiales, el mapa se elabora para medidas en las localizaciones libres y en los principales puntos de trabajo o transito de personas.

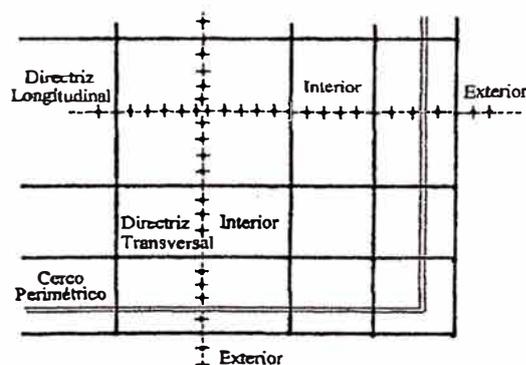


Fig. 5.5 Líneas de Medición

5.14 Medidas de Potencial en Subestaciones Eléctricas de MT / BT.

Cualquiera que sea el tipo de subestación o el soporte aéreo la cobertura de la puesta a tierra al dispersarse en el suelo una corriente de falla o de rayo, originara los gradientes de Toque y de Paso, cuya medida requiere :

- Un esquema de cableados similar al de la medida de la resistencia de puesta a tierra, con mínima resistencia de interfase electrodo-suelo en (C_2) y también en (P_1) y (P_2) .
- Una fuente de corriente estable (I_0) que pueda simular proporcionalmente en amplitud a aquella que ocurre debido a una falla (I_{CC}) o un rayo I_R .
- Electrodo planos según estipula la norma; a falta de ellos se pueden usar electrodos tipo varilla clavados a 0,20 m de profundidad en suelo firme.
- En unos casos con una fuente autónoma (I_0) , se miden los potenciales (V_m) proporcionales, y en otros casos con la fuente (I) de los instrumentos portátiles, se miden las resistencias reales (R_m) ; en ambos casos se siguen trayectorias simétricas equidistantes o alejándose de los electrodos de puesta a tierra.
- Los resultados que se leen en mV, se trasladaran a voltios considerando la (I_{CC}) real, con el *Factor de Proporcionalidad* $(k = \frac{I_{CC}}{I_0})$;

$$\boxed{V_T = V_{mI} \times k \qquad V_P = V_{mP} \times k} \qquad (5.31)$$

- Cuando los resultados se leen como resistencia real (R_m) en ohmios, se trasladan a voltios multiplicándolos por la corriente de corto circuito (I_{CC}) en dicho punto;

$$V_T = R_{mi} \times I_{CC} \quad V_P = R_{mp} \times I_{CC} \quad (5.32)$$

Se estima que el intervalo de tiempo en que los potenciales máximos permisibles a frecuencia industrial debido al aclaramiento de una falla son mucho menores y conociendo que 50 V es la tensión admisible por el cuerpo humano durante tres seg. Se puede admitir una:

- Tensión de Toque: 65 Voltios - Tensión de Paso: 90 Voltios

Antes de las mediciones, no deberá existir diferencia de potencial entre la masa de la subestación eléctrica o la bajada de puesta a tierra y el suelo, significaría la presencia de falla no franca del aislamiento; en tales circunstancias primero debe corregirse la falla, antes de hacer las medidas.

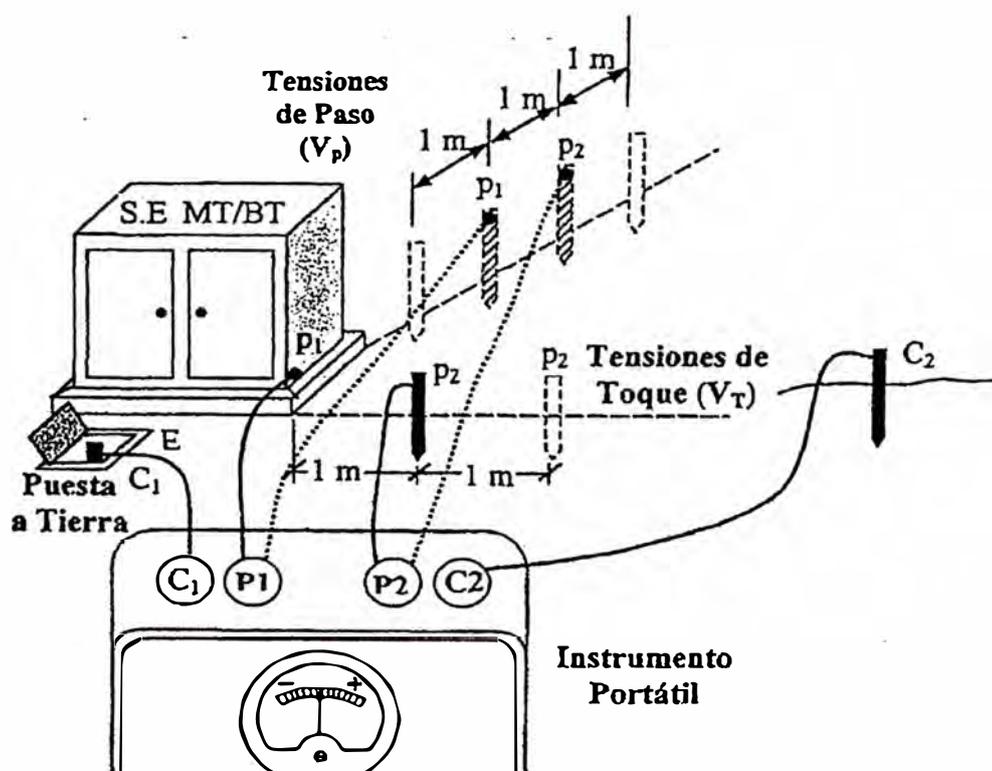


Fig. 5.6 Medición de potenciales en SS.EE

CAPÍTULO VI

SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA COMPUESTOS

La mayor parte de las puesta a tierra usadas en la practica consisten de buna combinación de jabalinas y conductores.

Para ciertas combinaciones sencillas y simétricas es posible deducir expresiones relativamente exactas para calcular la resistencia de puesta a tierra, recurriendo a métodos básicos similares a los empleados para los electrodos elementales.

6.1 Método básico solución de sistemas compuestos

Una Forma de determinar la resistencia de la puesta a tierra de una combinación de electrodos es recurrir al método básico empleado para los electrodos elementales.

Este método consiste en determinar la expresión del potencial en cualquier punto del terreno y a continuación, calcular este para el contorno de uno de los electrodos componentes del sistema.

De lo descrito anteriormente se desprende que determinar la resistencia de puesta a tierra implica determinar el potencial de esta para una cierta corriente total.

A su vez, determinar el potencial exige conocer la magnitud de cada una de las corrientes que lo producen, el método general para la solución de sistemas compuestos consiste en:

- Una configuración de electrodos elementales establecer ecuaciones de potencial inducido en cada uno de ellos, estos potenciales serán producidos por las propias corrientes disipadas y por las corrientes que disipan los otros electrodos.

- Resolver el sistema de ecuaciones para determinar la corriente que disipa cada electrodo.
- Calcular el potencial de cualquiera de los electrodos el cual es igual al potencial de la puesta a tierra.
- La resistencia será igual al cociente entre el potencial de la puesta a tierra y la corriente total disipada.

Dos parámetros son importantes en el cálculo del sistema compuesto estos son:

- La resistencia *propia* de un electrodo
- La resistencia *mutua* entre electrodos.
- La *resistencia propia de un electrodo* se define como el cociente entre el potencial adquirido por un electrodo único y la corriente que esta disipa a tierra por lo tanto coincide con el valor de resistencia deducido para el electrodo individual.
- La *resistencia mutua entre dos electrodos* se define como el cociente entre el potencial inducido en uno de ellos y la corriente única disipada a tierra por el otro electrodo.

6.2 Sistema de dos electrodos en paralelo

Para el calculo de la resistencia de una combinación simple de electrodos, se determinará primeramente la resistencia de dos jabalinas de iguales dimensiones, unidas mediante un conductor *aislado* del terreno.

Aceptando la suposición que el potencial del conjunto es el determinado para ($Z=0$) basta encontrar la expresión del potencial sobre la superficie del terreno (fig. 6.1).

El potencial en el punto “P” vale:

$$V_P = \frac{\rho}{2\pi} \left(\int \frac{dI_1}{r_1} + \int \frac{dI_2}{r_2} \right) \quad (6.1)$$

donde:

$$dI_1 \approx \left(\frac{I_1}{L}\right) dZ_1 \quad (6.2)$$

$$dI_2 \approx \left(\frac{I_2}{L}\right) dZ_2 \quad (6.3)$$

Reemplazando y resolviendo tenemos :

$$V_P = \frac{\rho \cdot I}{4 \pi \cdot L} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + (q+d)^2 + m^2}}{\sqrt{(q+d)^2 + m^2}} \right] + \text{Ln} \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + (q-d)^2 + m^2}}{\sqrt{(q-d)^2 + m^2}} \right] \right\} \quad (6.4)$$

Esta expresión permite determinar el potencial en cualquier punto sobre el terreno.

El potencial del conjunto se puede determinar haciendo:

$q = d + a$; ($m=0$) contorno de la barra 2 ; o bien

$q = d - a$; ($m=0$) contorno de la barra 1

Tomando la primera expresión para evaluar el potencial V_0 por lo que se tiene:

$$V_0 = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot L} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + (2d+a)^2}}{\sqrt{(2d+a)^2}} \right] + \text{Ln} \left[\frac{L + \sqrt{L^2 + a^2}}{\sqrt{a^2}} \right] \right\} \quad (6.5)$$

Considerando que $L \gg a$; $d \gg a$ se tiene:

$$2d + a \approx 2d$$

$$L^2 + a^2 \approx L^2$$

por lo que:

$$V_0 = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot L} \left\{ \text{Ln} \left[\frac{(L + \sqrt{L^2 + 4d^2})(2L)}{2da} \right] \right\} \quad (6.6)$$

Se sabe que $D = 2d$

$$V_0 = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot L} \text{Ln} \left[\frac{2L(L + \sqrt{L^2 + D^2})}{D \cdot a} \right] \quad (6.7)$$

La resistencia de las jabalinañ en paralelo será:

$$R = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \text{Ln} \left(\frac{2L}{a} \right) + \frac{\rho}{2\pi \cdot L} \text{Ln} \left(\frac{L + \sqrt{L^2 + D^2}}{D} \right) \right\} \Omega \quad (6.8)$$

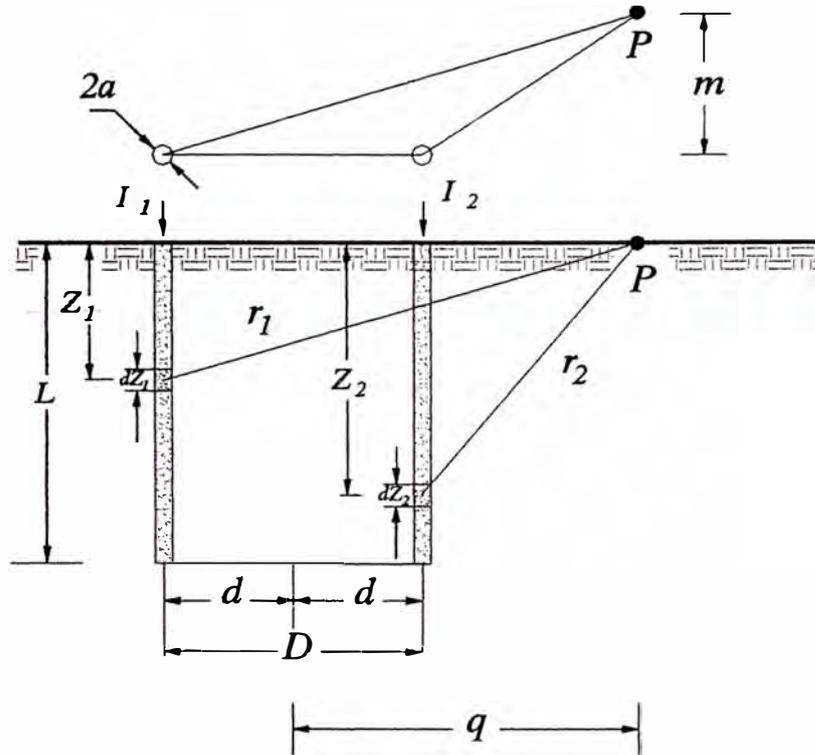


Fig. 6.1 Disposición de dos electrodos en paralelo

Siendo:

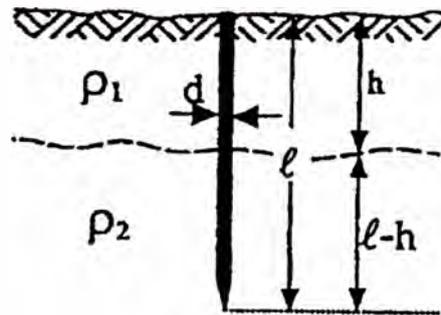


Fig. 6.2

$$\rho = \rho_{EQ} = \frac{l \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2 \cdot h + \rho_1 \cdot (l - h)} \Omega \cdot m \quad (6.9)$$

6.3 Electrodo Múltiples

Una cuestión de primera importancia es la relativa a la determinación de la resistencia equivalente de un electrodo compuesto por n electrodos individuales; en principio del mismo tipo y con la misma dimensión enterrados en un terreno homogéneo en forma lineal o malla regular. Si se piensa primero en un arreglo de varios electrodos separados entre si por una distancia inconmensurables resulta lógico aceptar que el campo de corriente de cada uno de ellos se desarrolla libremente el uno del otro.

Pero en la realidad los electrodos elementales de un electrodo múltiple se encuentran localizados a distancias finitas uno de otro por lo que cada uno de ellos restringe debido a la extensión de sus líneas de corriente el volumen de terreno vital del electrodo vecino causándose inducción mutua lo cual origina un calentamiento adicional.

Esta resistencia equivalente de los electrodos en conectados en paralelo esta determinado por la siguiente expresión:

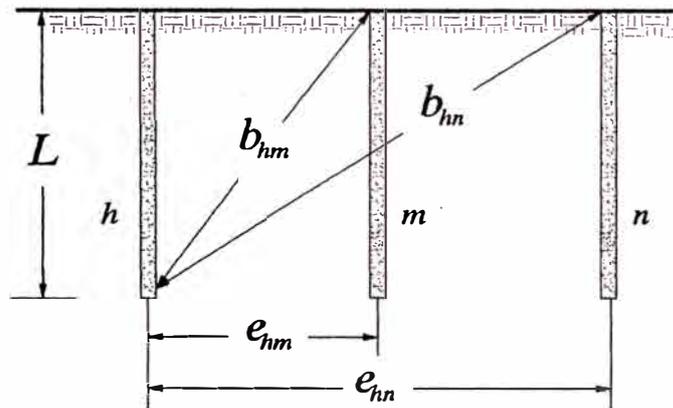


Fig. 6.3

$$R_{hm} = \frac{\rho}{4\pi L} Ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2} \quad (6.10)$$

$$R_h = R_{hh} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq h}}^N R_{hm} \quad (6.11)$$

donde:

R_h : Resistencia eléctrica resultante.

N : Numero de Jabalinas dispuestos en paralelos

R_{hh} = Resistencia eléctrica propia de la puesta a tierra (R_0).

R_{hm} : Resistencia eléctrica del electrodo “h” debido a la influencia generada por cada uno de los otros “n” electrodos.

e_{hm} : Distancia de separación entre el electrodo “h” y el electrodo “m” ($h \neq m$).

Haciendo el cálculo para todos los electrodos del conjunto se tendrá los valores de resistencia de cada electrodo

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + \dots\dots\dots R_{1n} \\
 R_2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + \dots\dots\dots R_{2n} \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 &\quad \cdot \\
 R_n &= R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + R_{n4} + \dots\dots\dots R_{nn}
 \end{aligned}$$

$$R_{EQ} = \frac{1}{\sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{1}{R_h}\right)} \quad (6.12)$$

6.4 Electrodos Dispuestos en Arreglo Circular

Cuando el electrodo compuesto tiene a sus electrodos elementales cada uno de ellos con resistencia R_0 distribuidos simétricamente uno al lado de otro sobre la circunferencia

(ver fig. 6.4) de un círculo como se muestra, la corriente que cada uno de ellos conducirá a tierra será la enésima parte de la corriente total

Por lo que la resistencia compuesta del arreglo será:

$$\delta = \frac{\text{Ln}\left(\frac{2L}{r_0}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{\left(\frac{2L}{a}\right)^n - \left(\frac{a}{2L}\right)^n}{\left(\frac{nr_0}{a}\right)}\right)} \quad (6.13)$$

$$R_{\alpha} = \frac{1}{n} \cdot R_0 \quad R_0' = \frac{R_{\alpha}}{\delta} \quad \Omega \quad (6.14)$$

donde :

n : Numero de Jabalinas R_0 : Resistencia de un electrodo a nivel del suelo

r_0 : Radio del electrodo (m) R_0' : Req. de electrodo múltiple arreglo circular.

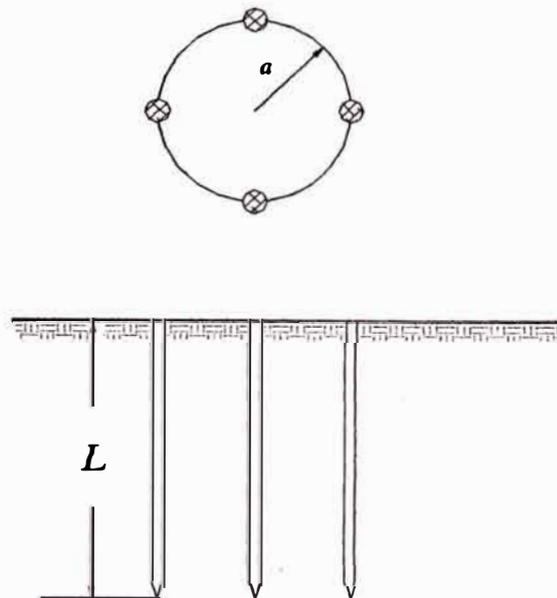


Fig. 6.4

6.5 Electrodo Tipo Jabalina Dispuestos en Malla – Método de Schwarz

Mediante este método se calcula la resistencia de una malla de jabalinas

$$R = \frac{\rho}{2\pi N L} \left[\ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1 + \frac{2K_1 L}{\sqrt{S_{MALLA}}} (\sqrt{N} - 1)^2 \right] \Omega \quad (6.15)$$

donde :

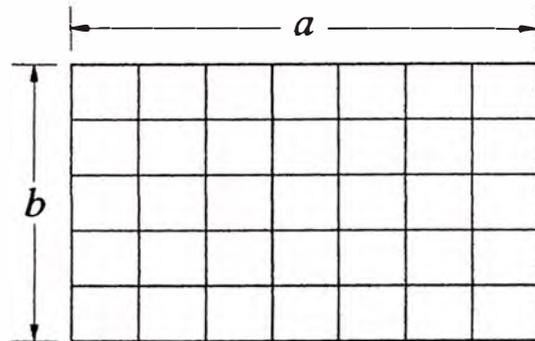
ρ : Resist. Equivalente del terreno

L : Longitud de Jabalina (m)

N : Numero de Jabalinas

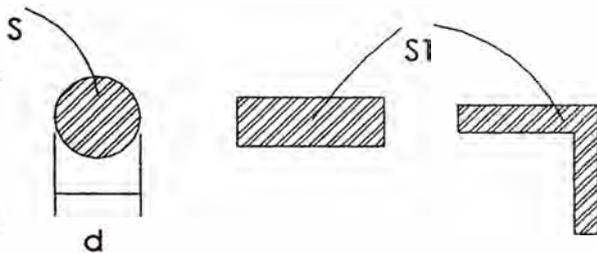
a : Radio de la Jabalina (m)

S_{MALLA} : Area de la malla.



$$K_1 = 1.41 - \frac{2,3h}{\sqrt{S_{MALLA}}} - 0,04 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \quad (6.16)$$

En el caso de electrodo tipo pletina (S_1) se debe efectuar el calculo del área de su sección transversal e igualar al área del círculo (S).



$$S_1 = S = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_1}{\pi}} \quad (6.17)$$

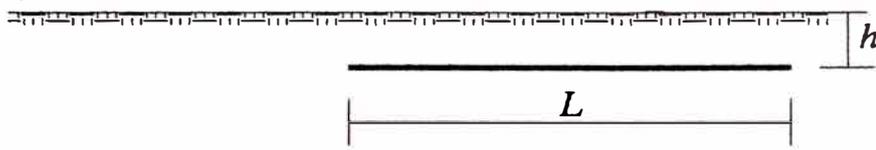
6.6 Sistemas de Contrapesos

Este tipo de electrodo es de interés, no tanto por la resistencia a la propagación que se consigue, en relación con la longitud utilizada, sino en particular por la eficiente dispersión de corriente de rayo (onda de impulso).

