

**Puesta A Tierra Y Perturbaciones  
Electromagneticas En Equipos De  
Carga Sensible**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MANIZALES

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

***PUESTA A TIERRA Y PERTURBACIONES  
ELECTROMAGNETICAS EN EQUIPOS DE  
CARGA SENSIBLE***

TRABAJO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA TOMAR LA CATEGORÍA DE  
PROFESOR ASOCIADO

*César Germán Castellanos Domínguez  
Departamento de Ingeniería*

MANIZALES, 1997

# ***CONTENIDO***

## **0 DEFINICIONES**

## **1 RESISTIVIDAD DE SUELO**

- 1.1 Definición de resistividad del suelo
- 1.2 Factores determinantes de la resistividad del suelo
  - 1.2.1 Composición del terreno
  - 1.2.2 Circulación de la corriente por el suelo
  - 1.2.3 Gradientes elevados de potencial
- 1.3 Principios y métodos de medición de resistividad
  - 1.3.1 Método de las cuatro puntas
  - 1.3.2 Medida de resistividad con dos electrodos
- 1.4 Técnicas de evaluación e interpretación de medidas de resistividad
  - 1.4.1 Suelo uniforme
  - 1.4.2 Suelos no homogéneos
- 1.5 Factores de influencia en la precisión de las medidas.
  - 1.5.1 Magnitudes en la calidad de la medición
  - 1.5.2 Calidad de la instrumentación

## **2 MEDIDA DE IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA**

- 2.1 Resistencia e impedancia de puestas a tierra
- 2.2 Principios y Métodos de medición de impedancia de puesta a tierra
  - 2.2.1 Método de los tres puntos o triangulación
  - 2.2.2 Método de la caída de potencial
  - 2.2.3 Método de la relación
  - 2.2.4 Método por tensión y corriente
  - 2.2.5 Meggers para tierras
  - 2.2.6 Métodos de Nippold, Wiechert y Behrend
  - 2.2.7 Pruebas de fallas escalonadas
- 2.3 Instrumentación en la medición de puestas a tierra
  - 2.3.1 Ohmetro de relación
  - 2.3.2 Puente doble balanceado
  - 2.3.3 Transformadores de balance simple
  - 2.3.4 Voltamperímetro

- 2.3.5 Unidades de polarización inducida
- 2.3.6 Medidor de resistencia de tierra de alta frecuencia
- 2.3 Tipos de electrodos de tierra
  - 2.3.1 Electrodos de tierra instalados en zanja
  - 2.3.2 Electrodos de barra introducidos verticalmente
  - 2.3.3 Electrodos en forma de placa
  - 2.3.4 Materiales apropiados para la construcción de tomas de tierra

### **3 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DE MEDICION**

- 3.1 Principios de funcionamiento
- 3.2 Clasificación de los instrumentos de medida
  - 3.2.1 Tipo de mediciones
  - 3.2.2 Condiciones de explotación
  - 3.2.3 Protección contra la acción de los campos externos
  - 3.2.4 Acciones mecánicas
  - 3.2.5 Precisión
- 3.3 Calibración y fuentes
  - 3.3.1 Técnicas de calibración
  - 3.3.2 Patrones
  - 3.3.3 Fuentes de instrumentos de medición

### **4 POTENCIALES Y GRADIENTES**

- 4.1 Circulación de corrientes por el suelo
- 4.2 Distribución de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente infinito
- 4.3 Distribución de potenciales en una red de tierra con retorno de corriente por otra red
- 4.4 Deformación de las superficies equipotenciales en un suelo heterogéneo
- 4.5 Intensidades de falla
  - 4.5.1 Determinación de las intensidades de falla
  - 4.5.2 Etapas que comprende
  - 4.5.3 Seguridad y precauciones en las medidas

### **5 PERTURBACIONES ELECTROMAGNETICAS**

- 5.1 Clasificación y fuentes de perturbaciones electrónicas
- 5.2 Acoplos de perturbaciones
- 5.3 Inducciones por redes de energía
- 5.4 Descargas atmosféricas
- 5.5 Descargas electrostáticas
- 5.6 Pulsos nucleares electromagnéticos
- 5.7 Interferencias de radiofrecuencia (RFI)

## **6 PUESTA A TIERRA PARA EQUIPOS DE CARGAS SENSIBLES**

- 6.1 Continuidad eléctrica y la puesta a tierra
  - 6.1.1 Red de continuidad eléctrica en malla
  - 6.1.2 Red de continuidad eléctrica aislada
  - 6.2.3 Distribución de energía en edificios de comunicaciones
  - 6.2.4 Mantenimiento y comparación entre la RCEA y la RCEM
- 6.3 Clasificación de las instalaciones de comunicaciones para sistemas de puesta a tierra
- 6.4 Puesta a tierra para equipos de proceso digital
  - 6.4.1 Configuraciones típicas
  - 6.4.2 Exigencias de EMC para equipos de proceso digital
- 6.5 Puesta a tierra de redes de computación
  - 6.5.1 Puesta a tierra aislada (independiente)
  - 6.5.2 Puesta a tierra única
  - 6.5.3 Malla de alta frecuencia
  - 6.5.4 Empleo de pararrayos

## **7 DISPOSITIVOS DE PROTECCION**

- 7.1 Los pararrayos
- 7.2 Descargadores
- 7.3 Varistores
- 7.4 Diodos Zener
- 7.5 Transzorbs
- 7.6 Blindajes electrónicos
- 7.7 Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS)
- 7.8 Aspectos comparativos y de selección de protecciones

## **Apéndice A ASPECTOS PRACTICOS DE MEDIDAS**

- A.1 Selección de equipos de medidas
- A.2 Precauciones durante la prueba

## **Apéndice B EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA**

- B.1 Umbral de sensibilidad
- B.2 Umbral de no soltar
- B.3 Muerte aparente
- B.4 Fibrilación ventricular y su umbral
- B.5 Influencia de la frecuencia de la corriente
- B.6 Concomitancia de sucesos para originar riesgo de accidente

## **BIBLIOGRAFIA**

## 0 DEFINICIONES

Las definiciones de términos pertinentes al objetivo de la materia se dan en esta sección y corresponden a las aprobadas y estandarizadas por las respectivas entidades internacionales, en particular, a las dadas por el CCITT (hoy parte de la UIT). Existen definiciones adicionales contempladas en ANSI/IEEE std 100-1977 **Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms**, las cuales serán indicadas con un asterisco (\*).

### 0.1 TOMA DE TIERRA

Cuerpo conductor, o conjunto de cuerpos conductores, que en contacto eléctrico con tierra, concebido o utilizado para dispersar las corrientes eléctricas por el suelo.

(\**Puesta a tierra*: Una conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por medio de la cual un circuito eléctrico o equipo es conectado a la tierra o a un cuerpo conductor de una extensión relativamente grande que sirve en lugar de la denominada tierra.

*Nota*: Se emplea para establecer y mantener el potencial de tierra (o del cuerpo conductor) o aproximadamente ese potencial en los conductores conectados a él, y para corrientes conducidas por la toma de tierra desde y hacia la tierra (o cuerpo conductor).

### 0.2 CONDUCTOR DE TIERRA

Conductor o conjunto de conductores que enlazan la toma de tierra al colector de tierra.

(\*El conductor que es usado para establecer la toma de tierra y que conecta un equipo, dispositivo, sistemas de alambrado u otros conductores (usualmente conductor neutro) con el electrodo de toma de tierra o electrodos.

### 0.3 COLECTOR DE TIERRA

Conductor en forma de barra o de anillo al que están conectados, por un lado el conductor o conductores de tierra y, por otro, el sistema de distribución de tierra.

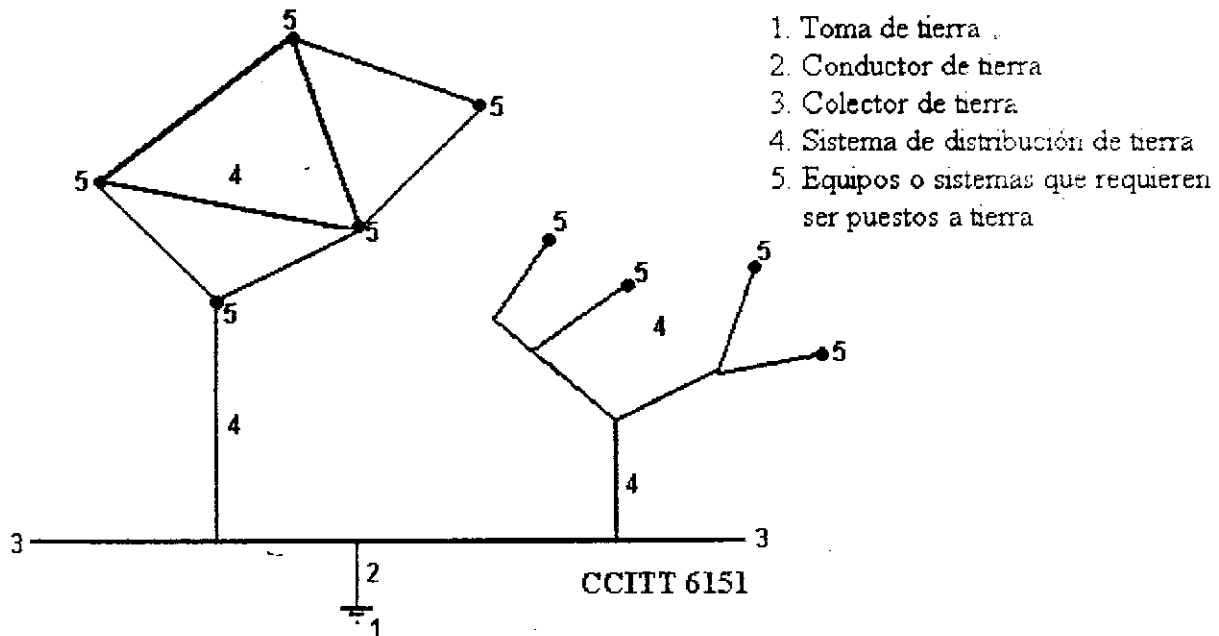
(\**Electrodos*: Un conductor usado para establecer una puesta a tierra.

### 0.4 INSTALACION DE TIERRA

Conjunto formado por la toma de tierra, el conductor o los conductores de tierra, el colector de tierra y el sistema de distribución de tierra (véase la figura 0.1).

(<sup>\*</sup>)Una conexión usada en el establecimiento de la toma de tierra y que consta de un conductor de tierra, un colector de tierra y el suelo que circunda el colector o algún cuerpo conductor el cual sirve en vez de tierra.

## 0.5 SISTEMA DE DISTRIBUCION DE TIERRA



Conjunto de conductores que enlazan a el colector de tierra las distintas partes que han de ponerse a tierra.

(<sup>\*</sup>)*Malla de tierra*: Un sistema de colectores de tierra que consta de cables desnudos conectados entre si y enterrados en el suelo que proveen una toma de tierra común a los dispositivos eléctricos y las estructuras metálicas.

**Nota:** esta deberá ser conectada a los colectores de tierra auxiliares para bajar su resistencia.

(<sup>\*</sup>)*Parrilla de toma de tierra*: Un sistema de conductores desnudos sobre o debajo de la superficie terrestre conectados a una toma de tierra o malla de tierra para proveer la protección de las tensiones de toque peligrosas.

**Nota:** las placas y enrejados adecuados al área son formas comunes de parrillas de tomas de tierra.

(<sup>\*</sup>)*Sistema de toma de tierra*: consiste en todas las interconexiones de tomas de tierra conectadas en un área específica.

### **0.6 INSTALACION DE TIERRA DE SERVICIO**

Instalación de tierra utilizada para el funcionamiento de un equipo con alimentación eléctrica.

### **0.7 INSTALACION DE TIERRA DE PROTECCION**

Instalación de tierra empleada para limitar a valores permitidos (inofensivos) las sobretensiones accidentales.

### **0.8 INSTALACIONES DE TIERRAS SEPARADAS**

Instalaciones de tierra con tomas de tierra distintas, concebidas de manera que, durante su funcionamiento, su influencia recíproca no sea sensible (desde el punto de vista de el riesgo o del funcionamiento).

### **0.9 PONER A TIERRA**

Conectar un equipo con alimentación eléctrica a una instalación de tierra.

(\*)Un sistema, circuito o aparato referido para ser provisto con una toma a tierra.

### **0.10 TENSION DE CONTACTO**

Tensión a que puede estar sometida el cuerpo humano como consecuencia de el contacto con partes metálicas accesibles que por regla general, no están bajo tensión pero que, por defectos de aislamiento o por otras causas, podrán encontrarse bajo tensión.

### **0.11 INTERCONEXION PARA IGUALACION DEL POTENCIAL**

Interconexión de las partes metálicas independientes por medio de un conductor de sección apropiada, cuyo fin es el de eliminar las diferencias de potencial entre las estructuras metálicas, en los casos en los que estas diferencias pueden constituir un peligro para el personal y para el equipo.

### **0.12 CIRCUITO DE TOMA DE TIERRA DE RETORNO**

(\*)Un circuito en el cual la tierra es utilizada para completar el circuito.

### **0.13 CORRIENTE DE TOMA DE TIERRA**

(\*)La corriente que fluye en el suelo o en una conexión aterrizada.



**0.14 (\*) Resistencia de puesta a tierra** (Entre electrodos de puesta a tierra)

La resistencia en ohmios entre los electrodos de tierra y un electrodo remoto de puesta a tierra con resistencia cero.

**Nota:** Por remoto se entiende una distancia tal que la resistencia mutua entre los dos electrodos es esencialmente cero.

**0.15 (\*) Resistencia mutua de electrodos de puesta a tierra**

Es igual al cambio de voltaje en uno de los electrodos producido por un cambio de un amperio de corriente directa en el otro y expresado en ohmios.

**0.16 (\*) Potencial eléctrico**

La diferencia de potencial entre un punto y alguna superficie equipotencial. Usualmente la superficie de la tierra es tomada arbitrariamente con potencial cero (tierra remota).

**Nota:** Un punto en el cual se tiene un potencial más alto que una superficie cero, se dice que tiene un potencial positivo; uno que tenga un potencial inferior tiene un potencial negativo.

**0.17 (\*) Línea equipotencial o de contorno**

Una línea de puntos que tienen un mismo potencial en un mismo tiempo.

**0.18 (\*) Perfil de Potencial**

La gráfica del potencial como función de la distancia a lo largo de un trayecto especificado.

**0.19 (\*) Gradiente de potencial de superficie**

La pendiente de un perfil de potencial cuyo trayecto intercepta las líneas equipotenciales en ángulos rectos.

**0.20 (\*) Tensión de toque**

La diferencia de potencial entre una estructura metálica aterrizada y un punto de la superficie del terreno separado por una distancia igual a la normal de la horizontal máxima alcanzable, aproximadamente igual a un metro.

**0.21 (\*) Tensión de paso**

La diferencia de potencial entre dos puntos en la superficie de la tierra separada por una distancia de un paso que será asumida de un metro, en la dirección del máximo gradiente de potencial.

**Nota:** Esta diferencia de potencial puede ser peligrosa cuando la corriente fluye a través de la tierra o material sobre el cual se encuentre una persona bajo condiciones de falla.

**0.22 (\*) Resistividad (en un material)**

Es el factor que resulta de la división de la densidad de corriente de conducción sobre el campo eléctrico en el material.

**0.23 (\*) Acople**

La asociación de dos o más circuitos o sistemas en los cuales existe un camino por el cual la señal de potencia o de información pueda ser transferida entre sí.

**Nota:** Un acople se puede definir como cerrado o suelto. Un proceso de acople cerrado tiene elementos con pequeños desfases entre variables específicas, los sistemas de acople cerrados tienen grandes efectos mutuos demostrados matemáticamente por el producto cruz en el sistema matricial.

*Acople capacitivo:* La asociación de dos o más circuitos entre sí por medio de una capacitancia mutua a los circuitos.

*Acople resistivo:* La asociación de dos o más circuitos entre sí por medio de una resistencia mutua a los circuitos.

*Acople directo:* La asociación de dos o mas circuitos por medio de autoinductancias, capacitancias, resistencias o una combinación de éstas que sea común a los circuitos.

**Acople inductivo**

(1) *(en circuitos de comunicaciones).* La asociación de dos o más circuitos entre si por medio de inductancias mutuas a los circuitos o inductancias mutuas que asocian los circuitos.

**Nota:** Este término cuando es usado sin modificar las palabras es comúnmente usado para acoples por medio de inductancias mutuas; mientras que el acople por medio de autoinductancias comunes al circuito es llamada acople inductivo directo.

(2) *(en caso de coordinación inductiva).* La interpelación de sistemas de alimentación eléctrica y de comunicación vecinos por inducción magnética o eléctrica, o por ambas.

**0.24 (°) Resistividad efectiva**

Es aquel factor en el cual la densidad de corriente de conducción es igual al campo eléctrico en el material dividido por la resistividad.

**0.25 (°) Contrapeso (en líneas aéreas como protección contra rayos).**

Un conductor o sistema de conductores adaptado por debajo de las líneas de transmisión, localizado encima o más frecuentemente debajo de la superficie de la tierra y conectado a los soportes de las torres o a los polos de soportes de las líneas.

# 1 RESISTIVIDAD DE SUELO

## 1.1 DEFINICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad del suelo es la resistencia de un metro cúbico de tierra medido entre superficies opuestas paralelas de una porción de material de longitud y sección uniforme unitaria [9] (ver figura 1.1). La resistividad del suelo en gran medida, depende de la conducción del agua contenida en él, siendo en parte un proceso electrolítico.

La resistividad está dada por la siguiente relación:

$$\rho = r \left( \frac{a}{l} \right), [\Omega \cdot \frac{m \cdot m}{m}] = [\Omega \cdot m]$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad en ohmios-longitud [ $\Omega \cdot m$ ]

$r$  = Resistencia en ohmios [ $\Omega$ .]

$A$  = Area transversal en longitud [ $m^2$ ]

$l$  = Longitud en unidades de longitud [m]

La resistividad está expresada en ohmios-metro [ $\Omega \cdot m$ ].

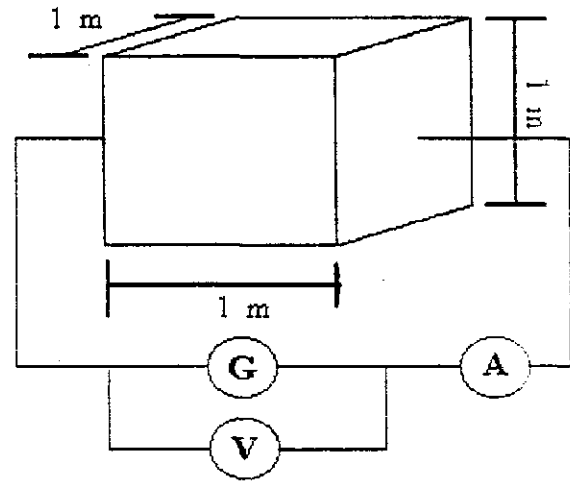


Figura 1.1

Los objetivos principales por los cuales se determinan los valores de resistividad del suelo son:

- determinar en una zona dada el lugar más apropiado para ubicarla puesta a tierra de una instalación eléctrica;
- determinar la configuración y las dimensiones de la instalación de tierra más favorable para la zona elegida;
- permitir el mejoramiento del diseño en los sistemas de apantallamiento, como elementos significativos en la operación y confiabilidad del sistema eléctrico en consideración, así como la seguridad de las personas, controlando que los voltajes de paso y de toque que soportan no excedan los valores sin perjuicio para la salud.

## 1.2 FACTORES DETERMINANTES DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad se debe en parte a un proceso electrolítico y, en parte, a la resistencia de contacto entre un gran número de finas partículas. Si el contenido de agua o de sales es elevado el fenómeno electrolítico será, posiblemente, predominante; en cambio, si el suelo es seco, los factores esenciales serán el tamaño de las partículas y el volumen de aire aprisionado por ellas [9].

El valor de la resistencia de puesta a tierra tiene como factor proporcional determinante la resistencia específica o resistividad del suelo y del subsuelo en que está enterrada. En la práctica, la resistividad del suelo en la superficie o en profundidad, raramente se conocen antes del establecimiento de las obras y es frecuente, que la realización de las instalaciones de tierra sean las que aporten las primeras indicaciones sobre la calidad de los suelos.

Si bien los componentes más importantes del suelo son, en estado seco, aislantes (silice, óxido de aluminio, etc.), su resistividad depende de otros factores como la presencia de las sales solubles, la humedad, etc. Por otro lado, la composición de la tierra, incluso en un lugar conocido, es muy heterogénea, presentándose capas, bolsas, depósitos, etc., tanto vertical como horizontalmente.

Las zonas superficiales en que se instalan las puesta a tierra tampoco son uniformes y, además, están afectadas fuertemente por los cambios climáticos, lluvias y heladas. Todo ello hace que la resistividad sea muy variable de un lugar a otro y pueda resumirse en que la modifican, de manera muy notable, los siguientes factores del suelo:

- tipo de suelo (naturaleza geológica, estratigrafía);
- composición química de las sales disueltas en el agua contenida en el suelo;
- concentración de las sales disueltas en el suelo;
- nivel de humedad y de las aguas subterráneas;
- temperatura o nivel de congelación del suelo;
- la granulometría del suelo;
- el grado de compactación y presión del suelo.

### 1.2.1 COMPOSICIÓN DEL TERRENO

La variación de la resistividad se considera dependiente solamente de la composición del suelo, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber, de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la puesta a tierra.

Sucede incluso, que para una misma clase de suelo, situado en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente, dependiendo de su formación geológica como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Resistividad del suelo de acuerdo a su edad de formación

<i>Resistencia de tierra [Ω.m]</i>	<i>Cuaternario</i>	<i>Cretaceo, terciario y cuaternario</i>	<i>Carbonífero, triásico</i>	<i>Cámbrico, ordoviciano, devoniano</i>	<i>Precámbrico combinado con cámbrico</i>
1					
10		Marga Arcilla Yeso	Tiza		
30			Trampa rocosa Diabase Caliza		
100			Limo	Esquisto	
300			Arenisca	Caliza Arenisca	Arenisca
1000				Dolomita	Cuartita
3000	Arena gruesa y grava en capas superficiales				Pizarra
10000					Granito Gneises

Tabla 1.2. La resistividad y la naturaleza del terreno

<i>Naturaleza del terreno</i>	<i>Valor medio de la resistividad [Ω.m]</i>
Terrenos cultivables y fértiles, compactos y húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

Los valores extremos que se encuentran en la práctica, pueden variar de algunas decenas de ohmios por metro, para terrenos orgánicos y húmedos, hasta unas decenas de miles de ohmios por metro para granitos secos. La tabla 1.2 muestra valores típicos medios de resistividad, mientras que la tabla 1.3 proporciona valores orientativos.

Existen dos formas para medir la resistividad de diversos tipos de suelo; sacando muestras y midiéndolas con aparatos especiales, o recurriendo a mediciones *in situ* en la masa del suelo virgen. Sin embargo, el segundo método proporciona resultados más precisos, pues es difícil garantizar que en el momento de la medición, una muestra esté en las mismas condiciones en que se encontraba antes de extraerla. Los valores de las tablas 1.2 y 1.3 deben considerarse como ordenes de magnitud de la resistividad previsible y no deben servir para evaluar la resistencia de tierra en cualquier sistema de puesta a tierra.

Se pueden mejorar los suelos, por ejemplo aquellos que contienen pocas sales o terrenos rocosos agregando sustancias químicas (sulfato de cobre, sulfato magnésico y la sal gema corriente), pero este método no es muy recomendable debido a la necesidad de repetir periódicamente la operación por la acción disolvente de la lluvia, o bien por el drenaje natural hacia el interior del terreno [9], lo que obliga a disponer de una canalización que permita regar las tomas de tierra en las estaciones calurosas. En algunas ocasiones, incluso resulta conveniente cultivar un pequeño prado de 50 a 100  $m^2$  encima de las tomas de tierra, para mantener húmeda la tierra sobrepuesta [6].

En [30] se expone un método concreto basado en el tratamiento químico periódico con canalización para el mejoramiento de las tierras en los sistemas de comunicaciones. En [11] se trae un método para mejoramiento de suelos basado en la adición de bentonita. Este método se emplea en casos extremos cuando el tipo de suelo es altamente rocoso, arenoso, o volcánico, y no es posible utilizar métodos convencionales.

La bentonita geológicamente es uno de los más puros minerales de arcilla. El componente principal de la bentonita es montmorillonita (hasta el 80%), la que determina sus propiedades fundamentales. Lo más importante de su estructura es que está formada por tres planos de mallas. Estos planos elementales se superponen paralelamente y forman una especie de tejido de capas. Entre estos tejidos de capas, hay espacios vacíos llamados huecos intercristalinos, los cuales tienen la propiedad intercristalina de dilatación, o de absorber diversas sustancias, en especial agua.

Otra propiedad de la montmorillonita es la permeabilidad de los poros y espacios intercristalinos. Con la absorción de humedad cambia el volumen y la forma exterior de las partículas. Este aumento de volumen disminuye la permeabilidad de los poros de modo que se retiene la humedad por la estructura cristalina formada.

Básicamente, el procedimiento de mejoramiento de puestas a tierra a base de bentonita, consiste en rellenar las grietas naturales, aberturas, y huecos libres que existan en el terreno mediante una masa que envuelva las partículas del terreno y las una eléctricamente, formando una gran superficie con buenas cualidades conductoras.

Tabla 1.3

<i>Naturaleza del terreno</i>	<i>Resistividad [<math>\Omega.m</math>]</i>
Terreno pantanoso	5 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcilla compacta	100 a 200
Margas de jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granito	10000 a 50000
Granito y gres procedente de alteraciones	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000
Aguas subterráneas, de pozo	10 a 150

Si el terreno no presenta grietas o huecos naturales, es necesario hacerlos artificialmente en la proximidad de la puesta a tierra. Estas grietas o fisuras pueden producirse mediante pequeñas explosiones que no afecten la resistencia mecánica del terreno.

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

*Sales solubles y su concentración:* Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductividad del suelo es, esencialmente, de naturaleza electrolítica; esto es, la conducción de corriente tiene lugar, principalmente, a través del electrólito formado por las sales y el agua habitualmente contenidas en el suelo.

En la figura 1.2 se muestra cómo la cantidad de sales disueltas afectan la resistividad y en la figura 1.3 los distintos efectos de sales diferentes.



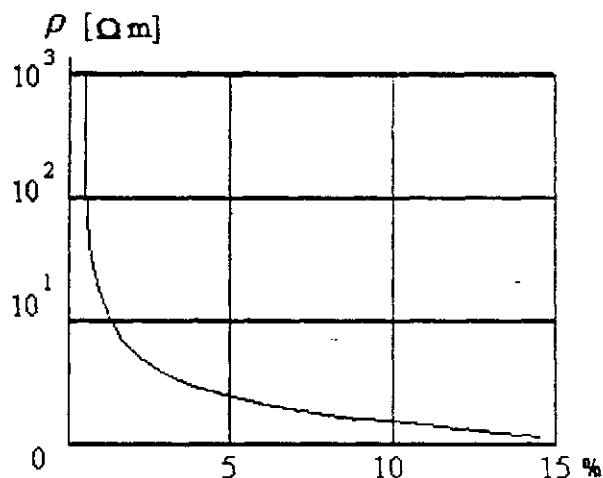


Figura 1.2

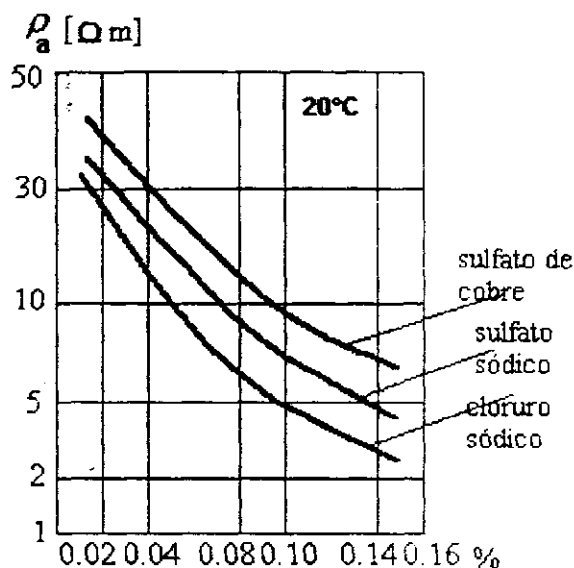


Figura 1.3

*Estado higrométrico del terreno:* El contenido de agua o grado de humedad del terreno influye de forma apreciable sobre su resistividad. Su valor no es constante, pues, 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.

A medida que el grado de humedad aumenta, cuyo principal efecto es disolver las sales solubles, la resistividad disminuye con rapidez, pero, a partir de valores del orden del 15% al 22% en peso, esta disminución es muchos menos notable. a causa de la práctica saturación del terreno, tal como puede verse en la figura 1.4. En relación con este factor, en general, cuando la humedad del suelo varíe considerablemente de unas épocas del año a otras, se tendrá en cuenta esta circunstancia al dimensionar y establecer el sistema de tierra. Se podrán usar recubrimientos de gravas como ayuda para conservar la humedad del suelo [27]. El nivel de las aguas subterráneas también ejerce gran influencia en la resistividad como se ve en la tabla 1.3 [9].

*Temperatura:* La resistividad del suelo aumenta a medida que desciende la temperatura y este aumento es notorio al alcanzarse los  $0^\circ C$ , hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrólitos. que como se ha visto influye decisivamente en la resistividad del terreno, elevándose significativamente en la misma, tal como se ofrece en la figura 1.5.

De otro lado, para temperaturas inferiores a los  $0^\circ C$  su resistividad aumenta mucho. Por ello, en zonas con peligro de heladas los electrodos se enterrarán a una profundidad que no alcance esa temperatura o se tendrá en cuenta esta circunstancia durante su cálculo [27].

**Granulometría:** Es un elemento importante que influye tanto en la porosidad como en el poder de retener humedad y en 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 éste supere al de la arcilla.

Los suelos de grano grueso (gravas, guijarros, etc.) no contribuyen al establecimiento de buenos sistemas de distribución de tierra, circunstancia que se puede remediar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.

**Grado de compactación:** La resistividad disminuye al aumentar el grado de compactación del suelo. Se recomienda utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno [27].

**Estratigrafía:** La resistividad total del suelo 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 el nivel freático.

