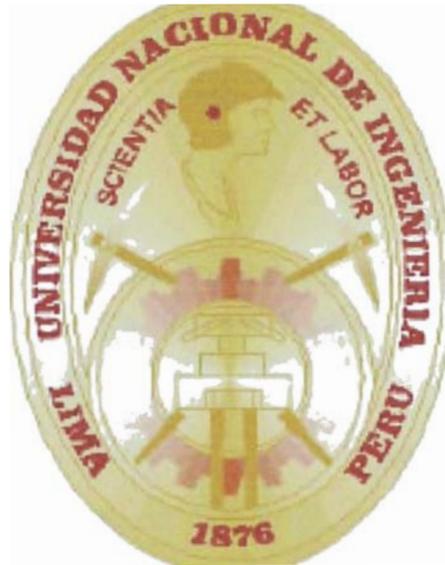


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS



SEGURIDAD DE CENTROS DE COMPUTO CON
DISEÑO Y APLICACIÓN MEDIANTE
SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA

TESIS

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO INDUSTRIAL

María Teresa Román León

Marco Antonio Peña Lindao

Lima Perú

2,003

INDICE

	Página
Descriptores Temáticos	1
Resumen	2
Introducción	9

Capítulo I

Fundamentos Científicos y Tecnológicos de las Puestas a Tierra

1.1 Consideraciones Generales	13
1.2 Fundamentos Científicos y Tecnológicos de la Puestas a Tierra	15
1.3 Resistividad de las rocas	25
1.4 Minerales formadores de rocas	31
1.5 Proceso de formación de las rocas	34
1.6 Enfoque macroscópico de los suelos	38
1.7 Integrantes físicos y naturales del suelo	40
1.8 Campos de acción de la Geoelectrica	46
1.9 Aspectos fisicoquímicos de los suelos	51

Capítulo II

Proceso Físico de la Distribución de Corrientes en el Suelo y Medición de las Resistividades

2.1 Proceso físico de la distribución de la corriente	57
2.1.1 Toma de tierra elemental	57
2.1.2 Distribución de corriente	60
2.1.3 Tensión de paso	61

2.1.4 Tensión de contacto	63
2.1.5 Aspectos geoelectrónicos	65
2.1.6 Corrientes	66
2.1.7 Corrientes por el cuerpo humano	66
2.1.8 Efectos de la corriente sobre el cuerpo humano	67
2.1.9 Corriente máxima admisible por el cuerpo humano	68
2.1.10 Cálculo de las corrientes por el cuerpo humano	68
2.2 Medición de resistividad	69
2.2.1 Electrodo de toma a tierra	73
2.2.2 Factores de los que depende la resistividad del suelo	74
2.2.3 Resistividad de diferentes tipos de suelo	75
2.3 Objetivos de las mediciones de resistividad	76
2.3.1 Medición de la resistividad de los suelos	76
2.3.2 Inhomogeneidad de los terrenos	77
2.4 Medición de la resistividad – Método de los 4 electrodos	77
2.4.1 Medición de terrenos inhomogeneos	79
2.5 Método de Wenner	80
2.5.1 Configuración de Wenner	80
2.5.2 Método e Wenner – Otro enfoque	81
2.5.3 Parámetro de diseño con medidas Wenner	85
2.5.4 Ventajas de la configuración Wenner	85
2.6 Método de Schlumberger	86
2.6.1 Configuración de Schlumberger	86
2.6.2 Ejemplo de aplicación del método de Schlumberger	88
2.6.3 Ventajas de la configuración de Schlumberger	91

Capítulo III

Sistemas de Puestas a Tierra

3.1 Terminología	92
3.2 Tipos de electrodos	99
3.2.1 Ejemplo de la canalización del agua	99
3.2.2 Casos no recomendables para mediciones	100
3.2.3 Precauciones para una buena medición	101

3.2.4 Tipo de electrodos	101
3.2.4.1 Electrodo verticales o jabalinas	101
3.2.4.2 Electrodo horizontales o contrapesos	103
3.2.5 Dimensionamiento de sistemas de aterramiento compuesto por astas verticales	108
3.2.6 Aumento del diámetro de las astas	108
3.2.7 Aumento de la longitud de penetración de las astas	109
3.2.8 Interligazón de astas en paralelo	110
3.3 Astas formando figuras geométricas	113
3.4 Electrodo paralelos	116
3.5 Electrodo en forma de L	116
3.6 Electrodo en forma de cruz o en forma de cuadrado (perímetro)	117
3.7 Comparación de la resistencia de electrodo en varias formas	118
3.8 Elementos que influyen en la resistividad del terreno	122
3.8.1 Naturaleza del terreno	123
3.8.1.1 Resistividad de los medios heterogéneos	126
3.8.2 Humedad del terreno	129
3.8.3 Temperatura del terreno	131
3.8.4 Salinidad del terreno	132
3.8.5 Estratigrafía del terreno	133
3.8.6 Variaciones estacionales	135
3.8.7 Factores de naturaleza eléctrica	136
3.8.8 Compactación del terreno alrededor de los electrodo	136
3.8.8.1 El aumento del número de electrodo en paralelo	137
3.8.8.2 El aumento de la longitud y el diámetro de los electrodo	138
3.8.8.3 El aumento de la distancia entre ejes de los electrodo	139
3.9 Tratamiento químico del suelo	142
3.9.1 Tipos de tratamiento químico	143
3.9.2 Características principales de los tratamientos químicos	143
3.9.3 Cloruro de sodio + carbón vegetal	143
3.9.4 Bentonita	144
3.9.5 Thor-Gel (R)	144