Por lo que encuentra especial utilización en la puesta a tierra de torres de líneas de transmisión de alta tensión, pero también en toda instalación de protección contra la caída de rayos.

6.6.1 Conductor dispuesto en forma horizontal

La resistencia de una puesta a tierra de un conductor enterrado horizontalmente en el suelo como se muestra en el gráfico esta dada por la siguiente formula:



$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L^2}{d \cdot h} \right) - 2 + \frac{2h}{L} - \left(\frac{h}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \Omega \quad (6.18)$$

donde:

L : Longitud del conductor (m) d : Diámetro del conductor (m)

h : profundidad de enterramiento (m)

6.6.2 Conductores en paralelo dispuestos en forma horizontal

Para el caso de dos conductores de igual longitud y enterrados a igual profundidad “h” (ver fig. 6.4) el análisis corresponde a la aplicación del método básico; para comprender en forma sencilla el desarrollo de la expresión referente a la resistencia a tierra se muestra la gráfica a continuación:

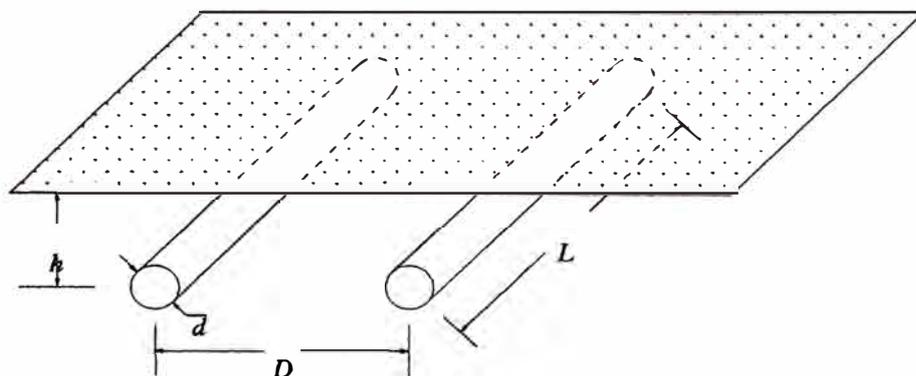


Fig. 6.5

$$R = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\rho}{4\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{4L^2}{d.h} \right) + \frac{\rho}{4\pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{4(L^2 + D^2)}{D\sqrt{D^2 + 4h^2}} \right) \right\} \Omega \quad (6.19)$$

La resistencia de dos conductores que divergen a partir de un punto común según su configuración es :

➤ **Disposición perpendicular**

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{L^2}{d.h} \right) - 0,24 + 0,86 \left(\frac{h}{L} \right) + 1,66 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 10,85 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \Omega \quad (6.20)$$

➤ **Disposición estrella de tres ramas**

$$R = \frac{\rho}{3\pi L} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{L^2}{d.h} \right) + 1,08 - 0,836 \left(\frac{h}{L} \right) + 3,81 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 13,82 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \Omega \quad (6.21)$$

➤ **Disposición estrella de seis ramas**

$$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{L^2}{d.h} \right) + 6,86 - 12,51 \left(\frac{h}{L} \right) + 28,13 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 125,4 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \Omega \quad (6.22)$$

➤ **Disposición estrella de ocho ramas**

$$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{L^2}{d.h} \right) + 10,98 - 22,04 \left(\frac{h}{L} \right) + 52,16 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 299,52 \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right] \Omega \quad (6.23)$$

L : longitud de cada segmento a partir de la conexión

d : Diámetro del conductor

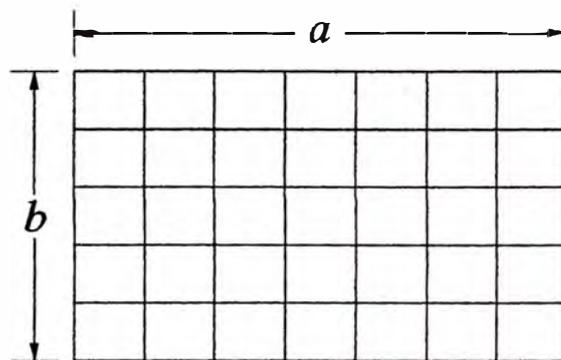
6.7 Resistencia Eléctrica de Malla Reticulada.

Uno de los diseños de los sistemas de puesta a tierra para Subestaciones Eléctricas esta basado en el modelo de malla reticulada, donde se utiliza una gran longitud de conductor comúnmente de 95 mm².

A continuación se presenta diferentes formulaciones del cálculo de resistencia para malla reticulada

6.7.1 Fórmula de Schwartz

La fórmula se basa en dos parámetros que son K_1 y K_2 los cuales han sido obtenidos en forma experimental con una aceptable aproximación en mallas rectangulares



$$K_1 = 1.41 - \frac{2,3 \cdot h}{\sqrt{S_{MALLA}}} - 0,04 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \quad (6.24)$$

$$K_2 = 5,50 - \frac{8 \cdot h}{\sqrt{S_{MALLA}}} + \left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S_{MALLA}}}\right) \left(\frac{a}{b}\right) \quad (6.25)$$

$$R_{mr} = \frac{\rho}{\pi L_T} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{2 L_T}{h^2} \right) + K_1 \left(\frac{L_T}{\sqrt{S_{MALLA}}} \right) - K_2 \right\} \Omega \quad (6.26)$$

donde :

h : Profundidad de enterramiento de la malla

ρ : Resistividad Equivalente del terreno

L_T : Longitud total de los conductores que forman la malla

$h^l = \sqrt{d \cdot h}$ para malla con profundidad de enterramiento h .

$h^l = 0,5$; para malla en la superficie ($h = 0$).

d : Diámetro del conductor (m)

S_{MALLA} : Area de la malla.

6.7.2 Fórmula de Sverak

Es una formula basada en el área de la malla y la longitud del conductor y nos permite el cálculo de la resistencia de puesta a tierra de una malla reticulada de con una pequeña variación respecto a la fórmula de Schwartz

$$R = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot S_{MALLA}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{S_{MALLA}}}} \right) \right] \Omega \quad (6.27)$$

donde:

h : Profundidad de enterramiento de la malla

ρ : Resistividad Equivalente del terreno

L_T : Longitud total de los conductores que forman la malla

6.7.3 Fórmula de Laurent

Dedujo una fórmula que se puede usar como calculo preliminar en el diseño final de una red de puesta a tierra.

$$r = \sqrt{\frac{S_{MALLA}}{\pi}} \quad R = \rho_{EQ} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot r} + \frac{1}{L} \right) \Omega \quad (6.28)$$

ρ : Resistividad Equivalente del terreno

L_T : Longitud total de los conductores que forman la malla

r : Radio de un círculo de igual superficie que el de la malla

6.7.4 Formula de Dwight

Al igual que Laurent es una formula de calculo preliminar de la resistencia de puesta a tierra para mallas.

$$R = \frac{\rho_{EQ}}{4} \sqrt{\frac{\pi}{S_{MALLA}}} \Omega \quad (6.29)$$

6.8 Resistencia eléctrica sistema compuesto – Método de Schwartz

➤ Malla reticulada : Ver formula (6.25)

➤ Jabalinas:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi.nl} \left\{ \text{Ln}\left(\frac{8.l}{a}\right) - 1 + \frac{2K_1 l}{\sqrt{S}} (n-1)^2 \right\} \quad (6.30)$$

➤ Resistencia mutua

$$R_M = R_{mr} - \frac{\rho}{\pi.L_T} \left[\text{Ln}\left(\frac{l}{\sqrt{h.d}}\right) - 1 \right] \Omega \quad (6.31)$$

donde:

R^* : Resistencia de malla reticulada

h : Profundidad de enterramiento de la malla

d : Diámetro del conductor (m)

L_T : Longitud total del conductor que forman la malla

l : Longitud del electrodo (m)

6.9 Resistencia total

$$R_T = \frac{R_{mr} \cdot R_2 - R_M^2}{R_{mr} + R_2 - 2 \cdot R_M} \Omega \quad (6.32)$$

donde:

R_{mr} : Resistencia de malla reticulada

R_2 : Resistencia de electrodos Dispuestos en Malla

R_M : Resistencia mutua

6.10 Determinación de la sección del conductor de puesta a tierra.

El calibre del conductor depende del valor de la corriente de falla (corto circuito), el tiempo de duración de está y el material del que esté hecho el conductor.

El código ha establecido valores mínimos que tienen la capacidad térmica para disipar la corriente de falla impuesta.

El calibre se puede determinar utilizando diferentes métodos utilizando en forma práctica los valores del siguiente cuadro

Tabla 6.1

Tiempo de duración de la falla (s)	Calibre mínimo del conductor en “circular mils / ampere”					
	Uniones soldadas			Uniones atornilladas		
	Cobre	Acero	Aluminio	Cobre	Acero	Aluminio
30	50	120	91	64	143	123
3	16	38	29	21	46	39
1	9,5	22	17	12	27	23
0,5	6,5	16	12	8,5	19	16

Esta presenta el calibre mínimo de los conductores en circular mils por ampere (1 mil = 0,0005067 mm²) en función del tiempo de la falla.

En las subestaciones eléctricas usualmente se utiliza, por razones mecánicas, y durabilidad (corrosión) como calibre mínimo el conductor número 4/0 AWG (107,2 mm²) ó 120 mm² de cobre.

Con el objeto de mantener los potenciales de paso y contacto, en sus valores de seguridad, en el interior del perímetro de la malla se requiere cierta longitud mínima del conductor de puesta a tierra.

El siguiente método es una forma práctica aproximada de calcular la corriente máxima de un conductor (de sección transversal en cmils) antes de que sufra daños:

$$I_{MAX} = \frac{S_t}{42,25} \left[\frac{cmils}{cmils / Ampere} \right] \text{ Amp.} \quad (6.33)$$

donde :

S_t : sección transversal

Se ha establecido que un conductor de cobre puede transportar una corriente de 1 ampere por 5 segundos por cada 42,25 cmils de sección transversal sin ser destruido.

El cálculo teórico de la sección del conductor de puesta a tierra para subestaciones es :

$$A = \frac{I_F \times 0,0005068}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m + T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33t}}} \quad (\text{mm}^2) \quad (6.34)$$

donde :

I_F : Corriente máxima de falla a tierra

t : Tiempo durante el cual fluye la corriente de falla

T_m : Temperatura máxima de fusión del conductor línea de tierra, en °C

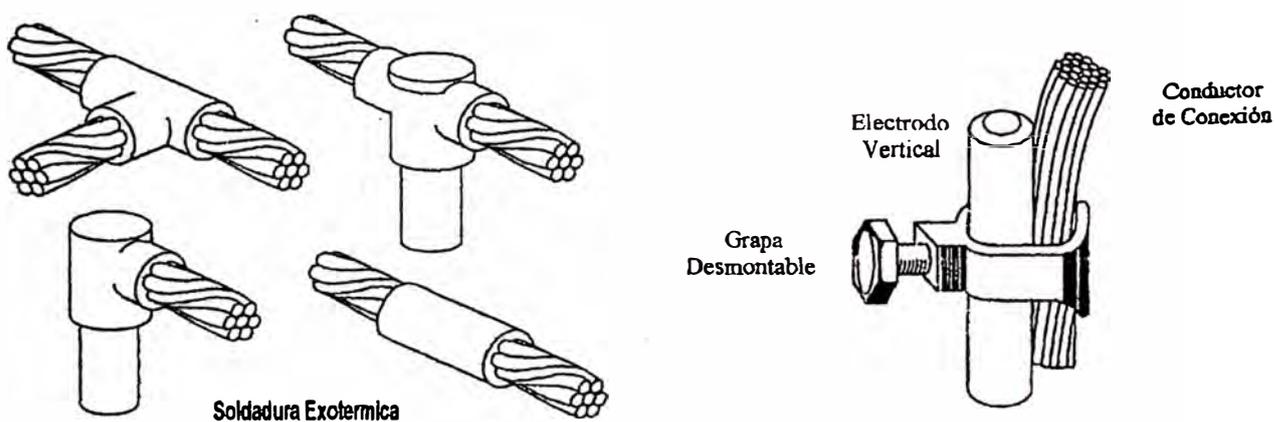
T_a : Temperatura ambiente, en °C

Tabla 6.2
Temperatura máxima de fusión

Material	Temperatura de fusión °C
Alambre de cobre recocido	1083
Alambre de cobre duro	1084
Núcleo de acero con revestimiento de cobre	1084/1300
Alambre de aluminio	657
Aleación de aluminio	660
Alma de acero con recubrimiento de aluminio	660/1300
Alma de acero con cubierta de zinc	419/1300
Acero inoxidable	1400

Tabla 6.3
Temperatura máxima de los contactos de unión en una malla de P.A.T.

Tipo de Conexión	Temp. Máxima Permisible (°C)
Grapa Desmontable de Bronce	250
Soldadura por Arco Eléctrico	450
Soldadura Oxi-Acetileno	550
Soldadura Exotérmica	850



CAPÍTULO VII

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

La construcción de un sistema de puesta a tierra requiere de una evaluación previa del terreno (resistividad) y una medición final (resistencia eléctrica del sistema) para ello se deberá contar con métodos de medición confiables.

Las normas establecen valores de resistencia eléctrica según la potencia de la S.E.

Tabla 7.1

Potencia de S.E. (KVA)	R (Ω)
Menos de 1 500	15
1 501 \rightarrow 7 000	10
7 001 \rightarrow 15 000	5
15 000 \rightarrow A mas	2

En el anexo se presenta dos cuadros con el nivel de resistencia de puesta a tierra para cada sistema.

Existiendo dos métodos utilizados como son el *método clásico* y *de oposición* se detallaran a continuación.

7.1 Método Clásico:

Este método consiste en ubicar los electrodos en línea recta, con el electrodo de potencial entre el electrodo de tierra y el de corriente como se muestra en la fig.7.1.

Para hallar la posición requerida “p” del electrodo P₂ utilizaremos el análisis del potencial de superficie en suelo estratificado, el potencial U_B será igual a los potenciales de la fuente real + las imágenes; de donde:

$$U_B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{p} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I\rho_1}{2\pi} \cdot \frac{K^n}{r_n^2} \text{ Volt ;} \quad r_n^2 = p^2 + (2.n.h_1)^2 \quad (7.1)$$

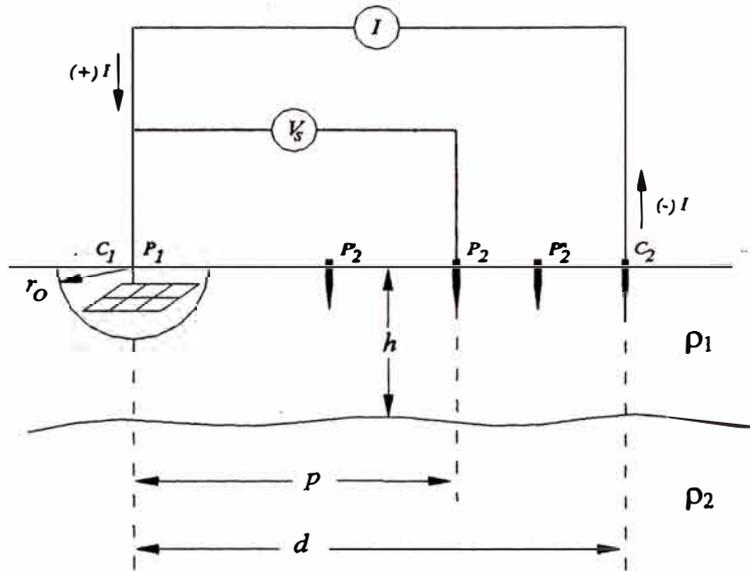


Fig. 7.1

Con la expresión del potencial de superficie (U_B) del modelo matemático del suelo de dos estratos, siendo (p) la distancia del electrodo de potencial P_2 a la fuente (C), se tendrá el valor de (R_T):

$$R_T = \frac{U_B}{I} = \frac{\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{p^2 + (2.n.h_1)^2}} \right) \Omega \quad (7.2)$$

luego con las siguientes igualdades:

$$X = \frac{p}{d} \quad H = \frac{h_1}{d} \quad K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad U = 2.n.H \quad (7.3)$$

tenemos:

$$\frac{1}{X} - \frac{1}{1-X} + 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{X^2 + U^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1-X)^2 + U^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+U^2}} \right] = 0 \quad (7.4)$$

Ecuación que puede ser expresada como una función de tres variables.

$$\psi(X, H, K)$$

La posición del electrodo de potencial $X = f(H, K)$ se obtiene con ayuda de la gráfica de la familia respectiva.