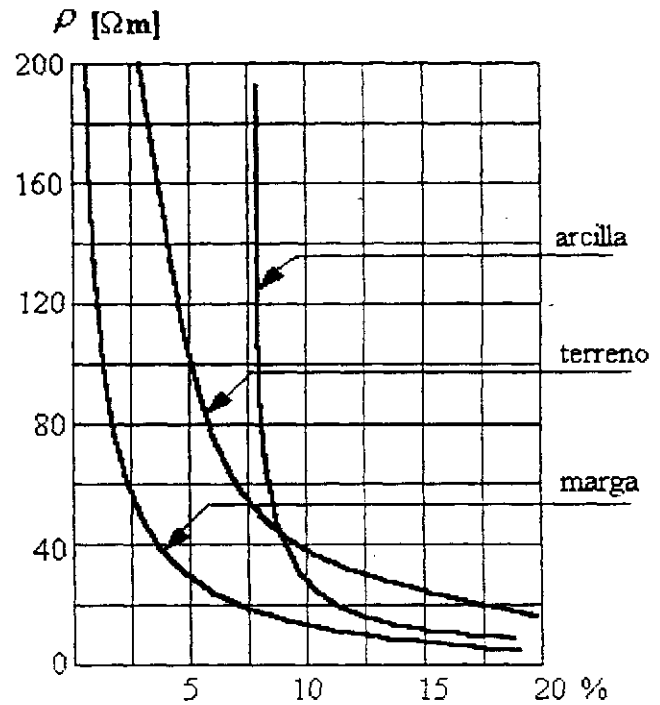


Figura 1.4

Tabla 1.3

Contenido de agua (% del peso)	Valor general de la resistividad [Ω.m]	
	Mezcla arcilla-arena	Arena
0	10'000.000	
2.5	1.500	3'000.000
5	430	50.000
10	185	2.100
15	105	630
20	63	290
30	42	

Queda entonces justificado que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales bajo el efecto del hielo y de la sequedad (que la aumentan) o de la humedad (que la disminuye). Esta acción puede notarse hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas. Será por tanto prudente tener en cuenta estas variaciones de resistividad en el establecimiento de una red de tierra enterrada a una profundidad del orden de 1 metro.

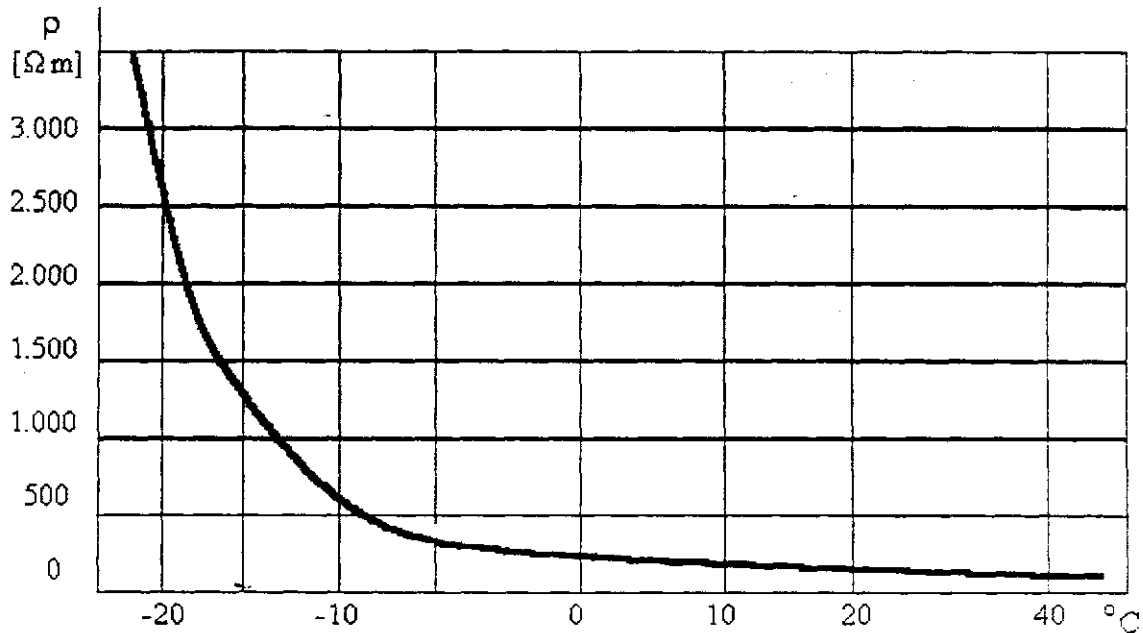


Figura 1.5

Puede concluirse que la resistividad del suelo es una magnitud variable y que la única forma aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su valor en las condiciones existentes en el caso.

### 1.2.2 CIRCULACIÓN DE LA CORRIENTE POR EL SUELO

La resistividad del suelo en las cercanías de los electrodos de puesta a tierra puede verse afectada si las corrientes que fluyen en el terreno circundante son relativamente altas: el calentamiento tiende a aumentar la conductividad mientras no vaya acompañado de un proceso de secado significativo. La resistividad de una capa de suelo puede disminuir en una relación de 2 a 1 para temperaturas entre algunos grados y 20 a 25°C, y en una relación del mismo orden entre 20 y 80°C.

La cantidad de calor que se genera en un electrodo puede considerarse dividida en dos partes: la acumulada en el volumen de terreno en contacto directo con el mismo, y otra parte que la absorben las capas circundantes más frías, circulando a través del terreno.

El efecto inicial de una circulación prolongada de corriente por un sistema de distribución de puesta a tierra, es disminuir su resistencia proporcionalmente a la contribución al valor total de la misma de las capas de suelo próximas, pero que no es apreciable más que para las tomas de tierra de pequeñas dimensiones.

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

La temperatura es máxima en la proximidad inmediata del electrodo, convirtiéndose las condiciones en críticas cuando se acerca a 100°C, al provocarse la evaporación rápida del agua contenida en el suelo 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 de la red, situación evidentemente peligrosa. Puede evitarse que se produzca el secado excesivo si las protecciones de la red eliminan la corriente de falla inicial en un tiempo  $t$ , tal que limiten la corriente  $i$ , evacuada por metro, al valor aproximado de [27]:

$$i = \pi d \sqrt{\frac{\gamma \theta}{\rho t}} = 4.156 \cdot 10^4 \frac{d}{\sqrt{\rho t}} \quad [A/m]$$

Expresión en la que  $d$  es el diámetro en metros del electrodo. Cabe anotar, que es necesario tener en cuenta las variaciones posibles de las características del suelo en épocas secas y después de haber sufrido corrientes de falla elevadas [27].

En conclusión, se puede afirmar que las características térmicas y el contenido de humedad del suelo, determinarán si una corriente de magnitud y duración dadas causará un proceso de secado significativo que aumente la resistividad efectiva del suelo. Un valor conservador de densidad de corriente, no excede los 200 A m<sup>2</sup> por segundo [22].

En casos de intensidades débiles la resistividad del suelo es, en ausencia de efectos secundarios, prácticamente independiente de la magnitud de la corriente que lo recorre, lo que justifica la utilización de intensidades débiles en las comprobaciones de las tensiones de seguridad y extrapolar en sus resultados a regímenes de corrientes mucho mayores [27].

Existen, sin embargo, otros factores distintos de los ya enumerados que modifican apreciablemente la resistividad del suelo pero que, por su naturaleza eléctrica, sólo pueden surgir posteriormente al establecimiento del sistema de distribución de tierra.

### 1.2.3 GRADIENTES ELEVADOS DE POTENCIAL

Cuando el contacto entre un electrodo y el suelo es defectuoso, pueden establecerse, en condiciones de corriente de falla y a partir de cierto valor, pequeñas descargas que atravesando las delgadas capas aislantes que separan los dos medios, contribuyan a igualar los potenciales de ambos. La resistencia del sistema de distribución de puesta a tierra arrojaría en estas condiciones, valores inferiores a los que se hubieran obtenido cuando no se producía el fenómeno, notándose esta reducción principalmente en instalaciones de puesta a tierra de pequeñas dimensiones.

Para magnitudes de la corriente de puesta a tierra muy importantes, el gradiente de potencial puede llegar, en las proximidades inmediatas de los electrodos, a alcanzar valores que provoquen la perforación del terreno, dando lugar a la formación de uno o varios arcos que, a partir de puntos del electrodo, se propaguen a través del suelo en diversas direcciones y con eventuales ramificaciones, hasta que se deje de verificar la superación del nivel de tensión crítico (algunos  $KV/cm$ ).

Prescindiendo de la caída de tensión en los arcos la traducción de este efecto, que sólo será apreciable en el caso de electrodos de pequeñas dimensiones, es prolongar de alguna manera las dimensiones de los mismos que se comportarán como si fueran de mayor tamaño o bien se hubiera reducido la resistividad del suelo pero, por diseño, debe evitarse el establecimiento de tales descargas porque deterioran rápidamente los electrodos.

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

## 1.3 PRINCIPIOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

Existen diversos métodos para determinar la resistividad de un terreno. En primer lugar, pueden citarse el método ya descrito basado en la toma de muestras, y el de los dos electrodos, pero que sólo proporcionan indicaciones muy locales y, consecuentemente, insuficientes o engañosas para la realización de las tomas de tierra.

Raramente se utiliza el sistema consistente en medir la resistencia de tierra de un electrodo que responda a una fórmula bien conocida para determinar a partir de ésta la resistividad del suelo que lo rodea, método que tiene la ventaja de proporcionar una medida global pero cuya aplicación no resulta adecuada si la toma de tierra a instalar es de dimensiones comparables a la de los electrodos empleados como referencia.

Por otro lado, los electrodos de medida también poseen resistencia de tierra y su valor puede ser considerablemente más alto que el que desea medirse, por lo cual uno de los problemas que plantea la medición de resistividad del suelo es análogo al de la medición de resistencia metálicas muy bajas en puntos en que la resistencia de contacto es comparable a la resistencia que desea medirse. La

solución es la misma en ambos casos, y se aplica un método de cuatro terminales.

Prácticamente, todas las disposiciones de las terminales utilizadas son variantes de este método de las cuatro terminales y se basa en la teoría enunciada en un principio por Frank Wenner [2].

### 1.3.1 MÉTODO DE LAS CUATRO PUNTAS

El método utilizado para grandes volúmenes, y de mayor precisión es el método de las cuatro puntas. Con el fin de abarcar mayor área, en cada sitio proyectado para la ubicación de estructuras de tierras, se trazan dos ejes imaginarios perpendiculares, teniendo como punto de intersección el jalón que establece el centro de la estructura.

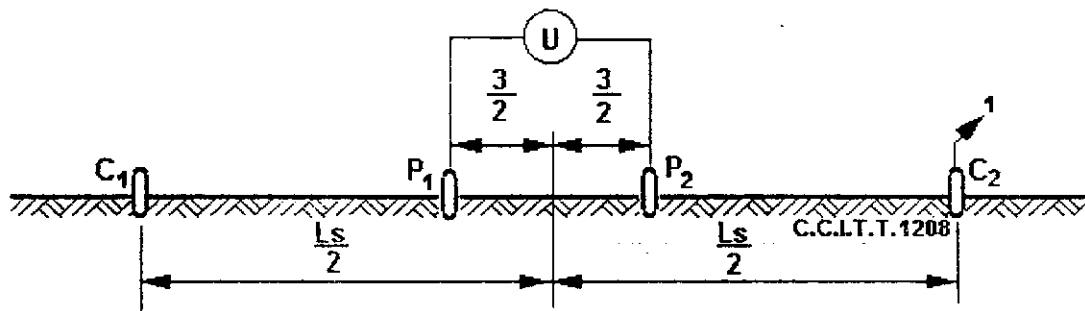


Figura 1.6

Los electrodos son enterrados en cuatro agujeros en la tierra, todos a una profundidad  $b$  y espaciados, generalmente, a una distancia  $a$ , como se representa en la figura 1.6. Una corriente de prueba  $I$  se hace pasar entre los electrodos externos  $C_1$  y  $C_2$ , y el potencial  $E$  entre los electrodos internos  $P_1$  y  $P_2$  es medido con un voltímetro de alta impedancia.

El potencial  $E$  en la superficie de una semiesfera de suelo con resistividad  $\rho$  y de radio  $r$ , en el centro de la cual una fuente puntual suministra una corriente  $I$ , viene dado por:

$$E = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Entonces si se define  $E/I$  como la resistencia mutua  $R$  en ohmios, puede sustituirse en la siguiente ecuación en términos de  $a$  y  $b$ :

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

En la práctica, generalmente se usan los cuatro electrodos dispuestos en línea recta y clavados a una profundidad  $b$  que no exceda del 10 al 20% de  $a$ . De esta manera, cada electrodo aparecerá como un punto con respecto a las distancias involucradas en la medida. Entonces, se puede aproximar el valor de  $b \approx 0$ , y la última expresión se reduce a

$$\rho \approx 2\pi aR.$$

En el caso de la figura 1.6, el potencial en el punto de inserción de la punta  $P_1$  debido a la corriente que pasa al suelo por las puntas  $C_1$  y  $C_2$ , se calcula según la fórmula anterior aplicando el principio de superposición:

$$E_1 = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \frac{1}{\frac{a}{2} - \frac{a_E}{2}} - \frac{1}{\frac{a}{2} + \frac{a_E}{2}} \right]$$

Se puede deducir una expresión análoga para el potencial  $E_2$  en el punto de inserción de la punta  $P_2$ . Por consiguiente, la diferencia de potencial entre las dos puntas es:

$$U = E_2 - E_1 = \frac{4\rho I a_E}{\pi(a^2 - a_E^2)}$$

De donde 
$$\rho = \frac{\pi(a^2 - a_E^2)}{4a} \frac{U}{I}$$

Un conjunto de lecturas, tomado para diferentes espaciamentos de los electrodos  $a$ , da un conjunto de resistividades que cuando se grafican en papel de escala logarítmica, indican si hay distintas capas de suelo, con diferentes resistividades así como la profundidad de la capa superior. Para grandes espaciamentos el valor de  $R$  es de centésimas de  $\Omega$ , como se explica en el punto 1.5 y, por lo tanto se requiere un potenciómetro sensitivo de corriente directa con baterías de hasta 180 V.

El método de las cuatro puntas da un valor de resistividad en el que no influyen las resistencias de los electrodos, puesto que sólo figuran en el cociente  $E/I$ . Si por ejemplo, los electrodos se introducen a mayor profundidad en el suelo, lo que hace aumentar la corriente  $I$ , la diferencia de potencial  $E$  entre los electrodos o puntas de medida de tensión también aumenta proporcionalmente, permaneciendo invariable la relación  $E/I$ . Las resistencias de las puntas de medida de tensión determinan, por otra parte, la resistencia interna más baja aceptable del voltímetro utilizado.

Si se toma la condición de que el suelo es homogéneo, la configuración de las puntas no influye en la resistividad media. En caso de un suelo no homogéneo, la corriente  $I$  no se difundirá uniformemente, sino que fluirá preferentemente por las capas de baja resistividad. La resistividad media

dependerá entonces de la configuración de las puntas, y se designará normalmente por el término de resistividad aparente  $\rho_a$ .

Aunque la corriente de medida penetra en teoría a una profundidad infinita, puede admitirse en la práctica que la profundidad efectiva de la penetración de la corriente, es igual a  $1/3$  de la distancia entre puntas de alimentación, o dicho de otro modo, que la resistividad aparente medida depende sólo de la resistividad y del espesor de las diversas capas del suelo por encima de una profundidad correspondiente a  $1/3$  de la distancia entre puntas de alimentación.

La resistividad aparente  $\rho_a$  en función de  $1/3$  de la distancia  $a$  entre puntas de alimentación, se representa en la figura 1.7 en dos casos de suelos estratificados distintos *A* y *B*. En ambos casos se encuentra a la misma profundidad una capa que presenta una resistividad prácticamente infinita; en el caso *A*, está recubierta por una capa cuya resistividad es igual a  $75 \Omega.m$ , y en caso *B*, por tres capas de igual espesor, pero cuya resistividad es, respectivamente,  $75 \Omega.m$ ,  $105 \Omega.m$ , y de  $17.5 \Omega.m$  a partir de la superficie del suelo.

La forma de las curvas *A* y *B* de la figura 1.7 permite sacar las siguientes conclusiones:

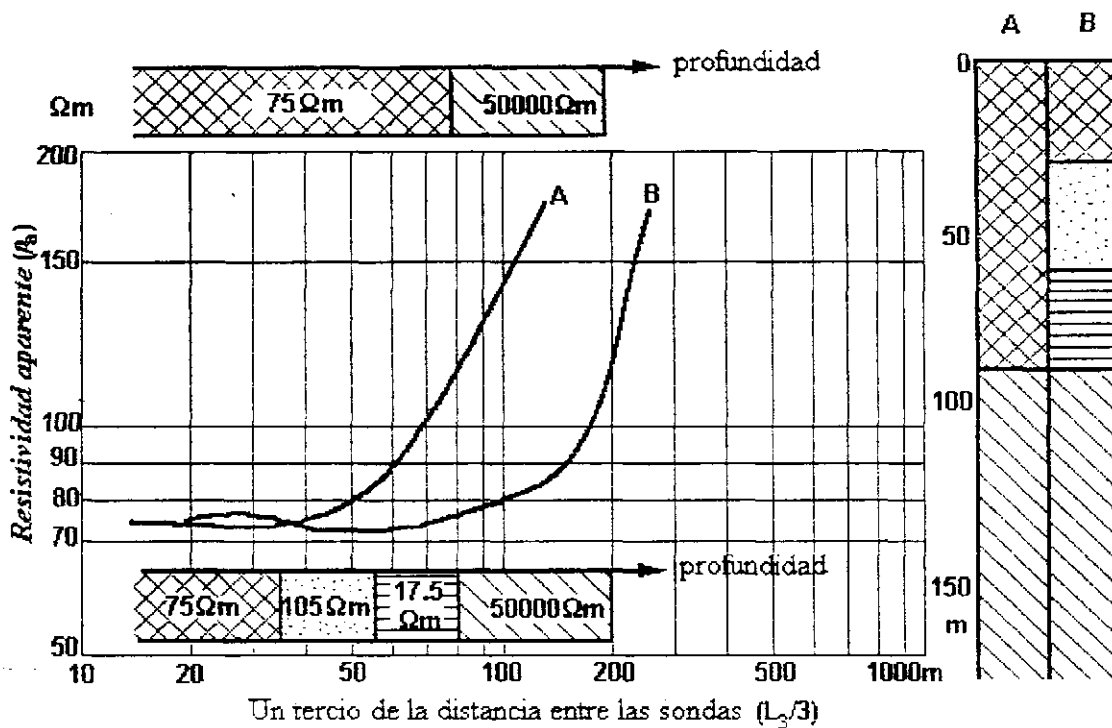


Figura 1.7

- dado que en el caso *A* la resistividad aparente aumenta un 54% con relación a la resistividad de la capa superior cuando la distancia entre puntas de alimentación es igual al triple del espesor de la capa superior, la penetración efectiva debe superar  $1/3$  de la distancia entre



puntas de alimentación:

- aunque las capas de resistividad prácticamente infinita estén situadas a profundidades iguales en los dos casos *A* y *B*, el aumento de la resistividad aparente debida a esas capas empieza en el caso *B* a una distancia entre puntas de alimentación 100% mayor que en el caso *A*, debido a la presencia de una capa arcillosa de resistividad relativamente pequeña. Se puede concluir que no es posible determinar profundidades de penetración por la simple lectura de las curvas de resistividad aparente, puesto que tal resistividad solo da una imagen aproximada del subsuelo;

El método de las cuatro puntas tiene dos configuraciones alternas: la de *Wenner* y la de *Schlumberger* [1,9,27].

*Configuración de Wenner o de igual espaciamento:* En esta configuración, las cuatro puntas se ubican sobre una línea recta a igual separación *a* entre ellas. Adicionalmente, la distancia entre las puntas de corriente *a* se toma 3 veces mayor que la distancia entre las puntas de voltaje, o sea,  $3a$ .

Si consideramos los electrodo correspondientes a cada punta como una semiesfera, a una distancia *x* de su centro la densidad de corriente será:

$$J = \frac{I}{2\pi x^2}$$

Entonces, el campo eléctrico se determina como:

$$\varepsilon = \rho J = \frac{\rho I}{2\pi x^2}$$

y el potencial en el punto *x* será:

$$\varphi(x) = - \int_{\infty}^x \varepsilon dx = \frac{\rho I}{2\pi x}$$

En la configuración de igual espaciamento se cumplen las relaciones siguientes:

$$\varphi_{(C_1, P_1)} = \frac{\rho I}{2\pi a}; \quad \varphi_{(C_2, P_1)} = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

$$\varphi_{(P_1)} = \varphi_{(C_1, P_1)} - \varphi_{(C_2, P_1)} = \frac{\rho I}{4\pi a}$$

$$\varphi_{(P_2)} = - \frac{\rho I}{4\pi a}$$

$$E = \varphi_{(P_1)} - \varphi_{(P_2)} = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

teniendo en cuenta, que:

$$R = \frac{E}{I} = \frac{\rho}{2\pi a}$$

entonces la resistividad estará dada por  $\rho = 2\pi aR$ . El método de Wenner tiene la ventaja de que la tensión de medida disminuye sólo linealmente en función del aumento de la distancia entre las sondas de alimentación (en suelo homogéneo) [9].

En suelos no homogéneos, la configuración de Wenner da una visión más directa de la medición de la resistividad aparente la cual permite ver si se debe continuar o no la medición para mayores valores de separación entre las puntas [13].

*Configuración de Schlumberger o de desigual espaciamento:* Debido a los inconvenientes que puede presentar el método de Wenner, una medida apta de la resistividad para largos espaciamientos entre los electrodos de corriente es el arreglo mostrado en la figura 1.8.

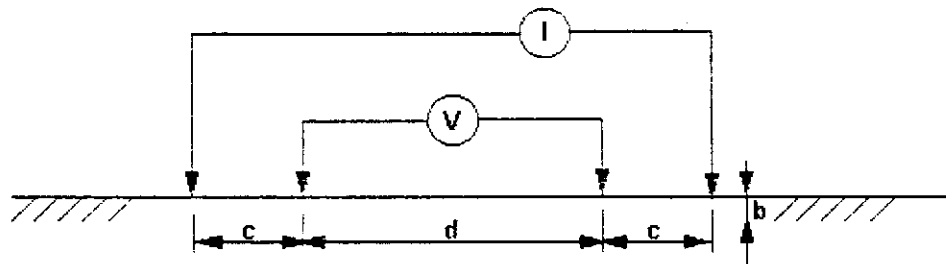


Figura 1.8

Además, puede ser usado sucesivamente, solo modificando la longitud  $c$ . Los electrodos de potencial están más cerca de los correspondientes electrodos de corriente y esto incrementa el nivel de potencial. En este método se escoge la distancia entre las puntas de alimentación que sea mucho mayor que la distancia entre las puntas de medida de tensión. Normalmente, solo hay que desplazar las puntas de alimentación, mientras que las puntas de medida de tensión se mantienen próximas entre sí en el centro de la disposición adoptada. La expresión usada en este caso puede ser fácilmente determinada. Si la profundidad de enterramiento  $b$  es pequeña, comparada con las separaciones  $d$  y  $c$ , entonces la resistividad aparente puede ser calculada así:

$$\rho \approx \frac{c(c+d)R}{d}$$

Además, para grandes valores de  $d/(c-d)$ , la variación en la medida de la resistividad debido a irregularidades de la superficie está reducida al mínimo, y se obtiene más fácil y con mayor precisión en las medidas. Esta configuración es menos sensible a las variaciones laterales de la resistividad, las cuales se presentan en la mayoría de los casos. Sin embargo, el instrumento utilizado en esta configuración deberá ser más sensible que en la configuración de Wenner.

El método de Schlumberger tiene el inconveniente de que la tensión que ha de medirse disminuye en función del cuadrado del aumento de la distancia entre las sondas de alimentación, lo que obliga

a utilizar equipos de medida muy sensibles, exigiendo mayor experiencia en el personal que ejecuta la medición.

*Otras configuraciones:* Con el método de Wenner, la distancia entre los electrodos de alimentación es igual al triple de la distancia entre electrodos de medida de tensión. Se ha propuesto aplicar métodos en los cuales la diferencia entre estas distancias sea inferior, a fin de aumentar la tensión que se ha de medir. Por ejemplo, la distancia entre electrodos de medida de tensión es igual a la distancia entre electrodos de alimentación dividida por 1.5. Si los valores de corriente de medida y de resistividad son los mismos en ambos casos, la tensión que hay que medir se multiplica por 3.2.

La única manera posible de medir realmente la resistividad del suelo consiste en aplicar el método de cuatro electrodos, pero se puede utilizar solamente dos electrodos si se quiere simplemente obtener una evaluación aproximada de la resistividad de la capa superficial. El método consiste en aplicar una tensión determinada entre las dos sondas y en medir la corriente que circula. Se toma la mitad de la relación  $U/I=R$  así medida y con esto se obtiene el valor de  $\rho$ .

Puede emplearse una corriente continua o alterna. Si se aplica una corriente continua, la sonda cátodo debe ser mucho mayor que la sonda ánodo para disminuir los efectos de la polarización. Si no se dispone de aparatos apropiados para mediciones con cuatro electrodos, pero si de un aparato de tres terminales que pueda servir para medir la resistencia de las tomas de tierra, puede medirse la resistividad del suelo (con menos precisión y a profundidades menores) midiendo la resistividad de tierra de un electrodo y calculando la resistividad aparente [9].

### 1.3.2 MEDIDA DE RESISTIVIDAD CON DOS ELECTRODOS

Las mediciones aproximadas de la resistividad del terreno se pueden hacer con medidores especializados de dos puntas [13]. Estos aparatos constan de un electrodo pequeño y otro de menor longitud, los cuales están unidos a una varilla aislante. El terminal positivo de una batería se conecta a través de un miliamperímetro al electrodo de menor longitud y el terminal negativo al otro electrodo. El instrumento puede ser calibrado para leer directamente en  $\Omega.m$  con el voltaje nominal de la batería. Este tipo de mediciones es relativamente fácil de realizar debido a la transportabilidad de los aparatos, al tiempo reducido de mediciones, además de pequeños volúmenes de tierra exigido para estos, por ejemplo en hoyos excavados en la tierra o en las paredes, o al fondo de las mismas excavaciones.

## 1.4 TÉCNICAS DE EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE MEDIDAS DE RESISTIVIDAD

Las técnicas utilizadas para interpretar las medidas pueden agruparse en 2 categorías:

- Interpretación empírica;
- Interpretación analítica.

La interpretación analítica es, en teoría, independiente de la persona que lleva la cabo. Por el contrario, los resultados de una interpretación empírica son significativamente influenciados por el conocimiento y experiencia del interpretador.

Es preferible utilizar una combinación de ambas aproximaciones para una máxima exactitud y una mínima incertidumbre. Por ejemplo, cuando las técnicas analíticas indican que dos o más modelos de tierra son adecuados, la decisión más real puede ser determinada desde consideraciones empíricas o inspecciones visuales de las curvas.

Las técnicas empíricas pueden ser descritas como de naturaleza estadística. Se observa que la forma de una curva de resistividad aparente está íntimamente relacionada con la estructura de la tierra y sus características en el sitio de medida. Debido a esto, ciertas propiedades de la curva de medida se utilizan para deducir la resistividad y el espesor de las capas del suelo. Las técnicas empíricas pueden ser de gran utilidad para interpretaciones en el sitio de medida y servir como un buen punto de arranque para técnicas más rigurosas.

Las técnicas analíticas, como su nombre lo indica, tienen una metodología determinada:

*Primer paso:* Los valores medidos son examinados y se realiza una interpretación preliminar típicamente basada en los técnicas empíricas mencionadas previamente.

*Segundo paso:* Se proponen uno o varios modelos de tierra.

*Tercer paso:* Los valores medidos son comparados con los calculados a partir de los modelos propuestos.

*Cuarto paso:* Se escoge el modelo más adecuado. Si más de un modelo es adecuado, estos se consideran equivalentes.

*Quinto paso:* Se optimiza el modelo seleccionado. A veces pueden ser escogidos estudios adicionales para chequear la validez de algunas suposiciones o para eliminar incertidumbres. Sin embargo, en el diseño de sistemas de potencia este paso generalmente se omite.

En [19], se describen varias técnicas empíricas y analíticas de interpretación de medidas de resistividad del suelo. La primera técnica analítica, se basa en el uso de curvas precalculadas. La segunda, se basa en un algoritmo de convergencia rápida para el cálculo en el computador.

La exactitud de las medidas de resistividad, raramente excede el 1%, aún cuando el equipo utilizado sea sofisticado. Normalmente, se considera aceptable una precisión de hasta el 5%.

En la práctica, en sistemas de potencia, el método Wenner es utilizado casi exclusivamente para medidas de resistividad [19]. Cuando este método, es empleado con el equipo de prueba adecuado, proveerá datos suficientes para un modelo exacto de la estructura de la tierra en el análisis de las

instalaciones del sistema de distribución de puesta a tierra. Debido a la simplicidad relativa de la interpretación de los resultados, es recomendado como un estándar efectivo y adecuado para el procedimiento de medición.

#### 1.4.1 SUELO UNIFORME

Algunas veces, aún en suelos con varias capas, la variación de la resistividad aparente del suelo con respecto a la profundidad no es considerable: tales suelos pueden considerarse como homogéneos o uniformes. Sin embargo, es muy difícil establecer un criterio para determinar cuándo un suelo es uniforme o no.

Como guía general [8,22], un suelo puede ser considerado como *uniforme* si la diferencia entre dos valores externos de resistividad aparente es menor del 30%. En suelos uniformes se acostumbra tomar la resistividad  $\rho_a$  para una profundidad equivalente a la de los electrodos de la malla, que para todo fin práctico puede ser  $2 m$  [22].

El problema de interpretación más simple es el caso en donde las resistividades aparentes medidas,  $\rho_a$ , varían poco respecto a un valor promedio  $\rho$ . Esto indica que la tierra en el sitio de medida es más o menos uniforme y tiene una referencia  $\rho$ . Variaciones de resistividad observadas puede ser atribuidas a pequeñas discontinuidades locales, las cuales pueden ser despreciables, o a inexactitudes en las mediciones debido a un gran número de factores como corrientes parásitas en la tierra o a la sensibilidad inadecuada del equipo de medida.

Si se desea utilizar un modelo de suelo uniforme debido a la simplicidad de la puesta a tierra, pero se tiene que los valores de resistividad a una misma profundidad difieren según el sitio de medida, se hace necesario utilizar un criterio para determinar el valor real de resistividad. Por ejemplo, el criterio obtenido por el método probabilístico [8].