3.10 Tipos de puestas a tierra	146
3.11 Sistema de puesta a tierra por área de instalación	146
3.11.1 Puestas a tierra formales	146
3.11.2 Puestas a tierra puntuales	147
3.11.3 Puestas a tierra de pequeña cobertura	148
3.11.4 Puestas a tierra de gran cobertura	149
3.12 Sistemas de puesta a tierra por ubicación	150
3.12.1 Toma de tierra de barra	151
3.12.2 Toma de tierra superficial	151
3.12.3 Combinación de tomas de tierra	152
3.13 Sistemas de puesta a tierra por función	153
3.13.1 Puesta a tierra para protección	153
3.13.2 Puesta a tierra para funcionamiento	153
3.13.3 Puesta a tierra para trabajo	153

Capítulo IV

Seguridad de Centros de Cómputo

4.1 Usos y aplicaciones genéricas de la electricidad	156
4.2 Riesgos de la electricidad	161
4.2.1 Tensión de contacto	164
4.2.2 Tensión de paso	164
4.2.3 Incendios de origen eléctrico	166
4.2.4 Choques eléctricos	168
4.2.5 Descargas electrostáticas	172
4.2.5.1 Serie triboeléctrica	174
4.2.5.2 Humedad relativa para controlar descargas electrostáticas	175
4.2.6 Tormentas eléctricas	177
4.2.6.1 Causa de los fuegos	178
4.3 El ambiente eléctrico en centros de cómputo	180
4.4 Riesgos en el ser humano por acción de los parámetros eléctricos	185
4.4.1 Valor de la intensidad de la corriente eléctrica	186
4.4.2 El valor de la tensión o voltaje	191

4.4.3	Influencia de la resistencia ohmica en el organismo	192
4.4.4	Tiempo de paso de la corriente	196
4.4.5	Factores fisiológicos de la corriente eléctrica	198
4.5	Prevención de accidentes eléctricos	202
4.5.1	Análisis de los daños de origen eléctrico	203
4.5.2	Análisis de fallas y accidentes	207
4.5.2.1	Análisis del árbol de fallas	208
4.5.3	Aspectos gráficos de las intensidades de defectos en el ser humano	210
4.5.4	Estructura de la prevención de accidentes eléctricos en el ser humano	216
4.5.4.1	Operatividad de los interruptores de circuitos por fallas a tierra	219
4.5.4.2	Circuito interruptor de detección por inmersión (IDCI)	223
4.6	Conexiones a tierra	225
4.6.1	Características de las puestas a tierra formales	227
4.6.2	Conexión a tierra para la operación confiable de computadoras	228
4.6.3	Especificaciones para la unión del sistema	230
4.6.4	Confiabilidad de diseño – Normal UL 149	233
4.7	Reglas generales de seguridad	234
4.7.1	Dispositivos eléctricos para un centro de cómputo	240
4.7.2	Dispositivos de seguridad	240
4.7.3	Tableros de distribución	241
4.7.3.1	Principios de funcionamiento	242
4.7.4	Sistema de seguridad y prevención de incendio	243
4.7.5	Protectores contra descargas eléctricas	244
4.7.6	Sistema de protección frente a descargas atmosféricas	245
4.8	Fallas a tierra en las instalaciones	251
4.8.1	Fallas a tierra	251
4.8.2	Tipos de falla	252
4.8.3	Fallas de sistemas conectados a tierra	255
4.8.4	Detectores de corrientes de falla	259

4.8.5 Limitación de las sobretensiones oscilatorias	260
4.8.6 Forma de detectar un sistema incorrecto neutro-tierra	261
4.8.7 Impedancia de fallas a gran distancia, en comparación con la resistencia de conexión a tierra	264
4.8.8 Impedancia de fallas a corta distancia, en comparación con la resistencia de conexión a tierra	265