Cuando $K = 0$ se cumple que $X = 0,618$

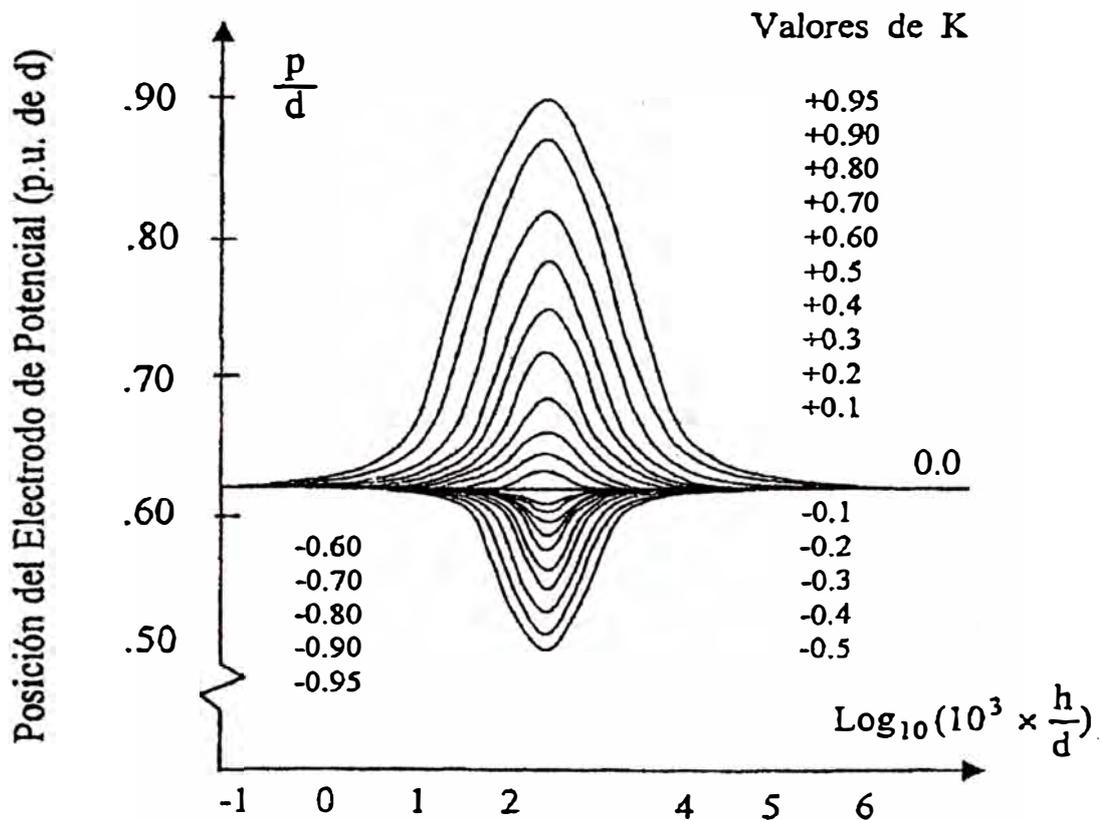


Fig. 7.2 Familia de curvas del coeficiente de reflexión

7.2 Método de Oposición

En este método ubicamos los electrodos en línea recta, con el electrodo de potencial en oposición al electrodo de corriente a 180° , (ver fig. 7.3); Haciendo el estudio de manera similar al método clásico; tenemos que para calcular la posición requerida del electrodo de potencial, X debe ser reemplazada por $-X$ en la ecuación (α); obteniéndose:

$$\frac{-1}{X} - \frac{1}{1+X} + 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\frac{1}{\sqrt{X^2 + U^2}} - \frac{1}{\sqrt{(1+X)^2 + U^2}} + \frac{1}{\sqrt{1+U^2}} \right] = 0 \quad (7.5)$$

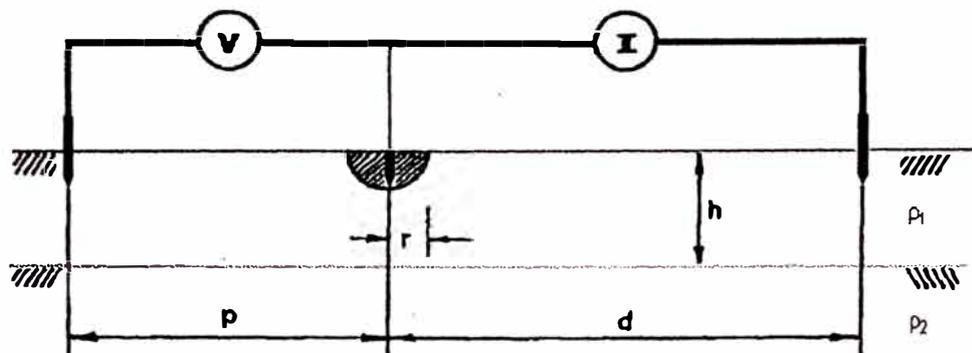


Fig. 7.3 método de oposición de caída de potencial

La posición del electrodo de potencial $X = f(H, K)$ de manera similar graficamos $\frac{p}{p+d}$

en función de H tomando a K como parámetro, el cual se muestra :

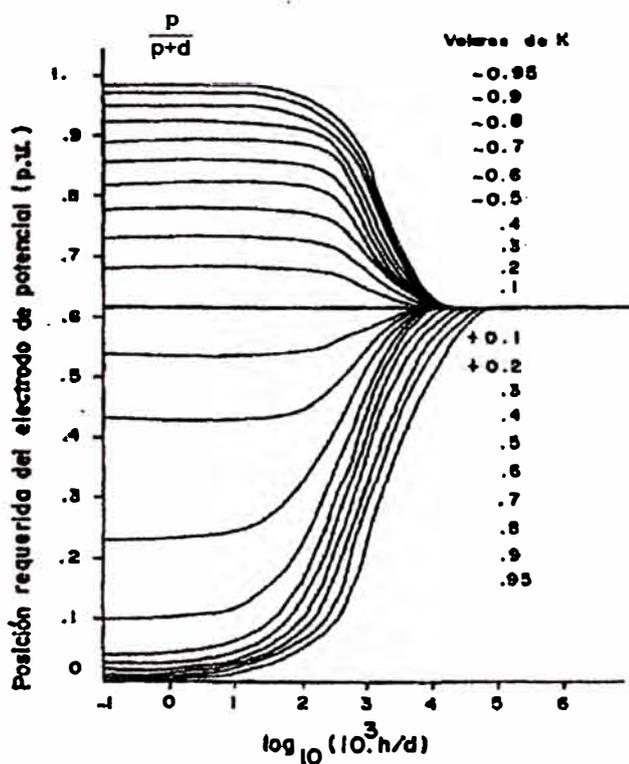


Fig. 7.4 Familia de curvas del coeficiente de reflexión

Observamos que para un suelo de resistividad uniforme ($K = 0$) resolviendo la ecuación (7.5) tenemos:

$$X = 1,618 \quad (7.6)$$

Que nos indica que la posición del electrodo deberá ser a 1,618 veces la distancia entre el aterramiento y el electrodo de corriente.

7.3 Distancias para la medidas de resistencias de P.A.T.

La dispersión de corriente (I) en las puestas a tierra se aproxima a hemisferios, toda puesta a tierra concentrada tiene un radios hemisférico equivalente (r_0), dicho criterio no es aplicable a puestas a tierra desconcentradas o irregulares.

$$\text{Para jabalina} \quad r_0 = \frac{l}{\text{Ln}\left(\frac{4.l}{d}\right)} \quad (\text{m}) \quad (7.7)$$

$$\text{Para área cubierta por jabalinas :} \quad r_e = \sqrt{\frac{S}{2.\pi}} \quad (7.8)$$

7.4 Determinación de la Distancia Mínima (d) (Para error < 5%)

El criterio es que la línea de corriente no deban cerrarse por P_2 , por lo que las normas recomiendan ($d \geq$ cinco veces la diagonal) del área cuadrangular de la red de P.A.T. y ($d = 40$ m), para medidas de puestas a tierra puntuales regulares o irregulares.

En la practica también se pueden aplicar los parámetros (r_0) calculados, como sigue:

- Puesta a tierra puntuales ($r_0 < 3\text{m}$) $d > 20r_0$
- Redes Pequeñas ($r_0 < 6\text{m}$) $d > 15r_0$
- Redes medianas a grandes $d > 10r_0$

La precisión de las medidas depende de la distancia (d) que se determine para el circuito de corrientes ($C_1C_2 = d$).

En relación a la cobertura de la puesta a tierra. que se representa por su radio Hemisférico Equivalente (r_0) según lo cual:

- El criterio se cumple en suelos homogéneos y estratificados
- Se puede verificar con las características de medidas punto a punto
- Cada curva de medida de campo de las red de puesta a tierra (R) vs p con P_2 dentro de su propio intervalo (d), tiene como parámetro ($\frac{d}{r_0}$).
- Si $\left(\frac{d}{r_0} > 10\right)$ siempre se puede aplicar para (P_2) el criterio de ubicación de $p = 0,62 \times d$.
- Cada curva tiene un punto de inflexión que proyectado en el eje de resistencia da la resistencia de la puesta a tierra (R_T), a mayor valor de la relación ($\frac{d}{r_0}$) mas fácil es la definición y ubicación grafica del punto de inflexión y de la resistencia de puesta a tierra (R_T); la precisión de toda medida de (R_T), esta supeditada a la relación ($\frac{d}{r_0}$)

cuanto mayor valor tiene la relación ($\frac{d}{r_0}$), menor es el error (Ver fig. 7.5)

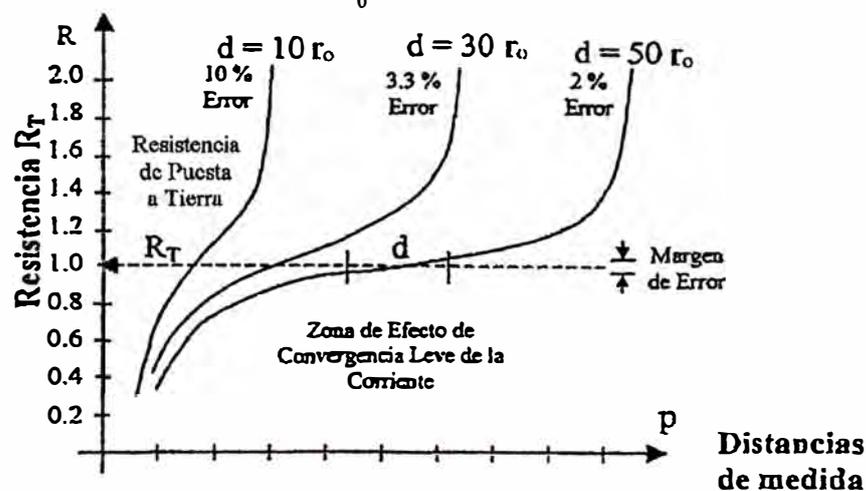


Fig. 7.5

Un error aceptable menor del 3.3 %) se obtiene con una relación $\left(\frac{d}{r_0} = 30\right)$

➤ Para medición de Puesta A Tierra puntuales la IEC recomienda hasta $\left(\frac{d}{r_0} \approx 100\right)$

➤ Para medición de Puestas A Tierra, extensas la IEC recomienda mínimo de :

$$\left(\frac{d}{r_0} \approx 17,5\right)$$

Si el alcance del cableado del instrumento portátil según catalogo, es menor que la distancia requerida (d), *las medidas incrementaran mucho mas el error*, dando siempre lecturas de Resistencia mas bajas que las reales.

7.5 . Medición de Resistencia de Puestas a Tierra Puntuales

Están conformadas por uno o mas (hasta 5) electrodos verticales y/o pequeños electrodos horizontales (totalizado hasta 20 m), dispuestos en forma geométrica cerrada o en ramas radiales o en combinación de ambos.

- Para medir se utilizan Telurómetros o Geómetros según las instrucciones del fabricante; a menor Corriente de medida menor alcance del instrumento, el voltaje de las baterías se debe verificar cada 10 medidas.
- Las magnitudes de (R_T) que se esperan hallar, oscilan entre 5Ω y 25Ω , las medidas se hacen con la puesta a tierra totalmente desconectada y libre.
- Normalmente no se privilegia la precisión, las medidas correctas se hacen solo con el método aproximado (suelo homogéneo), con distancias para :

- Circuito de Corriente (I) : $C_1 C_2 = d$ (Según Norma: 40m)

- Circuito de Potencial (Vs) : $C_1 P_2 = 0,618 d$

- Los circuitos de medida (I) y (Vs) deben ser ortogonales u opuestos al electrodo enterrado, tanto mas si este no tiene geometría regular o desconcentrada solo de esta manera se obtendrán medidas con un mínimo error.
- Los conductores paralelos deben separarse a un metro de distancia
- Los conductores divergentes deben tener ángulo menor a 90°
- La medición de la resistencia de puesta a tierra de un solo electrodo vertical clavado o instalado en pozo, se pueden medir a una distancia mínima ($d \geq 12m$) con un error de medición menor al 3.3 %
- La comprobación de las medidas en suelo despejado (sin objetos conductores enterrados) se hace permutando las directrices de (I) y de (V), el mayor valor de (R_r) obtenido será el resultado.

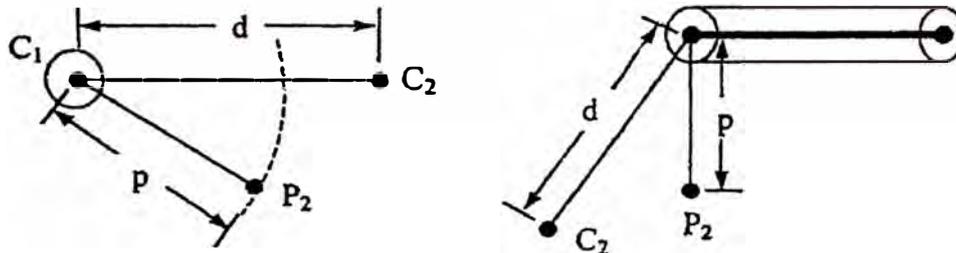


Fig. 7.6

7.6 Medición de resistencia de puesta a tierra en aterramientos medianos

Las puestas a tierra de mediana envergadura generalmente están conformadas por electrodos mixtos con dimensiones cuyo lado mayor de la cobertura puede llegar hasta 20 o 25 m y tener áreas de variada forma.

- Las magnitudes de (R_r) que se espera hallar oscilan entre 2 y 15 Ω .
- A menos que se solicite expresamente obtener una medición precisa, las

verificaciones se pueden hacer con el método aproximado (suelo homogéneo) y con un instrumento portátil de máximo alcance (25 o 50 mA).

- Circuito de Corriente (I) $C_1 C_2 = d$
- Circuito de Potencial (Vs) $C_1 P_2 = 0,618 d$
- La distancia del circuito de Corriente deberá ser como mínimo 5 veces la diagonal del área cubierta por el sistema de Puesta a Tierra o hallarse calculando el (r_0).
- En suelos de baja resistividad el alcance de las distancias de medida especificadas para el Instrumento portátil pueden ampliarse hasta cuatro veces, con un error de hasta 10%.
- Las medidas requieren la desconexión de todas las bajadas de puesta a tierra y la desconexión total del suministro eléctrico de la Subestación Eléctrica en Alta Tensión y Media Tensión; *de no ser posible* la medida deberá efectuarse con una fuerza autónoma de corriente (hasta 10 A).

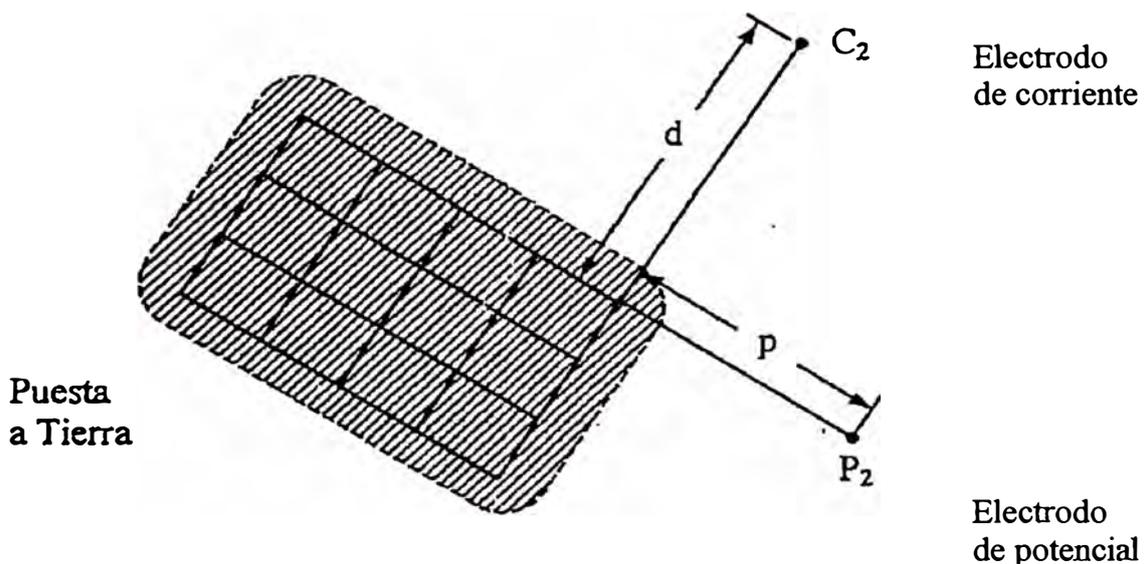


Fig. 7.7.- Medición de puestas a tierra medianas

7.7 Medición de Resistencia de Puesta a Tierra en Aterramientos Grandes.

Son Puestas a Tierra que algunas veces se complementan con electrodos Verticales y puestas a tierra auxiliares o periféricas.

Para las medidas se deben desconectar los Cables de Tierra o Guarda y los seccionadores de tierra de las líneas y alimentadores.

Las Normas cubren los casos convencionales de instalación en suelos de baja o moderada resistividad (100 a 600 Ω -m), dotados de humedad natural o recarga estacional, y recomiendan lo siguiente:

- La aplicación del principio de caída de potencial con grandes corrientes inyectadas; con electrodos de potencial (P_2) y de retorno de corriente (C_2), fuera de la influencia del sistema de puesta a tierra que puede estar energizado.
- La longitud del circuito de corriente, ($d >$ Cinco veces la diagonal).
- La medida se hace por incrementos de corriente hasta un nivel asintótico de la resistencia de puesta a tierra bajo una corriente de medida no especificada teniendo como límite($I = 1\%$ de I_{CC})

Cuando las instalaciones están sin energía, permiten la inyección de menores corrientes de medida, que pueden ser

- Del orden de 10 A. (retirando las principales bajadas a P.A.T.) en suelos de alta resistividad evitando su desecamiento y la inestabilidad de la medida
- Mayor que 10 A. en suelos de baja resistividad y húmedos o cuando las bajadas de conexión de equipos a la P.A.T. no han sido desconectadas.

Las mediciones pueden hacerse aplicando:

- El método de mediciones aproximadas (tres mediciones) :

Tabla 7.2

Electrodo P ₂	
Medición	<i>p</i>
1	0,583 . d
2	0,618 . d
3	0,680 . d

- El método de medición precisa (1 medida), P₂ con localización exacta.
- El método por puntos (muy exigente) impone largo tiempo de ejecución.

7.8 Método de medida por puntos de la Resistencia de Puesta a Tierra.

En los casos en que es difícil la caracterización del perfil de resistividades del suelo, la resistencia de puesta a tierra se puede determinar en forma analítica o gráfica en forma exacta o aproximada respectivamente utilizando la característica de puntos obtenidos con medidas de campo.

Este método se puede aplicar para medir pequeños valores de la resistencia de puesta a tierra en suelo irregular y/o con estratos de espesor variable (laderas de cerro).

Se determina la distancia del Electrodo de Corriente (C₁, C₂ = d) según (r₀) o con cinco veces la diagonal, la cual se divide en 10 segmentos iguales.

Se obtiene mediciones Intermedias de (R) con distancias iguales a $p = (0,1)d$ c/u y se obtienen 9 lecturas en total

Los Valores de los Puntos (R) vs (p) se grafican, se lisa la curva mediante una regresión matemática, luego se halla la función continua $f(p)$

La curva cruza a su tangente (pendiente cero) en el punto de Inflexión (P.I.), en el que la concavidad cambia de sentido, $\frac{\partial^2 f}{\partial p^2}$ cambia de signo.

Para localizar analíticamente el punto de inflexión (P.I.), se determina el valor de abscisas (p) en el $\frac{\partial^2 f}{\partial p^2} = 0$ ó en el que $\frac{\partial^2 f}{\partial p^2}$ no esta definida.

La proyección del (P.I.) en el eje de ordenadas da el resultado (R_T exacto).

La mayor Precisión grafica se obtiene con la mayor distancia (d)

En forma simplificada, se entra en abscisas con ($p = 0,62.d$), se intercepta la curva en (P.I.) y al proyectar dicho punto en el eje de ordenadas se halla (R_T) aproximadamente.