*Método probabilístico:* Este método se aplica especialmente para suelos homogéneos donde los valores de resistividad medidos a una misma profundidad difieren según el punto de medida. El método probabilístico se basa en que los logaritmos naturales de los valores de resistividad del suelo en un sitio particular siguen la función de distribución normal, en forma casi independiente de la magnitud de las variaciones de resistividad.

Los pasos a seguir para el procedimiento de aplicación, son los siguientes [8,31]:

- Las medidas deben efectuarse en forma organizada de tal manera que se logre un cubrimiento total del área sobre la cual se construirá la puesta a tierra; si es necesario la repetición de una medida, el sitio deberá ser localizable siquiera en forma aproximada. Uno de los métodos que podría ser empleado consiste en trazar líneas separadas de tal forma que cubran aproximadamente el ancho del sitio donde se localizan los equipos. Sobre cada una de las líneas se efectúan dos o tres series de medidas con una separación entre electrodos que va de  $2$  a  $8 m$ . Estas medidas se pueden efectuar en diferentes épocas del año (tiempo

húmedo y tiempo seco) para, así, tener cálculos más precisos.

- Se ordenan en forma ascendente los valores de resistividad medidos para una determinada profundidad y se obtienen los logaritmos naturales  $x = \ln \rho$ . Para estos valores logarítmicos, así ordenados, pueden calcularse seguidamente las estimaciones del valor promedio  $\bar{x}$  y la desviación estándar  $\sigma^2$ . Esta última es una medida de variación de la resistividad del suelo, de tal forma que un valor bajo de desviación estándar constituye un índice alto de uniformidad.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i^n X_i; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_i X_i^2 - \left(\sum_i X_i\right)^2/n}{(n-1)}}$$

- La validez de la relación log-normal para los valores de resistividad permite predecir, con un determinado grado de confianza, la probabilidad de encontrar suelo con una resistividad igual a un valor dado. Esta probabilidad se calcula mediante la siguiente función:

$$p = F\left[\frac{\ln \rho - \bar{x}}{\sigma}\right] \quad \text{ó} \quad p = F(z)$$

donde  $z = (x - \bar{x})/\sigma$ ,  $\rho$  es la resistividad del suelo, y  $p\% = F(z) * 100\%$ .

El valor de  $p$  se puede obtener a partir de la función de distribución normal acumulada [8]. Así, para cada valor de resistividad o de  $\ln \rho$  se puede encontrar un valor de probabilidad  $p$ ; esto quiere decir que existe una probabilidad  $p$  de encontrar resistividad  $\rho$  [ $\Omega.m$ ] o menos.

- Fijándose una probabilidad de por lo menos el 70% se define un valor muy representativo de la resistividad. A partir de esta probabilidad se puede encontrar en las tablas de la función de distribución normal acumulada [8] un valor de  $z = -0.5245$  y con el promedio y la respectiva desviación estándar, se encuentra el valor de la resistividad a partir de la siguiente expresión:

$$\ln \rho = \sigma z - \bar{x}$$

Por ejemplo, para  $z = 3.5$ , entonces,  $p = 1$  ó  $p\% = 100\%$ .

El cálculo anterior se puede complementar determinando los límites para un nivel específico de confiabilidad, mediante la función:

$$F\left[z - a \sqrt{\frac{2 + z^2}{2n}}\right] \leq p \leq \bar{F}\left[z - a \sqrt{\frac{2 + z^2}{2n}}\right]$$

en donde  $a$  es un coeficiente para un nivel específico de confianza (por ejemplo 1.65 para 90% y 1.96 para 95%),  $n$  es el número de lecturas.

## 1.4.2 SUELOS HETEROGÉNEOS

En la práctica, los casos de uniformidad raramente ocurren y la representación más precisa de un sistema de tierra debe basarse en la variación real de la resistividad del suelo presente en el sitio de medida. Generalmente, el análisis se basa en una representación de mediana exactitud, es así, como el camino que sigue la corriente de falla a tierra, se modela usualmente en forma muy simplificada como un conductor perfecto, lo que raramente lleva a resultados reales. La inconsistencia aparente de estas aproximaciones, puede ser explicada por las dificultades matemáticas involucradas en la solución del cálculo del flujo tridimensional de corriente dentro de la tierra.

Frecuentemente, las amplias variaciones observadas en las características de la tierra, generalmente descritas como un medio no homogéneo semi-infinito, son utilizadas como justificación para no emplear modelos detallados del camino a tierra de la corriente de falla.

Con el avance de los computadores, han desaparecido muchas limitaciones de cálculo para desarrollar modelos más exactos de la estructura de la tierra, que incluyen grandes variaciones en la resistividad del suelo. Con esto, modelos de tierra relativamente simples pueden utilizarse efectivamente para predecir con exactitud el comportamiento de los sistemas de distribución a tierra.

La variación del valor de la resistividad aparente en función de la distancia entre los electrodos de medida, proporciona una primera indicación cualitativa de la estructura del suelo; si esa curva es decreciente, significa que el subsuelo es mejor conductor que el terreno superficial e inversamente para una curva creciente.

La determinación cuantitativa de la resistividad del terreno a diferentes profundidades se hace graficando la curva experimental de variaciones de la resistividad aparente calculadas, correspondientes a ciertas estructuras del terreno bien precisas que, generalmente, son:

- suelo cuya resistividad varía continuamente siguiendo una ley exponencial;
- suelo constituido por una capa superficial de resistividad uniforme,  $\rho_1$ , y de un subsuelo de resistividad  $\rho_2$ ;
- suelo constituido por tres capas.

La búsqueda de la estructura más adecuada a los resultados experimentales puede hacerse gráficamente o por cálculos mediante computador, quedando determinada la estructura del suelo con una precisión que depende únicamente de la manera como los resultados de las mediciones se superpongan con las curvas teóricas, que pueden calcularse con gran precisión dependiendo de la calidad de los equipos empleados.

La figura 1.9 muestra un ejemplo de curvas de valores de resistividad aparente medidas por el

método de Wenner (curvas de trazo continuo y guión) y su comparación con las de un modelo teórico de dos capas (curvas de trazo punto-guión), habiéndose considerado tres alternativas para el valor de  $\rho_2$ .

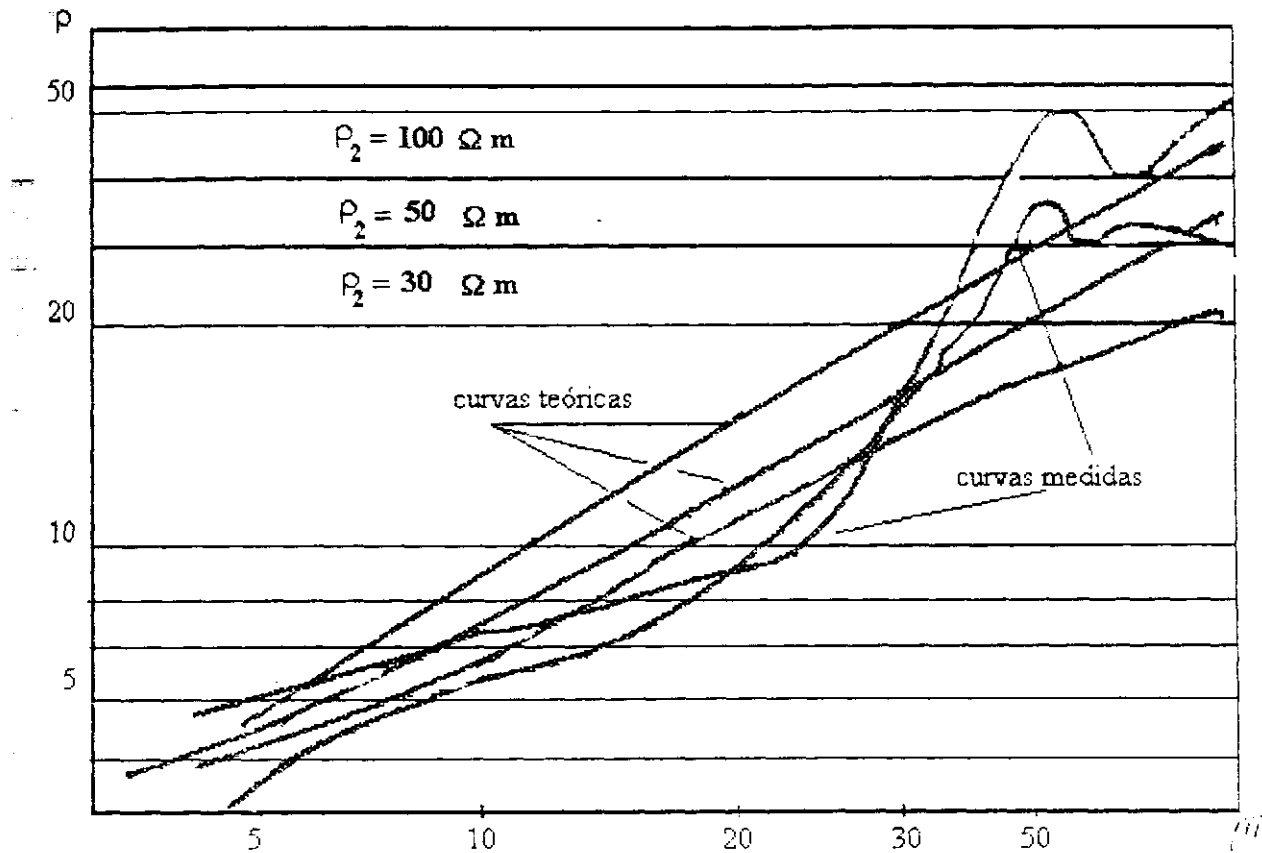


Figura 1.9

En el diseño y cálculo de sistemas de distribución de puesta a tierra, el modelo del suelo puede ser representado, aproximadamente, por una estructura de dos capas. Debido a las amplias variaciones en la composición y propiedades de los materiales de la tierra, existen diferentes técnicas para determinar el modelo equivalente de las dos capas del suelo a partir de los valores medidos de resistividad [8].

El número de parámetros requeridos para representar un modelo de la estructura de la tierra es usualmente tan grande que es difícil escoger los valores iniciales. Teniendo un algoritmo de computador se puede llegar a una solución aceptable dentro de un tiempo razonable. La selección de los valores iniciales se convierte en una tarea fundamental en el proceso de interpretación.

El éxito en esta evaluación inicial depende, generalmente, de la experiencia del ingeniero y su conocimiento de las propiedades eléctricas de la tierra. Sin embargo, no siempre es posible obtener



la solución única para el problema de interpretación de medidas: debido a las inexactitudes en estas, 5% con instrumentos geológicos típicos como se mencionó antes, se pueden encontrar varios modelos de estructura de tierra que dan respuestas satisfactorias a los resultados de las medidas iniciales. Estos modelos diferirán usualmente, en las características de las capas de suelo profundas.

*Modelo de las dos capas:* En la mayoría de los casos, la representación de una malla de tierra basada en un modelo equivalente de suelo en dos capas es suficiente para el diseño de un sistema seguro [8,32], ya que es difícilmente justificable en términos económicos, o no existe la posibilidad técnica de modelar todas las variaciones.

Este modelo se desarrolla con base en distintas aproximaciones matemáticas usadas para el cálculo de potenciales eléctricos en un terreno con capas de diferentes propiedades eléctricas. Uno de los métodos utilizados busca una solución particular a la ecuación de Laplace, la cual satisface ampliamente las condiciones del problema [22].

Este modelo muestra que el potencial de tierra está siempre expresado por una cantidad de potencial normal (tierra uniforme), y un potencial de disturbio, el cual corresponde a la capa más profunda del terreno.

Con el método de dos capas, el suelo está caracterizado por el espesor de la primera capa  $h$ , la resistividad de las capas: primera  $\rho_1$  y segunda  $\rho_2$ , tal como se muestra en la figura 1.10.

Las variables  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ , son generalmente determinadas por medio de la interpretación de los valores de resistividad aparente medidos utilizando el método de Wenner.

Los cambios bruscos en resistividad en las fronteras de cada capa pueden ser descritos por el factor de reflexión  $k$ , el cuales definido como:

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

Este factor de reflexión varía entre -1 y +1. Un suelo con cambios extremos en la resistividad representa un factor con un valor cercano a la unidad, mientras un factor de cero o cercano a cero es dado por un suelo uniforme.

De acuerdo a la teoría electromagnética, el cambio de resistividad de un medio (o capa) a otro actúa como espejo para la carga puntual, produciendo reflexiones de dicha carga a distancias proporcionales a la distancia inicial. Usualmente, mientras más profunda sea la primera capa menos número de reflexiones deben ser consideradas. En la práctica 1 ó 2 reflexiones son suficientes para la

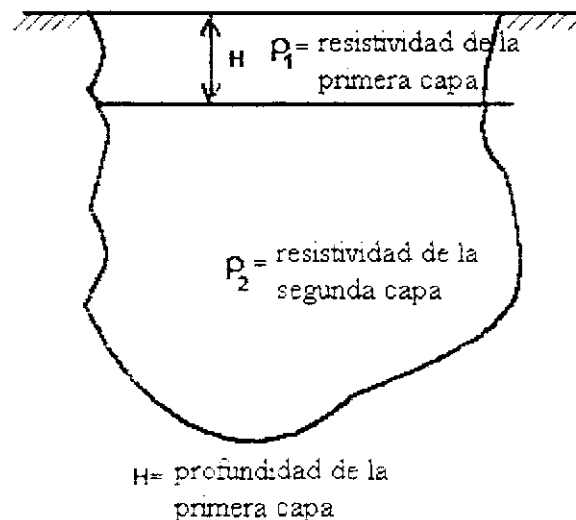


Figura 1.10

mayoría de los casos.

El método de las dos capas puede ser usado como la más simple estructura equivalente de tierra por la interpretación práctica de las medidas del terreno. La resistividad aparente  $\rho_a$  es medida teniendo en cuenta las condiciones para el suelo de dos capas y se expresa de la siguiente manera:

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{4nh}{a}\right)^2}} \right] \right\}$$

donde:

- $\rho_a$ : La resistividad aparente medida usando el método de Wenner.
- $a$ : Distancia de separación entre las puntas de corriente y de potencial.
- $\rho_1$ : Resistividad de la primera capa.
- $\rho_2$ : Resistividad de la segunda capa que se extiende hasta una profundidad infinita.
- $k$ : Coeficiente de reflexión.
- $h$ : Profundidad de la primera capa.
- $n$ : Cantidad de reflexiones.

La altura de la primera capa afecta el comportamiento de los electrodos verticales. Si la altura es mayor que la longitud de los electrodos, su comportamiento será el mismo, que para el caso del suelo uniforme con resistividad  $\rho$ . Para los casos en que  $k$  sea positivo, dependiendo de los valores de  $k$  y  $h$ , el efecto de los electrodos verticales no contribuye significativamente al control de la resistencia de la malla y las tensiones de choque. Este modelo sólo es justificable en suelos visiblemente heterogéneos, en mallas no uniformes y en grandes áreas e implica el uso de métodos de computación. Para sistemas que involucran arreglos simples y suelos relativamente uniformes, otros métodos con menor precisión son suficientes.

Paralelamente se emplea el método de medida denominado Electrodo Enterrado [33]. Este método es más costoso.

*Modelo de capas inclinadas:* Si el límite de separación de las dos regiones de tierra con diferentes resistividades no es horizontal, pero inclinado respecto a la superficie, la solución matemática exacta para la función de potencial es obtenida a través de un proceso de doble integración de una función complicada que contiene senos hiperbólicos y funciones de Bessel de segunda clase [x].

Cuando el ángulo de inclinación es de  $90^\circ$  (falla de estructura vertical), puede obtenerse una solución simple. La figura 1.11 ilustra este caso. En la práctica, este efecto puede ser el resultado de un número de diferentes mecanismos, incluyendo pero no limitando una falla geológica. Los cambios horizontales de resistividad ocurren, pero en comparación con los verticales son más casuales.

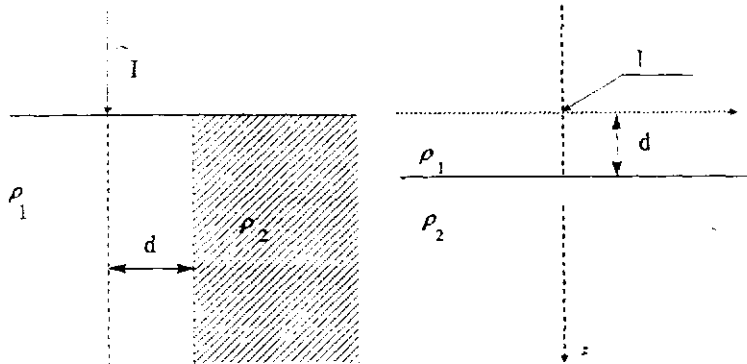


Figura 1.11

La resistividad aparente  $\rho_a$  para la condición de falla vertical será:

$$\rho = \frac{\rho_1}{1-k} \left[ 1 + k^2 + \frac{k(1-k)}{\sqrt{4\left(\sin \omega + \frac{h}{a}\right)^2 + \cos^2 \omega}} - \frac{k(1+k)}{\sqrt{\left(2\sin \omega - \frac{h}{a}\right)^2 + \cos^2 \omega}} \right]$$

donde  $h$  es la distancia del centro y la línea de falla,  $\omega$  es el ángulo entre y la línea de falla, ver figura 1.12.

*Inspección visual:* Cuando se presentan cambios en el gráfico de resistividad aparente contra la profundidad, se puede determinar aproximadamente el modelo de las dos capas. Un gráfico de este tipo se ilustra en la figura 1.13 en la cual se puede observar fácilmente que la resistividad de la segunda capa es alrededor de 100  $\Omega.m$ ; por otra parte, la resistividad de la primera capa y su altura  $Y$ , son difíciles de estimar. Una estimación conservativa consiste en extender el gráfico hasta que cruce con el eje  $Y$  y tomar dicho valor como la resistividad de la primera capa, que para la gráfica dada, son 1250  $\Omega.m$ . Para la determinación de la profundidad de la primera capa, se puede tomar el valor a partir del cual la curva toma un valor asintótico, que para el caso sería 4.5 m [8].

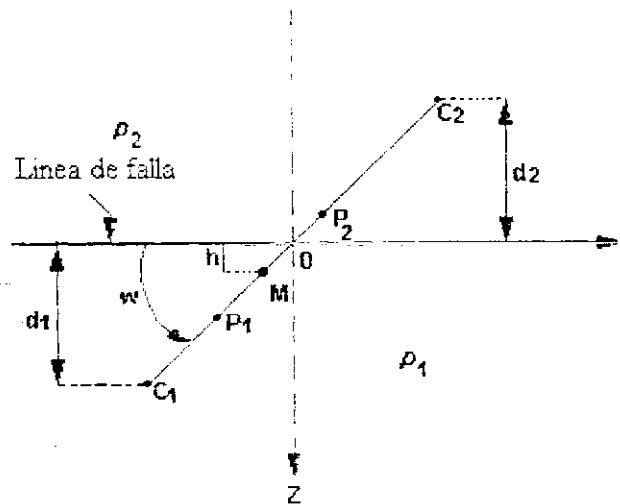


Figura 1.12

*Métodos gráficos:* En la mayoría de los casos, la resistividad aparente graficada como una función del espaciamiento entre electrodos, muestra cambios bruscos respecto al espaciamiento entre éstos, lo que indica que la tierra no es uniforme.

En general, las curvas de resistividad aparente cambian suavemente y no exhiben cambios abruptos. Cuando ocurre lo último, se tiene una clara indicación que la configuración de electrodos ha cruzado una falla vertical o una discontinuidad local cerca a la superficie de la tierra. La magnitud del cambio es una indicación de la diferencia entre las resistividades de dos capas de tierra adyacentes.

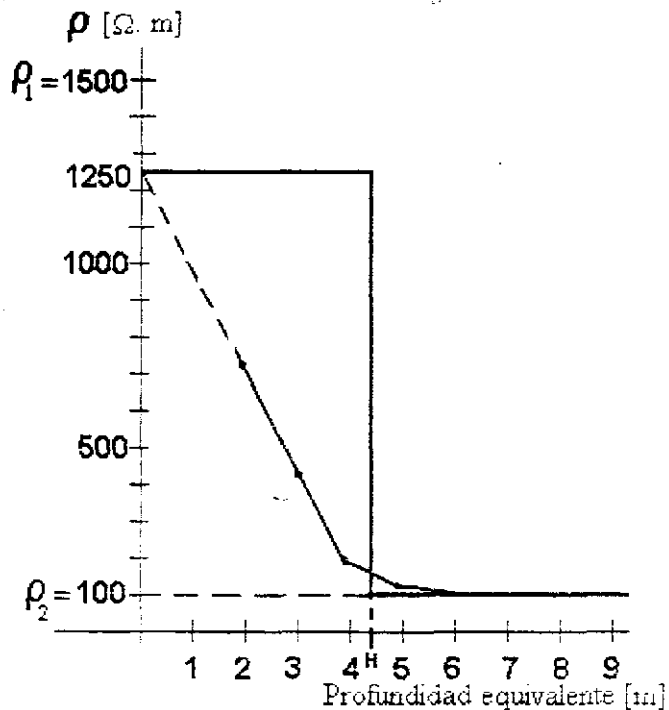


Figura 1.13

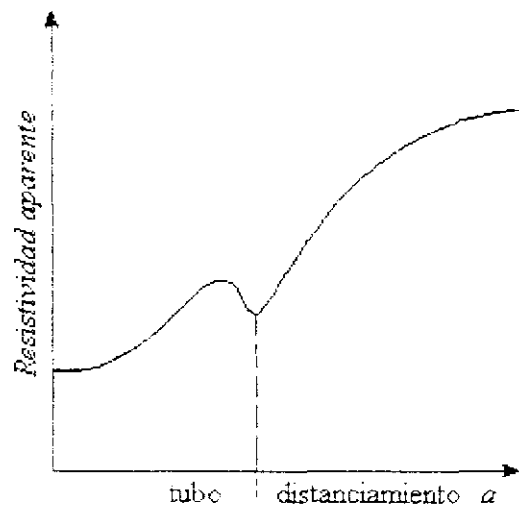


Figura 1.14

La presencia de tubos enterrados u otras estructuras metálicas cerca a la superficie es también una causa típica de cambios bruscos en la resistividad aparente de la tierra, como se muestra en la figura 1.14. La interpretación de las medidas se puede llevar a cabo estableciendo un gráfico de la dependencia entre los valores de resistividad medidos (ordenada) y  $1/3$  de los valores de las distancias entre los electrodos de alimentación (abscisa) para el caso del método de Wenner.

Las figuras 1.15 muestran un ejemplo de las cuatro formas diferentes posibles de curvas para el caso de tres capas. Según las figuras, se ve que sólo con cierto número de mediciones a diversas distancias entre los electrodos se pueden obtener informaciones suficientes sobre la composición del suelo; por ej., en el caso de un suelo de tipo *A*, si se efectúan solamente dos mediciones dejando una distancia entre los electrodos de  $2m$  y  $50m$ , respectivamente, puede pensarse que el suelo tiene una resistividad que aumenta con la profundidad, perdiéndose así toda información sobre la existencia

de una capa intermedia de resistividad menor.

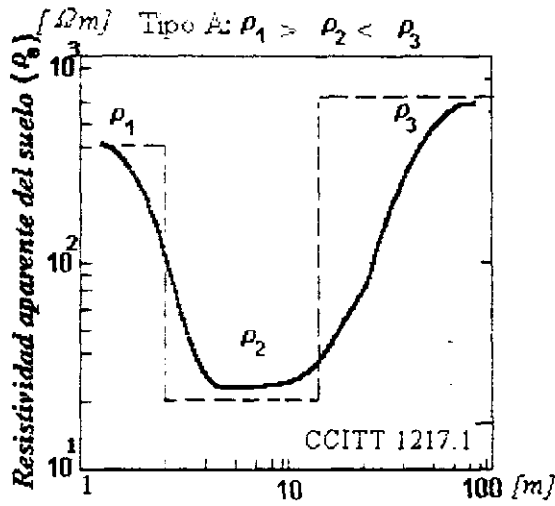
La misma figura muestra, que en ciertos casos, son necesarias mediciones con grandes separaciones entre los electrodos, por ejemplo, para distinguir un suelo de tipo *D* de un suelo de tipo *C* es necesario realizar las mediciones con distancias entre los electrodos de alimentación superiores a 30 m.

**Técnica de interpretación de Sunde:** El modelo de las dos capas puede aproximarse a partir de las medidas de campo realizadas por el método de Wenner con ayuda de las gráficas de Sunde [34], y que se representan figura 1.16.

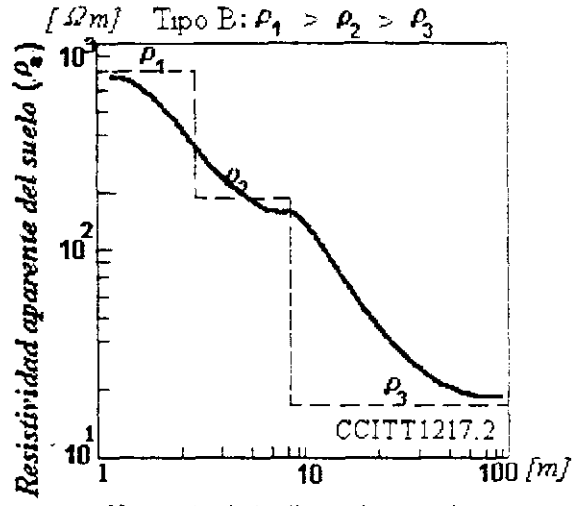
Los valores  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , y  $h$  son obtenidos por el método de prueba y error, siguiendo el siguiente procedimiento [8]:

- *Paso 1:* Se grafica la resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje  $x$  contra el espaciamiento de las puntas  $a$  (o profundidad equivalente).
- *Paso 2:* El  $\rho_a$  correspondiente al menor espaciamiento es  $\rho_1$  y al mayor es  $\rho_2$ , con lo cual se determina la relación  $\rho_2/\rho_1$  y se selecciona la curva correspondiente en la gráfica de Sunde, figura 1.16.
- *Paso 3:* Se asume un valor inicial de  $h$ , por ejemplo  $h_1$ , basándose en la pendiente del gráfico de  $\rho_a$  contra profundidad. Si la pendiente es fuerte, utilizar  $h_1$  pequeño y viceversa.
- *Paso 4:* Se determina la relación  $a/h_1$ , para todas las mediciones.
- *Paso 5:* Se obtiene  $\rho_a/\rho_1$  para cada  $a/h_1$ , (encontrados en el paso 4) a lo largo de la curva seleccionada en el paso 2.
- *Paso 6:* Dividir cada  $\rho_a$  obtenido en mediciones por el correspondiente  $\rho_a/\rho_1$ , obtenido en el paso 5. Esta división debe resultar en un valor constante de  $\rho_1$ .
- *Paso 7:* Si no se obtiene un valor constante de  $\rho_1$  en el paso 6, incrementar ó disminuir el valor de  $h$  asumido en el paso 3 y repetir de nuevo los pasos 3 a 7.

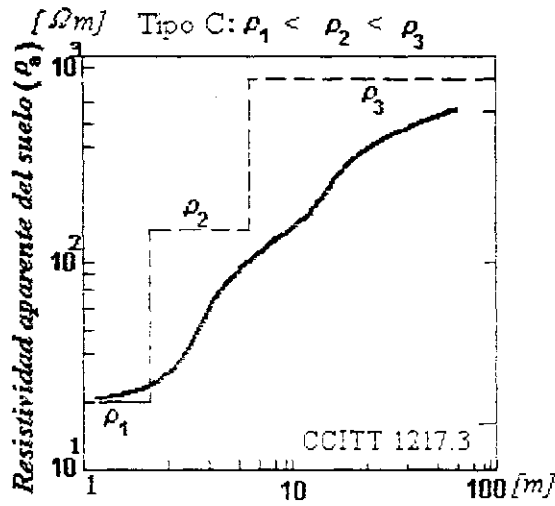
Después de la predicción por medio de este método, para algunos casos se pueden esperar resultados rápidos y precisos. Debido a que los valores  $\rho_1$  y  $\rho_2$  se seleccionan a *grosso modo*, solamente la profundidad  $h$  de la capa superior puede determinarse con mayor precisión utilizando este método en vez del método visual.



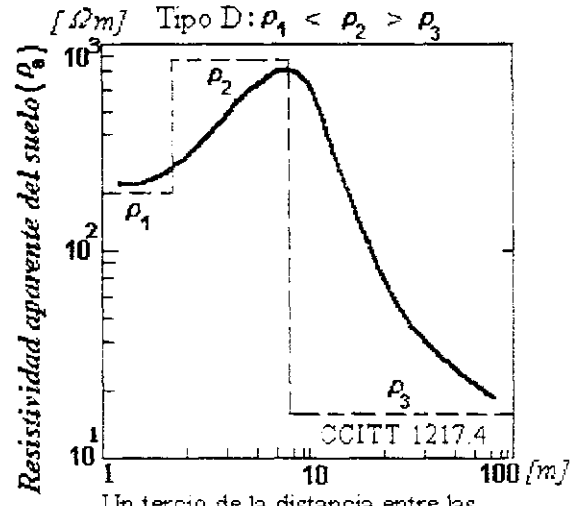
Un tercio de la distancia entre las sondas de alimentación  
 Arcilla entre dos capas de arena



Un tercio de la distancia entre las sondas de alimentación  
 Arena/arena debajo de la capa freática/arcilla



Un tercio de la distancia entre las sondas de alimentación  
 Arcilla/mezcla arcilla-arena/pizarra



Un tercio de la distancia entre las sondas de alimentación  
 Mezcla arcilla/arena/grava de morena/arcilla

Figura 1.15

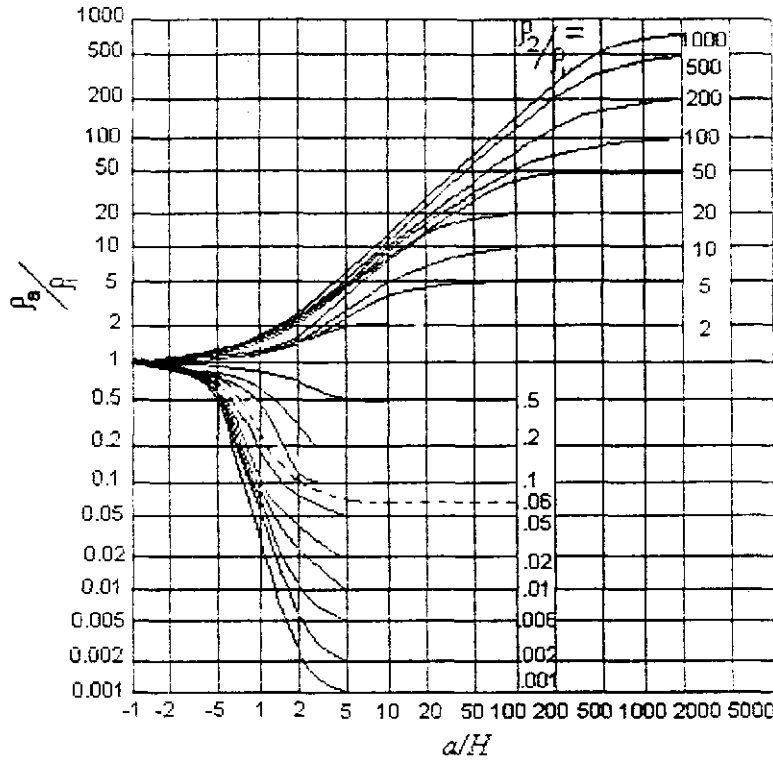


Figura 1.16

**Concordancia con curvas logarítmicas:** Las funciones de resistividad aparente pueden ser descritas en términos de relaciones adimensionales  $k$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h$ .