Capítulo V

Cálculo, Diseño de la Estratificación de Suelos y Costos de una Puesta a Tierra

5.1 Introducción	267
5.2 Medición por el método de Wenner	267
5.3 Cuidados en la medición	269
5.4 Confiabilidad de las mediciones	271
5.5 Evaluación de mediciones de campo	272
5.6 Modelamiento de la estratificación del suelo en capas	275
5.7 Cálculo en un suelo de dos estratos	279
5.8 Método de dos capas usando curvas	283
5.8.1 Desarrollo conceptual del método de dos estratos	286
5.8.2 Aplicación práctica del método gráfico de dos estratos	288
5.9 Método simplificado para una estratificación de suelos en dos capas	292
5.9.1 Aplicación práctica del método gráfico simplificado de dos estratos	295
5.9.2 Método de Tagg: Estratificación del suelo en dos capas	297
5.10 Método de estratificación del suelo en varias capas	300
5.11 Medios estratificados y nomenclatura	302
5.12 Interpretación de las curvas de campo	313
5.13 Ejemplo teórico de interpretación de curvas de campo	320
5.14 Método gráfico de Yokogawa	330
5.15 Análisis de sensibilidad de resistividades en diversos tipos de terrenos	338
5.15.1 Generalidades	338
5.15.2 Cálculo de resistividades	340

5.15.3 Cuadro resumen de evaluación de resistividades	352
5.15.4 Reducción de resistencias por tratamiento químico de terreno con dosis de producto Thor-Gel.	353
5.16 Esquema de cálculo para una red de 200 computadoras	354
5.17 Metodología de desarrollo para un Sistema de Puesta a Tierra en un Centro de Cómputo	357
5.18 Costos y Metrado	359
5.18.1 Lista de requerimientos	359
5.18.2 Presupuesto aproximado	360
5.18.3 Participación económica de las sales químicas en el costo	362

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones	365
6.2 Recomendaciones	370
Bibliografía	374
Anexos	379

DESCRIPTORES TEMÁTICOS

- Tipos de Suelos
- Estratificación de los Suelos
- Tipos de Electrodo
- Conducción Iónica
- Métodos de Cálculo de Resistividades
- Diseños de Puestas a Tierra
- Efectos Fisiológicos de la Corriente Eléctrica
- Prevención de Accidentes Eléctricos
- Seguridad e Higiene en el Trabajo
- Costos de un Sistema de Puesta a Tierra.

RESUMEN

Las instalaciones, equipos y sistemas actuales que se emplean en los Centros de Cómputo incorporan cada vez mayor cantidad de elementos y dispositivos electrónicos de muy alta densidad y gran escala; lineales, digitales, microprocesadores, microcontroladores, etc., y en cualquier aplicación final, ya sea: Industrial, médica, bancaria, transporte, de telecomunicaciones, navegación, redes de computadoras, en la Domótica (Equipamiento inteligente doméstico o del hogar), etc.

Es necesario tener presente que, la tecnología electrónica y la minituarización de los circuitos en nuestros días tiene un avance incontenible, son cada vez más sofisticados los equipos que brindan mayores prestaciones inteligentes a la sociedad pero; presentan también algunas debilidades entre las que podemos contar con la sensibilidad a los cambios bruscos de las condiciones de operación esto es, a las fluctuaciones en la alimentación eléctrica o a los fenómenos eléctricos transitorios que se presentan o inducen en las líneas físicas a las cuales están conectadas estos circuitos.

Está demostrado que estos fenómenos son muy perjudiciales para su funcionamiento, ya que paralelamente a las redes tradicionales de alimentación coexisten en el espectro electromagnético: Redes electrónicas, telefonía, data, fuerza, telecomunicaciones, etc., que se relacionan unas a otras.

Tal vez no exista usuario de un equipo o sistema de cómputo, que no haya pasado por la decepcionante experiencia de comprobar que el trabajo de muchas horas, se ha perdido en algunos casos en fracciones de segundo, como producto de una fluctuación o sencillamente de un corte de

energía eléctrica o, por la aparición súbita de corrientes electrostáticas o por acción de las mismas que pudieran estar acumuladas en las cubiertas metálicas de los equipos.

Las redes de Data de un Centro de Cómputo, o de alimentación, o de transferencia de información en equipos sofisticados actuales y que, son de uso generalizado, están de una u otra manera siendo influenciados por ciertas anomalías, en particular; las redes de Area Local (LAN) que han alcanzado una gran difusión por numerosas razones, la principal de ellas radica en el hecho de que la mayoría de las empresas u organizaciones transmiten más del 80% - 90% de sus datos e información de forma local, esto es; dentro del ámbito de sus edificios. Entre las principales anomalías que suelen presentarse, podemos mencionar: la Caída de Voltaje o Fluctuación, la cual es una reducción momentánea del voltaje de línea; el Sobrevoltaje, el cual es inverso a la caída de tensión; el Ruido Eléctrico, que es una interferencia de alta frecuencia en la línea, que puede manifestarse de dos formas: Ruido Transversal (Normal) que siempre está presente en un par de conductores activos (Fases y Neutro) y, el Ruido Común que, generalmente se deriva de la Inducción Electrostática, es decir cuando las líneas pasan por medios eléctricos ruidosos.

Este entorno local de flujo de datos, requiere de un sistema de transmisión de datos entre los dispositivos de la organización que necesita de un obligatorio régimen estable de alimentación por lo que la operación con falla de estas unidades provocan situaciones no deseables, costosas y, peligrosas.