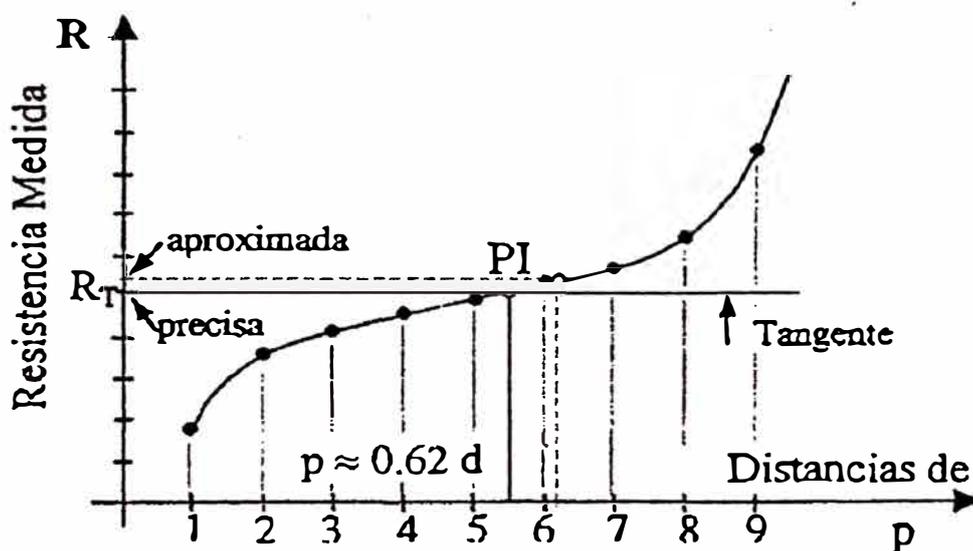


Fig. 7.8

7.9 Medida precisa de la resistencia de puesta a tierra.

La presencia de los estratos del suelo de diferente resistividad, influye en la medida de (R_T), lo cual tiene importancia sobre todo cuando se trata de sistemas de puesta a tierra extensos y de baja resistencia de dispersión.

Para toda distancia (C_1, C_2) del circuito de corriente inyectada (I) existirá la distancia precisa ($C_1 P_2$), del circuito de potencial (V_s)

Las resistividades del suelo en modelo de dos estratos influyen en las corrientes inyectadas (I), en función de un coeficiente de reflexión

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{7.9}$$

Al no ser conocida la ubicación de (P_2) en suelo estratificado, la medida de R_T tendrá imprecisiones según se elija la posición del punto (P_2), ejemplo en (P'_2) o en (P''_2) no dan idénticos resultados.

- Medidas con Potencial entre (C_1 y P'_2) : Optimista (mide $< R_T$)
- Medidas con Potencial entre (C_1 y P''_2) : Pesimista (mide $> R_T$)

Para las medidas exactas se debe contar con los parámetros del perfil de resistividades del suelo en modelo de dos estratos (ρ_1, ρ_2, h).

El modelo analítico simplificado considera un electrodo de P.A.T. de radio equivalente (r_0), pequeño respecto de la distancia ($d = C_1, C_2$) y de la profundidad (h_1), cumpliendo con las condiciones geométricas:

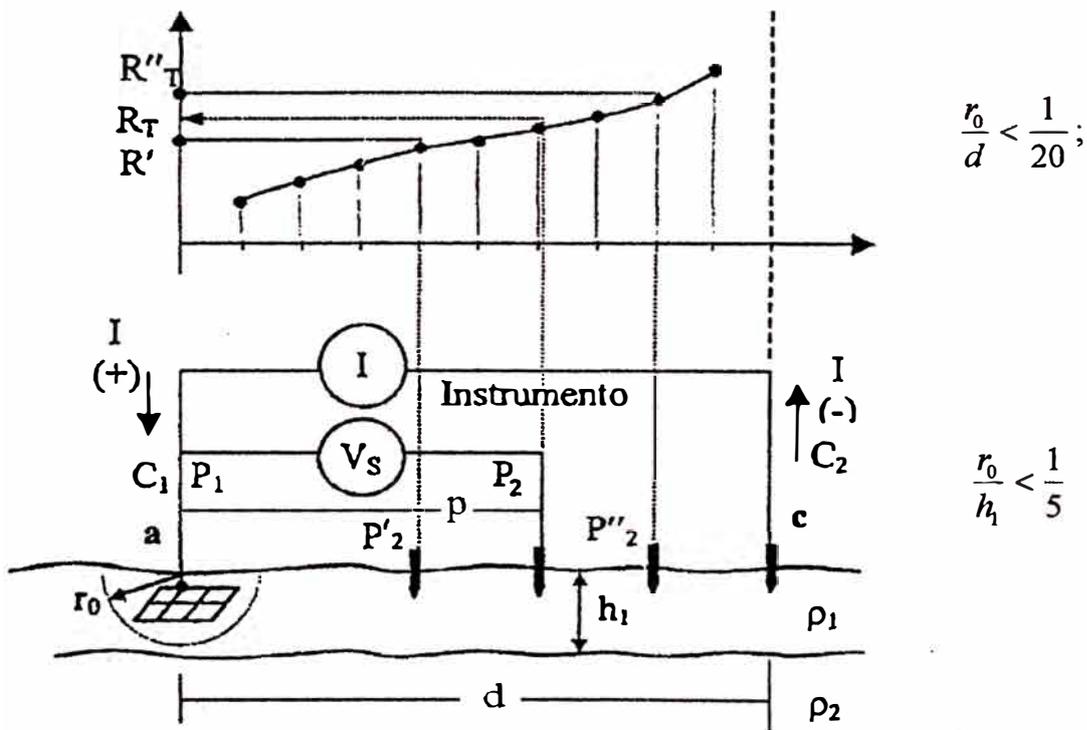


Fig. 7.9

7.10 Condiciones para medición de parámetros eléctricos del suelo.

Criterios generales

- Para la seguridad del operador que mide bajo sistema energizado.
 - Utilizar guantes y zapatos aislantes
 - Abstenerse de realizar mediciones bajo lluvia o neblina densa cerca de Líneas de Transmisión o Subestaciones Eléctricas.
 - Abstenerse de realizar mediciones si las condiciones ambientales (humedad relativa) en Líneas de Transmisión o Subestaciones Eléctricas energizadas supera el 80%.
 - Abstenerse de realizar mediciones cuando hay tormentas aguas arriba o aguas abajo de la Línea de Transmisión.

- **Para asegurar la representatividad de las medidas de campo**

Se debe considerar:

- La Estación climática del lugar
Verano (costa), Estiaje (Sierra, Selva); aplicar valor directo
Invierno (costa), Lluvias (Sierra, Selva); aplicar valor corregido
- Evitar medir en suelos recién humedecidos por riego o lluvia o removidos
- Desconectar los Cables de Guarda o Cables de Tierra para medir la resistencia de puesta a tierra.
- Anticipadamente la verificación de los equipos y accesorios de medida

- **Para asegurar la precisión de las medidas**

Se debe :

- Evitar la superposición de los circuitos de medida (I) y (V_s)
- Asegurar buen contacto entre los electrodos clavados y el suelo
- Evitar paralelismo con Líneas Eléctricas Aéreas y Subterráneas.
- Evitar proximidad con objetos conductores de superficie y subterráneo
- Evitar la influencia directa de los circuitos de Alta Tensión.

➤ **Para asegurar las condiciones de medida en suelos Singulares**

Se debe:

- Medir en ausencia o bajo mínimas corrientes erráticas o geomagnéticas.
- Determinar el horario mas adecuado del día para las mediciones.

7.10.1 Instrumentos de medición de parámetros eléctricos del suelo

Existen instrumentos portátiles, unos son comparadores y otros de lectura directa denominados *Telurómetros* y *Geómetros*, que permiten medidas de la resistencia de puesta a tierra (R) en Ohmios con distintas escalas y mediante idénticos conexiones de circuitos de corriente (I) y de Potencial (V).

➤ **Telurómetros**

Tienen hasta cinco bornes de conexión, uno de ellos (guarda) para evacuar corrientes parásitas de suelos de alta resistividad; permiten medir *la resistividad del suelo, la resistencia de puesta a tierra y resistencias puras*.

La fuente de alimentación debe ser alterna o continua conmutada aproximadamente a 200 Hz. para evitar la polarización del suelo y efecto del acoplamiento a 60 Hz

- La circulación de (I) entre (C_1) y (C_2) crea una diferencia de potencial entre (P_1) y (P_2), debido a la resistencia del suelo (R_x): $V = I.R_x$

- La corriente (I) en la porción (L_m) de la resistencia de comparación (R_v), que tiene longitud (L), crea una diferencia de potencial (K : Factor del Instrumento).

$$V_0 = K I R_v \cdot \frac{L}{L_m} \quad (7.10)$$

- Al eliminar las deflexiones del galvanómetro (punto cero), se habrán balanceado ambas diferencias de potencial, luego : $V = V_0$
- La Resistencia medida (R_x) será indicada por el instrumento, independientemente de la corriente (I) inyectada

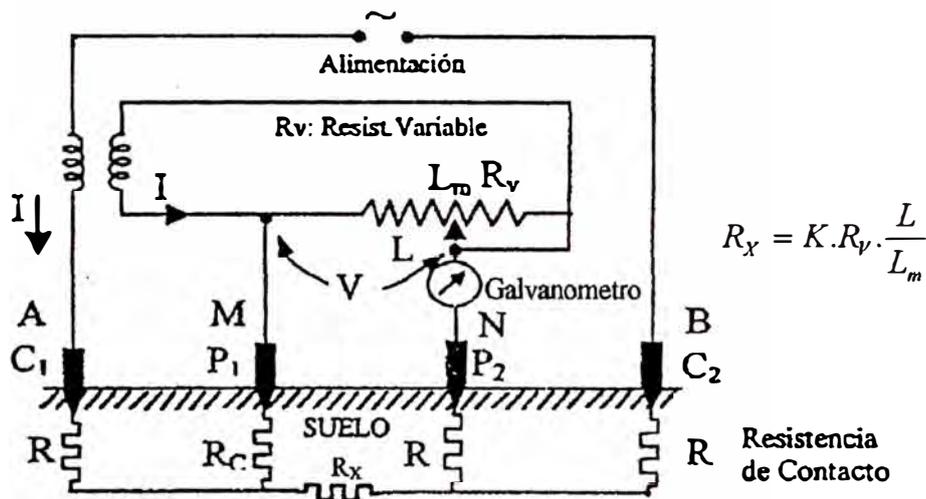


Fig.7.10

➤ Geómetros

Tienen tres bornes de conexión, permiten medir *la resistencia de puesta a tierra, resistencias puras y de manera indirecta la resistividad equivalente (Superficial)*; su principio de funcionamiento es idéntico al del Telurómetro.

La fuente de alimentación puede ser

industriales) se utiliza una fuente de alimentación independiente que pueda suministrar corrientes de 10 A. o mayores, hasta el 1% de la corriente de falla del sistema.

7.12 Ejecución de Medidas de Resistencia de Puesta a Tierra

➤ Disposiciones Comunes para la Medida de RPT Importantes.

Antes de las medidas; en una Subestación Eléctrica para obtener *el valor real se deberán desconectar y aislar perentoriamente*, para luego ser reconectadas en idéntica forma :

- Todos los Cables de Guarda en las llegadas y/o salidas de Líneas Eléctricas
- Las conexiones a tierra de las chaquetas metálicas de los Cables Subterráneos
- Los Seccionadores de tierra y las conexiones a los armados Estructurales
- Antes de las medidas en soportes de líneas de transmisión eléctricas, para obtener el valor real, se deberán desconectar y aislar perentoriamente como condición primordial.
- Las bajadas al Electrodo de P.A.T. en las patas o en la propia PAT; la sola desconexión del Cable de Guarda o Tierra, no asegura medida correcta.
- La disposición general para las medidas, considera las directrices de los Circuitos (I) y (V) coincidentes (Paralelismo a mas un (1) m.) o bien divergentes (ángulo $< 90^\circ$ para mínima variación), y en lo posible perpendiculares u opuestos a las P.A.T.
- Los electrodos exploradores de Corriente (C_2) y de Potencial (P_2), en relación al suelo, deberán tener respectivamente, la mas baja resistencia de Dispersión y el mejor contacto posible; de ello depende la resolución de las medidas.

- Las medidas con instrumentos portátiles en puesta a tierra, puntuales o pequeñas se hacen indistintamente estando las instalaciones energizadas o sin energía; las corrientes de medidas que utilizan, alcanzan hasta 50 mA, siendo indispensable que:
 - La cobertura de la PAT este dentro del alcance del instrumento.
 - La PAT este libre de toda conexión de bajada
 - No hayan cambios bruscos de Resistividad ni corrientes erráticas en el Suelo.
- Las medidas con fuente autónoma de corriente se aplican a Puestas a Tierra extensas, las corrientes son del orden de (1% de I_{cc}) y pueden llegar hasta 100 A.

Es necesario

- Si la energía es del sistema eléctrico o de una fuente autónoma, aplicarla a través de un variador
- En instalaciones sin energía (I) puede ser de hasta 10 A, sobre todo si también se desconectan las bajadas a tierra de los equipos mayores.

CAPÍTULO VIII

ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA PUESTA A TIERRA

Las Normas recomiendan en primer lugar *el uso de electrodos sólidos preferentemente continuos*, y elementos conectores o medios de conexión en metales y aleaciones que al estar en contacto con el suelo húmedo y salino tengan un comportamiento resistente a la corrosión, por su homogeneidad y la necesaria compatibilidad galvánica con las partes que se empalman para unirse a las instalaciones de superficie; pero muchas veces dichas pautas mínimas no se pueden cumplir a cabalidad en perjuicio del desempeño de las puestas a tierra.

Generalmente por tener que reducir las inversiones iniciales en materiales; lo que conduce a utilizar como Puestas a Tierra en Líneas Eléctricas de Alta Tensión, por ejemplo los elementos sobrantes de acero angular galvanizado; mientras que a veces se ha observado que en otras instalaciones de menor envergadura en el pasado también se han utilizado tubos de Acero, perfiles recuperados de Aluminio y hasta varillas de Acero negro de construcción.

Se prefiere el uso de conductor torzalado como electrodo horizontal, en lugar de una pletina sólida, pese a que las hebras por tener pequeño diámetro presentan una mayor superficie expuesta al ataque del suelo y/o de los componentes químicos del relleno; asimismo en vez de los electrodos verticales que no se instalan por clavado directo, se prefiere prolongar el conductor de conexión hasta la base de los postes.

De otro lado, actualmente las formas de los electrodos, el diseño de las puestas a tierra y los métodos de instalación han confluído en esquemas de mayor eficacia en la obtención de la *mínima resistencia de dispersión* con una mayor estabilidad de dicho parámetro a lo largo del tiempo, cumpliendo asimismo con los requerimientos de resistencia ante las sollicitaciones mecánicas; según lo cual, prácticamente se han dejado de lado el uso ingente de metal enterrado con electrodos de gran superficie y/o grosor o espesor y electrodos verticales de gran profundidad frente al uso de rellenos eficaces y al mejor aprovechamiento de los estratos de baja resistividad del suelo.

Aparte lo arriba indicado, se han estudiado en diferentes partes el mundo el uso de diversos materiales metálicos y aleaciones, en variadas formas, armados y modos de instalación; ya sea con la finalidad de reducir los accidentes fatales debido al drástico incremento de la *resistencia de dispersión* o bien para reducir los costos del desproporcionado uso del cobre electrolítico que puede ser perjudicial, todas las alternativas; casi siempre permiten obtener inicialmente la misma *resistencia de dispersión* el problema ulterior reside mayormente en la durabilidad de la instalación conservando dicho parámetro.

8.1 Materiales utilizados como electrodos

Los materiales mas usados como electrodos en la construcción de sistema de puesta a tierra son:

➤ Cobre Electrolítico y Bronce

El Cobre fue siempre utilizado en las instalaciones de puesta a tierra, inicialmente el electrodo enterrado era solo la prolongación del Conductor enterrado torzalado de bajada, posteriormente la escasez, alto costo, falta de rigidez y su presencia

perniciosa a proximidad de las instalaciones ferrosas origino el uso sustitutorio de aleaciones que no logran todos los objetivos como es el caso del *bronce fosforoso* del cual prevalecen los conectores y grapas, mientras que el Cobre electrolítico se ha consolidado y es recomendado por la mayoría de las normas debido a su mejor desempeño galvánico por ser un metal noble que por si mismo asegura su larga durabilidad.

➤ **Acero Resistente a la Corrosión y Aceros al Carbono.**

Normalmente se aplican electrodos rígidos de acero resistente a la corrosión, los cuales han sido incluidos en diversas Normas Lideres (NEC: 250-83, NFPA-78, etc.), en el entendido que no sufrirán corrosión, no obstante la realidad muestra que bajo ciertas condiciones que comúnmente se dan, son susceptibles de ataque puntual y acelerado que acaba en fractura.

El uso de electrodos de Acero al Carbono con protección por galvanizado, se basa en el análisis de las propiedades fisico-químicas del suelo fue incentivado en la década del 70 por condicionamientos técnicos, económicos y de seguridad de las instalaciones ferrosas periféricas; teniendo en consideración la inevitable problema de corrosión del metal que se traduce en diseños especiales el uso de mayores secciones y a veces protección habiéndose realizado múltiples aplicaciones para puestas a tierra importantes, con una proyección de vida útil de mas de 25 años; lo cual no obstante, no ha logrado disminuir la preeminencia del cobre ni a cubierto el espacio que este ocupa cuando los suelos son muy corrosivos, o cuando se imponen exigencias de alta confiabilidad y larga vida útil.

➤ **Aluminio Puro y Aleaciones Ligeras de Aluminio**

Las mismas premisas de observación al uso del Cobre para los Aterramientos, fueron las que originaron los estudios de aplicación del Aluminio Puro y sus Aleaciones, teniendo en consideración que es un metal cuya capa superficial constituye buena protección contra la corrosión electroquímica si es que no llega al *nivel de anodizado* en que dicha capa presenta una *resistencia eléctrica* grande que se contrapone a la eficiente dispersión de la corriente.

De ese modo, la sola posibilidad de la capa superficial con Alumina que constituye una barrera frágil ante los gradientes térmicos y permeable ante los ataques salinos, las hace fácilmente víctima de la corrosión, aunque las mayores deficiencias radicarían en su baja elasticidad que conduce a deformaciones permanentes en los puntos de empalme a presión, donde la corrosión por grieta incrementa la resistencia eléctrica; asimismo es proceso de soldadura es difícil.

8.2 Cambio de terreno

Los terrenos pueden ser cambiados en su totalidad, cuando ellos son rocosos, pedregosos, calizas, granito etc., ya que son terrenos de alta resistividad.

Pueden cambiarse parcialmente cuando el terreno esta conformado por componentes de media y baja resistividad; de modo que se supriman las partes de mayor resistividad y se reemplacen por otros de baja resistividad.

Uno de estos procedimientos es realizado con el zarandeo del terreno donde se desechan las piedras contenidas en el terreno.

El cambio total o parcial del terreno deberá ser lo suficientemente necesario para que el electrodo tenga un radio de buen terreno que sea de 30 a 50 cm en todo su contorno así como en su fondo.

La resistencia crítica de un electrodo se encuentra en un radio de contorno que va de 30 a 50 cm de este, por lo que se tendrá cuidado con las dimensiones de los pozos para electrodos proyectados.

El porcentaje de reducción en este caso es difícil de deducir, debido a los factores que intervienen, como son resistividad del terreno natural, resistividad del terreno de reemplazo total o parcial, adherencia por la compactación y limpieza del electrodo.

Para lugares de alta resistividad donde se cambie el terreno de los pozos en forma total, el porcentaje estimado puede oscilar entre 50 a 70% de reducción de la resistividad natural del terreno.

Para terrenos de media resistividad donde el cambio del terreno de los pozos, puede ofrecer un porcentaje de reducción estimado si el:

Cambio es parcial la reducción de la resistividad natural del terreno oscilará entre un 20 a 40 %

Cambio es total la reducción de la resistividad natural del terreno oscilará entre un 40 a 60%.

Para terrenos de baja resistividad donde se cambiara el terreno de los pozos en forma parcial o total, el porcentaje de reducción puede estar aproximadamente entre 20 a 40% de la resistividad natural del terreno.