*Modelo de tierra de dos capas horizontales*

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 - 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{4nh}{a}\right)^2}} \right] \right\}$$

*Modelo de tierra de dos capas verticales (Falla vertical)*

$$\rho = \frac{\rho_1}{1 - k} \left[ 1 - k^2 - \frac{k(1 - k)}{\sqrt{4 \left( \sin \omega - \frac{h}{a} \right)^2 - \cos^2 \omega}} - \frac{k(1 - k)}{\sqrt{\left( 2 \sin \omega - \frac{h}{a} \right)^2 - \cos^2 \omega}} \right]$$

Si una de las anteriores funciones adimensionales de resistividad aparente  $\rho_a^0 = \rho_a/\rho_1$ , es graficada

en coordenadas logarítmicas, o sea,  $\ln(\rho_a/\rho_1)F(\ln(a/h))$ , en un punto de la curva de resistividad se tendrá  $y = \ln \rho_a - \ln \rho_1$  en el eje  $y$ , mientras  $x = \ln a - \ln h$  en el eje  $x$ .

Si se asume que el número de curvas de resistividad aparente, denominadas como curvas patrones, se grafican para varios coeficientes de reflexión  $k$ , entonces:

$$y^0 = \ln \rho_a,$$

$$x^0 = \ln a,$$

asumiendo que  $\rho_1 = 1 \Omega m$  y  $h = 1 m$ .

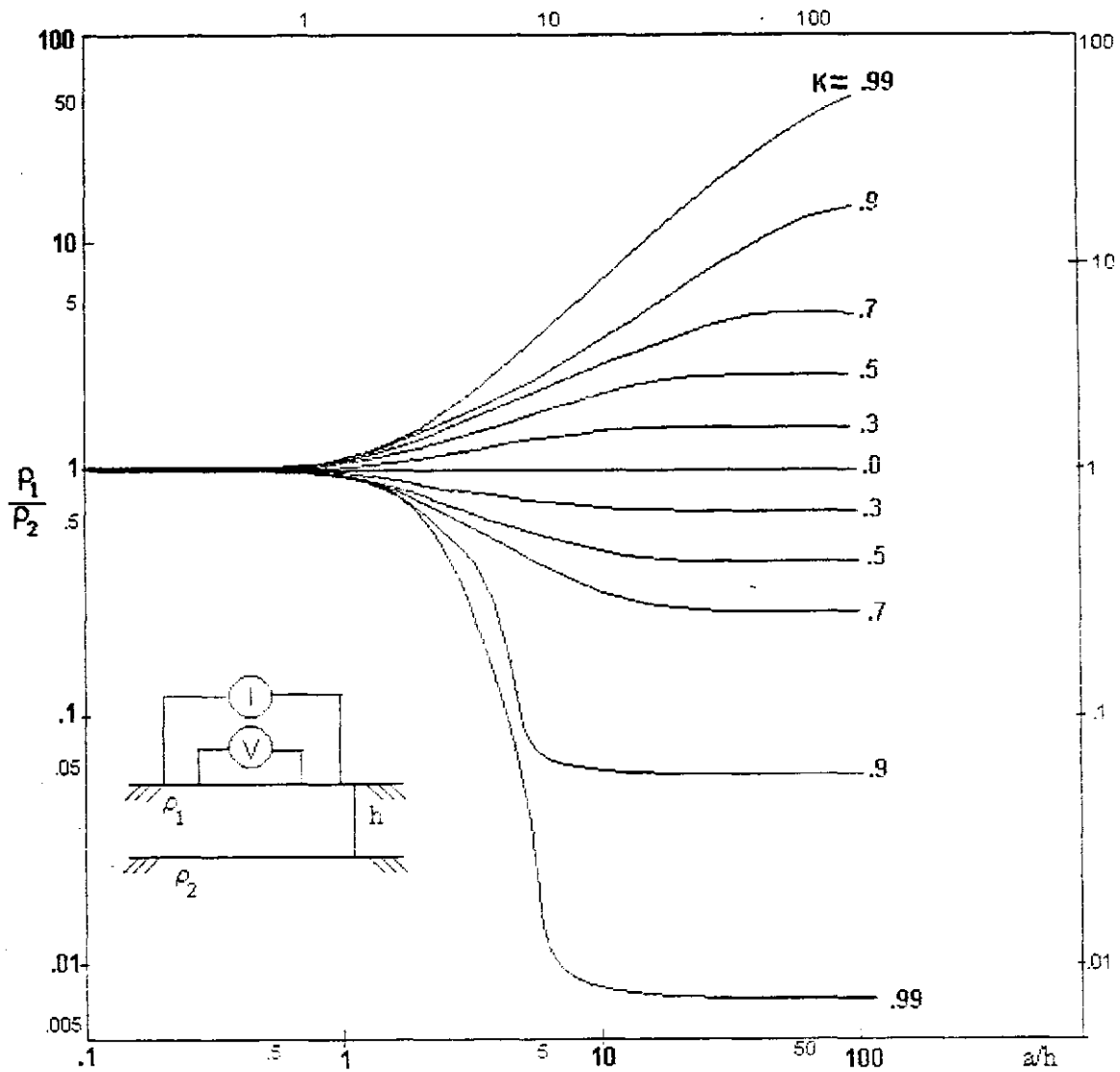


Figura 1.17



Las curvas de resistividad derivadas de la configuración de dos capas, donde  $\rho_1$  y/o  $h$  no son iguales a la unidad, serán desplazadas verticalmente por  $-\ln\rho_1$  y horizontalmente por  $-\ln\rho_1$  con respecto a las curvas patrones correspondientes. Las formas de las curvas se conservan. Esta propiedad de la curva de resistividad aparente cuando se realiza en coordenadas logarítmicas, es la base de la convergencia del método de la curva logarítmica. De esta manera, una curva de campo puede compararse directamente con una curva teórica patrón.

Si se encuentra una convergencia satisfactoria entre la curva teórica y la de campo, entonces, el factor de reflexión  $k$ , es igual al que se calcula en la curva. Este método requiere que un grupo de curvas patrones de referencia precalculadas, estén disponibles para el interpretador.

La figura 1.17 es un grupo de curvas patrones para el caso de la configuración de dos capas. Cuando una curva de campo se halla entre dos curvas, los valores correctos pueden ser interpolados. Si se requiere de más precisión, se utilizarán curvas adicionales, con valores cercanos de  $k$ .

La figura 1.18, es un grupo de curvas patrón aplicadas a la falla vertical, cuando la dirección de la transversal está en un ángulo de  $0^\circ$  con respecto a la línea de falla. Se debe anotar que son requeridas curvas adicionales (en diferentes ángulos de travesía), para un grupo completo de curvas patrón.

La construcción de tales curvas se realiza directamente por medio de calculadoras programables.

*Método sistematizado:* La norma **IEEE-81** [1] en sus anexos ilustra métodos iterativos para determinar el modelo de las capas del suelo, los cuales requieren la utilización del computador. Estos métodos se basan en soluciones de la fórmula de Tagg [35], dada en el modelo de las dos capas.

*Comparación de modelos uniformes y de dos capas:* El modelo de las dos capas ha demostrado ser mucho más preciso que el modelo uniforme, siendo las siguientes algunas de las razones:

- La variación de la resistividad del suelo tiene una notable influencia en el comportamiento de los sistemas de tierra, afectando la resistencia de la malla, el GPR y las tensiones de choque.
- En general para valores negativos de  $k$  ( $\rho_1 > \rho_2$ ), la resistividad es menor que en el mismo sistema con resistividad aparente  $\rho_a$ , lo contrario pasa cuando  $k$  es positivo ( $\rho_1 < \rho_2$ ). Una relación similar existe para las tensiones de choque.
- La profundidad  $h$  de la primera capa, afecta el comportamiento de los electrodos verticales. Si la profundidad  $h$ , es mayor que la dimensión de los electrodos, su comportamiento será el mismo para el caso de un suelo uniforme con resistividad  $\rho_a$ , para los casos cuando  $k$  es positivo ( $\rho_1 < \rho_2$ ). Dependiendo de los valores de  $k$  y  $h$ , el efecto de los electrodos verticales

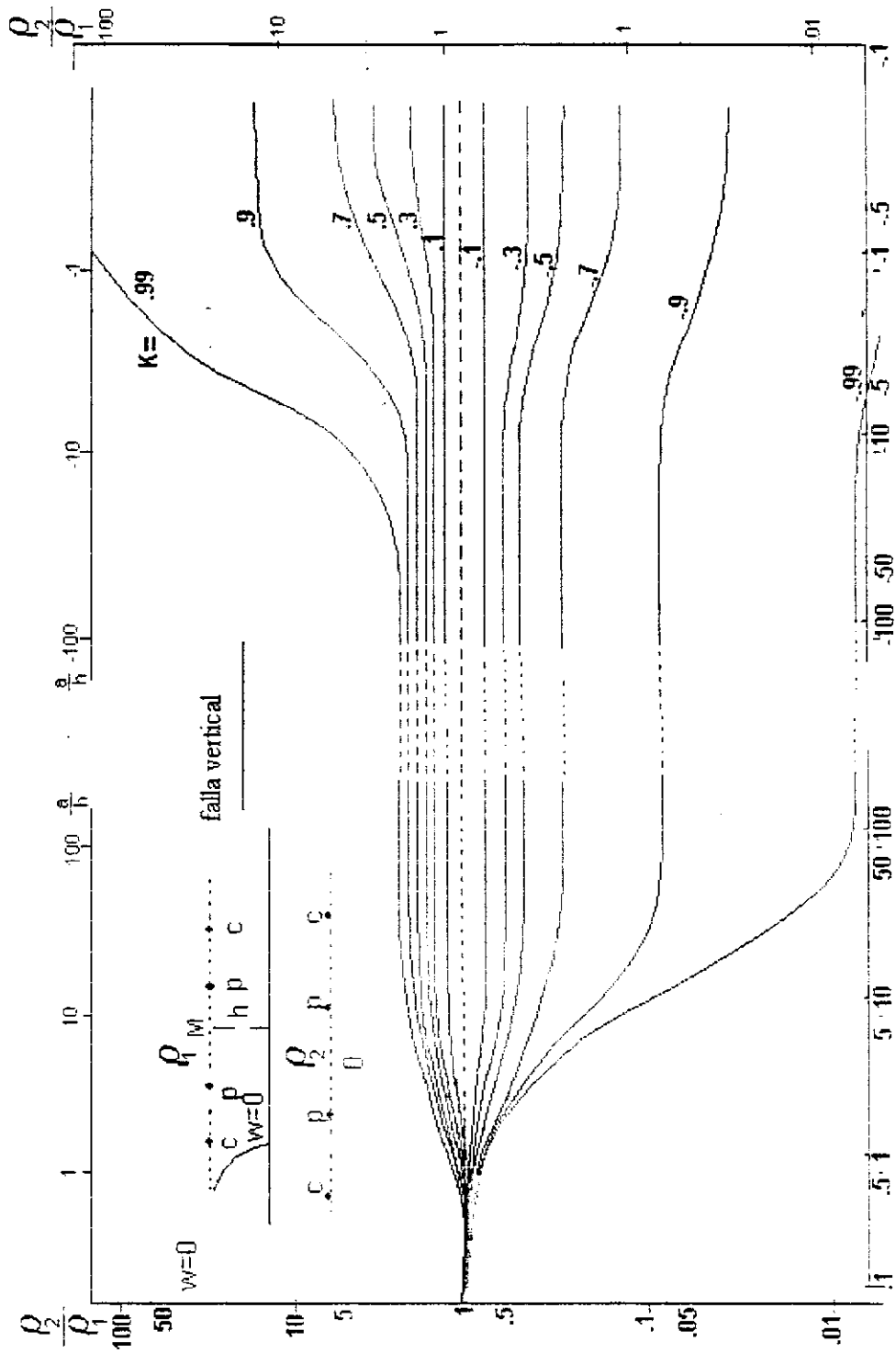


Figura 1.18

no contribuye significativamente al control de la resistencia y las tensiones de choque.

Con modelos de suelo uniforme y mallas uniformes se obtienen las peores tensiones de choque, especialmente en los lazos exteriores

## 1.5 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA PRECISIÓN DE LAS MEDIDAS

La conducción del suelo es esencialmente un fenómeno electrolítico; por lo tanto, el paso de la corriente continua de medida a través del suelo provoca la aparición de una fuerza electromotriz inversa, susceptible de motivar corrientes en el circuito de medición y de provocar errores de medida, si no se toman las precauciones necesarias.

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta la presencia en el suelo de corrientes parásitas de origen telúrico o industrial. Dado que la tensión que ha de medirse es, generalmente, débil; las tensiones debidas a estas corrientes son a menudo molestas.

Los aparatos de medida de resistividad del suelo incluyen normalmente un dispositivo que permite reducir al mínimo el efecto de las corrientes electrolíticas y parásitas. El procedimiento habitualmente empleado consiste en utilizar un rectificador en el circuito de potencial, que funcione en sincronismo con la corriente de medida, a fin de rechazar las corrientes que no tengan los mismos valores de frecuencia y fase. Es conveniente variar la frecuencia de la corriente de medida, modificando, por ejemplo, la velocidad de rotación de la manivela, si se utiliza un generador manual como fuente de corriente. Si se emplea una corriente alterna en las mediciones, para disminuir el acople inductivo entre conductores de alimentación y de medida de tensión, se recomienda alejarlos al máximo unos de otros eligiendo la forma apropiada, y la frecuencia que se ha de utilizar.

El método de Schlumberger tiene el inconveniente de que la tensión que ha de medirse disminuye en función del cuadrado del aumento de la distancia entre las sondas de alimentación, lo que obliga a utilizar equipos de medida muy sensibles, exigiendo mayor experiencia en el personal que ejecuta la medición.

La inductancia de los cables de alimentación de los electrodos y de los de medida de tensión, debe ser lo más baja posible; para esto, dichos cables se separarán durante las mediciones.

Se debe analizar la posibilidad de efectos peculiares en el suelo. En particular, si la resistividad del suelo es reducida, las mediciones efectuadas, cuando los electrodos de alimentación están muy alejados entre sí, pierden precisión debido a la dispersión.

Si las mediciones se hacen aplicando una corriente continua de inversiones periódicas, y si estas se hacen a un ritmo rápido, puede inducirse tensión en el circuito de medida debida a las inversiones de corriente: esta tensión puede ser particularmente importante si los electrodos están alejados entre sí, puesto que la resistencia mutua entre los circuitos de medida de tensión y de alimentación, disminuye en función de la distancia entre los electrodos, en tanto que aumenta el acople inductivo.

Cuando la resistividad del suelo es reducida, el efecto inductivo se aprecia más que cuando es alta, ya que la resistencia mutua es proporcional a la resistividad, mientras que el acople inductivo depende en menor grado de la resistividad. Para solucionar este problema, puede introducirse un retardo en el rectificador síncrono del circuito de medida de tensión, de modo que la tensión transitoria inducida haya desaparecido cuando interviene el rectificador.

La resistencia de los cables de alimentación y la resistencia de los electrodos de tierra de alimentación sólo afectan a la tensión respectiva necesaria para inyectar por el suelo la corriente de medida deseada. Sin embargo, en el circuito de medida de tensión, y según la técnica empleada para las mediciones, una resistencia de tierra demasiado fuerte de los electrodos exige aplicar tediosas correcciones o a utilizar equipos de medida mucho más complejos, y por lo tanto, más costosos si se quiere obtener mediciones precisas sin precauciones suplementarias.

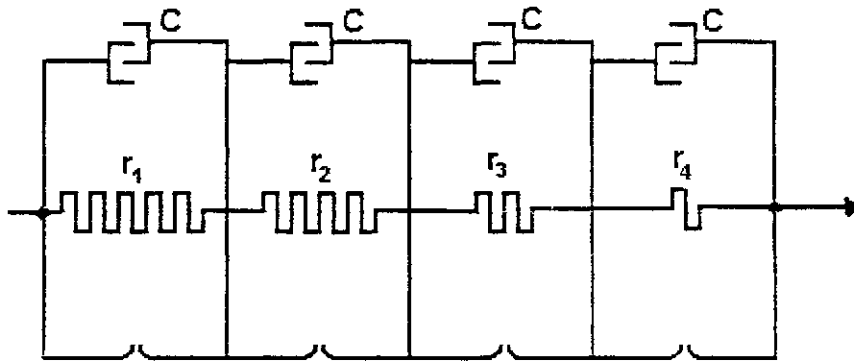


Figura 1.19

Algunos medidores requieren correcciones para las resistencias de los electrodos, en tales casos el fabricante del instrumento de medida de resistividad dará su factor de corrección. La presencia de estructuras metálicas enterradas cerca al sitio de medidas (tubos y cubiertas de cables, por ejemplo), disminuye la resistividad aparente medida en función de la posición de la línea del eje de los electrodos (paralela o perpendicular) con relación a los tubos o cables, siendo más fuerte la disminución en el primer caso. Cuando el número, y sobre todo, la longitud de las estructuras metálicas enterradas es considerable, como ocurre en las aglomeraciones urbanas, el valor de las mediciones de resistividad es dudoso, pero hay que decir que en este caso son rara vez necesarias estas mediciones.

El comportamiento de los electrodos de tierra enterrados en un suelo puede ser analizado por medio del circuito representado en la figura 1.19. El terreno se comporta como un conductor de resistencia  $r$  y con dieléctrico  $\epsilon$ . La corriente de carga es insignificante en comparación con la corriente de dispersión y la tierra puede estar representada por una resistencia pura.

### 1.5.1 MAGNITUDES EN LA CALIDAD DE LA MEDICIÓN

*Efecto de los gradientes de voltaje:* La resistividad del terreno no está afectada por un gradiente de

voltaje menor que cierto valor crítico, con el cual varía la resistividad del terreno. Este valor usualmente tiene una magnitud de kilovoltios por centímetro. Una vez excedido este valor, el arco puede desarrollarse en la superficie del electrodo y progresar dentro de la tierra incrementando el tamaño efectivo del electrodo, hasta que el valor del gradiente se reduce y el terreno pueda aguantar.

*Efecto de la magnitud de la corriente:* La resistividad del suelo en la vecindad de los electrodos de tierra puede ser afectada por corrientes que fluyen desde los electrodos hacia los alrededores del sitio de medida. Las características térmicas y el contenido de humedad del terreno determinará si la magnitud de la corriente y su duración, causarán resequead y aumento de la resistividad efectiva del suelo. Un valor conservativo de la densidad de corriente no es mayor que  $200 A m^{-2}$  por segundo.

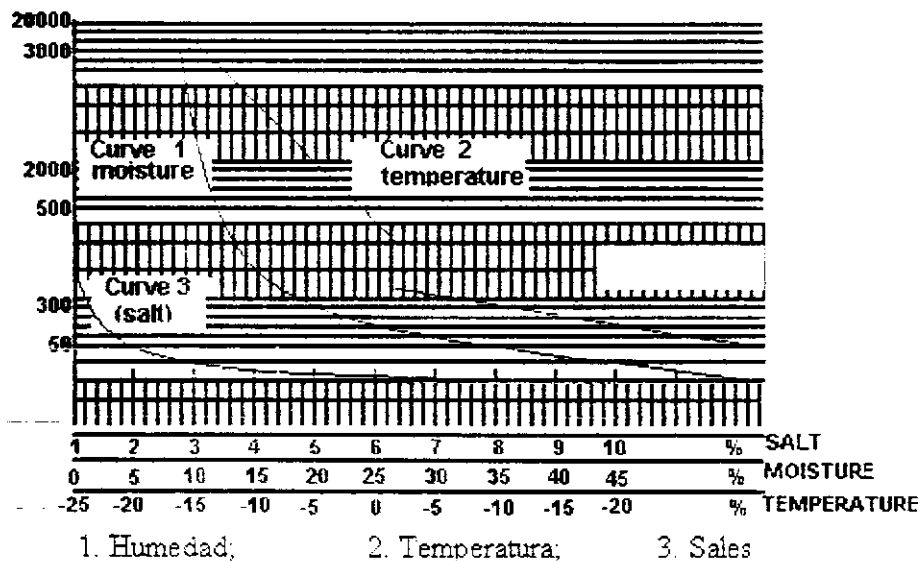


Figura 1.20.

1) Humedad; 2) Temperatura; 3) Sales.

*Efecto de humedad, temperatura y contenido químico:* La resistividad del terreno aumenta abruptamente cuando el contenido de humedad es menor que el 15% del peso del terreno. La figura 1.20 muestra una variación típica de la resistividad respecto a la temperatura para un 15.2% de humedad. El efecto de la temperatura sobre la resistividad del terreno es insignificante para valores por encima del punto de congelación. A  $0^{\circ}C$ , el agua en el terreno empieza a congelarse y la resistividad se incrementa rápidamente. Igualmente la composición y cantidad de aguas solubles, ácidas o alcalinas presentes en el terreno pueden afectar considerablemente la resistividad.

### 1.5.2 CALIDAD DE LA INSTRUMENTACION

Gran número de empresas fabrican aparatos de medidas apropiados para medir el cociente  $E/I$ . En la figura 1.21 se muestran los esquemas de principio de cuatro tipos de aparatos corrientemente utilizados. Cada uno de éstos sistemas tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

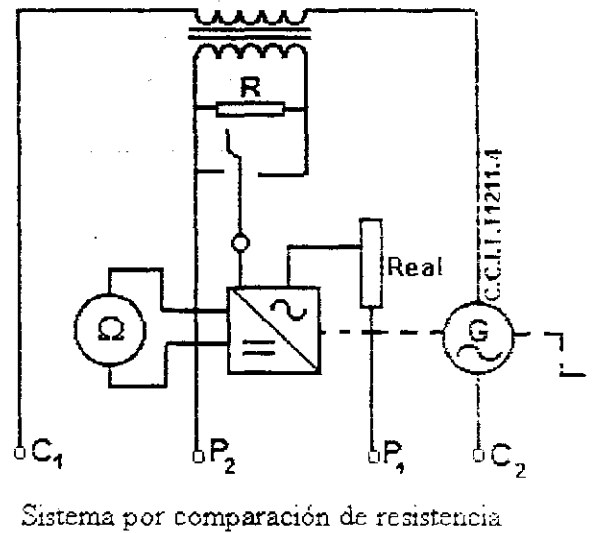
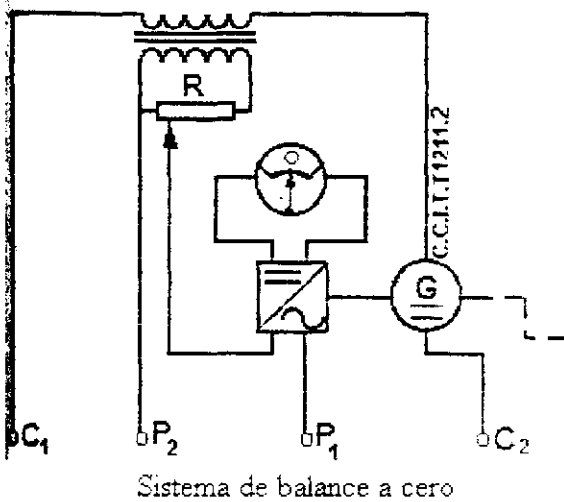
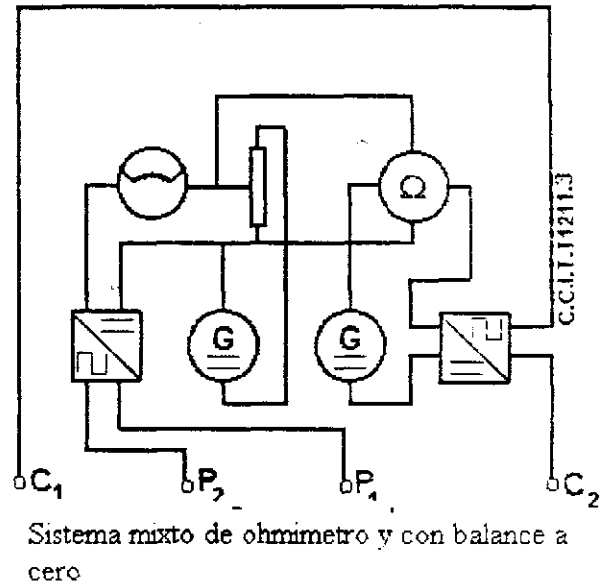
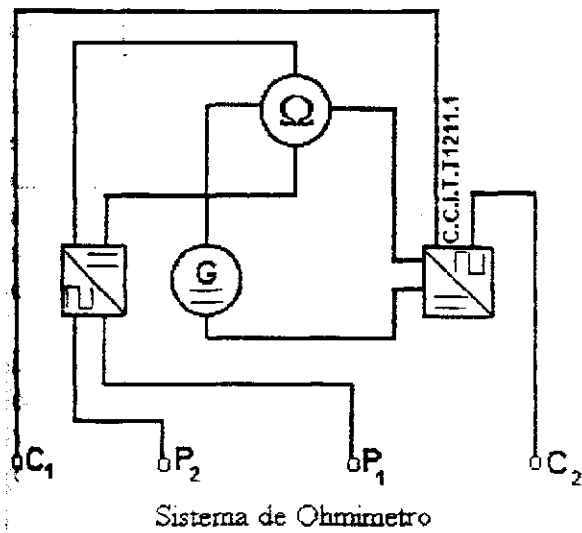


Figura 1.21

En el sistema de óhmetro, la resistencia interna del circuito de medida de tensión suele ser elevada, con el fin de reducir al mínimo los efectos de resistencia de tierra de los electrodos de potencial, pero ésta característica hace al aparato poco sensible. En el sistema mixto de óhmetro y por compensación a cero, el circuito de medida de tensión es independiente de la resistencia de tierra de los electrodos de potencial, lo que le da al circuito una resistencia interna pequeña, obteniendo así una mayor sensibilidad de forma que se puedan medir valores de resistividad y resistencia más pequeños que con el sistema de óhmetro.

En el sistema por compensación a cero, las resistencias de tierra de los electrodos del circuito de medida del potencial están en serie con el indicador de cero, afectando así a la sensibilidad del equilibrio de resistencias.

En el sistema por comparación de resistencia, se ajusta la resistencia del calibrado real hasta que se lea la indicación máxima, compensándose así totalmente las resistencias de electrodo en los dos circuitos de alimentación y de medida de tensión. Cuando se pulsa el conmutador, la corriente que atraviesa el indicador disminuye en una relación  $x/(R+x)$ , siendo  $x$  la resistencia a medir. El indicador suele ser un instrumento de bobina móvil, calibrado de forma que indique directamente el valor de  $x$  a partir de la relación  $x/(R+x)$ , a menos que se modifique con un montaje paralelo.

En las figuras, las fuentes de alimentación son generadores manuales, pero en muchos casos se usan convertidores transistorizados o vibradores de batería. En éste último caso, pueden incorporarse al vibrador contactos rectificadores. Su acción es, entonces, análoga a la del rectificador mecánico utilizado con los generadores manuales.

## 2 MEDIDA DE IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA

Las conexiones de puesta a tierra en general poseen impedancia compleja, teniendo componentes inductivas, capacitivas y resistivas, todas las cuales afectan las cualidades de conducción de la corriente.

La resistencia de la conexión es de particular interés en los sistemas de transmisión de energía (bajas frecuencias), debido a que ésta es afectada por la resistividad del terreno en el área de conexión. Por el contrario, los valores de capacitancia e inductancia son de particular interés en altas frecuencias como en comunicaciones de radio y descargas atmosféricas.

### 2.1 RESISTENCIA E IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA

**Resistencia:** En corrientes continua así como en alternas de frecuencias industriales lo que importa es la resistencia del sistema de tomas de tierra, la cual se compone de tres elementos, así [9]:

*Resistencia eléctrica de los electrodos:* Los materiales constitutivos de las tomas de tierra, no suelen desempeñar un gran papel. Con corrientes muy intensas como las que producen las descargas atmosféricas, la intensidad de campo en la superficie de los electrodos es tan grande que los materiales magnéticos de tierra se saturan y su permeabilidad relativa es igual a 1. Puede despreciarse la resistencia longitudinal de los electrodos de tierra de dimensiones normales, comparada con la resistencia del volumen de suelo que rodea al electrodo.

*Resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el suelo:* La resistencia de puesta a tierra de un electrodo es la resistencia entre el electrodo y el suelo circundante teniendo en cuenta que el suelo se extiende sobre una distancia, prácticamente infinita, es imposible medir esta resistencia con precisión, pero por fortuna, la mayor parte (el 98% aproximadamente) de la resistencia corresponde a una distancia finita, generalmente de 5 m [5].

La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el suelo circundante puede aumentar la resistencia efectiva de la toma de tierra en una proporción de hasta el 10%. Puede ser reducida por los arcos que se producen en caso de descargas, y puede también ser derivada por la admitancia capacitiva entre el conductor y el suelo. Esta resistencia no suele tenerse en cuenta.

*Resistencia del volumen del suelo que rodea al electrodo:* La resistencia del volumen del suelo que rodea al electrodo es, realmente el factor más importante. Este volumen varía según la forma y el tamaño del electrodo. Una toma de tierra que permita la difusión de corriente en un gran volumen de suelo, tendrá una resistencia inferior que una toma de tierra que difunda la misma corriente en un volumen de suelo más reducido.

Las formas especiales que se dé a los electrodos tienen poco o ningún valor, hecho que es esencial



tener en cuenta. El valor de la resistencia depende de la naturaleza del suelo [9]. La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo (características físicas y químicas), es decir, que el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con alto contenido de minerales conductores. Al contrario se presentará una alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca, y altamente rocoso, lo que implica que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año [11].