El desarrollo de una vasta experiencia en el desempeño de varias decenas de aplicaciones en este interesante quehacer, nos impulsó a tratar de indagar por el correcto diseño de la ejecución de los trabajos en el campo de la Protección de Redes de Comunicación o Data en Centros de Cómputo; motivo por el cual consideramos que este aporte va a coadyuvar a visualizar la correcta interpretación de los fenómenos que ocurren al momento de la disipación de estas corrientes de fuga o erráticas y, por lo tanto de la adecuada protección a la inversión realizada.

La Tierra, tiene una habilidad única para absorber los electrones de la corriente eléctrica. Si se produce un corto circuito o una sobrecarga, cualquier exceso de electricidad encontrará un camino en la conexión de los dispositivos de tierra hasta la tierra previamente diseñada, donde ya resultará inofensivo este suceso. Asimismo, la tierra tiene una gran capacidad de absorción del ruido eléctrico.

Por consiguiente, la ciencia de la Ingeniería de Puesta a Tierra - acepción que ha valido ser considerada como desarrollo de texto de la especialidad -, que se ocupa del eficiente, seguro y económico traspaso de corrientes eléctricas de diversa naturaleza hacia la tierra, en las variadas instalaciones industriales, electrotécnicas y, de cómputo, para su adecuada performance y protección; constituye todo un reto para los Ingenieros Industriales y de Sistemas quienes en el ejercicio de su desarrollo profesional estarán de una u otra manera involucrados con esta atrayente realidad, por lo que la contribución del desarrollo de esta temática tiene como objetivos los siguientes:

Conceptuar que la naturaleza del fenómeno de aceptación de corrientes eléctricas por parte de los suelos, es de naturaleza fisico-química y es mediante el mecanismo de conducción electrolítica o iónica (ó disociación electrolítica o iónica) que los suelos mezclados con sales electrolíticas y humedad, generan las condiciones para aceptar y neutralizar las corrientes derivadas hacia tierra.

Precisar criterios que eliminen la característica de informalidad y empirismo y hacer de éste tema uno de carácter técnico, científico y académico, que coadyuve a ejecutar obras y servicios de calidad en los Centros de Cómputo requiriendo de procesos ajustados a estándares actualizados y vigentes con base y sustento de ingeniería.

Desarrollar nuevos conocimientos, para dominar la supervisión de trabajos serios de calidad incorporando al perfil del ingeniero de nuestra facultad, conocimientos adicionales en el campo de la Seguridad e Higiene Industrial, debido a que cumple el potencial del especialista en esta rama del conocimiento.

Presentar una temática metodológicamente la cual ha sido elaborada en base a la experiencia, estudios, capacitación, investigación y compilación de textos multidisciplinarios afines al tema, por lo que le dan tal característica esencial; aquí contribuyen temas de la Geofísica Aplicada, Geología Física, Geoelectricidad, Química de los Suelos, Matemática Aplicada, Electricidad, Seguridad e Higiene Industrial, Química General, etc.

Para el desarrollo del tema, se ha creído conveniente separarlo en 5 capítulos principales; se incluyen también el capítulo de Conclusiones y Recomendaciones. Se ha considerado además un acápite de Anexos que amplían aún más el tema y finalmente se detalla la Bibliografía empleada.

En el Capítulo I se tocan aspectos de los Fundamentos Científicos y Tecnológicos de la Puesta a Tierra; con el fin de auscultar la naturaleza de los fenómenos que se presentan en los medios donde ocurrirán las disipaciones de energía, como son, las rocas y los suelos en la corteza terrestre; se han desarrollado tópicos que tienen sus orígenes en aplicaciones de los profesionales en Minas y Geología, para la búsqueda de minerales no magnéticos, y combinándose el análisis matemático con temas de la Geología y otros campos de la ciencia, desembocamos en la Geofísica y sus aplicaciones posteriores, con la búsqueda de hidrocarburos como el petróleo y gas natural, lo cual ha devenido históricamente en la Geofísica Aplicada; así como el hallazgo de aguas subterráneas topándonos con la Hidrología, la Hidrogeología y la Agronomía.

En el Capítulo II apreciaremos en detalle el Proceso Físico de la distribución de las corrientes en el suelo con la teoría principal del método de las imágenes desarrolladas por J.J.Thompson. En cuanto a la medición de la Resistividad, creemos conveniente mencionar que, en un proceso de ejecución de protección de redes de cómputo y comunicaciones, normalmente la parte interesada o propietaria de la infraestructura no efectúa esta evaluación o no la solicita a los especialistas; procediendo el contratista únicamente al cavado de un número determinado de pozos en tierra para atender esta solicitud, procediendo así de una manera empírica.

La existencia de esta práctica, que no necesariamente es la mejor alternativa para enfrentar estos problemas, fue lo que motivó a realizar sendos estudios para entender la naturaleza de la Puesta a Tierra y decidir lo que normalmente se debe ejecutar para resolver técnicamente esta problemática; es decir, considerar dentro de los costos, la evaluación de la resistividad de los terrenos por donde va a operar la protección, la cual necesariamente reposará en el área del jardín preferentemente por sus cualidades de humedad constante, que es el medio óptimo donde se deberán descargar o dispersar las corrientes de fuga y propender a ejecutar un diseño que perdure en el tiempo.