8.3 Tratamiento químico del suelo

Todo sistema de aterramiento depende de integridad del suelo así como de la resistividad aparente, Si un sistema ya está físicamente definido e instalado la única manera de disminuir su resistencia eléctrica y alterar las características del suelo es usando tratamiento químico

El tratamiento químico debe ser utilizado solamente cuando existe un aterramiento

en el suelo con una resistencia cuyo valor esta fuera de los parámetros de diseño y no existe otra alternativa posible dentro de las condiciones del sistema.

Las sustancias que se usan para un buen tratamiento químico del suelo deben tener las siguientes propiedades:

- Higroscopico.
- No corrosivo
- Baja resistencia eléctrica.
- Químicamente estable en el suelo.
- Inocuo para la naturaleza.
- No toxico.

Existen diversos productos para el tratamiento químico del suelo y reducir la resistencia de un pozo de puesta a tierra, entre ellos podemos mencionar los mas conocidos como:

- Cloruro de Sodio (Sal) + Carbón Vegetal.
- Bentonita.
- Gel.

8.4 Características Principales de los Tratamientos Químicos

Ninguna sal en estado sólido es conductiva, para que los electrolitos que la constituyen conduzcan la corriente, se deben convertir en soluciones por ejemplo:

Cloruro de Sodio en agua forma una solución verdadera el mismo Cloruro de Sodio disuelto en benceno forma una seuda solución o dispersión coloidal como también se le conoce.

➤ **Cloruro de Sodio + Carbón Vegetal**

El cloruro de sodio forma una solución verdadera y se precipita fácilmente junto con el agua por efecto de la percolación, capilaridad y evaporación.

Pero existe un inconveniente del tratamiento convencional con Sal y Carbón y es que su elevada corrosión reduce ostensiblemente el tiempo de vida útil de la jabalina, 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 es aprovechar la capacidad de este para absorber la humedad del medio (puesto que el carbón vegetal seco es aislante) y retener junto a esta algunos de los electrolitos del Cloruro de Sodio que se percolan constantemente.

➤ **Bentonita**

La Bentonita constituye un grupo de sustancias minerales arcillosas que no tiene composición mineral definida; aun cuando las distintas variedades de Bentonita difieren mucho entre si en lo que respecta a sus propiedades respectivas es posible clasificarlas en dos grandes grupos:

- Bentonita Sódica.
- Bentonita Cálcica

La Bentonita tiene baja resistividad (1,2 a 4 Ω -m) y es no corrosiva (pH alcalino) protege el material de aterramiento contra la corrosión natural del suelo.

La Bentonita molida retiene las moléculas de agua. pero la pierden con mayor velocidad con la que la absorben, al perder el agua pierden conductividad y restan toda compactación lo que deriva en la perdida del contacto entre el electrodo y el medio, generándose burbujas de aire las cuales eleva la resistencia del pozo ostensiblemente. Una vez que la Bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua es casi nula.

➤ **Gel**

El Gel esta constituido de una mixtura de diversas sales que en presencia de agua, forman un agente activo de tratamiento, una característica fundamental de este gel es que retiene el agua por largo tiempo y la resistencia de aterramiento decae acentuadamente.

La aplicación del Gel permite además rellenar los espacios intersticiales dentro el pozo de tierra, constituyendo una excelente conexión eléctrica entre el terreno de cultivo (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente.

CAPÍTULO IX

CORROSIÓN

Corrosión es la tendencia de los metales a volver a su estado natural cuando se combinan y forman óxidos, hidróxidos y sales; es la alteración destructiva de un metal que puede originar tanto una reacción química como una electroquímica.

La corrosión casi siempre es de origen electroquímico. Este tipo de reacciones un cambio químico que engloba el transporte de cargas eléctricas circula entre polos positivo (ánodo) y negativo (cátodo) capaz de conducir dicha corriente se presenta la corrosión cuyos efectos sufre la terminal del ánodo.

Cuando los átomos del ánodo se disuelven para formar iones (partículas químicas cargadas eléctricamente) los electrones libres hacen al ánodo (electrodo donde ocurre la oxidación) negativo con respecto a la solución.

Sus electrones pasan al cátodo a través del metal y allí neutralizan a los iones positivos; la corrosión se sostiene mediante procesos anódicos y catódicos simultáneos, el anión es el ion cargado negativamente y el catión es el ion cargado positivamente.

A veces puede ser de naturaleza química (no electroquímica) o de naturaleza fisico-metalúrgica.

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.

Los recubrimientos de cadmio y zinc son de gran valor antioxidante debido a que ambos metales están situados delante del hierro en la escala electropositiva de los metales.

9.1 Velocidad de corrosión

Puede expresarse bien, indicando la pérdida de peso del material por unidad de tiempo. Referido a la unidad de área, a veces es mejor indicar la penetración por unidad de

tiempo $\left(\frac{mm}{año}\right)$.

$$\text{➤ La velocidad de corrosión : } \frac{mm}{año} = \frac{0,033.e.i.}{d}$$

donde:

e : Peso equivalente (químico) del metal.

i : Densidad de corriente de corrosión $\left(\frac{\mu A}{cm^2}\right)$

d : Densidad del metal $\left(\frac{gr}{cm^3}\right)$

Cuando una corriente fluye entre el ánodo y el cátodo. los potenciales de ambos cambian. Este cambio se denomina polarización o también el cambio de potencial de un electrodo debido al paso de una corriente.

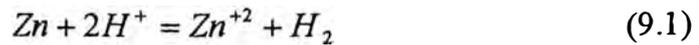
9.2 Pasividad

Un metal se ha pasivado en un cierto ambiente si presenta una muy pequeña velocidad de corrosión cuando desde el punto de vista termodinámico se espera que se corra con gran facilidad.

La mayoría de las reacciones de corrosión son reacciones electroquímicas; la

naturaleza electroquímica puede explicarse fácilmente considerando el ataque del Zinc por el ácido clorhídrico.

Cuando el Zinc (Zn) se introduce en ácido clorhídrico diluido (HCl) tiene lugar un desprendimiento de hidrógeno gaseoso y una disolución del zinc de acuerdo con la reacción:



➤ Oxidante: Aceptor de electrones (se reduce)



➤ Reductor : Dador de electrones (se oxida)



Hay que recordar que los procesos de oxidación y reducción son simultáneos, los electrones que pierde un elemento los gana el otro, dando lugar a reacciones denominadas «redox»



Cuanto mayor sea el flujo de electricidad por la pila, mayor será la cantidad de metal que se corroe; peso del metal corroído (p):

$$p = K.I.t \quad (9.5)$$

donde:

I : Intensidad de corriente (A) ; t : Tiempo (s)

K : Equivalente electroquímico.

9.3 Tipos de Corrosión

- **Corrosión Uniforme** : Consiste en un ataque químico directo mediante sales y ácidos. Si este ataque es persistente, una superficie pulida o brillante perderá el lustre y adquirirá una característica áspera.
- **Corrosión galvánica o bimetálica** : Sucede cuando se tiene la conexión entre dos metales no similares en un electrolito.
- **Corrosión por picadura** : Se concentra en zonas muy pequeñas de la superficie metálica, las picaduras pueden ser estrechas, profundas, cortantes, horizontales o verticales.
- **Corrosión Ínter granular** : Usualmente galvánico, es un ataque selectivo a lo largo de las fronteras granulares de una aleación. Estas aleaciones pueden romperse cuando la corrosión actúa sobre los componentes individuales.
- **Corrosión por exfoliación** : Esta se encuentra en metales donde la corrosión ocurre debajo de la superficie metálica y causa la formación de una ampolla por debajo de ésta. Ocurre cuando la estructura cristalina del metal cambia de dirección.

9.4 Corrosión en los metales básicos

Es de naturaleza electroquímica y resulta del funcionamiento de *celdas galvánicas*, debido a la presencia de una diferencia de potencial en la superficie del metal inmerso en un electrolito, las cuales se atribuyen a la inestabilidad termodinámica del metal, que será mayor cuanto mayor haya sido la cantidad de energía aplicada para su refinación.

Existen cuatro condiciones primordiales que deben cumplirse para la operación de una celda de corrosión en presencia de oxígeno y humedad.

➤ **Reacción Anódica**

Son las partes afectadas donde ocurre la disolución del metal denominada Reacción

Anódica u Oxidación, (remoción de electrones de un átomo), ocasionando la Acidez del medio y producción de electrones.



Este proceso conduce a otras reacciones como la formación de Hidróxidos (Ej. herrumbre)

➤ Reacción Catódica

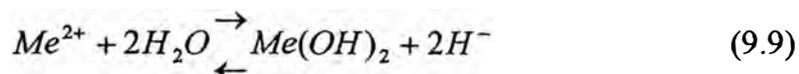
Son las partes que permanecen sanas donde ocurre la conservación del metal denominada *reacción catódica o reducción*, con la alcalinización del medio y consumo de electrones.



Una reacción catódica típica da lugar a la evolución del Hidrogeno ($H_2 \uparrow$)

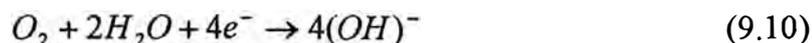


Los metales con iones no estables en contacto con el agua se Hidrolizan para alcanzar su equilibrio Termodinámico.



La tendencia de la reducción del oxígeno del electrolito ocurre en función de la concentración (*pH*) de la solución.

- Para $pH > 7$ en la zona Neutro-Alcalina se producen iones $(OH)^{-}$



- Para $pH \approx 7$ inicio de la zona ácida



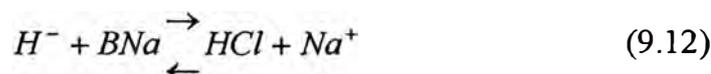
➤ **Conexión Directa entre la Zona Anódica y la Zona Catódica**

Que asegura la circulación de la corriente convencional desde la zona catódica hasta la zona anódica en sentido contrario al flujo de electrones que parten desde la zona anódica.

➤ **Presencia de un Electrolito**

Permite el desarrollo de los procesos Anódico y Catódico y la circulación de la corriente iónica entre el ánodo y el Cátodo.

Si el electrolito contiene sales ácidas débiles por ejemplo el Borato de Sodio marino (BNa) ocurrirá el consumo de Protones (H^+) y en consecuencia no se modificara el (pH)



Si el Electrolito contiene sales ácidas fuertes por ejemplo sulfatos, dichos aniones no capturan Protones (H^+) y en consecuencia su acumulación produce gran nivel acidez disolviendo los óxidos del metal.

9.5 Los Potenciales de Electrodo de los Metales

La corrosión de los metales, esta asociada a los potenciales propios (de reducción u oxidación), los cuales se miden exponiéndolos a soluciones que contienen un átomo-gramo en peso de sus respectivos iones; dichos potenciales están relacionados con sus propias energías de remoción de electrones para alcanzar el equilibrio electroquímico y permitir interpretar los mecanismos que desarrolla la corrosión

Lo cual al ser comparado con un patrón de reducción u Oxidación, como por ejemplo el electrodo de Hidrogeno $\left(\frac{H_2}{H^+}\right)$, al que arbitrariamente se le asigna el Potencial

cero les otorga un lugar de clasificación en la serie de potenciales electroquímicos también denominada de potenciales de Electrodo según la expresión:

$$\Delta E = EM_{Mn}^+ - EH_{2H}^+ \quad (9.13)$$

Tomando como base los potenciales de reducción, los metales mas resistentes a la corrosión (mas catódicos o mas nobles), son aquellos que producen menos electrones que el Hidrógeno y por lo tanto presentan un potencial de Electrodo (potencial galvánico) mas positivo; tal es el caso del Oro que encabeza la serie con ($V = +1,42$ Voltios); mientras que los metales Alcalinos y Alcalino Terrosos que son muy' activos liberando electrones (muy anódicos o susceptibles de corroerse) presentan potenciales negativos y de mayor magnitud como el Litio que se ubica al final de la serie con $V = -3,045$ Voltios; en. este contexto la diferencia de potencial (d.d.p.) medida entre el Hierro y el electrodo de Hidrogeno es $V = -0,44$ Voltios y si existiesen dos metales inmersos en un Electrolito por ej. Cobre-Hierro la d.d.p. resulta $V = 0,337 - (-0,44) = 0,777$ Voltios; o cobre-zinc $V = 0,337 - (-0,763) = 1.10$ Voltios

9.6 Representación de la Corrosión de los Metales

La descripción termodinámica del sistema *metal-solución*, se halla en los respectivos *diagramas de POURBAILX*, indicando el estado final de las tendencias, mas no la velocidad CON la que se llega a dicha representación consiste en la variación del potencial de electrodo (Voltios); con respecto al carácter de la solución (pH), permitiendo delinear las *zonas de estabilidad* de los diferentes elementos químicos en:

➤ Zona de Inmunidad

Indicando la región en la que el Metal se halla incólume y libre de reacciones químicas.

➤ **Zona de Corrosión**

Indicando la presencia de elementos solubles resultantes y la tendencia a la disolución del metal.

➤ **Zona de Pasivación**

Indicando las condiciones de formación de productos sólidos que entorpecen la Corrosión.

9.7 Diagramas de *POURBAIX*

Los criterios de base para la interpretación de los *diagramas de POURBAIX* son:

- Un metal se disuelve a un potencial determinado y no a potenciales inferiores.
- El potencial de disolución de un metal no es afectado por el (*pH*) del medio.
- Si el metal disuelto da un óxido o un Hidróxido, la reacción ocurre a un potencial dependiente del (*pH*).
- Si se neutraliza una solución ácida que contiene iones metálicos, a un cierto (*pH*) se forman precipitados de Hidróxidos.
- El aumento del (*pH*) por encima de cierto valor crea la redisolución de los Hidróxidos precipitados aniones e iones complejos.

➤ **Interpretación de Gráfica**

El significado de las líneas que corresponden a la representación grafica es la siguiente:

- Líneas Horizontales
Corresponden a reacciones (anódicas) bajo el Potencial (V), en las que hay

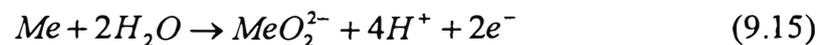
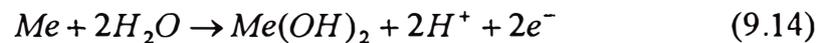
intercambio de electrones independientes del (pH).

- Líneas Verticales

Corresponde a las reacciones (Catódicas), dependientes del (pH) pero independientes del Potencial (V)

- Líneas Oblicuas

Corresponde a las reacciones que dependen del Potencial (V) y del (pH) simultáneamente.



9.8 Diagramas de POURBAIX - Metales Básicos

Se pueden describir en forma resumida los patrones del comportamiento de los metales que se utilizan en los electrodos de puesta a tierra cuando se hallan inmersos en un electrolito equivalente al suelo considerando que la Temperatura ambiente y del medio es de 25 °C a la presión atmosférica Normal.

➤ Comportamiento del Cobre

Presenta dos zonas de corrosión asociadas a los medios ácido y alcalino; en el medio ácido con un ($pH < 5,4$) el límite del dominio de corrosión es una línea horizontal a (+0,15 Voltios), al incrementarse el (pH) la línea cambia de dirección, manteniéndose lineal, formándose una capa de óxido de cobre (Cu_2O) que protege completamente al metal de la solución y de la destrucción, siempre que este adherida y no sea porosa; adicionalmente se forma $Cu(OH)_2$ y CuO

Cuando el $pH > 11,6$, los Hidróxidos y óxidos se disuelven originando una nueva

zona de corrosión.

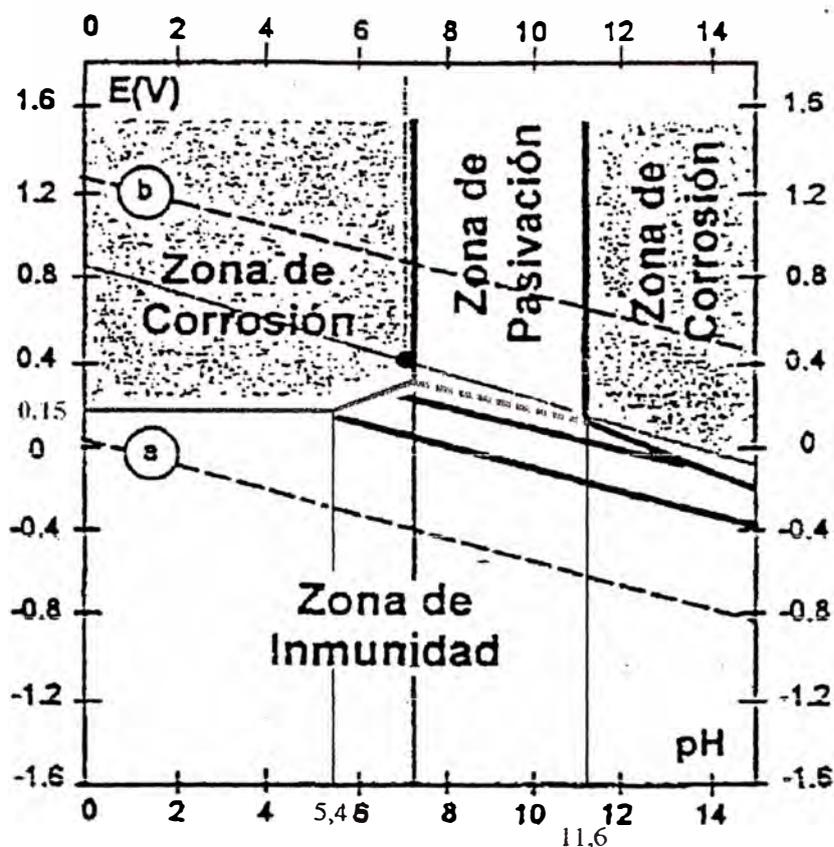


Fig. 9.1 Comportamiento del cobre en soluciones acuosas (capa pasivante Cu_2O)

➤ Comportamiento del Aluminio

Siendo un metal de gran Basicidad y estando su dominio de estabilidad por debajo de la del Agua, en soluciones ácidas descompone el agua con evolución de Hidrógeno (H^+) disolviéndose en iones metálicos idénticamente ocurre en soluciones Alcalinas donde al descomponerse el agua, se disuelve en forma de iones de aluminato (AlO_2).

Cuando el (pH) de las soluciones se hallan en el intervalo (4 a 9), se recubre de una capa protectora de Alumina (Al_2O_3).

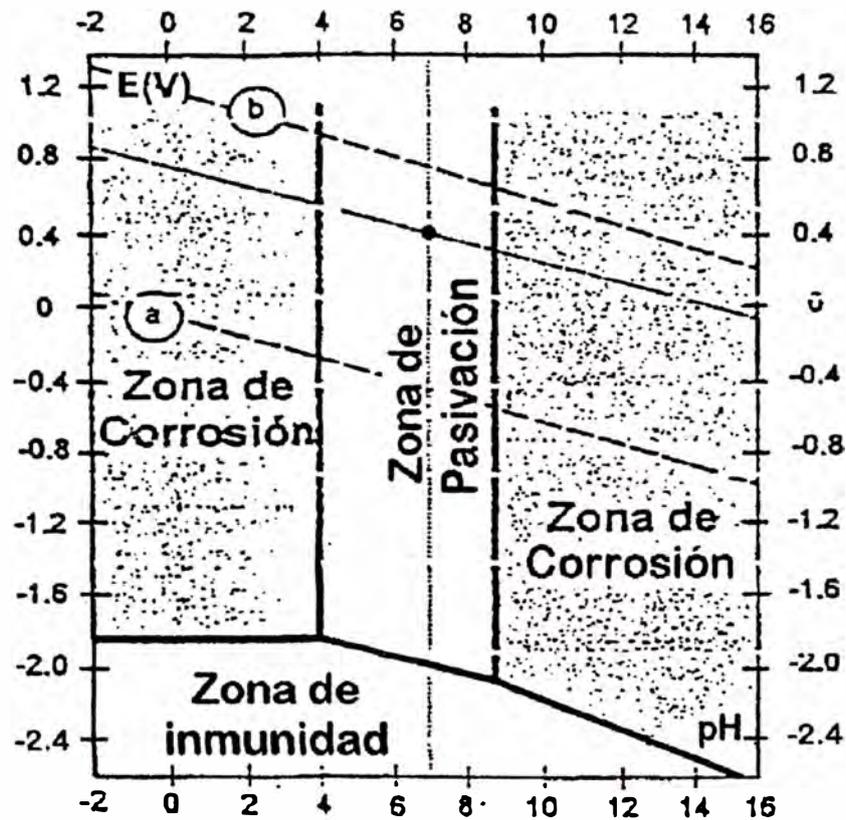


Fig. 9.2 Comportamiento del aluminio en soluciones acuosas (capa pasivante Al_2O_3)

9.9 La Corrosión en el Suelo

El suelo es un conglomerado de estructuras moleculares micro y macro, con características físicas y químicas variables, dichas heterogeneidades en la fase electrolítica crean zonas Anódicas y zonas Catódicas en la superficie del metal, donde otros constituyentes del suelo también afectan la Resistencia del circuito de funcionamiento de las celdas de corrosión.