**Impedancia de las tomas de tierra:** La impedancia inicial de una toma de tierra frente a la onda de corriente de una descarga atmosférica puede ser considerablemente mayor que su resistencia en corriente continua, en particular si el electrodo es muy largo. Es preferible, pues, prever varios electrodos cortos más bien que uno largo.

Las mediciones de impedancia de puesta a tierra se hacen para:

- Proteger efectivamente los sistemas contra los efectos de las descargas atmosféricas.
- Proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica en la tierra bajo condiciones normales o de corto circuito, sin exceder ningún límite operacional de los equipos o suspender la continuidad del servicio.
- Minimizar la interferencia de los circuitos eléctricos de transmisión y distribución con los sistemas de comunicación y control.

**Clasificación de las Puestas a Tierra:** En la práctica se utilizan dos tipos principales de puestas a tierra:

- Puesta a tierra de protección;
- Puesta a tierra de servicio.

La puesta a tierra de protección se instala para prevenir accidentes personales. Todas las partes metálicas de una instalación que no pertenezcan al circuito de corriente de trabajo tienen que estar puestas a tierra cuando al producirse fallas, incluso arcos eléctricos, pueden entrar en contacto con elementos metálicos bajo tensión. Por lo tanto, es necesario conectar a tierra los siguientes elementos de una instalación:

Las carcasas de máquinas, transformadores en general, al igual que otros aparatos y dispositivos eléctricos.

Los arrollamientos de transformadores de medida, que pueden quedar sometidos a alta tensión por rompimiento del aislamiento. En transformadores de corriente se conecta a tierra uno de los bornes de baja; en transformadores de tensión, el punto neutro del circuito secundario trifásico o una de las fases.

Por el lado de baja tensión, hay que conectar a tierra el centro de la conexión estrella.

Las partes de armazones metálicos, bridas de aisladores pasamuros y de apoyo, y accesorios de cables (cajas terminales, manguitos).

Las palancas, manivelas y volantes de aparatos eléctricos, rejillas de protección y

revestimientos metálicos.

La puesta a tierra de servicio es la que pertenece al circuito de corriente de trabajo, es decir, al centro de la conexión estrella de generadores y transformadores. También están incluidos en este grupo los circuitos de tierra de las pararrayos y otros dispositivos de protección contra sobretensiones (bobinas, cables de tierra, etc.).

Los valores máximos recomendados de la resistencia eléctrica de las tomas de tierra son los siguientes:

- redes de baja tensión...15  $\Omega$
- redes de alta tensión...20  $\Omega$

## 2.2 PRINCIPIOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN DE IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA

Dentro de los propósitos principales para los cuales se determinan los valores de impedancia de puesta a tierra se incluyen los siguientes:

- determinar la impedancia actual de las conexiones de puesta a tierra;
- como control y verificación en los cálculos en el diseño de sistemas de distribución de puesta tierra;
- determinar:
  - .El nivel pico de potencial de puesta a tierra y su variación en un área, que aparece por la corriente de falla de puesta a tierra en un sistema de potencia.
  - .La adecuación de una puesta a tierra para protección contra descargas atmosféricas.
  - .La adecuación de una puesta a tierra para transmisión de radiofrecuencia.
- La obtención de los datos necesarios para el diseño de protección de edificaciones, del equipo interno y cualquier personal que pueda estar involucrado.
- Asegurar mediante el diseño apropiado de la puesta a tierra el buen funcionamiento de los equipos de protección.

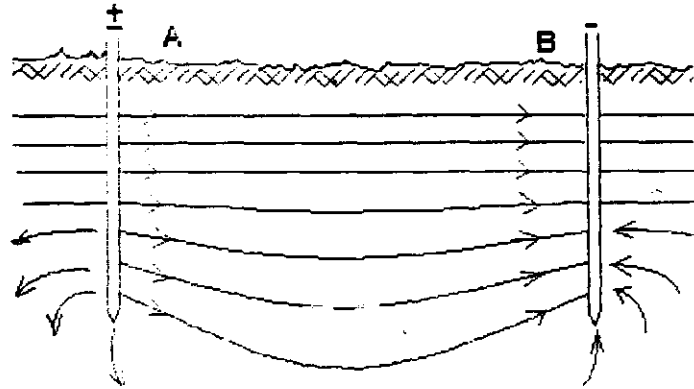
A la par de la resistencia de valor óhmico (activa), existe una componente reactiva que hay que tomar en cuenta cuando el valor de la tierra que se analiza es menor a 0,5  $\Omega$ . Esta componente reactiva tiene poco efecto en las tierras cuya impedancia es mayor a un ohmio.

**Medidas de resistencia a tierra:** La resistencia de toma de tierra es, prácticamente, la resistencia del volumen del material térreo que rodea el elemento de la toma hasta una distancia aproximada de 5 m de éste, y que se definió en el parágrafo anterior.

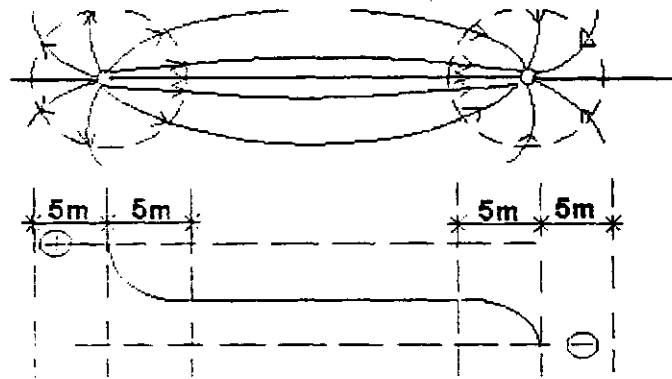
La medida de resistencia de puesta a tierra es necesario realizarla tanto en el momento inicial de la energización como en intervalos periódicos para estar seguro que el valor de dicha resistencia no

aumente apreciablemente. La medida de la resistencia a tierra de una conexión con respecto a la tierra absoluta es un poco difícil.

Todos los resultados son aproximados y se requiere cuidado tanto con el equipo de prueba como con la selección de los puntos de referencia de la puesta a tierra. Hay diferentes métodos de probar resistencia de puesta a tierra, pero todos ellos son similares en que las dos conexiones de referencia de puesta a tierra son usadas y una fuente de corriente conveniente es requerida para la prueba. Al hacer circular una corriente entre las dos tomas de tierra las líneas de corriente se distribuyen en forma similar a las líneas de fuerza entre polos magnéticos norte y sur. Se considera en la práctica, que el gradiente de tensión entre las dos tomas es como el indicado por la figura 2.1[5].



a. Líneas de corriente entre dos electrodos



b. Gradientes de tensión entre dos electrodos

Figura 2.1

### 2.2.1 MÉTODO DE LOS TRES PUNTOS O TRIANGULACION

Este método involucra el uso de dos tierras auxiliares y el electrodo que será medido, son colocados en un arreglo triangular. Se designarán a las resistencias de las tierras auxiliares con los valores respectivos de  $r_2$ ,  $r_3$  y a la tierra que se va a medir con  $r_1$ .

Las resistencias en serie de cada par de puntos de la puesta a tierra en el triángulo será determinada por la medida de voltaje y corriente a través de la resistencia de puesta a tierra. Las medidas de resistencia son hechas por el método del voltímetro-amperímetro o por medio de un puente adecuado (ver figura 2.2).

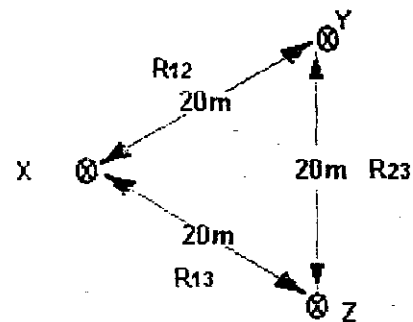


Figura 2.2

La resistencia entre cada par de tierras es medida y designada con  $r_{12}$ ,  $r_{13}$  y  $r_{23}$ , donde

$$r_{ij} = r_i + r_j$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$r_1 = \frac{r_{12}r_{23} + r_{13}^2}{2}$$

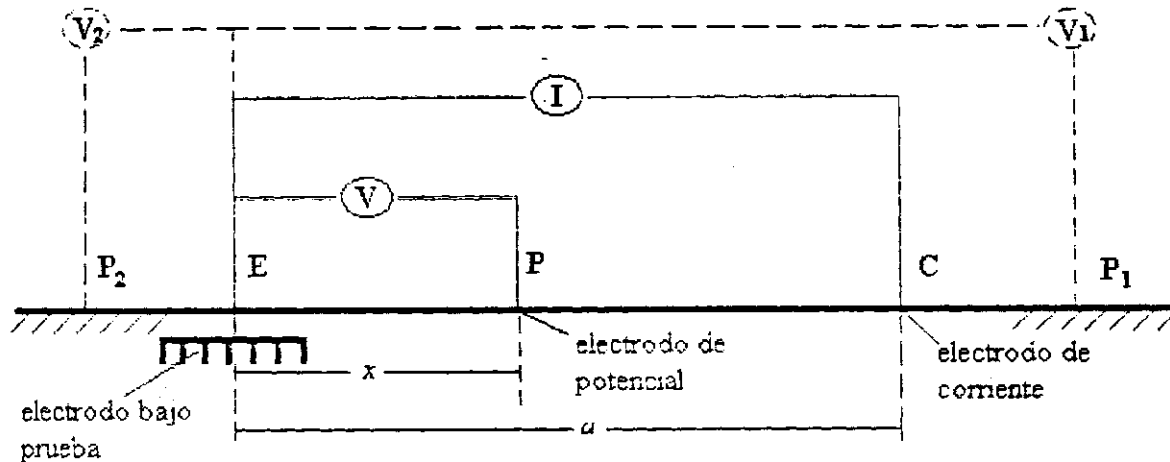


Figura 2.3

Por lo anterior, al medir la resistencia de los electrodos de puesta a tierra en serie y sustituyendo los valores de la resistencia en la ecuación anterior, se puede establecer el valor  $r_1$ . Este método es conveniente para medidas de resistencia de las bases de las torres, tierras aisladas con varilla o puesta a tierra de pequeñas instalaciones. No es conveniente para medidas de resistencias bajas de como las de mallas de puesta a tierra de subestaciones grandes.

Los dos electrodos de prueba auxiliares deben tener un valor de resistencia del mismo orden al de la tierra de análisis. Como regla general el electrodo auxiliar no debe tener una resistencia mayor que cinco (5) veces la de la resistencia que se prueba, ya que la precisión de la medida puede dar resultados absurdos tales como cero, o peor aún resistencias negativas, como en el caso donde se usa una resistencia a tierra de prueba muy baja con dos electrodos adicionales de alta resistencia. Esto sencillamente significa que, si la tierra que se prueba es un grupo de varillas clavadas, cada uno de los electrodos auxiliares debe ser por lo menos de tres elementos clavados. La disposición más práctica de una tierra auxiliar es la de tres varillas formando un triángulo separadas entre sí unos 3 m. El empleo de las varillas de tierra barrena es recomendable donde la tierra sea bastante suave, mientras que el uso de varillas clavadas es aconsejable donde el suelo es extremadamente duro y rocoso.

### 2.2.2 MÉTODO DE LA CAÍDA DE POTENCIAL

Este método tiene algunas variaciones y es aplicable a todos los tipos de medidas de impedancia de puesta a tierra. El método involucra el paso de una corriente por el electrodo a ser medido y se analiza la influencia de esta corriente en términos de voltaje entre la puesta a tierra bajo prueba y un *electrodo de potencial de prueba*, también llamado *tierra remota*. Se usa un *electrodo de corriente de prueba* para permitir que pase una corriente por el electrodo bajo estudio (ver fig. 2.3).

La corriente  $I$  a través del electrodo de prueba  $E$  y del electrodo de corriente  $C$ , causa en la superficie del terreno variaciones de potencial. El perfil de potencial a lo largo de la dirección  $C, P, E$ , se verá como en la figura 2.4. Los potenciales son medidos con respecto a la puesta a tierra bajo prueba  $E$  el cual se asume por conveniencia como potencial cero.

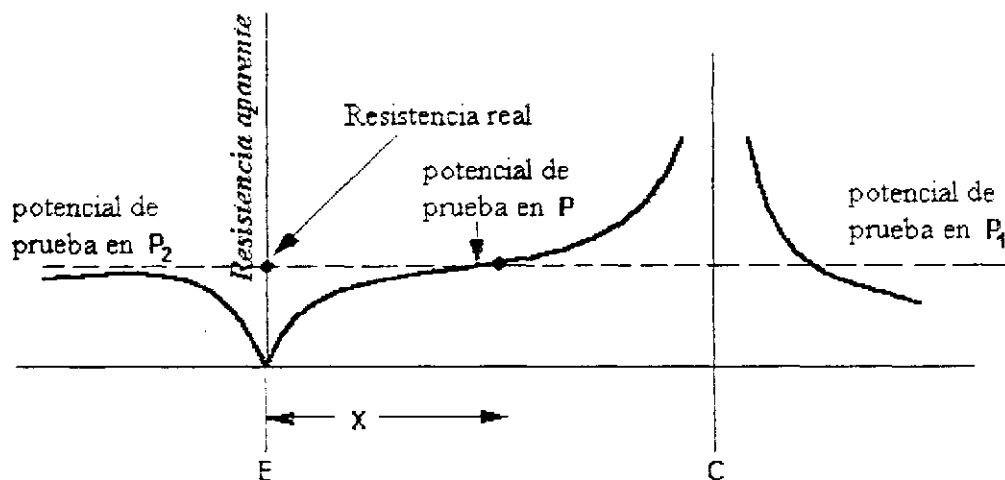


Figura 2.4

El método de la caída de potencial consiste en graficar la relación  $V/I-R$  como función del espaciamiento de prueba  $x$ . El electrodo de potencial es sacado fuera de la tierra bajo prueba en etapas. Se obtiene un valor de la impedancia en cada etapa. Esta impedancia se grafica como función de la distancia, y el valor en ohmios en el cual la curva representada se aleja de la primera curva obtenida, se toma como el valor de la impedancia de la tierra bajo prueba (ver figura 2.5).

Este método debe aplicarse cuidadosamente, por cuanto genera resultados satisfactorios solamente si se ha establecido una región plana en la gráfica de valores medidos, muy claramente. Con el fin de obtener una porción plana de la curva es necesario que el electrodo de corriente esté efectivamente fuera de la influencia de la puesta a tierra a ser probada. Esta influencia es algunas veces llamada *extensión de la tierra de la estación* y puede considerarse como la distancia después de la cual hay un efecto despreciable sobre el pico de voltaje medido causado por la corriente de tierra. Teóricamente la influencia se extiende hasta el infinito, pero, en la práctica hay un límite debido a que la influencia varía inversamente a la distancia desde la puesta a tierra a ser evaluada.

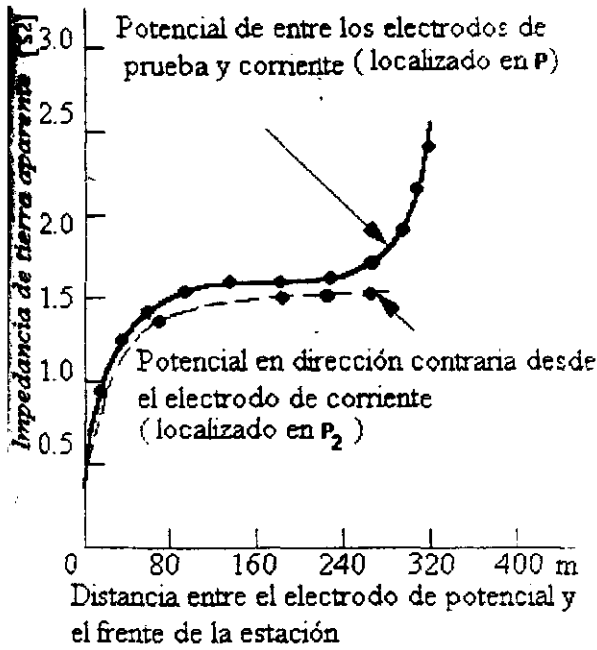


Figura 2.5

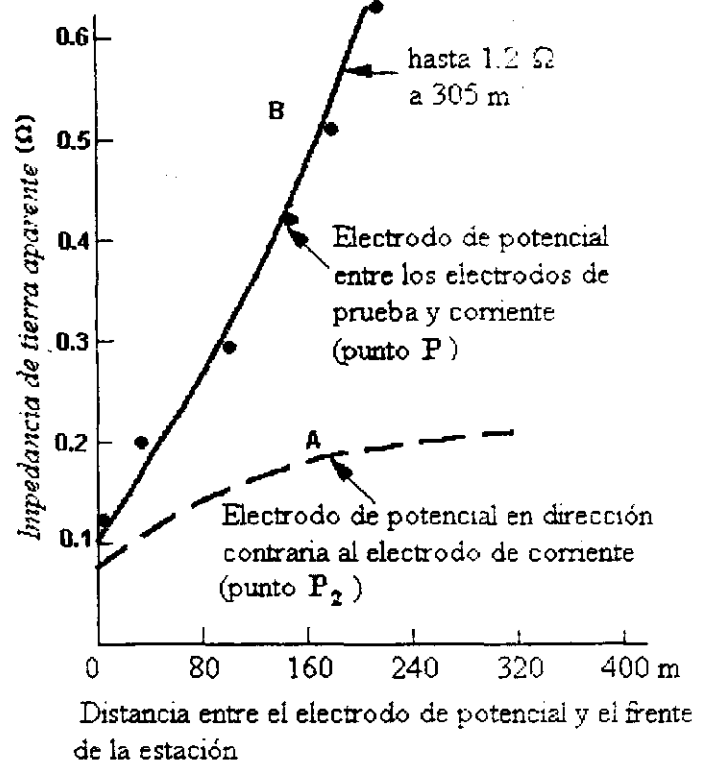


Figura 2.6

Esta influencia se determina y permite durante la prueba en mallas de puesta a tierra o varillas de puesta a tierra profundamente clavadas de 1 Ω o menos. En el caso de áreas pequeñas, tales como una simple barra de puesta a tierra, y bases de torres (no conectadas a cables aéreos o contrapesos), la influencia puede hacerse insignificante conservando espacios del orden de 50 m lo cual es práctico y fácil de realizar en la mayoría de los sitios. Para grandes áreas los espacios requeridos pueden no ser prácticos o aún posibles de encontrar. Consecuentemente, la porción plana de la curva no podrá obtenerse y deben usarse otros métodos de interpretación.

Es importante anotar en esta etapa, que un análisis teórico del problema de la caída de potencial, muestra que la ubicación de la punta de prueba de potencial P en el lado opuesto con respecto al electrodo C (P<sub>2</sub>) resultará siempre en una medición de resistencia aparente menor que la verdadera. Aún más, cuando P se localiza al mismo lado que el electrodo C pero lejos de él (P<sub>1</sub>), hay una localización particular la cual dará la resistencia verdadera.

Debe hacerse énfasis, sin embargo, en que la disposición de P<sub>2</sub> presenta la ventaja de minimizar el problema de acople entre los conductores de prueba. Si se alcanza una distancia razonablemente larga entre P<sub>2</sub> y C (con respecto al electrodo E bajo prueba), entonces es posible usar este método para obtener un limite inferior de la verdadera resistencia del electrodo E.

Una curva representativa para grandes mallas de puesta a tierra se muestra en la figura 2.6. Los datos para esta figura fueron tomados de una prueba hecha en una estación que tiene una malla de puesta a tierra de aproximadamente  $125m \times 150m$ . Las distancias fueron medidas desde el frente de la estación. Por lo tanto, la impedancia no es cero para la distancia cero de la curva. La curva *B* se obtiene con el potencial entre *E* y *C*. La curva *A* se obtiene con el potencial localizado en el lado opuesto respecto del electrodo de corriente *C*.

La prueba muestra la existencia de una resistencia mutua entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra de la estación y por esto la curva *B* no está acotada. La curva *A* parece no acotada y puede usarse para obtener un límite inferior para el valor de la impedancia del electrodo bajo prueba.

*Desarrollo matemático del método de caída de potencial:* Para la descripción del método de caída de potencial, el potencial de la tierra remota se asume igual a cero. Una corriente al sistema de puesta a tierra *E* y retorna a través del electrodo *C* (ver figura 2.7). La diferencia de potencial entre *E* y un punto de la superficie del retorno es medida usando una sonda potencial *P*. En este caso,  $V_G^M$  es el potencial causado por el electrodo *G* (*G*=*E* ó *C*) del punto *M* (*M*=*P* ó *E*). Se asume que el electrodo *G* conduce corriente de *I* A.  $V_G^M$  está en *V.A.* Se podrán escribir las siguientes ecuaciones:

$$V_P = V_P^E(I) + V_P^R(-I)$$

$$V_E = V_E^E(I) + V_E^R(-I)$$

donde  $V_P$  y  $V_E$  son las potenciales de los electrodos *P* y *E* respectivamente.

El voltaje *V* es medido por el método de la caída de potenciales:  $V = V_E - V_P$ , así:

$$V = I(V_E^E - V_E^R - V_P^E + V_P^R),$$

donde  $V_E^E$  es el aumento de potencial del electrodo *E* asumiendo una corriente de 1 A. Esta es por definición la resistencia  $R_E$  (o impedancia del electrodo *E*), por tanto:

$$R = \frac{V}{I} = R_E + (V_P^R - V_E^R - V_P^E),$$

siendo  $V_P^R$ ,  $V_E^R$ ,  $V_P^E$  funciones de la resistencia entre los electrodos, la configuración de los electrodos y las características del terreno.

Se puede definir las siguientes funciones  $\eta(x)$ ,  $\theta(x)$ ,  $\psi(x)$  con respecto al sistema mostrado en la figura 2.7:

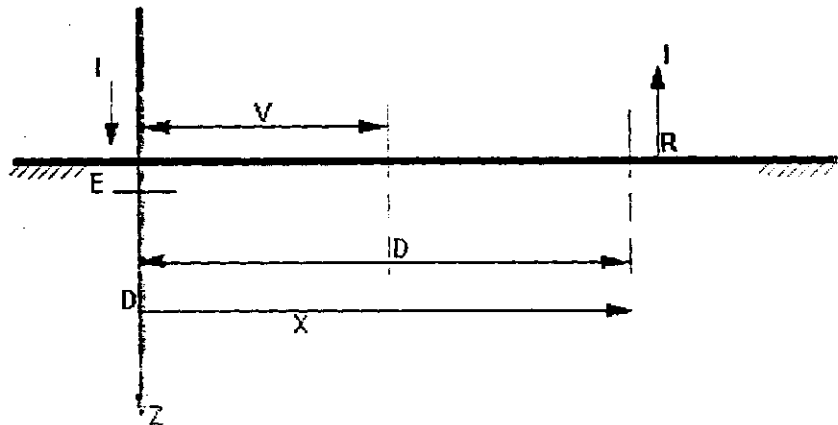


Figura 2.7

$$V_E^R = \eta(D); V_P^R = \varphi(D - x); V_P^E = \psi(x)$$

La resistencia medida  $R_{VI}$  será igual a la resistencia real  $R_E$  si se cumple la condición:

$$V_P^R - V_E^R - V_P^E = 0,$$

es decir,

$$\varphi(D - x) - \eta(D) - \psi(x) = 0.$$

Si los electrodos  $E$  y  $C$  son idénticos, o sea,  $\varphi(x) = \psi(x)$  y si  $D$  es bastante grande tal que

$$V_E^R = V_E^E = \eta(D) = 0, \text{ entonces } \varphi(D - x) - \varphi(x) = 0 \text{ y } x_0 = D/2.$$

Además, si los electrodos se consideran hemisferios y sus radios son muy pequeños comparados con  $x$  y  $D$  el terreno es uniforme, entonces las funciones de potencial  $\eta(x)$ ,  $\varphi(x)$ ,  $\psi(x)$  son inversamente proporcionales a la distancia relativa del centro del hemisferio.

Si el origen del eje es el centro del hemisferio  $E$ , luego:

$$\frac{1}{D - x} - \frac{1}{D} - \frac{1}{x} = 0$$

La raíz de la anterior ecuación es la exacta localización  $x_0$  de la sonda de potencial:  $x_0 = 1.618D$ . Esta es la norma 61.8%.

En caso de que la sonda de potencial este ubicada en  $P_1$  (al lado de  $E$ , ver figura 2.3), entonces  $D-x$  podría ser reemplazado por  $D+x$ . En este caso la ecuación tiene sólo raíces complejas. Si  $P$  está ubicada en  $P_2$  (al lado de  $R$ , ver figura 2.3), entonces,  $D-x$ . La raíz positiva es  $x_0 = 1.618D$ .

### 2.2.3 MÉTODO DE LA RELACIÓN

En este método la resistencia de la tierra que se prueba es comparada con una resistencia conocida, comúnmente usando la misma configuración del electrodo, como en el método de la caída de potencial. Puesto que este es un método de comparación, las lecturas en ohmios son

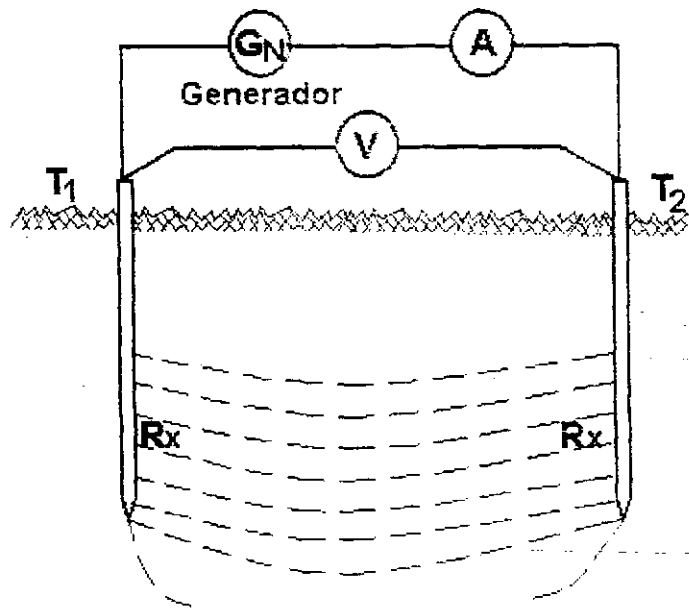


Figura 2.8



independientes de la magnitud de la corriente de prueba, si la corriente de prueba es lo bastante alta para dar sensibilidad adecuada. La resistencia en serie  $R$  de la tierra bajo prueba y una punta de prueba, se mide por medio de un puente el cual opera con el principio de balance a cero.

## 2.2.4 MÉTODO POR TENSIÓN Y CORRIENTE

Teniendo la seguridad de que el terreno sea completamente homogéneo entre 2 tomas  $A$  y  $B$  (ver figura 2.8) se hace la medida de la resistencia del camino de la corriente entre  $A$  y  $B$ . Esta medida puede llevarse a cabo por el método del voltímetro-amperímetro. Se aplica una tensión  $U$  entre las dos tomas  $A$  y  $B$  cuyas resistencias se suponen, en este caso iguales. La corriente  $I$  se mide por medio del amperímetro intercalado en el circuito. Como se acepta que la resistencia entre las zonas periféricas situadas a 5 m de distancia de las tomas es cero, se tiene que:

$$2R_x = \frac{U}{I}, \text{ de donde } R_x = \frac{U}{2I}$$

Es usual para medir resistencias eléctricas de terrenos con el fin de calcular los elementos de tomas de tierra (varillas copperweld, láminas, mallas, etc.), en los sistemas de potencia.

Si se desea medir la resistencia del suelo (figura 2.9), por ejemplo, se entierra una varilla  $a$  metálica de material apropiado (hierro galvanizado, varilla copperweld, etc.) de por lo menos 1 m de longitud, o se entierra una lámina del mismo material. A cierta distancia (mínimo 20 m) de ellas, se entierra otra varilla  $b$ ; entre  $a$  y  $b$  se aplica una tensión alterna  $E$  y se mide la corriente  $I$  que circula entre las dos tomas. A distancia no mayor de 5 m de la toma principal se entierra una punta auxiliar  $s$ ; entre el punto  $a$  y la punta  $s$  se mide la tensión  $U$ . La resistencia de toma  $a$  será:

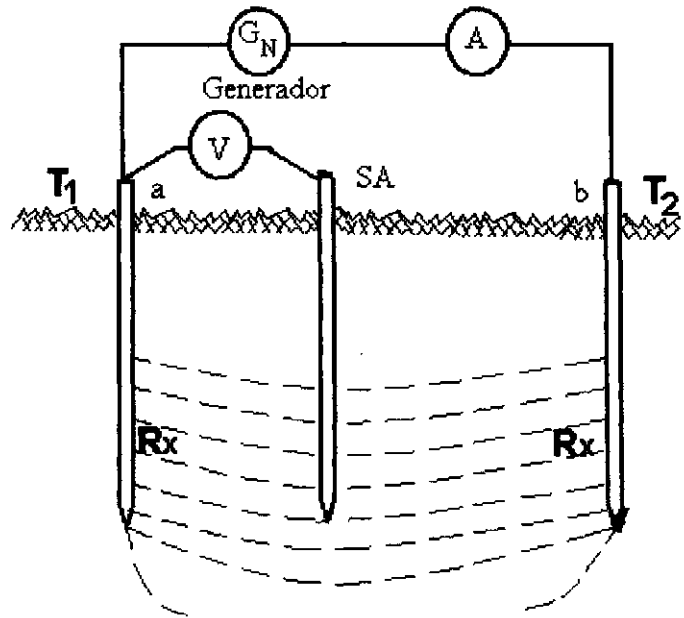


Figura 2.9

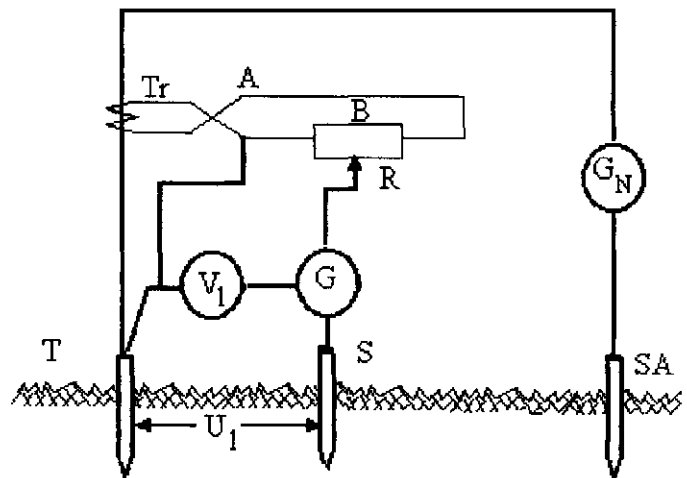


Figura 2.10

$$R_a = \frac{U}{I} [\Omega.m]$$

### 2.2.5 EMPLEO DE MEGGERS

Existen aparatos muy compactos para la medición inmediata de las tomas de tierra. La mayor parte de ellos tienen la particularidad de emplear puntas o tierras auxiliares para la operación, como se ve en el siguiente ejemplo (ver figura 2.10), en el cual  $G$  es un generador de corriente alterna.  $Tr$  un transformador de corriente,  $GALV$  un galvanómetro,  $T$  la toma de tierra cuya resistencia se quiere medir,  $S$  y  $S_a$  tomas o sondas auxiliares y  $R$  una resistencia variable. La corriente circula por el primario del transformador y pasa de  $T$  a  $S_a$ . Se produce una caída de tensión  $U$  entre  $T$  y  $S_a$ . A esta diferencia de potencial se opone la diferencia de potencial entre  $A$  y  $B$  producido en el secundario del transformador y que se regula por medio de la resistencia  $R$ . Esta igualdad de tensiones la revela el galvanómetro al llevarlo, por medio de  $R$ , a la indicación cero. En el indicador de resistencia de la toma  $T$  la precisión de la medida es independiente de la resistencia en  $S$  y en  $S_a$ .