Normalmente lo que se hace es evaluar otro parámetro que nos permite tener una idea preliminar de las características de un terreno que es la resistencia; ya que en muchas oportunidades el local a proteger está ubicado geográficamente fuera de la circunscripción de su sede central administrativa, que es la que otorga la ejecución de estas áreas; por lo que para tener una idea de un valor de medida de 700 a 800 Ohmios, es un numeral de resistencia preliminar que es indicador de un terreno más o menos serio o resistente para trabajarlo. En la práctica, partir de una suposición de la resistividad de un terreno cualquiera es de 300 Ohmios x mts. en promedio es un estimado no muy lejano a la realidad para el caso de aplicaciones pequeñas o medianas, que son las que mayormente se ejecutan en zonas de jardines o áreas de cultivo (el error que se puede incurrir es de un 20 a 25% aproximadamente).

Para instalaciones en cerros estamos hablando de valores de 7000 a 9000 Ohmios x mts. de resistividad valores severamente altos más o menos donde ya se justifica otro tipo de desarrollo, por la naturaleza del terreno, que es de característica rocosa severa. La resistividad de un suelo o una roca, es en realidad una medida del agua en sus poros y del contenido en minerales de dicha agua. Si el agua es prácticamente pura no es conductora, llega a serlo cuando contiene, como ocurre casi siempre, sales solubles parcialmente disociadas en iones. Desde el punto de vista de la Conductibilidad de la electricidad, se puede pues considerar, que las rocas están formadas por granos aislados, que pueden estar recubiertos por agua más o menos mineralizada, poseyendo en grado variable las propiedades de un electrolito.

La resistividad es pues, función de tres factores: la porosidad de la roca, su grado de saturación y la salinización del agua; por lo que su medida puede servir para determinar la profundidad de la superficie de saturación. Es interesante por tanto conocer los métodos de Wenner y de Schlumberger entre otros métodos para evaluar las resistividades y, serán descritas sus características principales así como una metodología para hallar los estratos y sus espesores, pudiendo identificar el estrato mas apropiado donde proceder a ubicar la protección del sistema que se pretende ejecutar.

En el Capítulo III, daremos a conocer una serie de vocablos y terminología propia del tema, así como, la presentación de formulaciones que, de acuerdo a la disposición y tipo de electrodo metálico a emplear, es factible evaluar y tener en cuenta para enfrentar una solución a un problema específico. Es necesario conocer alternativas para mejorar la resistividad de un terreno, mediante el empleo de tratamientos químicos así como conocer conceptualmente otras variables, que pudieran aplicarse si se tuviera que enfrentar a un terreno de naturaleza complicada.

En el Capítulo IV, se comprenderá cómo el componente eléctrico con sus distintos parámetros, ejercen influencia en la naturaleza humana y cómo debemos enfrentarlos, a fin de no alcanzar valores que puedan ser perjudiciales a las personas que, de una u otra manera, puedan ser afectadas; criterios que permitirán que los individuos desarrollen sus labores dentro de estas actividades con el cuidado necesario para evitar accidentes.

En el Capítulo V, presentamos el Cálculo para la Estratificación de los Suelos, las mediciones confiables y la interpretación por Métodos Gráficos para el caso general de dos y más estratos; así como la Estructura de Costos y el Metrado correspondiente a las actividades que se ejecutan en el desarrollo de un Sistema de Puesta a Tierra, técnicamente establecido.

Después se consigna en el Capítulo VI todo lo relacionado a las Conclusiones y Recomendaciones. Este desarrollo temático constituye un serio aporte, que sin temor a equivocarnos, permitirá visualizar cómo estas tecnologías actuales podrán

ser encaradas y empleadas en lo que a protección se refiere, para las instalaciones de cómputo de cualquier envergadura; además pretende ser una llama que fomente en nuestra facultad, la implementación de cierta cultura técnica, relacionada con la protección de los usos de la energía eléctrica sobre todo en aplicaciones “inteligentes” las cuales están muy en boga.

Incluimos un acápite de Anexos mostrando la Evolución Histórica de los Métodos Geoléctricos, que comprende desde la Época Primitiva, pasando por la Clásica hasta la Contemporánea.

La evolución histórica nos ilustra el desarrollo de las escuelas Francesa y Rusa, que siguen siendo las más rigurosas, las cuales han hecho grandes esfuerzos académicos y de investigación desde la década del 30 así como, la escuela Sueca y la Americana; esta última prácticamente ha efectuado grandes esfuerzos a partir de la década del 60 del siglo pasado.

La escuela Alemana, con los aportes del investigador Franz Ollendorf han contribuido notablemente a la sistematización de esta ciencia y, consideramos oportuno incluirla dentro del grupo de la escuela europea Franco-Soviética, las que siempre han sido las más exigentes y de gran desarrollo teórico.