9.10 Celda de micro corrosión

Originarán corrosión uniforme, se forman debido a las irregularidades en la superficie del metal y en la composición de este; las propiedades fisico químicas del suelo actúan en forma uniforme en las zonas Anódicas y catódicas haciendo despreciable la

Resistencia Ohmica del Circuito.

9.11 Celdas de macro corrosión

Se forman por la variación de las condiciones del suelo a lo largo de la superficie del metal; la diferencia de resistividad y la aireación diferencial son las principales causas, ocurre corrosión adicional cuando la zona anódica es mas pequeña que la zona catódica; en suelos de alta resistividad la resistencia óhmica del circuito es grande y limita la corriente de corrosión.

Las Celdas de Corrosión pueden tener varios orígenes y diferente comportamiento destructivo del metal.

➤ **Celdas Galvánicas o de Metales Disímiles**

Debido a la diferencia de potenciales de electrodo de los metales involucrados el ánodo es el metal mas activo.

➤ **Celdas de Concentración de Oxígeno**

Debido a la diferencia de concentraciones de oxígeno en el suelo, el ánodo es la zona de menor concentración.

➤ **Celdas de Concentración de Sales Disueltas**

Debido a la presencia de concentraciones diferentes de sales disueltas, la zona de mayor salinidad es anódica.

➤ **Celdas de Resistividad Diferencial**

Debido a la presencia de estratos o zonas del suelo de diferente resistividad a lo largo del Electrodo, el lado Anódico, es el de baja Resistividad.

➤ **Celdas de Bacterias Sulfato Reductoras**

Debido a la producción local de Sulfuros (zona de corrosión), a partir de los Sulfatos del suelo y del agua.

➤ **Celdas de Gradiente de Temperatura**

Debido a los gradientes térmicos en el metal; la parte anódica es la de mayor temperatura.

➤ **Celdas de Película de Oxido Superficial**

Debido a que el metal limpio se oxida en el aire y forma una película protectora heterogénea con zonas anódicas y catódicas.

➤ **Celdas de Corrientes Vagabundas**

Debido a la existencia de corrientes erráticas en el suelo que ingresan al electrodo, la zona de salida es anódica.

9.12 La corrosividad del suelo

Depende de varios factores cuyas magnitudes son diferentes dependiendo del tipo de suelo y del entorno.

➤ **La Resistividad del Suelo**

Es el parámetro eléctrico mas representativo de las características físico-químico del suelo a menor resistividad mayor será la corrosión de los metales enterrados; no obstante no existe consenso en la definición de los rangos debido a que puede cambiar drásticamente el nivel de corrosión con cualquier variación local o puntual de:

- La estratificación delgada en la superficie del suelo.
- La existencia de celdas de Concentración.
- Las diferencias de (pH) entre zonas adyacentes.
- La Contaminación química de los agregados.

TABLA N° 9.1

Corrosividad de los suelos	Resistividad (Ω -m)
Corrosión severa	0 – 25
Corrosión moderada	26 – 50
Corrosión media	51 – 200
Corrosión baja	200 – mas

➤ **La Aireación del Suelo**

Depende de la permeabilidad del suelo a la penetración del aire atmosférico; una pobre aireación cerca del metal, resulta en severa corrosión local, debido a que en las partes aireadas el oxígeno relleva el potencial estático del metal, ennobleciéndolo y creando una d.d.p. espontánea que hace funcionar las celdas de corrosión.

➤ **El Contenido de Humedad**

La penetración de la humedad en el suelo limita la tasa de penetración del aire (aireación), y paralelamente ocasiona la disminución de la Resistividad del suelo, lo cual incrementa el nivel de corrosión de este.

➤ **Los Contenidos Ácidos y Salinos**

Las sales ácidas incrementan la corrosividad del suelo, mientras que las sales alcalinas se comportan como inhibidoras de corrosión; en suelos ácidos aumenta la despolarización en la zona catódica, incrementando la corrosión en la zona anódica.

9.13 Las Corrientes que Producen Corrosión

La Tasa de Corrosión depende de la magnitud total de las corrientes que cierran las celdas activas en la superficie del electrodo de puesta a tierra, y aquellas que abandonan dicho electrodo para seguir su propio circuito (corrientes vagabundas).

La Corriente de Corrosión (I_C) es de naturaleza continua se la determina asumiendo que se conocen los procesos en el ánodo y el cátodo, para ello es necesario establecer la d.d.p. inicial (ΔE) entre ánodo (E_a) y cátodo (E_c) después de medir con una celda de Cobre-Sulfato de Cobre ($C_u - SO_4C_u$) entre el metal (electrodo) y el electrolito (suelo), los potenciales extremos respectivos; cuanto mayor sea la diferencia, mayor será la corriente de corrosión.

De otro lado la resistencia ohmica del circuito de la celda galvánica (R_C) se puede determinar en forma aproximada con la resistividad del electrolito (suelo) y la distancia ánodo-cátodo; la primera resulta del procesamiento de las medidas directas de resistividad aparente y la segunda del tanteo a partir de la configuración de la celda y la relación entre las superficies anódica y catódica; lo que finalmente permite hallar (I_C).

$$I_C = \frac{E_c - E_a}{R_C} \quad (9.16)$$

Las corrientes erráticas que recorren el suelo, aparte el tener fuentes y circuitos propios, también varían en intensidades según las horas del día o en forma aleatoria según las horas del día o en forma aleatoria; algunas son de origen telúricas y las geomagnéticas las otras pertenecen a procesos de trabajos como las corrientes continuas de los medios de transporte, las corrientes de rectificación para cargas no lineales, las corrientes de protección catódica etc.

Finalmente también participan corrientes alternas de diferentes fuentes (estática, fuga, inducción, homo polares, cuya contribución a la corrosión se estima en un 2%.

9.14 Corrosión de los materiales de las tomas de tierra

Aunque se prevé que las tomas de tierra deben resistir la acción corrosiva del

terreno este es un medio electrolítico en el que las tomas de tierra interconectadas formadas por diferentes metales, forman pares galvánicos.

El metal mas Electronegativo tiende a degradarse disolviéndose en el electrolito así ocurre con los pares cobre-hierro, cobre-zinc, cobre-plomo.

9.15 Actividad de las celdas de corrosión

Corresponde totalmente a la corrosión electroquímica que afecta la superficie de los electrodos de puesta a tierra, y se relaciona con diferentes factores bajo los cuales se diseñan se instala y se operan las aterramientos.

El proceso se establece al inicio discretamente y evoluciona poco a poco incrementándose drásticamente y a veces en forma irreversible la resistencia de dispersión en periodos relativamente corto (6 meses a 2 años) y paralelamente se va reafirmando extendiéndose y penetrando localmente o puntualmente hasta ocasionar fracturas.

Dicho fenómeno se puede precipitar y agravar en el caso de tener que funcionar dispersando altas corrientes de corto circuito, cuando existen uniones, empalmes o zonas muy resistivas por corrosión, en tales casos hay rotura por fusión y paralelamente vitrificación del suelo.

9.16 Comportamiento de los electrodos de puesta a tierra

➤ Corrosión en los electrodos de Cobre

Resiste la corrosión en casi todos los tipos de terrenos, a excepción de los terrenos alcalinos o en medios amoniacales (agua de estiércol); los derivados del cloro y del azufre contenidos en los suelos originan la oxidación del cobre formando una película negruzca denominada “petina” esta presenta :

- Alta densidad
- Baja solubilidad

- Alta resistencia eléctrica
- Elevada resistencia eléctrica al ataque químico y eventualmente a la erosión.

➤ **Corrosión en los electrodos de acero**

El oxígeno y la humedad producen en la superficie de los aceros enterrados primero una película protectora de hidróxido de hierro que se le conoce como “herrumbre” la cual es:

- Dura
- poco soluble
- Alta resistencia eléctrica

Como en todos los metales actúa como una barrera protectora también el ion cloruro de los cloruros ataca la superficie del metal y rompe la capa pasivante inclusive en los aceros inoxidable.

➤ **Corrosión del Aluminio**

El aluminio por ser un material muy alcalino y de carácter anfótero, es sumamente vulnerable ante la agresividad del medio ambiente salino, especialmente en suelos del litoral marítimo que tiene dicha filiación y reciben directamente las filtraciones y contaminación marina

Una de las reacciones que disuelve el aluminio puro y las aleaciones del aluminio lo ocasiona el hidróxido de sodio.



9.17 Corrosión Bacteriana

Puede definirse como un fenómeno de degradación de los metales, en los que intervienen microorganismos actuando bien directamente o indirectamente sobre los

mismos.

Ya en 1923, Von Wolzogen-Kühr puso en evidencia el mecanismo electroquímico del ataque del hierro por los microorganismos sulforreductores.

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 Ferró Bacterias**

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 del O_2 y CO_2 disueltos.

➤ **Las Sulfató Reductoras**

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.

➤ **Las Bacterias del Género «Desulfovibrio»**

Poseen la propiedad de oxidar el hidrógeno como la «*micrococcus denitrificans*».

➤ **Las Carbonato Reductoras**

Reducen los carbonatos dando lugar a metano; la mas importante es la «*Methanobacteriaceae*».

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

Los suelos arenosos retienen poco el agua que se filtra rápidamente; los arcillosos la retienen el grado de humedad depende de forma importante del espesor de la capa de humus.

➤ **Corrosión Anaerobia**

Esta corrosión originada por el desulfobiondo 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 procesos de corrosión sobre todo en suelos piritosos.

9.18 Cinética de la corrosión en el suelo

Los suelos de baja resistividad como se ha visto normalmente permiten altas tasas de corrosión, la humedad en este caso juega un rol importante debido al contenido y tipo de los elementos que producen iones libre en el electrolito.

La concentración de iones libres de hidrógeno (pH) y el oxígeno disuelto en el suelo participan en el proceso de control de la corrosión.

Un electrolito ácido (pH<7) contiene exceso de iones hidrógeno que promueven la neutralización de los electrones de la disolución del metal e incentivan el flujo de corriente de corrosión de ese modo las partes del electrodo que se halla en la zona ácida del electrolito son anódicas respecto de aquellas que se hallan en una zona de (pH) mayor.

Un subproducto de la corrosión es la acumulación de una capa de hidrógeno en la superficie catódica (por donde ingresa la corriente de corrosión; esta polarización catódica

interviene reduciendo espontáneamente la corriente de corrosión constituyendo una barrera aislante; sin embargo el oxígeno disuelto en el electrolito puede reaccionar con el hidrógeno para volver a formar agua actividad que destruye la capa polarizante y permite que la corrosión continúe.

9.19 Exigencia del funcionamiento de la puesta a tierra

Diseñados para conducir y dispersar corrientes de todo tipo por lo que se podría tomar tres alternativas prácticas, viables para la preservación de los electrodos de puesta a tierra.

➤ **Materiales resistentes a la corrosión**

Básicamente se trata del uso de metales nobles tales como el cobre y sus aleaciones cuando no hay posibilidad de perjuicios a instalaciones ferrosas próximas de menos envergadura o metales catódicas como el acero inoxidable o aleaciones especiales de Níquel o Titanio.

➤ **Lechos de instalación adecuada.**

Se debe tratar de crear un entorno inmediato al conductor conformado por rellenos preferentemente estables de (pH) neutro-alcalino mezclando la tierra fina con materiales naturales como la bentonita que es a la vez conductiva, aglutinante y selladora y limita la migración de sales corrosivas hacia el metal.

➤ **Protección catódica.**

Consiste en la inyección al suelo a travez de un electrodo sacrificial de una corriente de mayor magnitud en sentido contrario a la corriente de corrosión especialmente cuando se trata de instalaciones de baja resistividad y cuando se utiliza materiales electronegativos.

Descartando el uso de la protección catódica por su elevado costo y necesidad de mantenimiento solo quedaría las posibilidades de electrodos resistentes a la corrosión y rellenos conductores estables y neutros, exigencias difíciles de cumplir estrictamente pero si en forma aproximada.

CONCLUSIONES

1.- En este presente informe se ha tratado de dar a conocer que el análisis de suelos y el conocimiento de los mismos ayuda a poder diseñar en base a las formulaciones existentes sistemas de puesta a tierra confiables y dentro de los parámetros requeridos.

2.- La filosofía de la ciencia admite que pueden existir varias teorías para abordar y resolver un mismo problema, pero ellas deben cumplir los requisitos necesarios para ser consideradas como teoría científica.

3.- Los campos de acción de la ingeniería de puesta a tierra puede ser ordenados y abordados en varias formas y maneras:

- Basándose en la naturaleza científica de la corriente que será introducida a tierra por medio del electrodo
- Tomando como pivote a la naturaleza del proceso técnico de la instalación en que estará insertada, por ejemplo, estación generadora de electricidad, subestación eléctrica, línea de transmisión, etcétera
- Basándose en ciertas características técnicas de la instalación en cuestión como por ejemplo: media, alta y de extra alta tensión, entre otros posibles; sin embargo, cualquiera que sea el enfoque que se adopte, los diferentes tipos de electrodos (Jabalina, contrapesos, sistemas compuestos) son usados normalmente en el sistema de puesta a tierra de las instalaciones respectivas.

4.- Así mismo se deberá tener en cuenta que el valor de la resistencia de puesta a tierra estará determinado fundamentalmente por la característica de la resistividad del terreno en las cercanías del electrodo o sistema de puesta a tierra.

5.- La aplicación del método geoelectrico para la determinación de las resistividades específicas de los estratos del suelo que lo conforman y del espesor de la primera capa son datos suficientes para el diseño de un sistema de puesta a tierra.

6.- La ventaja de la aplicación del Método de Schlumberger, se interpretan en una mayor profundidad de penetración exploratoria como una mejor consistencia en la información obtenida de los estratos del suelo.

7.- En el caso de instalaciones de energía eléctrica, ya sea de corriente continua o alterna, tanto en baja como en alta tensión, se utiliza la teoría estacionaria, exceptuando el caso de las líneas aéreas de corriente alterna en alta tensión, en las cuales es necesario ya considerar a la teoría casi estacionaria (aquí interviene ya el fenómeno de la inducción); pero, ya que ellas están expuestas a las descargas atmosféricas, se debe considerar también a la teoría de las ondas electromagnéticas que se propagan como ondas viajeras.

8.- En las instalaciones de energía eléctrica en corriente alterna en baja y alta tensión, la puesta a tierra, tanto de servicio como de protección, se debe abordar con base en los mismos principios, pero con enfoques diferentes, en particular en lo relativo a la seguridad de las personas en los puestos de trabajo.

9.- En resumen, la ingeniería de puesta a tierra tiene en verdad un amplio campo de acción tecnológico, al cual se le podrá abordar si se cuenta con los conocimientos básicos fundamentales.

ANEXO A

Aplicación

APLICACIÓN

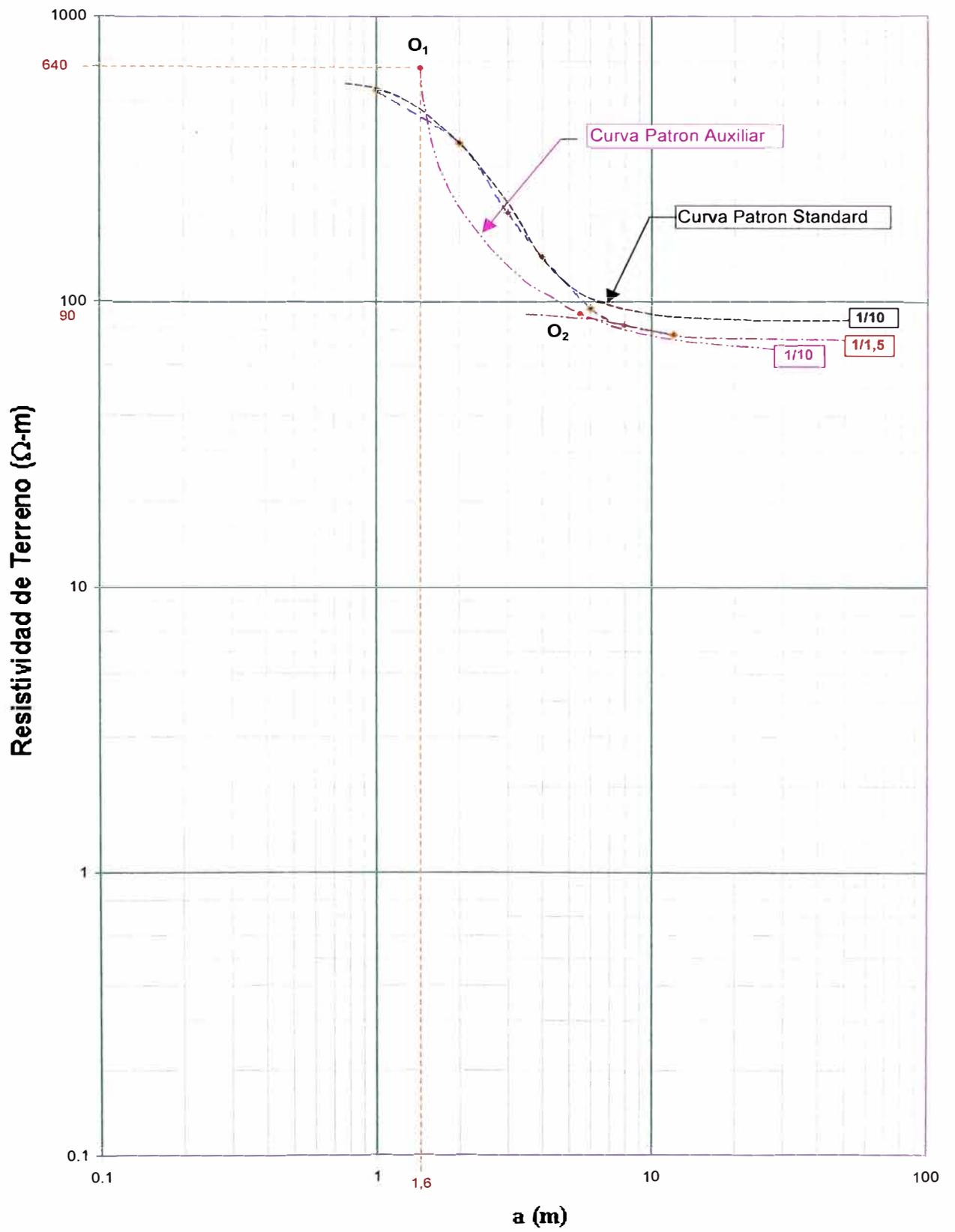
Se requiere diseñar un Sistema de Puesta a Tierra para una Subestación Eléctrica de Media Tensión, para ello se cuenta con los datos del Proyecto y las Medidas de resistividad de terreno utilizando el Método Wenner que se dan a continuación.