### 2.2.6 MÉTODOS DE NIPPOLD, WIECHERT, BEHREND

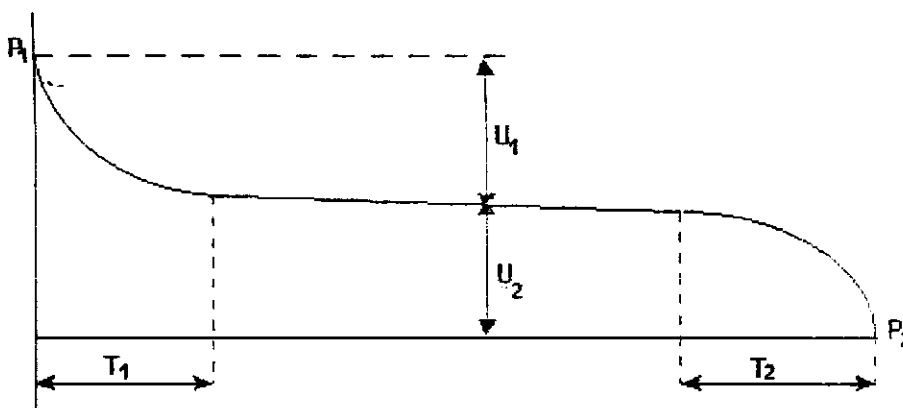


Figura 2.11

Debido a que las puestas a tierra son necesarias para el buen servicio y protección contra accidentes en las instalaciones de comunicaciones o de potencia, éstas no pueden tener valores de resistencia muy altos, por esto, se han desarrollado varios métodos para su medida que aprovechan los mismos aparatos empleados para la medida de cables.

Una medida de la resistencia entre el punto  $P_1$  puesto a tierra y la el nivel de referencia tierra no es posible directamente, ya que la conexión con este nivel sólo es posible a través de una segunda toma de tierra. Sólo es directamente medible la resistencia entre dos puntos puestos a tierra. Si se mide

por medio de puntas de prueba la distribución de potencial entre dos puntos conductores  $P_1$  y  $P_2$  (ambos puestos a tierra) se obtiene una curva de potencial más o menos como se ilustra en la figura 2.11.

En las zonas próximas a los electrodos de puesta a tierra la caída de tensión no es lineal (el radio de esta zona es usualmente es de unos 5 m). En todos los puntos situados fuera de estas dos zonas de radios  $r_1$  y  $r_2$  existe aproximadamente la misma caída de tensión:  $U_1$  con relación a  $P_1$  y  $U_2$  con relación a  $P_2$ . Si entre ambos puntos circula una corriente de intensidad  $I$ , la resistencias de tierra serán respectivamente:

$$R_1 = \frac{U_1}{I} \text{ y } R_2 = \frac{U_2}{I}$$

Sin embargo, solo es medible directamente la suma de ambas resistencias, para lo cual debe procurarse que no se translapen las dos zonas de caída de potencial (distancia mínima de medida de los puntos de 15 a 20 m). A causa de los fenómenos de polarización que aparecen con corriente continua, la medida se lleva a cabo con fuentes de corriente alterna.

A partir de tres medidas efectuadas entre la tierra ensayada y dos tierras auxiliares, según el método de *Nippold* se pueden determinar, dos a dos, las sumas de las tres resistencias (con la condición que las tres resistencias a tierra medidas sean del mismo orden de magnitud):

$$R_X + R_{H1} = a; R_X + R_{H2} = b; R_{H1} + R_{H2} = c$$

de donde:  $R_X = \frac{a + b - c}{2}$

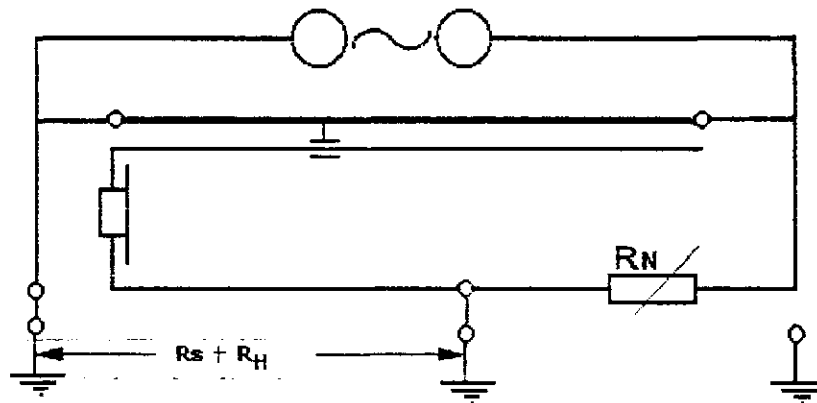


Figura 2.12

En este método ilustrado en la figura 2.12, al inconveniente de tener que efectuar tres mediciones, se añade la dificultad de disponer de dos tomas de tierra de la misma calidad que la se mide.

Otros métodos, como por ejemplo los de *Wiechert*, *Behrend*, etc., permiten llevar a cabo la medida

con sólo dos, o incluso una operación: únicamente requieren una buena toma de tierra auxiliar y una punta, o sólo dos puntas y cuyos esquemas se representan en las figuras 2.13 y 2.14.

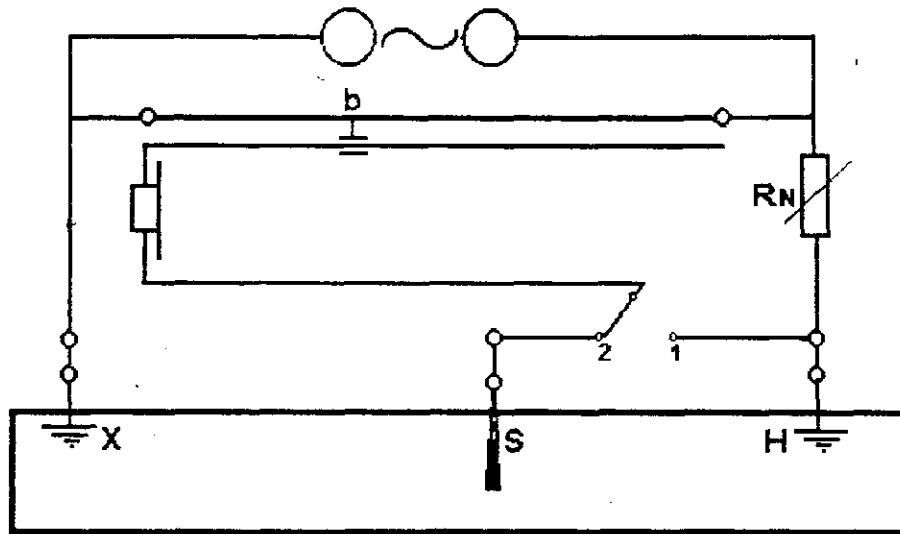


Figura 2.13

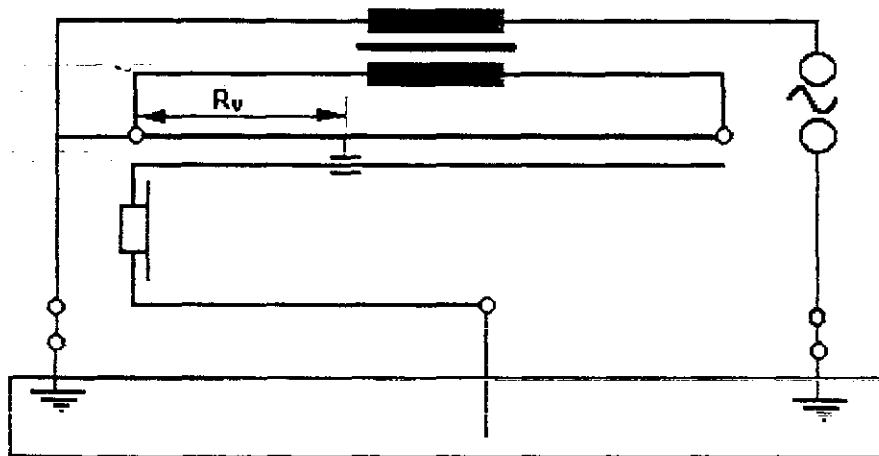


Figura 2.14

Con el puente para corriente alterna se llevan a cabo las siguientes tres mediciones:

a. Resistencia entre la tierra  $x$  y la tierra auxiliar  $H$ :

$$R_x + R_H = a.$$

b. Resistencia entre la tierra  $x$  y la tierra auxiliar  $H_2$ :

$$R_x - R_{H2} = b.$$

c. Resistencia entre las tierras auxiliares  $H_1$  y  $H_2$ :

$$R_{H2} - R_{H1} = c.$$

De donde se obtiene:

$$R_x = \frac{a + b - c}{2}$$

Son necesarias dos mediciones. En cada operación la sonda queda libre de corriente. Se miden las relaciones:

$$\frac{R_x + R_H}{R_N} = a ; \quad \text{y,} \quad \frac{R_x}{R_H + R_N} = b$$

Lo que da como resultado:  $R_x = R_N a \frac{1 + a}{1 + b}$

Este es el esquema fundamental para la mayor parte de las mediciones de puestas a tierra que se efectúan hoy en día: se trata de una medida por compensación. Se comparan las caídas de tensión debidas a dos corrientes iguales, en  $R_x$  y  $x$  (la punta queda libre de corriente y está al potencial de tierra siempre que se halle fuera de las zonas de caída de potencial de  $x$  y  $H$ ). La resistencia de la tierra auxiliar  $H$ , que incluso puede sustituirse por una punta no influye en la medida. Para  $I_1 = I_2$ ,  $R_x = R_v$ , en otro caso  $R_x = u R_v$ , donde  $u$  es la relación de transformación).

### 2.2.7 PRUEBAS DE FALLAS ESCALONADAS

Las pruebas de alta corriente escalonadas pueden requerirse para aquellos casos donde se desea información específica sobre una instalación de puesta a tierra en particular. Además, se puede determinar una impedancia de tierra, como una información auxiliar, en el caso de fallas a tierra, utilizando un osciloscopio.

En cualquier caso la instrumentación es la misma. El objetivo es registrar el voltaje entre dos puntos seleccionados sobre uno o más elementos del osciloscopio. Los voltajes a ser registrados serán probablemente de tal magnitud que sea necesario emplear transformadores reductores de voltaje. El máximo voltaje esperado, así como la relación para los transformadores de potencial requeridos pueden determinarse con anticipación a las etapas de prueba usando el método de la caída de potencial para valores prácticos de corriente de prueba.

Otra consideración importante es la calibración del circuito del osciloscopio, el cual está compuesto por un transformador de potencial con la posibilidad de una resistencia alta en el primario. Esta

resistencia se compone de el potencial de puesta a tierra remota en serie con una punta larga. Una calibración satisfactoria del elemento del osciloscopio puede hacerse insertando un voltaje conocido en el circuito primario en serie con la punta y la tierra de potencial remota como se usa durante la prueba. La situación de los puntos actuales a medir depende de la información deseada; pero en todo caso se debe hacer la consideración necesaria para el acople entre los circuitos de prueba.

*Interpretación de los Resultados:* En el apéndice A se muestra que hay un espaciamiento de la sonda de potencial el cual nos brinda la verdadera impedancia de tierra que se está evaluando.

El espaciamiento correcto puede ser muy difícil de obtener, sin embargo, para determinar especialmente si la malla de tierra tiene una forma compleja. (ver [8,12 y 14] para información adicional). El espaciamiento correcto es también una función de la configuración del terreno como es demostrado en [12] e ilustrado por la figura 2.15, el cual es aplicable a pequeños sistemas de puesta a tierra. Como se indica en esta figura el potencial requerido de espaciamiento  $x$  (cuando la sonda está entre  $E$  y  $C$  y cuando el terreno es uniforme) corresponde a la relación  $x/d = 0,618$ . Esto fue probado primero por E.B Curdts [8] para pequeños electrodos hemisféricos.

Las enunciados anteriores muestran que con el fin de aplicar la regla del 61.8% según las siguientes condiciones deberán existir:

- a. Una fuente uniforme.
- b. Largos espaciamientos tales que los electrodos puedan ser asumidos hemisféricos.

El origen de referencia para la medida del espaciamiento también deberá ser determinado. Para puestas a tierras hemisféricas, el origen es el centro de la puesta a tierra. Para grandes sistemas de puestas a tierras, algunos autores introducen el concepto de centro eléctrico y un método de determinar la impedancia de sistemas extensos de puesta a tierra orientados a suelos uniformes (basado en el concepto del centro eléctrico), es descrito en un artículo de Tagg [40]. Se debe anotar, sin embargo, que no hay pruebas de que el centro eléctrico sea una constante física (tal como el centro de gravedad), el cual no está influenciado por la localización del electrodo de corriente y sus características.

Como una conclusión general, la mejor garantía de una medida satisfactoria es lograr un espaciamiento tal que todas las resistencias mutuas sean suficientemente pequeñas y que las curvas del método de caída de potencial tiendan a un valor asintótico. La principal ventaja del método de caída de potencial es que los electrodos de potencial y corriente puedan tener una resistencia sustancialmente más alta que la de la puesta a tierra en prueba sin afectar significativamente la precisión de las medidas.

### 2.3 INSTRUMENTACIÓN EN LA MEDICIÓN DE PUESTAS A TIERRA

Los instrumentos utilizados para medir la resistencia de puestas a tierra son idénticos a los utilizados para medir resistividad.

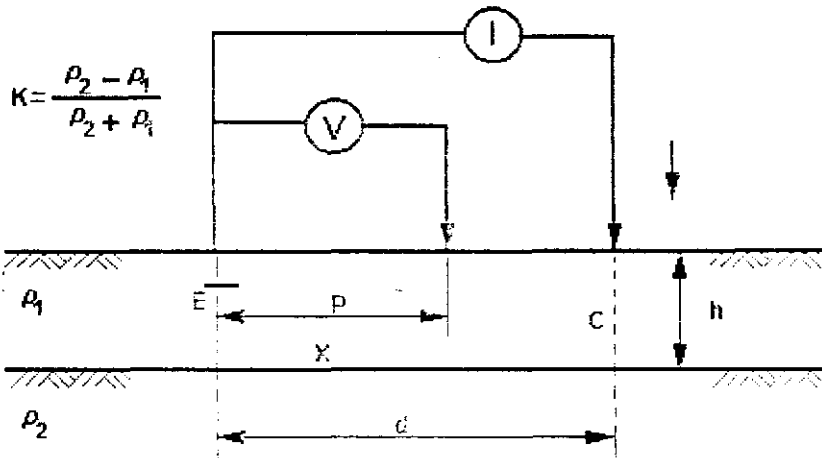
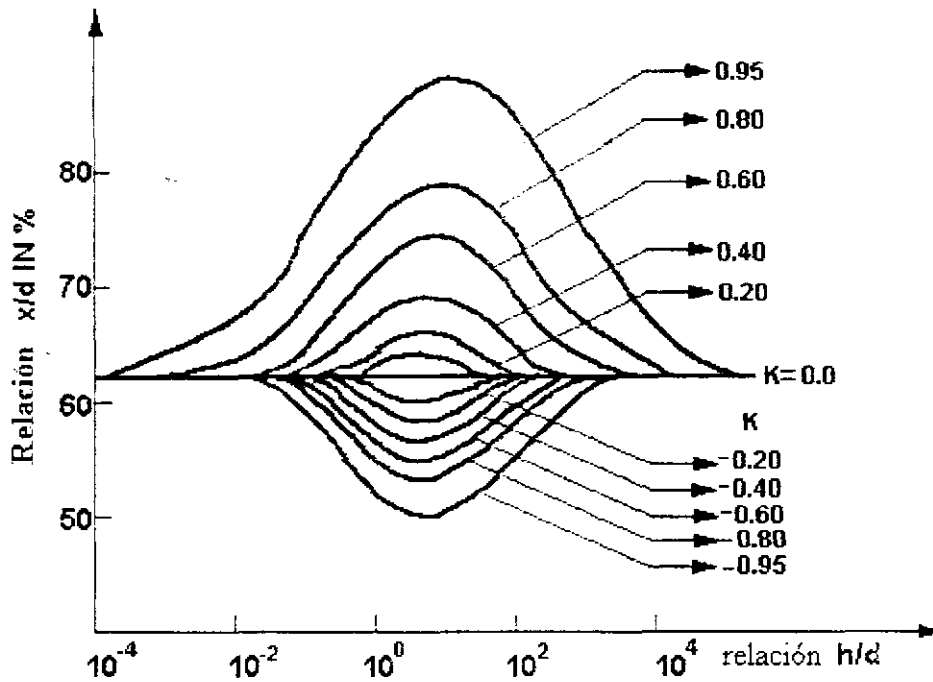


Figura 2.15

### 2.3.1 OHMETRO DE RELACIÓN

En la figura 2.16, se muestra un instrumento comúnmente usado para medir la resistencia de tierra. La corriente directa dada por un generador de manivela se invierte periódicamente y se hace circular en el suelo entre la puesta a tierra  $X$  en prueba y el electrodo  $C$  de corriente. La caída de potencial entre  $X$  y el electrodo de potencial  $P$  se rectifica por medio del inversor de potencial, el cual está sobre el mismo eje, y por consiguiente, opera en sincronismo con el inversor de corriente. Las bobinas operan en un campo formado por un imán permanente. La bobina de corriente tiende a

devolver el indicador hacia el cero, mientras que la bobina de potencial tiende a devolver el indicador a una lectura de ohmios más alta. La corriente que fluye a través de estas bobinas es suministrada respectivamente por la corriente a través de la puesta a tierra bajo prueba y la caída del potencial en ella, por consiguiente, la escala del instrumento puede calibrarse en  $\Omega$ . Un interruptor de varias posiciones proveerá un divisor a los valores de la escala.

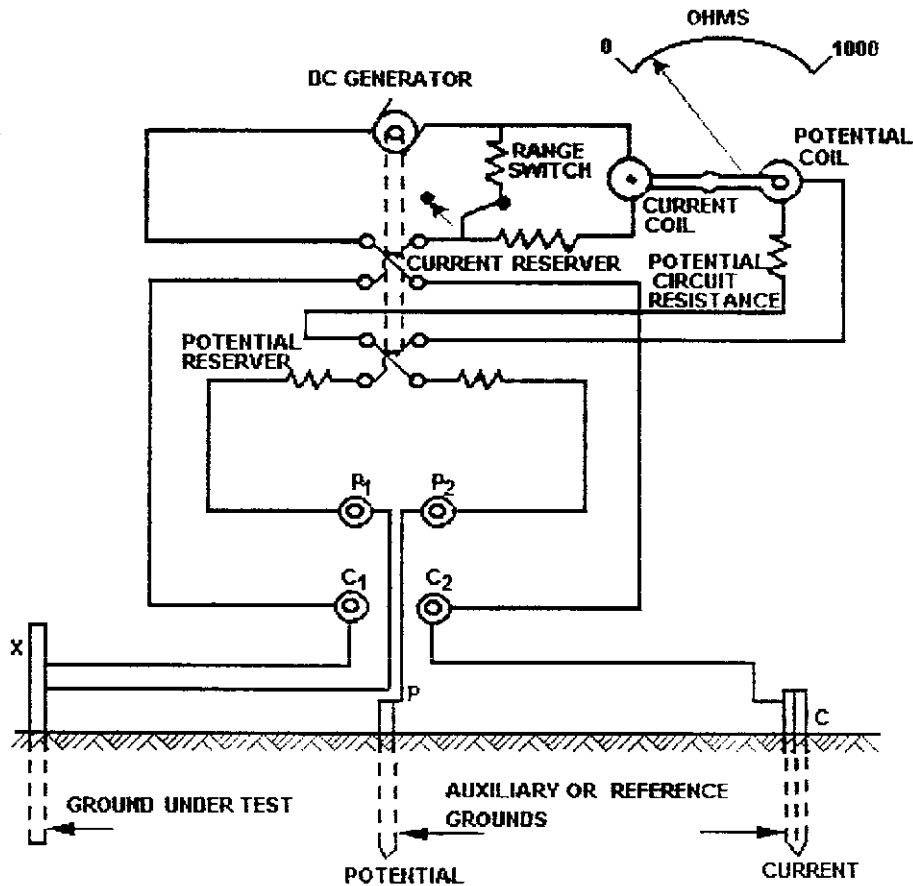


Figura 2.16

Conectando ambos terminales  $P_1$  y  $C_1$  (también  $P_2$  y  $C_2$ ), al mismo tiempo, el instrumento se convierte en un óhmetro de dos terminales y puede usarse en cualquiera de los métodos, pero son preferibles las conexiones separadas de los electrodos de prueba como se ve en la figura 2.16. Para puestas a tierras sobre  $1 \Omega$ , los terminales  $P_1$  y  $C_1$  puede conectarse juntos para usar un conductor común a la puesta a tierra bajo prueba.

El interruptor de sincronización de inversión (inversor común de corriente y de potencial) usado en este instrumento, lo hace relativamente insensible a voltajes parásitos en el circuito de potencial. En la mayoría de los casos se puede usar una velocidad de rotación manual que pueda eliminar el efecto de los voltajes parásitos relativamente grandes. Algunas dificultades se pueden experimentar en la obtención de una lectura en un caso extremo de una puesta a tierra de menos de  $0.5 \Omega$  con



voltajes parásitos de más de 10 V.

### 2.3.2 PUENTE DOBLEMENTE BALANCEADO

En este método la corriente alterna desde la fuente se aplica en dos circuitos paralelos como se muestra en la figura 2.17. El circuito inferior incluye la resistencia fija  $A$ , el electrodo  $X$  bajo prueba, y el electrodo de corriente auxiliar  $C$ . El circuito superior incluye la resistencia fija  $B$  y un reóstato móvil ajustable sobre el cual se tienen dos contactos móviles  $S_a$  y  $S_b$ . Cuando el interruptor del detector está cerrado a la izquierda, el contacto  $S_a$  se ajusta hasta que el detector muestre el balance. Las corrientes en los dos brazos del circuito son entonces inversamente proporcionales a las resistencias  $A$  y  $B$ , el interruptor, entonces, se cierra a la derecha y el contacto  $S_b$  es ajustado hasta que el detector de nuevo muestre el balance. La caída de potencial entre  $X$  y  $P$  es entonces igual a la caída en la parte  $R_b$  del reóstato móvil y la resistencia de la puesta a tierra bajo prueba está dada por:

$$R_x = \frac{R_b A}{B}$$

La escala sobre la cual  $S_b$  se mueve, puede calibrarse para leer  $R_x$  directamente.

Cuando se está probando puestas a tierra de alta resistencia, la fuente de corriente alterna puede ser un vibrador operando con pilas secas, y el detector puede ser un receptor telefónico o un detector de estado sólido. El tono de zumbado usualmente puede ser reconocido y balanceado aún en presencia de un ruido de fondo considerable ocasionado por corrientes alternas parásitas. La resistencia en  $P$ , simplemente, reduce la sensibilidad del receptor. La resistencia excesiva en  $C$  puede limitar el rango de resistencia que se necesita medir. Las localizaciones de los electrodos  $P$  y  $C$  están determinados por las mismas consideraciones como el método de caída de potencial.

### 2.3.3 TRANSFORMADORES DE BALANCE SIMPLE

Un instrumento que utiliza un balance simple se muestra en forma de esquemas en el circuito de la figura 2.17. En este instrumento, una batería se utiliza para manejar un vibrador que tiene dos juegos de contactos. El primer juego de contactos invierte la dirección de la corriente primaria hacia un transformador que proporciona la corriente de prueba entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra bajo prueba. El segundo juego de contactos, da el sentido de la dirección al galvanómetro de balanceo, el cual entonces puede indicar si el dial instalado está bajo o alto.

Cuando el indicador del potenciómetro se ajusta hasta que no haya potencial entre el contacto móvil y el electrodo auxiliar  $P$ , como se muestra por un galvanómetro de paso a cero, la porción del reóstato  $R_1$  soporta una relación definida para la resistencia de la puesta a tierra bajo prueba. Por consiguiente, el potencial neto puede ser calibrado en ohmios con multiplicadores apropiados provistos por los taps en el transformador de relación seleccionados por el interruptor de rango. Debido a que una corriente insignificante se aplica al circuito del electrodo de potencial en el

balance, la resistencia del electrodo de potencial no afecta la precisión, pero tiene efecto en la sensibilidad del galvanómetro.

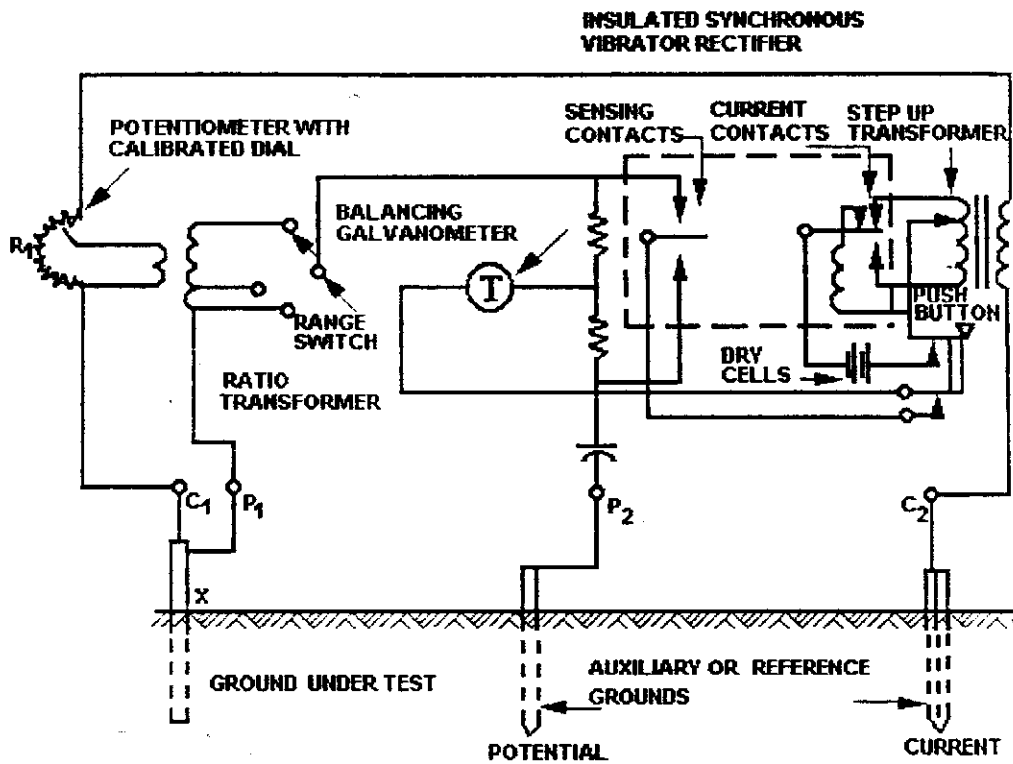


Figura 2.17

El instrumento es relativamente insensible a tensiones parásitas y solamente en un caso extremo dificultará el experimento.

### 2.3.4 VOLTAMPERIMETRO

Los amperímetros no tienen requisitos particulares en algunos de los métodos de medición. Los requisitos del voltímetro cuando no hay voltajes parásitos son simplemente que la impedancia del voltímetro sea alta en relación con la resistencia del electrodo de potencial y los conductores de prueba.

La impedancia del electrodo de potencial debe ser considerada en la medición de voltaje causado por una corriente a través de la puesta a tierra medida. Es obvio que el menor error se introduce cuando se utiliza un voltímetro de alta impedancia, y este error se puede despreciar cuando se usa un voltímetro de tipo electrónico.

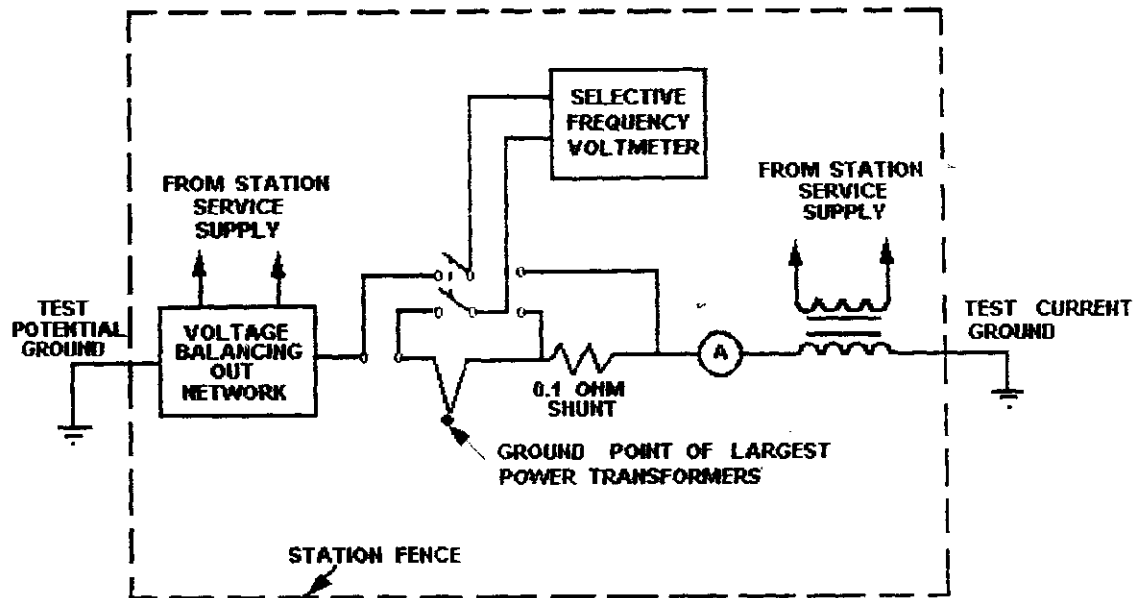


Figura 2.18

Cuando hay corrientes parásitas en la puesta a tierra a ser medida, y ésta produce un alto voltaje comparado con el voltaje causado por la corriente de prueba, este voltaje parásito debe neutralizarse por balanceo en magnitud y fase, antes de aplicarse la corriente de prueba. El voltímetro en este caso debe ser selectivo por frecuencia porque solamente puede balancearse en un valor de esta. Usualmente, el único caso donde uno de estos voltímetros selectivos por frecuencia es requerido, es en la medición de un gran sistema de puesta a tierra con impedancia menor de  $0.5 \Omega$ .