INTRODUCCION

El reciente desarrollo de Hardware electrónico basado en microprocesadores, ha estimulado el desarrollo de la formación de un apropiado equipamiento de Protección de Alimentación de Energía Eléctrica, diseñada para asegurar una adecuada operación de los microprocesadores

Sofisticados sistemas tales como Procesadores de Datos y microcomputadores, requieren que la energía eléctrica sea confiablemente estable y relativamente libre de interferencia y ruido eléctrico. Con la introducción del microprocesador se da una proliferación de los dispositivos digitales, y pocos elementos existen que no estén controlados por estos cerebros que han adquirido la categoría de “ equipos electrónicos sensibles “.

El ruido eléctrico, en sus diferentes formas, puede afectar negativamente a cualquier producto o equipo que incorpore una circuitería electrónica. Su capacidad potencial para ocasionar daños o disfunciones es hoy en día creciente; debido a que los circuitos electrónicos incorporados en los equipamientos de un Centro de Cómputo son cada vez más y más complejos.

Los ordenadores actuales y sistemas basados en microprocesadores trabajan a mayores velocidades y aportan más características en un tamaño y peso muy reducido, fruto del uso de complejos componentes de estado sólido, que son intrínsecamente susceptibles a sufrir daños y alteraciones por ruido eléctrico.

Esta tendencia actual hacia la incorporación de un mayor número de características, en un espacio más pequeño, ha contribuido en si misma a

incrementar el problema del ruido y, ha conducido al desarrollo de circuitos digitales con muy altas frecuencias de conmutación, que pueden erigirse lo mismo en fuente de ruido eléctrico que en objeto susceptible al mismo.

También, por supuesto, tenemos las fuentes convencionales de ruido, como la apertura y cierre de relés, contactores, interruptores automáticos, circuitos basados en semiconductores de potencia (SCR) como controladores de fase, emisión de radiofrecuencia, sobretensiones atmosféricas, y un amplio abanico de otras perturbaciones .

La calidad de la energía eléctrica suministrada a los equipos electrónicos sensibles es por tanto, crítica para un funcionamiento fiable de los mismos. Entre los métodos de Protección contra los problemas de la Energía Eléctrica de uso comercial se encuentran: el Sistema de Puesta a Tierra o Sistema Dispersor de las Corrientes de Falla o de Sobrecorrientes, Líneas dedicadas con alimentadores independientes desde el Tablero de Distribución, los transformadores de Aislamiento, los Reguladores de Voltaje, los Acondicionadores de Línea, los Grupos Electrónicos, los UPS, etc, . Estos sistemas de protección difieren en su costo y en el grado de Protección que ofrecen.

El control de los riesgos que originan el uso de la electricidad no es difícil ni costoso, en comparación a la inversión en equipos; requiere decisión y un poco de conocimiento de los que participan en su generación, distribución, uso y/o protección.

El tratamiento de las Puestas a Tierra de las instalaciones eléctricas de Centros de Cómputo y, actualmente de las instalaciones eléctricas modernas, constituyen un elemento importante y primordial para la protección de la vida humana, de los equipos e instalaciones; y, con frecuencia han supuesto un reto para su solución dado que son elementos de interacción de las instalaciones con algo tan variable y muchas veces impredecibles como es la propia naturaleza, por lo que constituye el elemento central de la presente tesis.

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

El conocimiento y dominio de esta rama profesional son necesarios no sólo para ingenieros en Electrotécnica quienes ejercen el ámbito de la técnica de la energía y potencia eléctrica, sino; también para los profesionales que se desarrollan en el ámbito de las comunicaciones electrónicas de cómputo y de la protección de la maquinaria industrial de última generación; de la geofísica, de la hidrogeología en la búsqueda de aguas subterráneas, de la arqueología, etc., considerando la importancia que tiene el “proceso de propagación de las corrientes eléctricas” en los suelos; ya sea de manera deseable o no.

La problemática de la Puesta a Tierra no es nueva, pero es evidente la escasez de Información válida fundamental y coherente sobre ella; ya que a nivel internacional se puede encontrar sólo unos cuantos libros que la tratan de tal forma, a pesar de que no es ya una situación agotada como se desprende del interés en los Congresos y Eventos contemporáneos.

El progreso industrial, económico y social no se detiene por lo tanto, los ingenieros tendrán que seguir enfrentando problemas interesantes y/o nuevos relacionados con la Puesta a Tierra.