DATOS	
Resistencia requerida (Ω)	< 2
Lados del Area de la malla de tierra (m)	A = 60 B = 50
Espaciamiento de reticulado (m)	$e_A = 5$ $e_B = 5$
Tiempo de Aclaramiento de la falla (ms)	112
Corriente de falla (A)	4000
Corriente de corto circuito fase-tierra (A)	7000

Datos de Resistividad de Terreno – Método Wenner							
a (m)	1	2	3	4	6	8	12
ρ (Ω -m)	550	360	205	145	95	83	77

a) Se procede a determinar la resistividad de los estratos del terreno.

Se usara la descripción del método grafico de Yokogawa (Curva Standard y Auxiliar) Pág.61.



Obteniéndose los siguientes valores de resistividad para cada estrato

Estrato	Resistividad (Ω-m)	h (m)
1	640	1.6
2	64	4.0
3	60	

Para el cálculo de la resistividad equivalente ρ_{EQ} de dos estratos se utilizara la formula (6.9 - Pág. 92)

$$\rho_{EQ} = 160 \Omega\text{-m}$$

b) Cálculo de Potenciales Máximos de Paso y Toque considerando la utilización de una capa de grava.

Características de la Grava	
Resistividad (ρ)	3 000 Ω -m
Espesor de Capa de Grava (h)	0.2 m

Para ello se deberá considerar la formula del factor de reflexión (K) (5.11 - Pág.77) y la del factor de corrección por el uso de grava (C_S) (5.10 - Pág. 77)

De donde se obtiene:

Factor	Valores
K	-0,89873
$C_S (1 \leq n \leq 5)$	0.76083

Utilizando las formulas correspondientes de $V_{P_{MAX}}$ y $V_{T_{MAX}}$ (5.12 - 5.13 – Pág.77),

obtenemos:

$V_{P_{MAX}}$	5 093.50 Voltios
$V_{T_{MAX}}$	1 324.95 Voltios

c) Cálculo de la Sección del conductor a utilizar

Sabiendo que la corriente $I_{F_{C:C}} = 7000$ A. y siendo la temperatura máxima del conductor ($T_{MAX} = 200$ °C), y utilizando la formula (6.34 - Pág. 103) obtenemos la sección del conductor correspondiente.

Sección de diseño del conductor	14,7 mm ²
---------------------------------	----------------------

Como no es comercial dicha sección se utilizara un conductor de calibre N° 4 AWG; pero sabemos que el calibre mínimo a utilizar es 2/0 AWG ó 70 mm².

d) Cálculo de la Longitud Mínima del Conductor a Utilizar

Es bueno indicar que para los siguientes cálculos se hace necesario definir que tipo de conductor se va a utilizar; por lo que este será de calibre N° 2/0 AWG.

Datos		
Descripción	Valores	Unidades
Diámetro del Conductor (d)	0,01083	<i>m</i>
Profundidad de enterramiento del conductor (h)	0,6	<i>m</i>
$e = \text{Max}(e_A, e_B)$	5	<i>m</i>
$N_a = \frac{A}{e_a} + 1$	13	
$N_b = \frac{B}{e_b} + 1$	11	
Número de conductores en paralelo ($N = \sqrt{N_a \cdot N_b}$)	11,96	

Hallando los siguientes factores

Factores	Valor	Pág.
K_m	0,7532	(5.19) – 80
K_h	1,2560	(5.22) – 81
K_{II}	0,5881	(5.21) – 81
K_I	2,7131	(5.23) - 81

Utilizando la formula (5.29 – 5.30 - Pág. 83) tenemos que $L_{CONDUCTOR}$ será .

$$L_{CONDUCTOR} \geq 987m$$

Como el conductor no puede tener una longitud infinita se calculara la longitud física del reticulado tratando de hallar un parámetro máximo y mínimo para la longitud del conductor.

$$L_{COND-MALLA} = A \times N_b + B \times N_a = 60 \times 11 + 50 \times 13 = 1310.00 \text{ m}$$

por lo tanto :

$$987 \text{ m} \leq L_{CONDUCTOR} \leq 1310,00 \text{ m}$$

e) Cálculo de las Tensiones de Toque y Paso de la Malla.

Considerando la utilización de algunas jabalina procederemos a hallar :

e₁) Tensión de Toque.- Utilizando los datos presentados a continuación:

Datos		
Descripción	Valores	Unidades
Longitud del conductor (L_c)	1 310.00	<i>m</i>
Número de jabalinas a utilizar (n)	20	
Longitud de Jabalina (L_v)	2,4	<i>m</i>
Longitud de electrodos ($L_E = n \times L_v$)	48	<i>m</i>

Podremos utilizar la formula (5.27 - Pág. 82) y obtener:

$$V_{T_{MALLA}} = 958 \text{ Voltios}$$

e₂) Tensión de Paso.- Utilizando los datos presentados

Datos		
Descripción	Valores	Unidades
Profundidad de enterramiento del conductor (h)	0,6	<i>m</i>
$e = \text{Min}(e_A, e_B)$	5	<i>m</i>
$N_a = \frac{A}{e_a} + 1$	13	
$N_b = \frac{B}{e_b} + 1$	11	
Número de conductores en paralelo ($N = \text{Max}(N_a, N_b)$)	13	

Hallando los siguientes factores :

Factores	Valor	Pág.
K_s	0,3860	(5.15) – 79
K_l	2,8920	(5.17) - 79

Podremos utilizar la formula (5.26 - Pág. 82) y obtener:

$$V_{P_{MALLA}} = 524,00 \text{ Voltios}$$

e3) Tensión de Toque - Cerca Metálica como Protección de la Subestación.

Utilizando los datos presentados a continuación:

Datos		
Descripción	Valores	Unidades
Profundidad de enterramiento del conductor (h)	0,6	m
$e = \text{Max}(e_A, e_B)$	5	m
$N_a = \frac{A}{e_a} + 1$	13	
$N_b = \frac{B}{e_b} + 1$	11	
K_1	2,7131	
Número de conductores en paralelo ($N = \text{Max}(N_a, N_b)$)	13	

Se ha considerado un punto a un metros de la malla ($x = 1 \text{ m}$) y hallando el siguiente factor:

Factores	Valor	Pág.
K_C	0,3860	(5.25) – 81

Podremos utilizar la fórmula (5.28 - Pág. 82) y obtener:

$$V_{T_{CERCA}} = 1320,00 \text{ Voltios}$$

f) Cálculo preliminar de la Resistencia de Puesta a Tierra de la Malla.

Utilizando la formula de Dwight (6,29 - Pág. 101) podremos calcular en forma preliminar la resistencia:

$$R = 1,29 \Omega$$

g) Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra de la Malla Reticulada.

Utilizando la formula de Sverak (6,27 - Pág. 100) podremos obtener el valor definitivo de la Resistencia de Puesta a Tierra de la malla.

$$R_{SVERAK} = 1,39 \Omega$$

h) Cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra utilizando jabalinas

Utilizando la formula de Schwartz (6,15 - Pág. 96) podremos obtener el valor de la Resistencia de Puesta a Tierra usando jabalinas.

Previamente deberemos calcular el factor K_1 por medio de la formula (6.16 - Pág. 96) y obtendremos:

Factor	Valor
K_1	1,3872

Utilizando la formula (6,15 - Pág. 96) Obtendremos el valor de la Resistencia de Puesta a Tierra:

$$R = 3,09 \Omega$$

i) Cálculo de la Resistencia Mutua de las configuraciones (Malla Reticulada y Jabalinas).

Utilizando la formula de Schwartz (6,31 - Pág. 101) podremos obtener el valor de la Resistencia Mutua usando ambas configuraciones:

$$R_M = 1,31 \Omega$$

j) Cálculo de la Resistencia Final que se podría obtener en un sistema de Puesta a Tierra..

Utilizando la formula de Schwartz (6,32) Pág. 102 podremos obtener el valor de la Resistencia Final:

$$R_f = 1,39 \Omega$$

Observaciones.-

- Podemos decir que cumplimos con el requerimiento de que la resistencia final debería ser menor a 2 Ohmios ($R_f < 2 \Omega$)
- Como se podrá observar el valor final de la resistencia de Puesta a Tierra es casi similar al obtenido con un arreglo de malla reticulada.
- Haciendo una preparación adecuada del terreno (uso de Gel y/o Bentonita) cuando se elabore el Sistema de Puesta a Tierra se podrá reducir la resistencia del Sistema de Puesta a Tierra entre un 10 % a 30%.
- Siendo la resistividad del segundo estrato de un valor bajo ($\rho_2 = 64 \Omega$) implica la obtención de un valor bajo de resistencia de Puesta a Tierra.

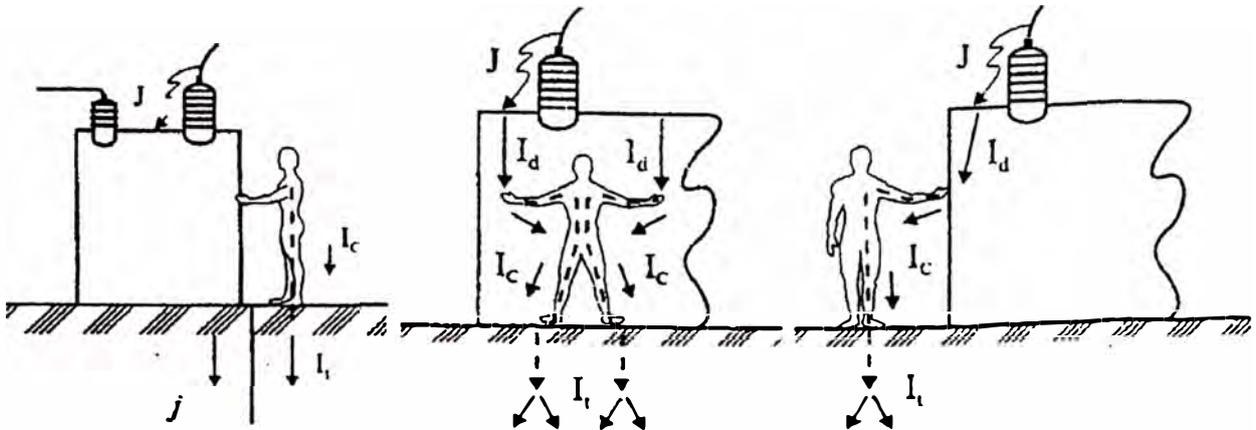
ANEXO B

Efectos de la corriente en el cuerpo humano

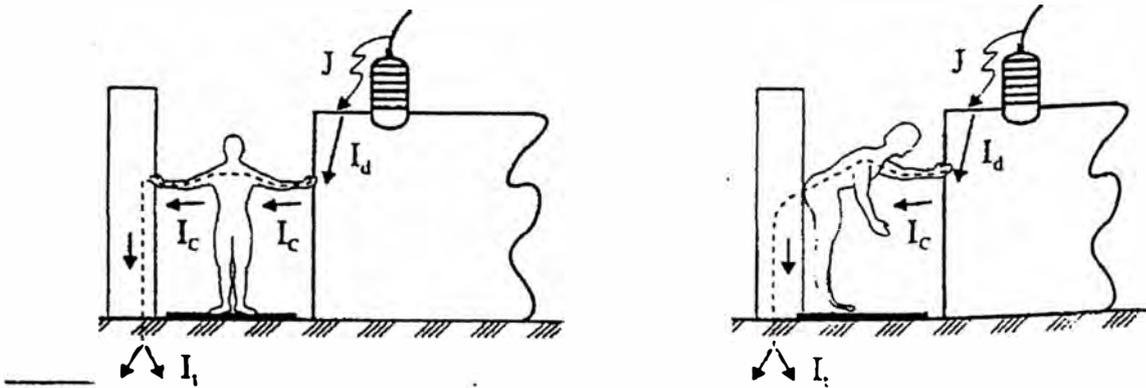
I (mA)		Reacción Fisiologica	Consecuencia	Primeros Auxilios	Resultado mas probable
C.A.	C.C.				
1 → 5	1 a 80	Limite de percepción.	Una corriente muy próxima a 25 mA puede provocar asfixia y como consecuencia muerte aparente	Respiración artificial	Recuperación
5 → 15		Contracción muscular.			
15 → 25		Contracción muscular violenta. Imposibilidad de soltar objeto energizado. Problemas respiratorios.			
25 a 80	80 a 300	Dolores insoportables Contracciones violentas de músculos lisos Asfixia	Muerte aparente	Respiración artificial	Recuperación
> 80	> 300	Asfixia inmediata Fibrilación Ventricular Alteraciones Musculares (Químicas)	Muerte aparente	Respiración artificial. Masaje cardiaco	Uso de Desfibrilador Recuperación
I (Amperios)		Quemaduras Necropsia de tejidos Paro cardiaco	Muerte	Tratamiento hospitalario Emergencia	Hospital Uso de Desfibrilador Atrofia muscular

ANEXO C

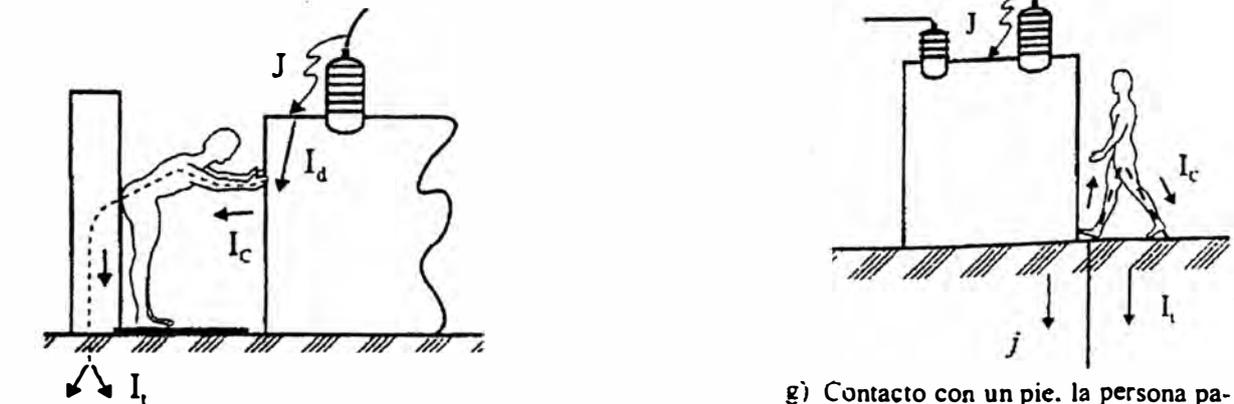
Contacto de personas con los medios eléctricos.



- a) Contacto con una mano, estando la persona parada sobre suelo conductor; circulación de corriente longitudinal, de manos a pies: $R_c \cong 750\Omega$.
- b) Contacto con las dos manos, parada la persona sobre suelo conductor; circulación de corriente longitudinal, de manos a pies: $R_c \cong 500\Omega$.
- c) Contacto con una mano, la persona parada con un pie sobre suelo aislante y con el otro sobre piso conductor; circulación de corriente longitudinal, de la mano al pie: $R_c \cong 1000\Omega$.



- d) Contacto con una mano y con la otra tocando un muro conductor (columna, etc.), la persona parada en un piso aislante; circulación de corriente transversal de mano a mano; $R_c \cong 1000\Omega$.
- e) Contacto de mano a cadera, la persona parada sobre piso aislante; circulación de corriente parcial de mano a cadera; $R_c \cong 500\Omega$.



- f) Contacto de manos a cadera, la persona parada sobre suelo aislante; circulación de corriente parcial de manos a cadera; $R_c \cong 250\Omega$.
- g) Contacto con un pie. la persona parada sobre suelo conductor; circulación de corriente parcial de un pie al otro; $R_c \cong 1000\Omega$.

ANEXO D

Evaluación de parámetros eléctricos del suelo

Métodos de Wenner - Schlumberger

Método de Wenner.

Se aplica el principio de Caída de Potencial donde una fuente inyecta una corriente I en un suelo de resistividad (ρ) homogéneo.

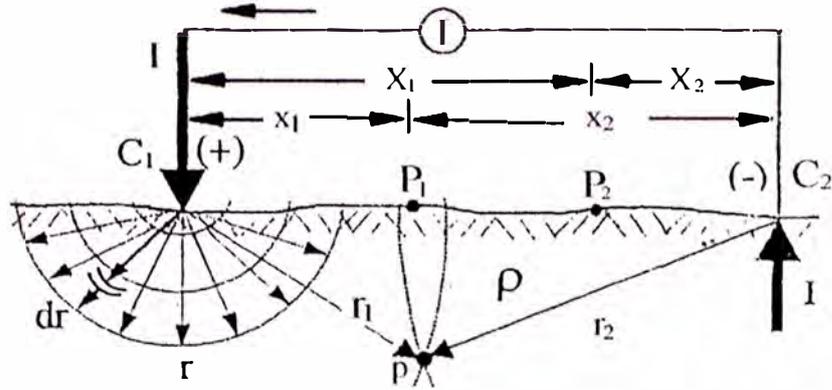


Fig. 3.1

El circuito exterior haciendo circular una corriente I inyectada por el electrodo C_1 y colectada por el electrodo C_2 (-).

Esta corriente pasa por el suelo entre los puntos C_1 y C_2 produciendo una diferencia de potencial entre los puntos P_1 y P_2 .

Los potenciales en un punto P inducidos desde C_1 y C_2 serán :

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

El Potencial V_P en el punto P estará dado por $V_P = V_{P(1)} + V_{P(2)}$

$$V_P = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Entre dos puntos cualesquiera P_1 con distancia (x_1, x_2) de C_1 y C_2 así mismo P_2 con distancia (X_1, X_2) . La diferencia de potencial entre ambos será (V_S):

$$V_S = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} - \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} \right) = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} F(x_n)$$

Conociendo las distancias x_1, x_2, X_1, X_2 así como I y V_S o la resistencia R que se mide con un Telurómetro, se halla la Resistividad del suelo (ρ)

$$\rho = 2.\pi R \frac{1}{F(x_n)}$$

Condición del conexionado

$$x_1 = X_2 = a$$

$$x_2 = X_1 = 2a$$

Operando en el Factor de Forma :

$$F(x_n) = \frac{1}{a}$$

$$V_S = \frac{\rho \cdot I}{2.\pi \cdot a}$$

De cuya relación se obtiene la expresión que da la Resistividad :

$\rho = 2.\pi \cdot a \cdot R$ En Suelo Homogéneo con una profundidad ($a \geq h \geq 0,75a$)

$\rho = 2.\pi \cdot a \cdot R_a$ En Suelo Estratificado (Aparente)

$\rho_a = \rho$ Se cumple en suelos Homogéneos

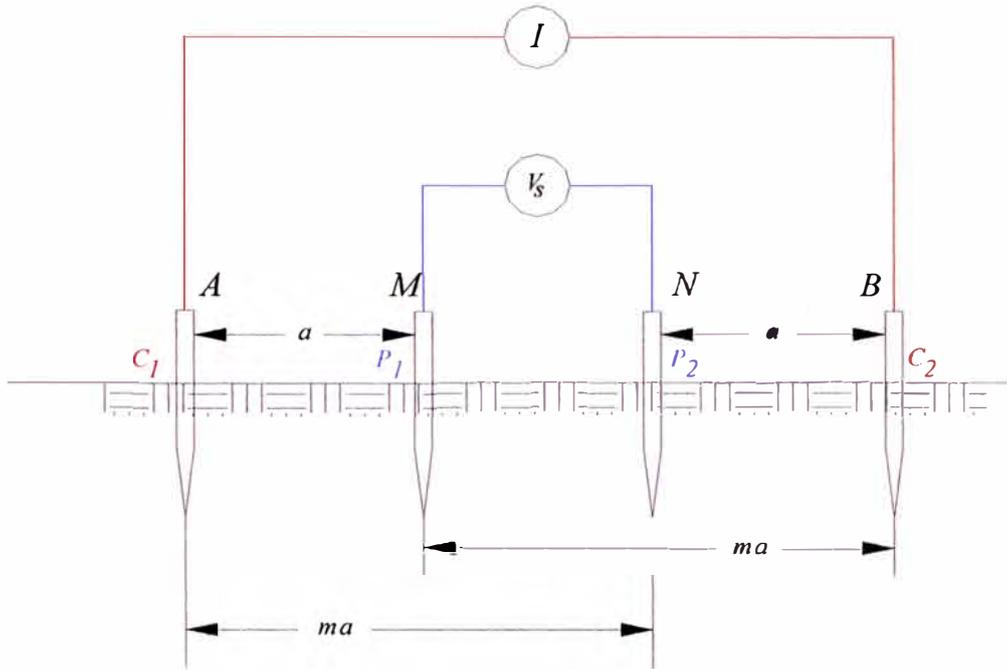
$\rho_a \neq \rho$ Se cumple en suelos Estratificados

Método de Schlumberger.