Un diagrama de esquemas simplificado de las conexiones de prueba para un circuito de voltamperímetro selectivo por frecuencia se da en la figura 2.18. La corriente de prueba se mide tomando la caída de voltaje a través de una derivación (shunt) de  $0.1 \Omega$  y se monitorea por un amperímetro mientras el voltímetro se usa para medir el voltaje entre el electrodo de potencial y la puesta a tierra bajo prueba. Este arreglo proporciona una forma de medida de relación, y por esto limita los errores a errores de escala del instrumento, y a los errores de relación en los shunts y los multiplicadores.

### 2.3.5 UNIDADES DE POLARIZACIÓN INDUCIDA

Estos instrumentos son ampliamente usado en análisis geo-eléctricos y son altamente sensibles, lo que es adecuado para medidas de resistividad de terrenos y resistencia de puestas a tierra. El instrumento es del tipo de 4 terminales, pero, con circuitería de medición y fuente de alimentación diferentes. El instrumento se compone de dos unidades: el receptor y el transmisor, como se muestra en la figura 2.19. Las dos unidades (de potencial y corriente) no tienen ninguna clase de acoplamiento, lo cual es de gran utilidad para eliminar el acople entre los terminales de prueba.

*Transmisor:* El circuito de medición del receptor se conecta y desconecta con los pulsos de corriente inyectados por el transmisor. Por esto no se requiere una conexión de cable directa entre el transmisor y el receptor. El transmisor pasa una corriente directa alta hacia la tierra a través de dos electrodos y entonces abruptamente se interrumpe esta corriente. Usualmente la duración del pulso ajustable es de 2 s, 4 s, y 8 s para los períodos de conexión y desconexión de la corriente.

*Receptor:* Los receptores recientes se construyen con base en circuitos integrados de alta sensibilidad, lo que reduce el peso y el consumo de potencia del equipo de polarización inducida en el dominio del tiempo.

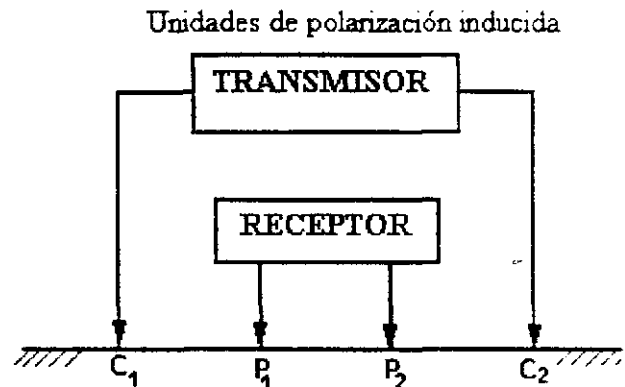


Figura 2.19

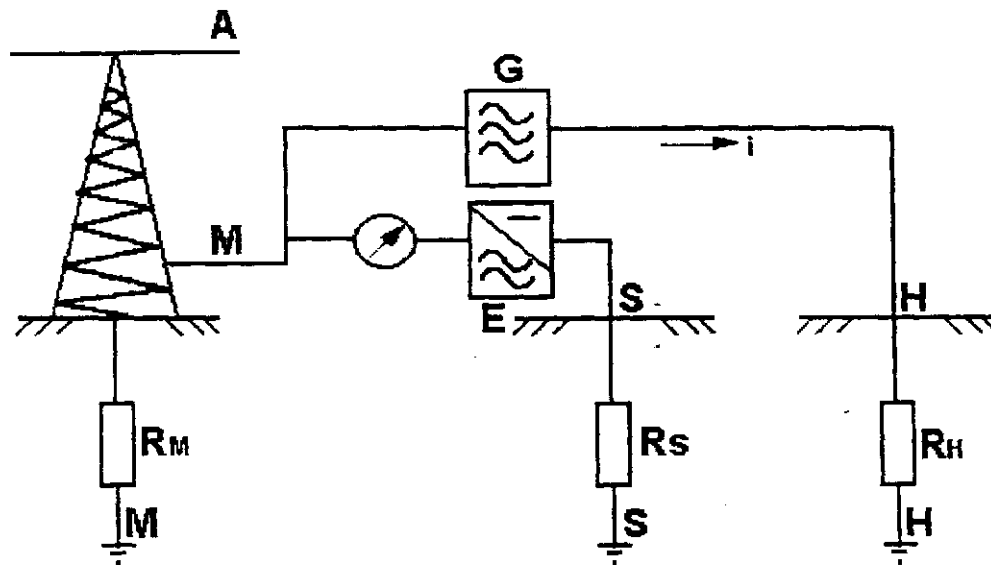
Usualmente, el diseño principal de los receptores incluye:

- a. Compensación automática de potencial.
- b. Disparo remoto (de puesta a tierra), filtros especiales para AC para suprimir el ruido.
- c. Discriminación de forma de curva y adición integral automática para supresión de ruido.

*Principales ventajas:* Las unidades permiten al ingeniero de campo operar el receptor en las líneas de estudio, y en ocasiones, permiten el uso de múltiples receptores con un transmisor, lo que aumenta considerablemente la eficiencia del estudio. Debido a la capacidad de supresión de ruido inherente a este sistema los estudios pueden ser llevados a cabo mucho más cerca de las fuentes de ruido eléctrico espúreo tales como líneas de potencia, y puede obtenerse una mayor penetración efectiva sin necesidad de incrementar los requerimientos de potencia. También el acople entre los conductores puede ser completamente eliminado. Finalmente, los requerimientos de bajos peso y consumo conllevan a la máxima versatilidad de operación y movilidad.

### 2.3.6 MEDIDOR DE RESISTENCIA DE TIERRA DE ALTA FRECUENCIA

Este instrumento relativamente nuevo referido en [1], es destinado para medir las resistencia de puesta a tierra de las torres de líneas de trasmisión (no equipados con contrapesos continuos) con los alambres estáticos energizados (aislados o no). El peligro se evitará en la medida que el trabajo no sea realizado cerca de los conductores energizados. Para el principio de operación ver la figura 2.20. El medidor de alta frecuencia es completamente transistorizado. Se usa una batería Ni-Cd como fuente de energía. El generador es un oscilador autoexcitado de potencia a una frecuencia de 25 KHz. La corriente de lazo  $i$  fluye a través del electrodo de corriente  $H$  y la puesta a tierra de la torre  $M$ . El receptor de alta frecuencia compara el voltaje medido, con un voltaje interno de referencia.



M = Torre	A = Conductor de tierra
S = Probador	$R_M$ = Resistencia a tierra de la torre
H = Electrodo de retorno	$R_S$ = Resistencia a tierra del probador
G = Generador de alta frecuencia	E = Receptor de alta frecuencia
$R_H$ = Resistencia de tierra del electrodo de retorno	

Figura 2.20

Se debe tener en cuenta que este medidor usa el método de caída de potencial (el efecto del cable estático se elimina por medio de circuitos de altas frecuencias y neutralizadores). Por lo tanto, debe emplearse un adecuado distanciamiento entre los electrodos de pruebas con el fin de obtener resultados confiables.

#### 2.4 TIPOS Y MATERIALES DE ELECTRODOS DE TIERRA

Los electrodos de tierra utilizados para edificaciones son a menudo complejos, pero conviene distinguir 3 tipos:

- Electrodo en zanjas: Electrodo horizontal enterrado cerca de la superficie del suelo, teniendo en cuenta el riesgo de daños mecánicos, saqueo, heladas, y disecación estacional de las capas superiores del suelo.
- Barras cortas (2 m aproximadamente) o largas: Enterradas verticalmente a una profundidad comprendida entre 1 y 50 m.
- Electrodo en forma de placa: Enterrados a una profundidad comprendida entre 1 y 4 m.

En forma general, para el cálculo de la resistencia de tierra de diversos electrodos influyen los siguientes parámetros:

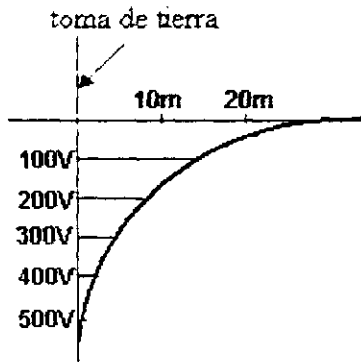


Figura 2.21

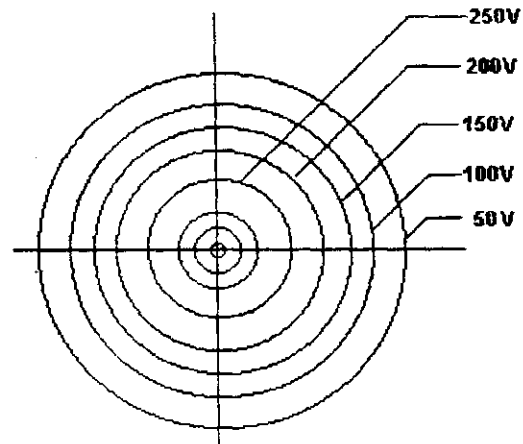


Figura 2.22

- profundidad;
- forma y sección de los electrodos;
- resistividad del suelo circundante.

La resistividad del terreno es siempre mucho mayor que la resistividad propia del elemento metálico que constituye la toma de tierra. Para el paso de la corriente es necesario disponer de una sección suficientemente grande, ya que la resistencia de paso de un conductor metálico a tierra, no produce un efecto de difusión de la corriente. La forma de la toma de tierra, su sección transversal y la resistividad del terreno determinan la forma de efectuarse esta difusión de corriente.

La difusión de la corriente por el terreno ocasiona una caída de tensión que depende, esencialmente, de la resistividad de este. Se ha demostrado experimentalmente que esta caída de tensión es máxima en la vertical de la toma de tierra y disminuye a medida que aumenta la distancia radial desde la toma de tierra; a unos 20 m de dicha toma, resulta inapreciable. La consecuencia de esto es la formación de un embudo de tensión, en las proximidades de la toma de tierra; si se grafica el valor de la caída de tensión contra la distancia radial en cualquiera de las direcciones se obtendrá una curva de potencial que, tal como se representa en la figura 2.21 tiene la forma de embudo y que, en proyección horizontal, tiene la forma representada en la figura 2.22 [6]. Cuanto mas profunda es la toma de tierra, mas se aplana el embudo de tensión, evitando los riesgos provenientes de la tensión de paso.

En muchas ocasiones, esto no es posible por la naturaleza rocosa del terreno o por otras razones. Entonces se recurre a las tomas de tierra de mando, que están constituidas por bucles concéntricos, colocados a cierta profundidad, alrededor de las tomas de tierra propiamente dichas y unidos eléctricamente entre si y con la tierra por medio de conductores metálicos. Instalados estos bucles a la misma profundidad de las tomas de tierra se obtiene una variación de tensión que es prácticamente nula debido a que los conductores que constituyen el conjunto están eléctricamente unidos.

### 2.4.1 ELECTRODOS DE TIERRA INSTALADOS EN ZANJA

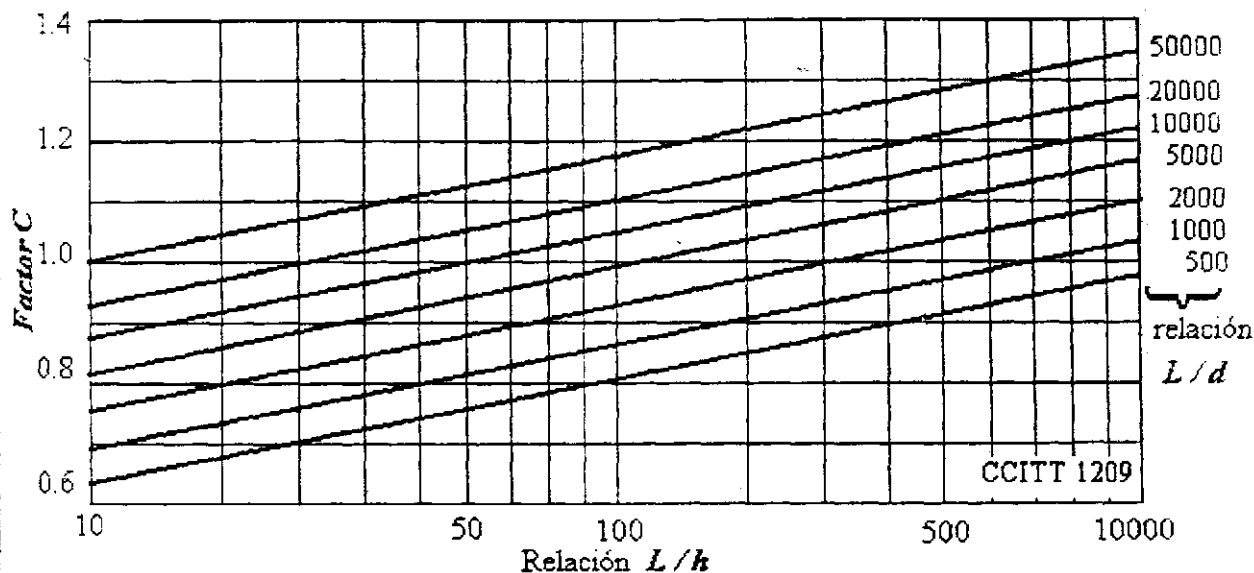


Figura 2.23

Para el caso de electrodos de tierra instalados en zanjas, estos consisten de conductores enterrados horizontalmente a una profundidad de por lo menos 60 cm [9]. Tales electrodos hacen intervenir un gran volumen de terreno y por consiguiente la resistencia de una puesta a tierra instalada en una zanja es, generalmente, más reducida incluso si la capa superficial en que está enterrado el conductor tiene un bajo grado de humedad.

Estas puestas de tierra están constituidas por una pletina o banda metálica, que se instala debajo del suelo, a poca profundidad y horizontalmente; se extiende sobre una gran superficie y, se utiliza, en instalaciones a la intemperie y también en aquellos casos que no pueden emplearse otros sistemas de toma de tierra (por ejemplo, terrenos rocosos).

Para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra, se puede considerar:

- La resistencia de tierra de un hilo de diámetro  $d$  y de longitud  $L$ , enterrado horizontalmente a una profundidad  $h$  en un suelo de resistividad  $\rho$ , puede calcularse mediante la fórmula:

$$R \approx \frac{C 2 \rho}{L} \quad [\Omega] ,$$

donde  $C$  es el factor procedente de la figura 2.23.

- La misma fórmula puede aplicarse a láminas cerradas, sustituyendo el diámetro  $d$  por la mitad de la anchura de la lámina [9].

Cuando se conoce la resistividad del suelo se puede determinar, mediante la anterior expresión y la figura 2.24, la longitud del electrodo necesaria para obtener una determinada resistencia de tierra. Una tubería metálica de agua de suficiente longitud constituiría un electrodo de tierra muy eficaz, sin embargo, debe tenerse en cuenta que las tuberías de distribución de agua no pueden utilizarse con este fin.

Para electrodos de tierra con formas especiales en zanjas distintos de un conductor cilíndrico rectilíneo, en la tabla 2.1 se muestran la disposición típica y las fórmulas de cálculo de resistencia de tierra.

Disposición		Resistencia de tierra
	Hilo rectilíneo	R
	Angulo recto	R+ 3R/100
	Estrella de 3 puntas	R+ 6R/100
	Estrella de 4 puntas	R+ 12R/100
	Estrella de 6 puntas	R+ 42R/100
	Estrella de 8 puntas	R+ 65R/100

Para mallas de geometría sencilla se desarrollaron expresiones analíticas que se muestran en la tabla 2.2. [63]

Tabla 2.2. Fórmulas para el cálculo de resistencia de puesta a tierra [ 63].

Configuración	Fórmula
Hemisferio radio a	$R = \frac{\rho}{2a\pi}$
Varilla a tierra longitud L radio a	$R = \frac{\rho}{2L\pi} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
Dos varillas a tierra S>L, espaciamiento s	$R = \frac{\rho}{4L\pi} \left( \ln \frac{4L}{s} - 1 \right) - \frac{\rho}{4s\pi} \left( 1 - \frac{L^2}{3s^2} - \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
Alambre horizontal long. 2L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4L\pi} \left( \ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 - \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} - \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
Alambre con ángulo derecho long del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4L\pi} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 - 0.2146 \frac{s}{L} - 0.1035 \frac{s^2}{L^2} \dots \right)$
Estrella de tres puntas long del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{6L\pi} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} - 0.238 \frac{s^2}{L^2} \dots \right)$
Estrella de cuatro puntas long del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8L\pi} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} \dots \right)$
Estrella de seis puntas long del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{12L\pi} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} \dots \right)$



Estrella de ocho puntas. Long. de brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{16L\pi} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} \dots \right)$
Anillo. diametro del anillo D, diametro del conductor d, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{2D\pi^2} \left( \ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
Listón horizontal. long. 2L, sección aXb, profundidad s/2, b < a/8.	$R = \frac{\rho}{4L\pi} \left( \ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - ab\pi}{2(a-b)^2} + \ln \frac{4L}{s} + 1 + \frac{s}{2L} + \frac{s^2}{16L^2} \dots \right)$
Placa circular horizontal. radio a, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4s\pi} \left( 1 + \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \dots \right)$
Placa circular vertical. radio a, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4s\pi} \left( 1 + \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \dots \right)$

## 2.4.2 ELECTRODOS DE BARRA INTRODUCIDOS VERTICALMENTE

Las barras enterradas verticalmente en el suelo constituyen un tipo conveniente de puesta a tierra y, de ser cortas, son relativamente fáciles de instalar y de precio módico.

Cuando se trata de barras cortas, es raro que una sola barra proporcione una resistencia suficientemente baja; por consiguiente, conviene utilizar varias barras espaciadas.

En lo que concierne a la resistencia de choque, las medidas efectuadas con electrodos verticales de corta longitud hundidos en el suelo, han demostrado que la resistencia puede reducirse al 70% de la resistencia de tierra en corriente continua, a causa de las rupturas que pueden producirse en el suelo. Si hay que enterrar varios electrodos de barra adecuadamente separados y conectados en paralelo, pueden ser necesarias conexiones de gran longitud que introduzcan fuertes impedancias inductivas. Se puede perder así la ganancia de resistencia debida al arco de tierra, y la resistencia de choque global puede ser superior a la resistencia en corriente continua. Para lograr resistencias de

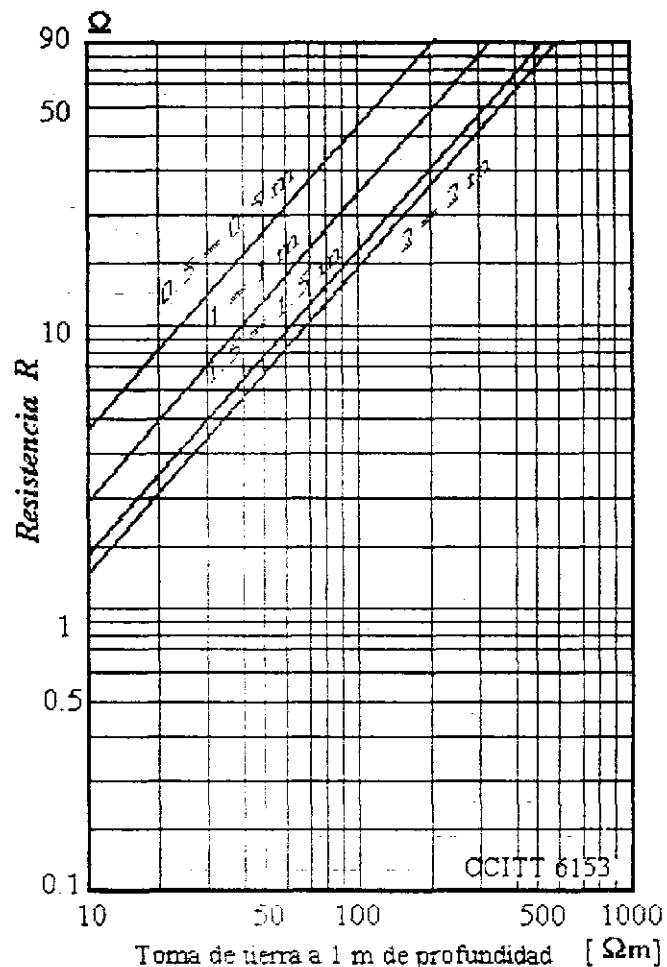


Figura 2.24

difusión de choque más bajas, hay que tener en cuenta la naturaleza del sistema de electrodos de tierra y su disposición, incluidos los conductores de conexión.

Comparadas con otros tipos de electrodos de tierra, las barras tienen las ventajas siguientes:

- Exigen pequeñas excavaciones, por lo cual son más baratas desde el punto de vista de la mano de obra;
- Si la capa superficial del terreno es arenosa, y la capa friática está a gran profundidad, puede introducirse hasta una profundidad tal que se reduzca mucho la resistencia de tierra;
- Las posibilidades de variación de la resistencia de tierra debido a los cambios de temperatura y humedad, son mucho menores en el caso de barras situadas a suficiente profundidad que en el de los electrodos enterrados cerca de la superficie;
- Si hay que sacar el mejor partido posible de un suelo poco profundo con una resistividad relativamente baja, pueden introducirse oblicuamente 2 ó 3 electrodos en un mismo punto y conectarlos en paralelo, sin conductores ni zanjas;
- La conexión entre una barra y el conductor al que esté asociada puede ser sencilla y muy fácil de inspeccionar y, en caso necesario, puede hacerse por encima del suelo, con lo que se evita el riesgo de corrosión cuando el electrodo y el conductor son de metales diferentes;
- El tratamiento químico de las tierras puede ser más económico;
- Si la refacción de la capa superior del suelo es costosa (por ejemplo, pavimentos de hormigón), conviene horadar esa capa e introducir barras en los agujeros hechos, con lo que se evitan las refacciones;
- Pueden emplearse también si el suelo está formado por rocas compactas, practicando un orificio con una perforadora.

La resistencia de tierra de las barras o tubos hundidos en el suelo puede calcularse con suficiente precisión aplicando las siguientes fórmulas en función de la relación  $L/d$ , donde  $L$  es la longitud,  $d$  el diámetro exterior y  $\rho$  es la resistividad del suelo:

$$R \approx 0.75 \frac{\rho}{L} \quad \text{si } 25 \leq \frac{L}{d} \leq 100 ;$$

$$R \approx \frac{\rho}{L} \quad \text{si } 100 < \frac{L}{d} \leq 600 ;$$

$$R \approx 1.2 \frac{\rho}{L} \quad \text{si } 600 < \frac{L}{d} \leq 3000 .$$

Pueden aplicarse las mismas fórmulas si los electrodos no son de sección cilíndrica. En este caso, se situará el diámetro  $d$  por el valor de la dimensión más importante de la sección en cuestión.

A menudo, la parte inferior de una barra hundida verticalmente en tierra alcanza una capa cuya resistencia es mucho más baja que la capa superior. Esta parte del electrodo tiene entonces tal importancia en el cálculo de la resistencia de tierra que se puede considerar como la longitud eficaz del electrodo.

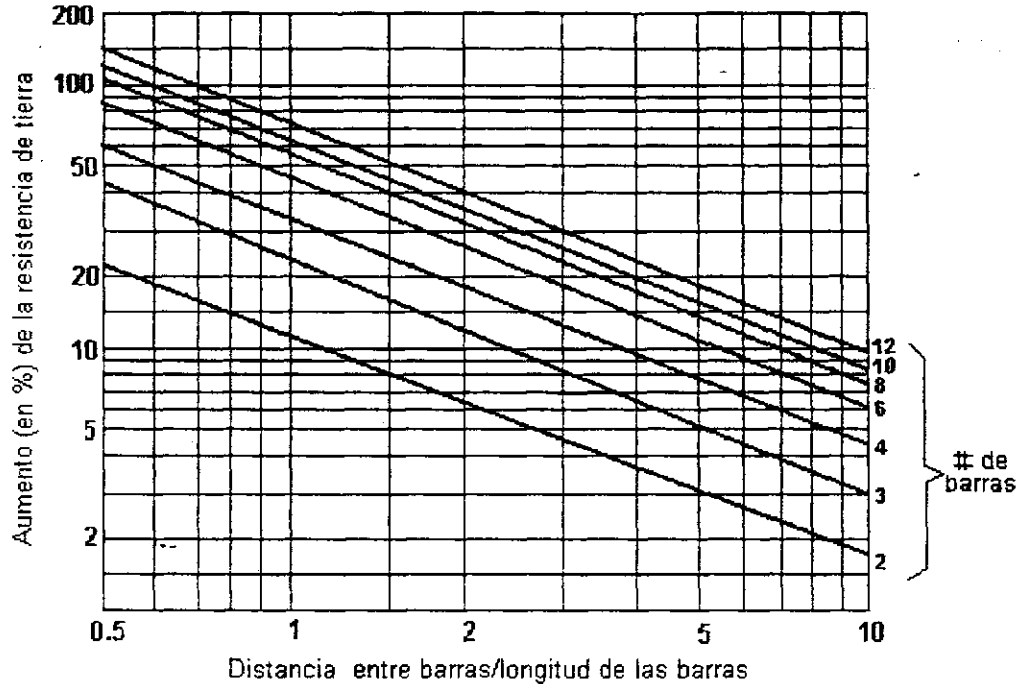


Figura 2.25

Como los electrodos de gran longitud suelen presentar capas de diferente resistividad, se recomienda que se mida la resistividad de la tierra durante su colocación, por ejemplo, cada tres metros (3 m), y, que según los valores medidos se establezca una curva continua, con la profundidad en abscisas y la resistencia de la tierra en ordenadas. Si la pendiente de la curva es menor que la de las líneas correspondientes a una resistividad constante, solo seguirá introduciéndose si se sabe o se cree que puede alcanzarse una capa de resistividad netamente inferior.

Si se emplean varias barras interconectadas, es necesario observar si la resistencia de tierra que se puede obtener es superior a la correspondiente a la conexión en paralelo de la resistencia de cada barra. El aumento depende de la distancia entre las barras y del número de estas; el empleo de conductores desnudos para la interconexión de las barras puede modificarlo bastante.

La figura 2.25 da una idea de este aumento (en porcentaje); está basada en la hipótesis de que la resistividad del suelo es uniforme en todos los puntos de la zona considerada y de que entre todas las barras de un sistema hay la misma separación.

### 2.4.3 ELECTRODOS EN FORMA DE PLACA

Las ventajas de este tipo de electrodos, empleado aún en ciertos países, se explica por el hecho de ser el que primero se utilizó y por que en un principio se pensó que había que aumentar la superficie de los electrodos para obtener una resistencia poco elevada, creencia errónea en la medida en que la resistencia de tierra varía solo en razón inversa a la raíz cuadrada de la superficie del electrodo. Por ello, si una placa no asegura una resistencia suficientemente baja, vale más multiplicar las placas que aumentar su superficie. Si se utiliza más de una placa, la distancia entre ellas será por lo menos igual al triple de la dimensión máxima de la placa.

Cuando la resistividad es reducida, puede dar buenos resultados una toma de tierra de placa. El uso de placas de más de 1 m por 2 m ofrece escasas ventajas. Más costosas que los electrodos de varilla, no son más eficaces que ellos.

El sistema de distribución de puesta a tierra en forma de placa, solamente, es recomendable en los suelos donde la profundidad de la tierra vegetal es importante (1 a 1,5 por lo menos). En los demás casos es preferible instalar tomas de tierra de barra vertical. El empleo de placas para puestas de tierra es menos recomendable puesto que la mayor parte de la corriente de paso se concentra en las aristas que tienen un perímetro reducido. En la práctica se pueden emplear placas perforadas para aumentar de esta forma la longitud de las aristas. Es indiferente que la placa se coloque en el terreno horizontal o verticalmente, siempre que la profundidad sea elevada respecto al diámetro de la placa. Las placas se entierran preferentemente de forma vertical y hasta una profundidad suficiente para encontrar un terreno bastante húmedo y, por lo tanto buen conductor. En terreno homogéneo y en condiciones normales, las placas se instalan a unos 2 m de profundidad. No conviene instalar mas profundamente, aunque se trate de terrenos de mala calidad, ya que están diseñadas para conseguir el contacto con la tierra en cercanías del equipo que deben proteger. Cuando existen capas de roca, grava, etc. a una profundidad menor de 2 m, la placa se instala horizontalmente de forma que se consiga buen contacto con la capa superficial.

Para calcular la resistencia de tierra de las placas redondas horizontales, puede aplicarse la siguiente fórmula aproximada, válida para  $h > (D/2)$ , donde  $D$  es el diámetro de la placa,  $h$  la profundidad a que se coloca y  $\rho$  la resistividad del suelo:

$$R = \frac{\rho}{4D} \left( 1 + \frac{D}{6H} \right)$$

Para garantizar un buen contacto con el suelo circundante, es preferible colocar las placas verticalmente; en este caso, puede también emplearse la misma fórmula, donde  $h$  representa la profundidad media de colocación.

En el caso de placas cuadradas, puede usarse la misma fórmula, pero sustituyendo  $D$  por 1.13 veces la dimensión del lado.

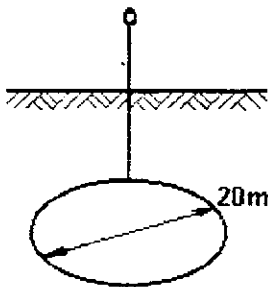
La resistencia de tierra de las placas redondas, cuadradas, o rectangulares, enterradas vertical u horizontalmente, puede calcularse en numerosos casos con suficiente precisión mediante la fórmula:

$$R \approx 0.25 \frac{\rho}{D}$$

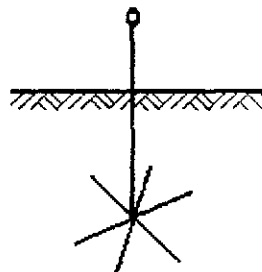
En la que  $D$  representa la dimensión máxima de la placa considerada.