El problema de la escasez de información es más agudo en particular para estudiantes, profesores y profesionales de Ingeniería de ramas afines a la eléctrica; así como para ingenieros de la práctica general que se desempeñan en instituciones que cuentan con amplio equipamiento sofisticado de última generación y; en grandes instalaciones industriales y administrativas modernas (“ Edificios Inteligentes ”), donde el requerimiento de

respetar por parte del fabricante / proveedor; las garantías de buen funcionamiento de los equipos suministrados, necesita del empleo de estas técnicas básicas de protección, para dar cobertura a los siniestros que se pueden dar por mala performance de los equipos proveídos por los fabricantes o sus distribuidores.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DE LAS PUESTAS A TIERRA

1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En los Sistemas electrotécnicos, la manera usual de traspasar las corrientes al suelo es por medio de los llamados electrodos (artificiales o naturales), que son elementos metálicos que, por lo tanto, poseen una conductividad muy alta en comparación con la del terreno ; los cuales pueden adoptar diferentes formas geométricas tales como : esfera , semiesfera , pica o jabalina , banda (o conductor cilíndrico) , anillo , placa (circular o elíptica) , pueden actuar de manera individual (electrodos elementales) o bien , en conexión paralela (electrodos múltiples) , tanto con electrodos de un mismo tipo o con la combinación de electrodos de varios tipos.

Para la Ingeniería de Puestas a Tierra, lo esencial es indagar el comportamiento (eléctrico, magnético y térmico) de electrodos, de las diversas formas geométricas en terrenos con diversas condiciones geoelectricas, geotécnicas y / o fisiográficas al traspasar a ella por medio de aquellas corrientes de diferente naturaleza (estacionaria , casi estacionaria etc.) así como también , todos los efectos derivados de tal hecho ; como por ejemplo campos de corriente , calentamiento , potenciales , gradientes de potencial , corrientes de cuerpo peligrosas (tanto de personas como de animales útiles) , voltaje de contacto y de paso , potencia eléctrica y zonas peligrosas dentro y fuera (en las proximidades) del ámbito de los electrodos.

La Ingeniería de Puesta a Tierra es una tecnología de la acción dentro del ámbito de la Electrotecnia; sin embargo, como toda tecnología de la acción, esta constituida con base en un cuerpo científico muy sólido sobre el cual se levanta su edificio tecnológico, estructurado con conocimientos tecnológicos sustantivos; así como, con sus reglas tecnológicas.

El cuerpo de conocimientos científicos comprende elementos de disciplinas que caen dentro del dominio de las llamadas Ciencias de la Tierra y, precisamente en la Geotecnia; donde los desarrollos efectuados por la Geología en sus ramas Geofísicas y Geoquímicas han contribuido a generar metodologías de análisis; para identificar la problemática de las corrientes de dispersión. La Geofísica Aplicada es la que participa con mayor peso en algunas de sus disciplinas, como por ejemplo: El Geomagnetismo, la Geoelectrónica y la Electricidad Atmosférica. De particular interés para la Ingeniería de Puesta a Tierra son: la Geoelectrónica y la Electricidad Atmosférica.

La Geoelectrónica, se ocupa del estudio de todo lo relacionado con la circulación de la electricidad dentro de la tierra, llamadas también "Corrientes Telúricas"; ya sean estas naturales o artificiales y, de los fenómenos eléctricos y magnéticos, involucrados que se verifican dentro de la tierra y, de sus posibles efectos.

Las corrientes a tierra de especial interés, pueden orientarse hacia diferentes campos tecnológicos, como por ejemplo hacia la Electrotecnia (tanto de corrientes intensas como de las débiles), hacia la Exploración Eléctrica (Prospección Eléctrica) entre otras posibles.

La Geoelectrónica es una disciplina científica profunda y densa, pues incluye elementos de diversas ciencias tales como: la Geotecnia (Ciencia aplicada que se ocupa de las propiedades físicas de los materiales que se encuentran en los terrenos en que, los ingenieros realizan sus construcciones ya sean civiles o electromecánicas) cuyas ramas comprenden a: la Geología Aplicada, Geofísica Aplicada, Geoquímica, Matemáticas

Aplicadas y ; aspectos de la Electrotécnica, en los que interviene la Tierra.

Es una teoría representacional, formulada matemáticamente por lo que se beneficia de la limpieza y el poder deductivo de la matemática levantada con base en la física y en la química del globo terráqueo y , estructurada racionalmente gracias a la lógica y , al formalismo matemático ; basta decir que su análisis riguroso y detallado , involucra el manejo de alrededor de dos mil funciones físico–matemáticas de alto nivel , siendo capaz de describir todos los fenómenos que se suceden en el seno de la tierra cuando circulan a través de ella, corrientes estacionarias, casi estacionarias, de alta frecuencia y , transitoria de impulso.

Es evidente que no es factible abordar el estudio de la Geoelectrica con todo rigor y detalle aquí , ya que las expresiones finales no serán en general ; fáciles de aplicar y , no son generalmente , las más apropiadas para la satisfacción de la ingeniería: La utilización de fórmulas de alta eficiencia ; es decir , fórmulas que ofrezcan mucho , exigiendo poco ; por lo que su uso no resultaría eficiente ni económico y , no siendo también , la intención del desarrollo del presente tema , pero que es importante dar una concepción generalizada o marco ; de esta filosofía del quehacer científico , pero si ; tener presente que el desarrollo de la tesis ; involucra los conceptos de la Exploración Eléctrica (ó Prospección Eléctrica ó Electro - exploración ó Ingeniería de Puestas a Tierra) ya que , es uno de los métodos geofísicos principales, aplicados para el estudio de la estructura geológica de la parte superior de la corteza terrestre.