Al igual que el método Wenner; se inyecta una corriente de medida (I) entre los electrodos (C_1) y (C_2) se mide la diferencia de potencial (V_S) entre los electrodos intermedios (P_1) y (P_2).

A diferencia del método Wenner; los electrodos de potencial son fijos y los electrodos de Corriente son móviles.

La separación de electrodos móviles es proporcional e idéntica.



Condición del conexionado con :

$$1 < m < 1.5$$

$$x_1 = x_2 = a \quad , \quad x_2 = x_1 = ma$$

Operando en el Factor de Forma :

$$F(x_n) = \frac{2 \cdot (m-1)}{m \cdot a} \qquad V_s = \frac{\rho \cdot I \cdot (m-1)}{\pi(m \cdot a)}$$

Luego, con las relaciones geométricas del esquema, se obtiene:

$$ma - a = L = MN \quad \text{y} \quad ma + a = L = AB$$

$$m = \frac{(AB + MN)}{AB - MN} \qquad a = \frac{AB - MN}{2}$$

Resultando la expresión que da la resistividad medida ya en el suelo Homogéneo

(ρ) ó suelo estratificado (ρ_a) respectivamente:

$$\rho = \frac{\pi}{4} \left(\frac{AB^2 - MN^2}{MN} \right) \cdot R \qquad \rho = \frac{\pi}{4} \left(\frac{AB^2 - MN^2}{MN} \right) \cdot R_a$$

$$K = \frac{\pi}{4} \left(\frac{AB^2 - MN^2}{MN} \right) \quad \text{Donde : } K = \text{Constante de medida}$$

$\rho_a = \rho$, Se cumple en suelos Homogéneos

$\rho_a \neq \rho$, Se cumple en suelos Estratificados

Profundización de las corrientes para medición de resistividad de terreno

Se requiere establecer la profundidad (y) de exploración óptima del suelo, que se hace a partir de medidas con una distancia ($2x$) entre electrodos de corriente.

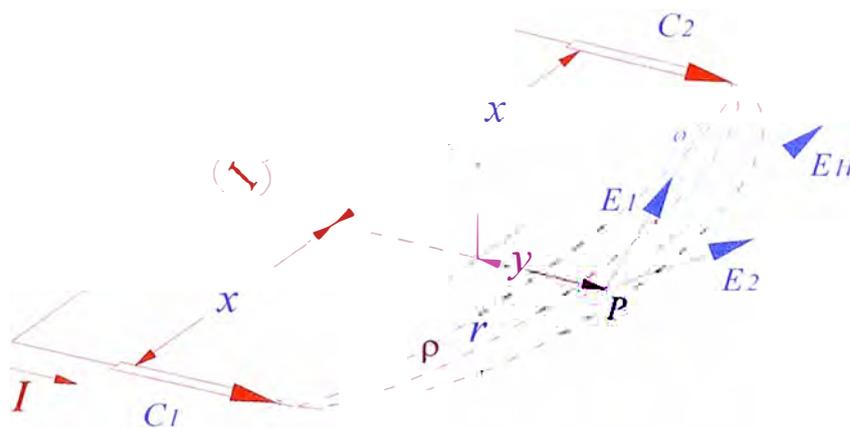
- Cada sondeo tendrá su propia corriente de profundización (I_s).
- El volumen de suelo que abarca (I), define el valor de ρ_a .
- La simulación se hace en un suelo homogéneo de resistividad (ρ).

Sea un punto (P) en el eje de simetría de una línea de sondeo geoelectrico.

Los módulos de campo eléctrico desde C_1 y C_2 en el punto (P) son:

$$E = \rho \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r^2} \quad r^2 = (y^2 + x^2)$$

Las componentes verticales E_v son opuestas, por lo tanto se anulan.



Las componentes horizontales (E_h) van en igual dirección, por lo tanto se suman obteniendo una resultante (E_H)

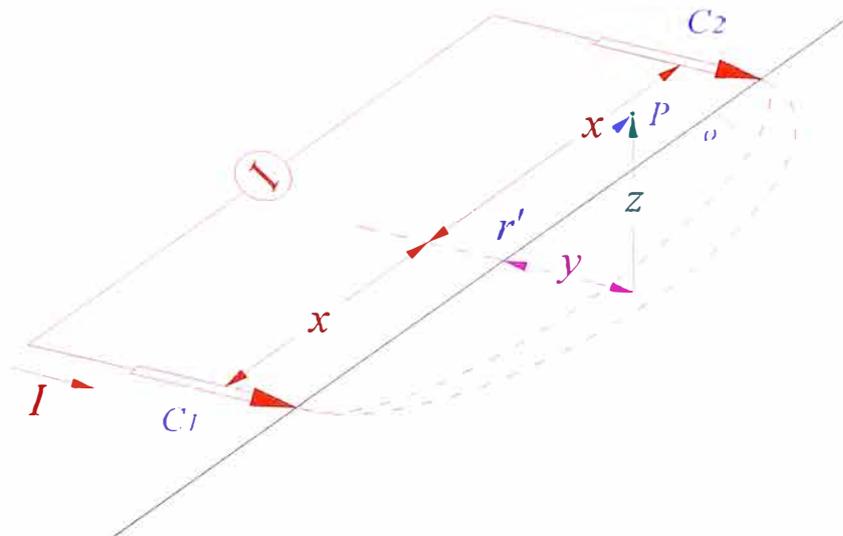
$$E_H = 2.E_1 \cos \alpha = \frac{I \cdot \rho \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot r^2} \quad \cos \alpha = \frac{x}{r}$$

La densidad de corriente (J_y) a profundidad (y) en el plano, resulta de :

$$E = \rho \cdot J \quad \text{identificando} \quad J_y = \frac{I \cdot x}{\pi \cdot r^3}$$

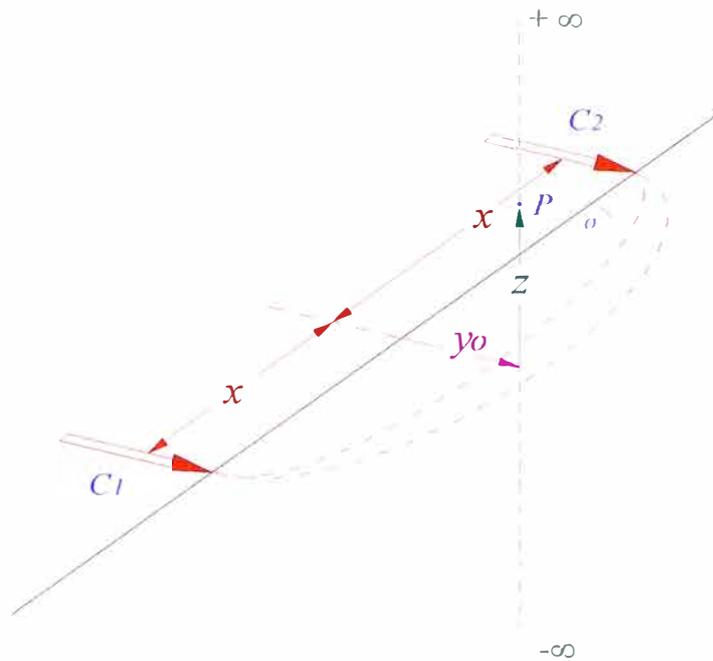
La densidad Volumétrica de (I) se obtiene por desplazamiento de (P) en una distancia (z), sobre el plano (x,y); se reemplaza por $(y^2 + z^2) = w^2$

$$J_{yz} = \frac{I}{\pi \cdot x^2 \left(1 + \frac{w}{x^2}\right)^{3/2}}$$



La corriente (I_S) hasta la profundidad ($y = y_0$); se calcula por la integral doble con límites $(0, y_0)$, $(-\infty, +\infty)$ y utilizando el artificio:

$$y' = \frac{y}{x} \quad z' = \frac{z}{x}$$



obteniéndose :

$$I_s = \frac{2.I}{\pi} \text{ArcTg} \left(\frac{y_0}{x} \right)$$

En suelos estratificados(ρ), la corriente circulación idéntica densidad (J) en el estrato de resistividad única (grueso) para cualquier distancia C_1 , C_2 .

En suelos estratificados(ρ_a) la densidad de corriente(J) varará según la resistividad de cada estrato del suelo y la distancia C_1 , C_2 .

ANEXO E

Equipos de medición

MARCA: MEGGER

EQUIPO PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD EN AREAS GRANDES



SPECIFICATIONS

Earth Resistance Range

0,010 Ω to 19,99 k Ω (auto-ranging),
1 m Ω resolution.

Accuracy (23 °C \pm 2 °C)

$\pm 0,5\%$ of reading \pm 2 digits

Service Error

$\pm 5\%$ of reading \pm 2 digits \pm 10 m Ω
(meets VDE service error over 50 m Ω)

Test Frequency

105 to 160 Hz reversing d.c. (50 Hz
operation default to 128 Hz, 60 Hz
operation default to 150 Hz) Set in
steps of 0,5 Hz

Maximum Interference

Typically 40 V peak-to-peak
(50/60 Hz, sinusoidal nature)

Display

Alphanumeric L.C.D. (130 x 35 mm:
giving test information and a larg
(20 mm) 3½-digit reading)

Temperature Coefficient

$< \pm 0,1\%$ per °C over the temperatur
range -10 to -40 °C

Temperature Range

Operating: -10 to -40°C

Storage: -20 to -60°C

MARCA: MEGGER

EQUIPO PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD EN AREAS URBANAS



SPECIFICATION

Earth Resistance Ranges (Autoranging)

20 Ω Range: 0,01 Ω to 19,99 Ω
200 Ω Range: 0,1 Ω to 199,9 Ω
2 k Ω Range: 0,001 k Ω to 1,999 k Ω
20 k Ω Range: 0,01 k Ω to 19,99 k Ω

Accuracy (at 23°C)

$\pm 2\%$ of reading ± 3 digits
Maximum service error
 $\pm 5\%$ of reading ± 3 digits.

Display

3½ digit L.C.D. with Ω , k Ω and low battery voltage indicators. LEDs for high noise, high voltage probe resistance and high current loop resistance.

Test Frequency

128 Hz $\pm 0,5$ Hz

Test voltage

Maximum 50 V peak.

Maximum Current Loop Resistance

An additional error of typically 1% may be introduced for current loop resistances of:-

20 Ω Range: 4 k Ω
200 Ω Range: 40 k Ω
2 k Ω , 20 k Ω Range: 400 k Ω

Note: with minimal current loop interference.

If the 'Rc' LED is not showing the maximum error will not exceed 2%.

Maximum Voltage Probe Resistance

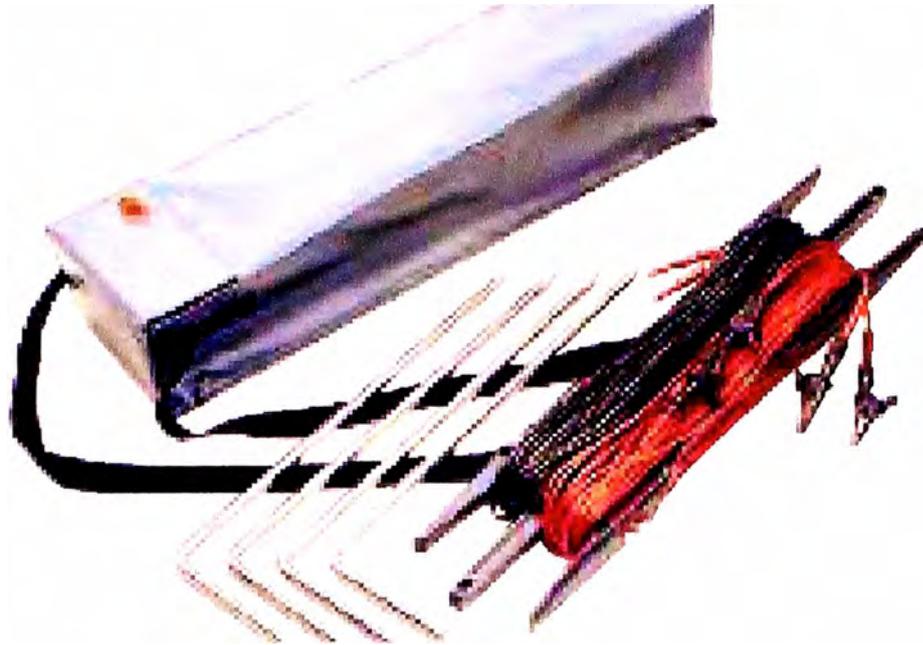
An additional error of typically 1% will be introduced for voltage probe resistance of 75 k Ω . If the 'Rp' LED is not showing the maximum error will not exceed 2%.

Power Supply

DET5/4D; 6 x 1,5 V (AA) IEC LR6 cells giving 600 typical 15 s tests at 20°C.

DET5/4R; Rechargeable version (12 V, 0,8 Ah) from 110/120 V or 220/240 V (user selectable) 50/60 Hz

ACCESORIOS DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE TERRENO



PINZA AMPERIMETRICA - AMPROBE



FEATURES

- 3-3/4 Digit LCD display, (4000 count)
- Measures ACV/ACA, DCV/DCA, ohms/continuity
- Frequency counter
- Peak hold to measure motor start or surge currents
- Data hold freezes display reading
- Auto power OFF
- Over-range indicator, low battery indicator
- Full annunciated display
- 9V battery, carrying case, test leads and instruction manual included
- Measures AC volts to 750 and DC volts to 1000
- AC/DC amps measured to 600 amps

ANEXO F

Nivel de resistencia de puesta a tierra para cada tipo de servicio

INSTALACIÓN ELECTRICA		RESISTENCIA (Ω)
Sub Estaciones	Grandes	0,1 → 1,0
	Medianas	1,0 → 2,0
	Pequeñas	2,0 → 5,0
Centros de Transformación	AT / MT (tierra única)	0,5 → 1
	Neutros	5 → 10
	Cables de Guarda y Masas de Alta	10 → 15
Patio de Transformadores de Alta Tensión	Malla integral del patio (Tierras separadas de neutro y masa)	2 → 5
Hidroeléctrica con Patio de Transformación	Malla Integral del conjunto	0,5 → 1
Pararrayos de puntas contra descargas directas de rayos	Ionizantes o radioactivos	5 → 10
	Convencionales o Franklin	10 → 15
Pararrayos auto valvulares contra inducciones atmosféricas	Baja Tensión	5 → 10
	Alta Tensión	10 → 15
	Extra Alta Tensión	10 → 20

ANEXO G

Definiciones de reacciones químicas

DEFINICIONES

- Oxidación : Reacción por la que se separan electrones de los átomos, moléculas o iones.
- Reducción : Reacción por la que se unen electrones de los átomos, moléculas o iones.
- Reacción en el Electrodo : Reacción que implica la transferencia de carga entre el electrolito y el electrodo.
- Reacción Anódica (oxidación) : Reacción en el electrodo por la que se suministran electrones a dicho electrodo.
- Reacción Catódica (reducción) : Reacción en el electrodo por la que se separan electrones de dicho electrodo.
- Ion : Átomo o grupo de átomos unidos que poseen una carga eléctrica no nula.
- Anión : Ion cargado negativamente.
- Catión : Ión cargado positivamente.
- Concentración Iónica : Cantidad por unidad de volumen de materia iónica de una especie determinada.
- Actividad Iónica : Concentración iónica corregida que tiene en cuenta las diferencias entre la disolución real y una disolución ideal.
- Factor de Actividad : Razón entre la actividad y la concentración iónica.
- Molalidad : Cociente de la cantidad de materia del soluto i por la masa del disolvente.
- pH : Numero que permite conocer el carácter ácido o básico de una disolución, expresado convencionalmente por el logaritmo decimal de la razón de la

actividad iónica del catión hidrógeno, bajo condiciones normalizadas, a la actividad iónica real del mismo catión; las disoluciones acuosas donde el pH es:

- Inferior a 7 → son ácidas.
- Igual a 7, → son neutras.
- Superior a 7 → son básicas.

- Pasivado Estado de la superficie de un metal para el que su corrosión electroquímica llega a ser desdeñable.
- Protección catódica : Inmunidad realizada mediante una polaridad catódica apropiada.
- Emigración : Desplazamiento de partículas cargadas bajo el efecto de un campo eléctrico.
- Difusión electroquímica : Desplazamiento de partículas bajo el efecto de un gradiente de concentración.

ANEXO H

Corrosión en electrodo tipo jabalina

LOCAL : REFINERÍA DE ZINC – CAJAMARQUILLA

ZONA DE PRODUCCIÓN DE ACIDO SULFURICO

POZO DE TIERRA TRADICIONAL ELABORADO CON SAL Y CARBON



COMPARACIÓN DE ELECTRODOS DE COBRE



**CONSECUENCIA
DE CORROSION**



NUEVO

DETALLE



BIBLIOGRAFIA

1.- Problemas de Ingeniería de Puesta A Tierra

Autor: De la vega Ortega, Miguel

Editorial Limusa - 2001

2.- La Puesta A Tierra en Instalaciones Eléctricas

Autor: García Márquez, Rogelio

Editorial Alfaomega – Marcombo - 1999

3.- Soluciones Practicas Para Las Puestas A Tierra

Autor: Díaz C. Pablo

McGRAW-HILL – 2001

4.- Puesta A Tierra en Instalaciones Eléctricas

Autor: Toledano Gasca, José – Martínez Requena, Juan

Editorial Paraninfo - 2001

5.- Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas

Autor: Enríquez Harper, Gilberto

Editorial Limusa – 1990

6.- Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión

Autor: Navarro Márquez, José

Editorial Paraninfo – 1999

7.- Técnicas y Procesos en Instalaciones Eléctricas de media Tensión

Autor: Sanz Serrano, José Luis - Toledano Gasca, José

Editorial Paraninfo - 2000

8.- Principios de Coordinación de Calibración de Reles

Autor: Fichtner

9.- Aterramiento Eléctrico

Autor: Kinderman, Geraldo – Campagnolo, Jorge

Sagra-DC Luzzatto - 1991

10.- Apuntes del Curso de Alta Tensión

Autor: Ing. Yanque Montufar, Justo

Universidad nacional de Ingeniería - 1994

11.- Técnicas de Aterramiento Eléctrico

Autor: Ing. Yanque Montufar, Justo - 2000

12.- Geología para Ingenieros Geotécnicos

Autor: Harvey J.C.

Editorial Limusa – 1987

13.- Protección en Instalaciones Eléctricas

Autor: Montané, Paulino

Editorial Marcombo - 1993

14.- Maniobras en Redes Eléctricas

Autor: Iberdrola, Endesa

Editorial Paraninfo

15.- Electrical Properties of Rocks

Autor: Parkhomenko

Editorial Plenum - 1967

16.- Catalogo de Conductores Eléctricos

Pirelli - 1999