**Otros sistemas de tomas de tierra:** Si la resistividad del suelo obliga a utilizar un conductor de gran longitud, es preferible sustituirlo por varios conductores más cortos en disposición de estrella por las siguientes razones:

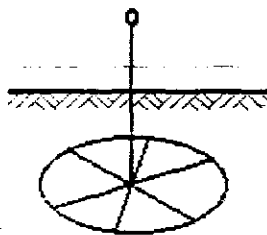
- La resistencia propia de un solo conductor de gran longitud, puede ser considerable;
- Frecuentemente es más fácil enterrar varios conductores de corta longitud que uno solo más largo;
- La impedancia de choque de dos o más conductores radiales es menor que la de un solo conductor.



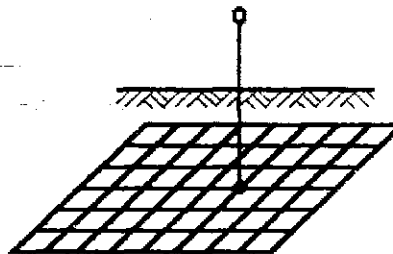
a. Toma de tierra en forma de bucle



b. Toma de tierra en forma de estrella



c. Toma de tierra de red estrellada en bucle



d. toma de tierra de red en malla

Figura 2.26

Sin embargo, hay que señalar que el empleo de cualquiera de las disposiciones enumeradas en la tabla 2.1 aumenta la resistencia de tierra que se puede obtener a una barra de longitud dada. En porcentaje el aumento es el indicado en dicha tabla.

Algunas veces se emplean las tomas de tierra en forma de bucle, en las que el conductor que constituye la toma de tierra se cierra sobre si mismo para formar un bucle circular, rectangular etc. En este caso, para el cálculo de la resistencia puede tomar, aproximadamente, la fórmula de la resistencia de la toma de tierra en forma de pletina.

Las tomas de tierra en forma de estrella (ver figura 2.26) están constituidas por conductores ramificados. El aumento de estas apenas contribuye a la disminución de la resistencia de la toma, por lo que se adopta este número como máximo el de seis, con ángulos entre los electrodos no inferiores a  $60^\circ$ . Para calcular la resistencia de una toma de tierra de esta clase, se aplica la misma fórmula que para el caso de la toma de tierra de pletina pero teniendo en cuenta que se ha de considerar un longitud igual a la suma de las longitudes de los electrodos radiales.

Si se unen entre si las ramificaciones que constituyen una toma de tierra en estrella, se obtiene una toma de tierra de red estrellada en bucle. También puede constituirse una excelente toma de tierra mediante una malla metálica rectangular.

En ambos casos para calcular la resistencia de puesta a tierra, se aplica la misma fórmula que para el caso de toma de tierra en forma de placa. El diámetro o la longitud del mayor lado de la superficie enmallada, no debe sobrepasar los 20 m.

Para el montaje de las tomas de tierra de bucle, estrella o enmalladas, se emplea frecuentemente el cable de acero o hierro galvanizado de 100 mm de sección mínima y 3 mm de espesor mínimo. Algunas veces se emplea también el acero cobreado, con sección mínima de 50 mm, la cinta de cobre con sección mínima de 50 mm y espesor mínimo de 3 mm y, finalmente, conductor desnudo de cobre de 35 mm de sección mínima.

#### 2.4.4 MATERIALES APROPIADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TOMAS DE TIERRA

El dimensionamiento de la instalación de puesta a tierra es función de la intensidad que, en caso de falla, circula a través de la parte afectada de la instalación de tierra y del tiempo de duración de la falla, además, se hará de forma que no se produzcan calentamientos que puedan deteriorar sus características o aflojar elementos desmontables que la constituyan.

Para el dimensionamiento de las secciones, el tiempo mínimo a considerar para duración de falla a la frecuencia de la red, será de 1 segundo y no podrán superarse las siguientes densidades de corriente: para el cobre  $160 A/mm^2$  y el acero:  $60 A/mm^2$ . Sin embargo, nunca se admitirán secciones menores a  $25 mm^2$  en el caso del cobre y de  $50 mm^2$  en el caso del acero. Los anteriores valores corresponden a una temperatura final de  $200^\circ C$ .

Cuando se empleen materiales diferentes de los indicados, se cuidará de que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que las temperaturas no sobrepasen los valores indicados anteriormente;
- Que la sección sea como mínimo equivalente, desde el punto de vista térmico, a la de cobre que hubiera sido precisa;
- Que desde el punto de vista mecánico, su resistencia, al menos, sea equivalente a la del cobre de  $25 \text{ mm}^2$ .

Cuando los tiempos de duración de la falla sean superiores a 1 s, se calcularán y justificarán las secciones adoptadas en función del calor producido y su disipación. Podrán usarse como conductores de tierra las estructuras de acero de apoyo de los elementos de la instalación, siempre que cumplan las características generales exigidas a los conductores y a su instalación [27]. Los valores prácticos de la densidad de corriente instantánea (o intensidad admisible de corta duración) en función de la duración del paso de la corriente, se muestran en la tabla 2.2 para facilitar un dimensionamiento rápido.

Tabla 2.2

Sección del conductor en $\text{mm}^2$	Corriente admisible (kA), en función del tiempo de circulación de la corriente (segundos), sin superar los $200 \text{ }^\circ\text{C}$				
	1"	2"	5"	10"	15"
16	2.65	1.86	1.18	0.84	0.68
25	3.68	2.60	1.65	1.16	0.95
35	5.80	4.07	2.57	1.83	1.50
50	8.25	5.80	3.68	2.60	2.12
70	11.50	8.10	5.20	3.63	2.95
95	14.00	9.35	6.25	4.40	3.60
120	19.70	13.00	8.80	6.25	5.05
185	25.60	17.40	11.00	7.90	6.35
200	30.50	21.60	13.60	9.70	7.85
240	39.50	28.00	17.60	12.70	10.20
300	49.50	35.00	22.20	15.70	12.80
360	65.75	46.40	29.40	28.80	17.00

En la práctica, los metales más empleados son el cobre, por su alta resistencia a la corrosión, y los aceros cromo-níquel que resisten a la corrosión por pasivación, o los galvanizados, si bien éstos presentan una vida útil dependiente de la duración de su capa protectora. Aunque pudiera concluirse que el empleo del cobre es siempre preferible, hay que tener en cuenta los inconvenientes que resultan de la formación de pares electrolíticos cobre-hierro o cobre-plomo con las estructuras metálicas en contacto con el suelo (pies de apoyo de líneas, carpinterías y canalizaciones metálicas, etc.), que serán objeto de corrosión.

El suelo es, generalmente, un medio heterogéneo y, en función de su composición, presenta gran variación en la velocidad de corrosión de los metales. Así, en un suelo natural, se puede separar, fundamentalmente, arena, arcilla, carbonato cálcico, y humus, componentes que, mezclados en diferentes proporciones, darán lugar a distintos grados de agresividad.

Los suelos artificiales, esto es formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción, residuos domésticos e industriales, son así mismo, agresivos. La corrosión es más activa a medida que el terreno contenga mayor humedad y sales, elementos desencadenantes de la generación de soluciones electrolíticas, fuertemente ionizadas, que confieren al terreno una cierta acidez denominada *agresividad*, y que como esas condiciones son las determinantes de una menor resistividad, mayor será la corriente galvánica que circule y mayor el ataque a corrosión que sufrirá el ánodo, papel que desempeña el menos electropositivo de los metales que constituyan la célula de corrosión, mientras que el contrario, cátodo, permanece inalterado.

La tabla 2.3 muestra el grado de agresividad del suelo, en función de su resistividad.

Tabla 2.3

Resistividad [ $\Omega.m$ ]	Grado de agresividad
Menos de 10	Muy fuerte
10 a 100	Fuerte
100 a 200	Moderado
más de 200	Escaso

En gran número de suelos, el zinc tiende a recubrirse de una película que lo protege contra la corrosión. En cierto modo, este material puede asegurar también la protección catódica del cobre, el plomo y el acero. Por ello, el acero galvanizado puede servir perfectamente para la construcción de electrodos de puesta a tierra si la capa de zinc es suficientemente gruesa. Se recomienda, generalmente, la aplicación de una capa de 0.007 mm como mínimo, pero si el suelo es corrosivo se recomienda aplicar de por lo menos 0.01 mm.

El cobre enterrado en el suelo resiste muy bien a la corrosión, sin embargo, facilita la de corrosión galvánica del aluminio, del zinc, del acero, del estaño y hasta del plomo si se establece una conexión metálica entre uno de los citados metales y un electrodo de tierra de cobre y si les separa un electrólito (tierra húmeda). A este respecto, los electrodos de acero revestidos de cobre se comportan exactamente igual que los electrodos de cobre puro.

La conductividad del cobre, mucho mayor que la del acero, hace que su empleo sea especialmente indicado en el caso de conductores y electrodos de gran longitud, a fin de que la parte de la resistencia de tierra que depende de la resistencia del electrodo sea suficientemente baja. Por desgracia, la gravedad de la corrosión galvánica posible es proporcional a la masa de cobre empleado. Como la tendencia moderna, en lo que respecta la puesta a tierra de los edificios, consiste en conectar todos los elementos metálicos del edificio que en condiciones normales no conduzcan corriente y los mismos que salgan de él al conductor de tierra, el empleo del cobre exige prestar gran atención



al problema de la corrosión. Por esto, no se recomienda el uso de acero sin revestimiento protector ni aluminio para los electrodos de tierra.

Algunos países utilizan electrodos cuya parte exterior está formada por una mezcla comprimida de carbono en polvo y resina sintética; este material presenta la ventaja de evitar la corrosión.

**Valor mínimo de la sección de los electrodos de tierra:** Dada la rigidez mecánica necesaria y la capacidad de descarga de corriente que ha de preverse, se recomiendan, por lo general, los siguientes valores aproximados para la sección de los electrodos de tierra:

i. Electrodos en zanjas:

- Electrodos de acero galvanizado:  
Hilos de  $95 \text{ mm}^2$   
Cinta de  $100 \text{ mm}^2$  y  $3 \text{ mm}$  de grosor
- Electrodos de acero recubiertos de cobre:  
Hilos de  $50 \text{ mm}^2$
- Electrodos de cobre:  
Hilos de  $16 \text{ mm}^2$   
Cintas de  $50 \text{ mm}^2$  con un grosor de  $2 \text{ mm}$

ii. Electrodos de barra enterrados verticalmente:

- Electrodos de acero galvanizado:  
Varillas de  $10 \text{ mm}$  de diámetro  
Tubos de  $20 \text{ mm}$ , de dimensión comercial  
Barra de acero en  $L$ , de  $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$   
Barra de acero en  $U$ , de  $30 \times 33 \times 5 \text{ mm}$   
Barra de acero en  $T$ , de  $50 \times 50 \times 6 \text{ mm}$   
Barra de acero en cruz, de  $50 \times 3 \text{ mm}$
- Electrodos de acero recubiertos de cobre:  
Varilla de acero,  $10 \text{ mm}$  de diámetro, recubierta de una capa de cobre de  $0.35 \text{ mm}$
- Electrodos de cobre:  
Tubos de  $30 \times 3 \text{ mm}$

iii. Electrodos de placa:

- Electrodos de acero galvanizado:  
Placa de  $3 \text{ mm}$  de grosor
- Electrodos de cobre:  
Placa de  $2 \text{ mm}$  de grosor

**Conexiones:** Si se quiere obtener una resistencia de contacto reducida y estable, es esencial que la

conexión entre el electrodo y los conductores sea insensible a la corrosión y a las tensiones debidas, por ejemplo, a las variaciones de temperatura. Además, siempre que sea posible se recomienda soldar el conductor al electrodo, pero únicamente cuando sean del mismo material. Para evitar toda corrosión de las conexiones, se recomienda aislarlas del suelo circundante mediante un compuesto estanco apropiado y una cinta aislante.

El tendido de los circuitos de tierra ha de realizarse con conductor desnudo, sin aisladores, al descubierto, de forma visible y de tal forma que no resulte fácil su deterioro por acciones mecánicas o químicas. Debido a la posibilidad de contactos inadvertidos, los conductores de los circuitos a tierra se consideran sometidos a tensión.

Los conductores de puesta a tierra han de tener un contacto eléctrico perfecto, tanto con las partes metálicas que se desea poner a tierra, como con el electrodo que constituye la toma de tierra propiamente dicha. Las conexiones de los conductores de tierra con las partes metálicas se realizan con todo cuidado, por medio de piezas de empalme adecuadas. Los contactos han de disponerse limpios, sin humedad y de tal forma que los posibles efectos electroquímicos no destruyan con el tiempo las conexiones efectuadas. Está prohibido interrumpir los circuitos de tierra con seccionadores, fusibles o disyuntores automáticos.

**Número y disposición de las tomas de tierra:** En las instalaciones de edificios o de estructuras a la intemperie de las estaciones de transformación y de distribución, se emplean sistemas de distribución de tierra, constituidos por varios electrodos unidos entre si, formando malla a la que se conectan la totalidad de los equipos.

Sin embargo ha de tenerse en cuenta que para evitar posibles accidentes ocasionados por tensiones de paso elevadas entre las diferentes partes de la instalación unidas por una tierra común, han de instalarse varias tierras independientes, conectando a ellas las partes de la instalación que se detallan seguidamente:

- a. Grupo de las partes de instalación no sometidas a tensión o sometidas a tensiones reducidas. Este grupo comprende las partes de la instalación que, en servicio normal, no deben estar sometidas a tensión y aquellas otras que aun estando normalmente sometidas a tensión, esta es tan reducida que el contacto con ellas no constituye peligro para las personas o cosas. Entre las primeras se pueden citar: las armaduras metálicas, las carcasas de máquinas eléctricas, las cubas de transformadores, e interruptores, los soportes de aisladores, los paneles de cuadros, las estructuras y bases de castilletes y postes etc. Entre las segundas están los circuitos secundarios de transformadores de medida, las instalaciones de muy baja tensión etc.
- b. Grupo de los neutros del lado de baja tensión. Comprende los neutros de los transformadores y los de la distribución de baja tensión.
- c. Grupo de los dispositivos de protección contra sobretensiones del lado de alta tensión. Están

incluidos en este grupo los pararrayos y descargadores, limitadores de tensión, bobinas, condensadores o descargadores de protección, líneas aéreas de tierra, etc., del lado de alta tensión.

- d. Grupo de neutros de alta tensión. Comprende los neutros de los transformadores del lado de alta tensión si los hubiese.
- e. Grupo de los dispositivos de protección contra sobre tensiones del lado de baja tensión. Comprende los aparatos de protección análogos a los del grupo 3, pero del lado de baja tensión.

Cada uno de los grupos citados ha de tener sus propios sistemas de distribución de puesta a tierra, con conductores conectados entre si, e independientes de los sistemas de distribución de tierras correspondientes a los demás grupos. Cada una de las tomas de tierra que corresponden a un sistema de distribución de tierra independiente, ha de estar separada por lo menos, a una distancia de 3 m respecto a las tomas de tierra de los restantes sistemas de distribución de tierra. Los circuitos de tierra independientes han de ir completamente separados durante todo su recorrido.

Si en esta misma instalación existieran elementos de producción o de transformación de tensiones de servicio muy diferentes, para cada estación de servicio deben establecerse tantos sistemas de distribución de puesta a tierra independientes como grupos existan, permitiéndose únicamente emplear una misma tierra para dos grupos de tensiones de servicio distintas, si no hay mucha diferencia entre estas.

Cuando se trate de pequeñas instalaciones, de potencias iguales o inferiores a 250 KVA, con tensiones de servicio iguales o inferiores a 15 KVA, puede instalarse una tierra por el neutro del secundario de la instalación, y otra tierra independiente para los restantes elementos. Los limitadores de tensiones de las líneas de corriente débil deberán ponerse a tierra independientemente de los anteriores, sobre todo en las proximidades de la líneas de alta tensión.

Las cercas, puertas y tapas metálicas se conectarán a los circuitos generales de tierra, excepto cuando quedan dentro de una malla de tierra externa.

Para las cercas metálicas, se clavarán varios de los montantes de estas directamente a tierra, sin embargo, de forma que la distancia entre estos montantes no se superior a 4 m y procurando que el sistema de sujeción de los alambres de la cerca asegure un buen contacto de estos con los montantes.

Las puertas metálicas que están al alcance del público, se unirán mediante conductores de cobre con una sección mínima de 35 mm a una esta enterrada junto a la puerta que en este caso puede ser de 60 a 100 cm de longitud y enterrada a una profundidad de 10 a 20 cm de la superficie.

Las tapas de entrada y pozos de ventilación de las estaciones transformadores subterráneas, deben

quedar aisladas sin contacto con ninguno de los circuitos de tierra.

En lo que se refiere al número de tomas de tierra necesarias, el valor de la resistencia, calculado por las fórmulas anteriores o medida sobre el terreno, dará idea si es suficiente una o se precisan más tomas para cada circuito de tierra. En las estaciones transformadores y en general, en los puntos de maniobra, es conveniente la instalación de placas o de dos estacas, como mínimo por cada circuito de tierra.

En terreno arenoso o seco y, en general, cuando se precise reducir la resistencia de las tomas de tierra, se aumentará el número de tomas conectándolas en paralelo y situándolas en las partes del terreno que reúnan mejores condiciones. La distancia mínima de estas tomas en paralelo es de 2 m; si se trata de placas, es preferible situarlas en un plano vertical, de forma que los trazos de sus planos en el suelo, tiendan a formar un polígono cerrado.

### 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DE MEDICIÓN

#### 3.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

*Instrumentos electrotérmicos:* El sistema electrotérmico funciona en base a la conversión de la potencia calorífica, producida por la corriente que circula por el calentador, en potencia mecánica, la cual origina el desplazamiento de la aguja indicadora. Este desplazamiento se obtiene aprovechando la deformación (dilatación, curvatura) de un elemento metálico, debido al calor producido a la corriente que se mide. La temperatura del sistema se estabiliza cuando la potencia recibida se iguala con la potencia disipada.

*Rectificadores:* El sistema magnetoeléctrico presenta grandes ventajas con respecto a otro sistema motor; tienen gran sensibilidad, no le afectan los campos magnéticos externos y resisten sobrecargas. El inconveniente es que este sistema funciona únicamente con corriente continua. Para utilizarlo en mediciones de corriente alterna se hace necesario un traductor o elemento que recibe las señales de corriente alterna y las transforme en señales de corriente continua; este traductor tiene como nombre rectificador.

*Instrumentos y elementos de inducción:* El funcionamiento de estos elementos se basa en la acción mutua de los flujos magnéticos, periódicamente variables (producidos por corrientes alternas) y las corrientes inducidas por estos flujos en la parte móvil del instrumento. Los flujos magnéticos se originan en un núcleo bobinado fijo, cuyo arrollamiento se conecta a la corriente alterna que se va a medir. Las corrientes que se inducen en la parte móvil son las denominadas corrientes de Foucault, Eddy o parásitas. Las ventajas de estos dispositivos son:

- momento motor elevado;
- grandes ángulos de desviación de la parte móvil.

La principal desventaja consiste en que no se presta para la construcción de elementos de altas clases de exactitud (de laboratorio) por ser muy sensibles a la variación de frecuencia.

*Instrumentos electrodinámicos:* El sistema electrodinámico funciona en base a la acción recíproca de dos flujos magnéticos generados en dos bobinas. La corriente que se va a medir se hace circular por las bobinas, siendo los flujos proporcionales a la corriente medida (existe una bobina fija y otra móvil). El flujo principal se origina en la bobina fija a diferencia del magnetoeléctrico.

Estos instrumentos se construyen en dos variantes:

- Instrumentos electrodinámicos sin núcleo (sin hierro).
- Instrumentos electrodinámicos con núcleo (con hierro) llamados Ferrodinámicos.

Los instrumentos ferrodinámicos se diferencian de los electrodinámicos sin núcleo, por tener núcleos magnéticos en ambas bobinas, el principio de funcionamiento, es el mismo, pero el empleo de núcleos ferromagnéticos permite la obtención del flujo magnético de valor elevado con un mínimo consumo de energía.

*Instrumentos electromagnéticos:* Denominados de hierro móvil, se basan en la atracción que ejerce un campo magnético creado por la bobina por la cual circula la corriente que se mide, sobre la parte móvil (hecha de material magnético no remanente). El núcleo móvil tiende a asumir una posición que origina el incremento del flujo magnético de la bobina. El flujo magnético de la bobina incrementa a pesar que la intensidad de la corriente permanece invariable. La aguja indicadora está fija en el núcleo móvil. La desviación de la aguja indicadora está en función de la corriente que circula. Las ventajas de estos dispositivos son:

- gran capacidad de sobrecarga;
- construcción simple;
- correspondientemente barato.

Entre las desventajas están

- No lineales (escala);
- Sensibilidad relativamente baja.

*Instrumentos magnetoeléctricos:* Reciben esta denominación los instrumentos de medición en los cuales la desviación de la aguja indicadora (o del espejo) se produce debido a la acción recíproca de dos campos magnéticos. Uno producido por un imán permanente y otro producido por los Amperes-vueltas de una bobina. Uno de los campos es fijo y el otro móvil.

Estos instrumentos se clasifican en instrumentos de bobina móvil e instrumentos de imán móvil, según cual de los dos sea fijo y móvil. Los instrumentos de bobina móvil son de alto costo, alta precisión y permiten la obtención de ángulos de desviación muy grande, lo cual da campo para escalas circulares; el cilindro exterior sirve como blindaje protector contra campos magnéticos; el sistema circular permite espacios reducidos y no hay dispersión de flujo. Los instrumentos de imán móvil son de bajo costo, no requieren alta precisión y adquieren dimensiones pequeñas.

En general los instrumentos magnetoeléctricos presentan las siguientes desventajas:

- Solo se aplican para corriente continua.
- De construcción compleja.
- Relativamente costosos.

*Instrumentos electrostáticos:* Estos sistemas están constituidos por un condensador de capacidad variable. El torque originado en el sistema depende de la diferencia de potenciales aplicada a los electrodos del condensador. El sistema trabaja en base a la ley de Coulomb:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2};$$

donde  $F$  es la fuerza entre dos cargas;  $q_1$  y  $q_2$  son las cargas sobre los electrodos;  $r$  es la distancia entre ellos y  $\epsilon$  es la constante dieléctrica. La fuerza  $F$  actúa como fuerza de repulsión o de atracción según las cargas sean de igual signo o de signo opuesto. Uno de los electrodos del condensador conforma la parte móvil y el otro la parte fija. Debido al incremento de la capacidad del condensador, la parte móvil tiende a estabilizarse en la posición en la que la energía eléctrica del campo es máxima.

*Instrumentos electrónicos:* Son aquellos instrumentos que usan amplificadores, rectificadores y otros circuitos para generar una corriente proporcional a la cantidad a medir. Esta corriente se introduce por cualquiera de los métodos anteriormente mencionados.

Los instrumentos que emplean movimientos para indicar la magnitud de la cantidad a medir sobre una escala continua son los llamados Instrumentos Análogos. Cuando el resultado de la medición se muestra en intervalos discretos o numéricos (en vez de la deflexión de la aguja) hablamos de una indicación digital.

Entre las ventajas de este tipo de instrumentos se tiene:

- la lectura directa reduce el error humano;
- elimina el paralelaje y otros errores de lectura;
- polaridad automática;
- facilita el cambio de rango;
- reduce el posible daño del instrumento causado por sobrecargas accidentales.

### 3.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Los instrumentos de medida se pueden clasificar por los siguientes criterios:

- por su destino;
- tipos de magnitud a medir;
- condiciones de explotación;
- protección contra los campos magnéticos y eléctricos externos;
- estabilidad a las acciones mecánicas
- precisión;
- principio de funcionamiento.

La clasificación de los instrumentos de tablero y portátiles indicadores o registradores está reglamentada por normas y se realiza de acuerdo a los siguientes criterios:

*Tipo de magnitud a medir:* Amperímetros, voltímetros, vatímetros, contadores de energía, ohmímetros, fasímetros, faradímetros, frecuencímetros. etc.

Condiciones de explotación:

- GRUPO A: Instrumentos destinados al trabajo en locales cerrados, secos y con calefacción;
- GRUPO B: Instrumentos destinados al trabajo en locales cerrados sin calefacción;
- GRUPO C: Instrumentos para el trabajo en condiciones de campo (de campaña C1 o marinos C2).

Grupo de instrumentos	Condiciones normales		Condiciones límites	
	Temperatura	H. relativa %	Temperatura	H. relativa %
A	+10 .. +35	80*	-40 .. +60	95*
B	-30 .. +40	90*	-40 .. +60	95**
C1	-40 .. +50	95**	-50 .. +60	95***
C2	-50 .. +60	95**	-60 .. +65	95***

- \* La humedad relativa esta dada a+30 C.
- \*\* La humedad relativa esta dada a+35 C.
- \*\*\* La humedad relativa esta dada a+60 C.

Protección contra la acción de los campos externos: Estos están divididos en dos categorías dadas en la siguiente tabla, con variaciones admisibles de indicación en función de la clase de precisión.

Clase de Precisión del Instrumento	Variación Admisible de Indicación de Instrumento %	
	CATEGORÍA I	CATEGORÍA II
0.05,0.1,0.2,0.5	+0.5,-0.5	+0.1,-0.1
1.0,1.5	+1.0,-1.0	-2.5,-2.5
2.5,4.0	+2.5,-2.5	+5.0,-5.0

Estabilidad a las acciones mecánicas: Según las acciones mecánicas, estos se dividen en: Ordinarios, ordinarios con alta resistencia y estables a las acciones mecánicas:

- Resistentes a las sacudidas (RS)-T II.
- Resistentes a las vibraciones (RV)-B II.
- Insensible a las sacudidas (ES)-TH.
- Insensible a las vibraciones (EV)-BH.
- Resistente a los golpes (RG)-Y II.



*Precisión:* Según la precisión se tienen los siguientes nominales (en porcentaje):

- Alta precisión: 0.05, 0.1, 0.2, 0.5;
- Precisión media: 1, 1.5, 2.5;
- Baja precisión: 4.

**Símbolos e Indicaciones sobre Cuadrantes:** El usuario debe tener la posibilidad de orientarse en las características del instrumento que utiliza, sin consultar el folleto descriptivo. Para facilitar esta orientación, todos los instrumentos fabricados según las normas internacionales, llevan sobre sus cuadrantes los símbolos convenidos que proporcionan informaciones útiles para su uso. Estos símbolos se dividen en:

- Símbolos de información general
  - a.* Marca de la fábrica.
  - b.* Número de fabricación.
  - c.* Año de fabricación.
  - d.* Unidad de medición.
- Símbolos correspondientes al uso
  - a.* Sistema motor (tabla III-3).
  - b.* Sistema de corriente (tabla III-4).
  - c.* Clase de exactitud (tabla III ver errores).
  - d.* Posición de trabajo (tabla III-5).
  - e.* Tensión de prueba de aislamiento (tabla III-6).
  - f.* Observaciones especiales (tabla III-7).

Los símbolos de información general *a*, *b* y *c*, pueden figurar en cualquier parte del cuadrante y *d* (unidad) está ubicada por encima o por debajo de la escala. Los símbolos del uso se suele imprimir en uno de los rincones del cuadrante.

La mayor o menor exactitud indica la certeza que se pueda tener sobre la calidad de una medida o determinación de una magnitud. La falta de exactitud genera una mayor incertidumbre.

### 3.3 CALIBRACIÓN Y FUENTES

#### 3.3.1 TÉCNICAS DE CALIBRACION

**Incetidumbre absoluta y relativa:** En los procesos de calibración es necesario distinguir la incertidumbre absoluta y la incertidumbre relativa. La incertidumbre absoluta corresponde a los patrones absolutos o primarios que de acuerdo a los niveles de calibración que veremos mas adelante, pueden

ser patrones internacionales en los procesos mas críticos o exigentes o patrones nacionales en aquellos menos críticos.

La incertidumbre relativa en cambio, es aquella que se genera en los procesos de calibración, luego de los cuales los equipos o instrumentos calibrados quedan con una incertidumbre que depende de las incertidumbres de los instrumentos o procesos que en ella se utilizaron. Este aspecto es muy importante porque las calibraciones que un laboratorio realice debe hacerlas con los patrones que el fabricante o diseñador recomiende.

*Calibración:* Es un procedimiento de medida especial y altamente refinado en el cual se comparan instrumentos de prueba o medición cuyo estado de operación se desconoce con otros instrumentos de gran precisión y de una muy bien definida exactitud, denominados patrones; con el fin de detectar, eliminar mediante ajuste y reportar cualquier variación en su precisión o aptitud para operar. En otras palabras, es un proceso que sirve para verificar la calidad de la operación de un equipo o instrumento de medida.

*Calibración estática:* La calibración estática se refiere al caso en que todas las entradas al proceso de calibración (deseadas o no deseadas), excepto una, se mantienen en un valor constante. Luego se hace variar la entrada que se estudia en un intervalo de valores constantes haciendo que la salida o salidas varíen también en un intervalo de valores constantes. Las relaciones entre la entrada y la salida obtenidas de esta manera corresponden a una calibración estática que es válida bajo las condiciones constantes establecidas en las demás entradas.

Esto mismo podrá hacerse para cada una de las entradas que se consideren importantes, con lo cual se consigue un conjunto de relaciones que describen en forma conveniente el comportamiento global del instrumento. Debe entenderse también que si se examina de manera crítica un instrumento práctico en condiciones no ideales, se encontrará muchas entradas no deseadas, cada una de las cuales producirá efectos tan pequeños que no sería práctico controlarlos. Así, la expresión de entradas constantes se refiere a una situación ideal muchas veces imposible de alcanzar en la práctica. El término *método de medidas* se refiere al caso ideal. El término *proceso de medida* describe la realización física (imperfecta) del método de medida.

*Patrones:* Son elementos de referencia que representan el valor exacto de una unidad de medida. Pueden ser de diferentes tipos así:

**Patrones internacionales:** Representan acuerdos científicos internacionales sobre las magnitudes de referencia. Los patrones internacionales se evalúan y chequean periódicamente por medio de mediciones absolutas en términos de las unidades fundamentales. Se conservan en la oficina internacional de pesos y medidas y no es fácil disponer de ellos.

**Patrones primarios o básicos:** Representan las magnitudes fundamentales y algunas unidades eléctricas y mecánicas derivadas. Se calibran independientemente por mediciones absolutas en cada uno de los laboratorios nacionales que poseen.