1.2 FUNDAMENTOS CIENTIFICOS Y TECNOLÓGICOS DE LAS PUESTAS A TIERRA.

En principio , la circulación de la corriente eléctrica a través de la tierra es posible gracias a su Conductividad Natural “ γ ” la cual se puede representar por una magnitud escalar, que bien se le puede considerar como un índice de la facilidad del transporte de electricidad.

En la normalización de unidades internacionales se usan los símbolos γ (Gamma) y κ (Kappa) para la Conductibilidad Eléctrica (o Conductividad Eléctrica) y sus unidades son Siemens por metro (S / m) o bien Siemens por centímetro (S / cm); $1 \text{ S / m} = 100 \text{ S / cm}$. En la práctica, generalmente, la conductividad se expresa por el valor de su inversa que es la Resistencia Eléctrica específica o Resistividad; que se denota con la letra griega Rho (ρ).

La Resistividad Eléctrica (ρ) de cualquier sustancia, se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de dicha sustancia, tomada en forma de cubo; a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas del cubo; ella se mide en $\Omega \cdot \text{m}$ ó en $\Omega \cdot \text{cm}$ ($1 \Omega \cdot \text{m} = 100 \Omega \cdot \text{cm}$) muy usada en Exploración Eléctrica, por ser una unidad mayor; pudiendo también utilizarse el Kilo Ohmio x m ($\text{K}\Omega \cdot \text{m}$) o el mili ohmio metro ($\text{m}\Omega \cdot \text{m}$). La resistividad es una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado.

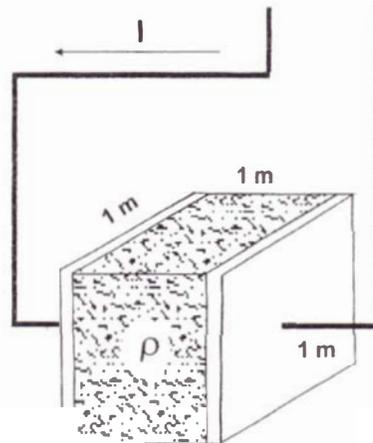


Fig. 1.1. Resistividad de un cubo de terreno de 1 m. de lado.

Los valores de Conductividad que puede alcanzar la tierra en los casos más favorables son de aproximadamente cinco mil millones de veces menor que la de los conductores metálicos; por ejemplo la conductividad del cobre en caliente es de 5×10^7 Siemens / mts, lo cual significa una diferencia con la

conductividad de un terreno considerado no mal conductor “ γ ” de 1×10^{-2} Siemens / mts.

La Conductividad “ γ ” de la tierra es de naturaleza macroscópica, ya que su magnitud depende de varios factores :

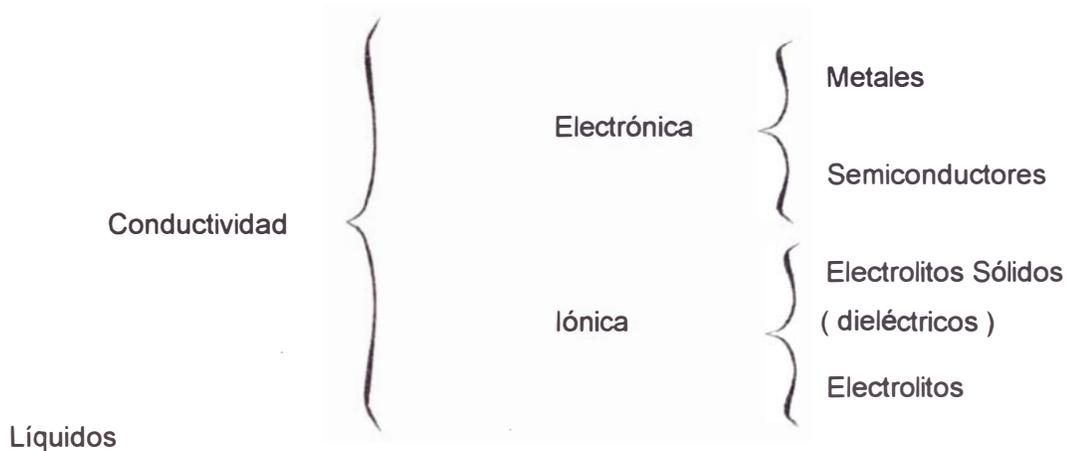
La clase de roca, sus propiedades físico-químicas y eléctricas, de su contenido de humedad y/o agua del medio, de la fisiografía (de los estratos topográficos) ; entre otros.

En consecuencia, la conductividad de la tierra puede variar entre límites muy amplios, aún tratándose de la misma naturaleza geológica y/o dentro de una zona delimitada de terreno. En cuanto a las propiedades eléctricas de las rocas, una cuestión fundamental es el proceso por el cual se realiza el transporte de la electricidad a través de ellas ; los mecanismos básicos son los siguientes

- 1.- Conducción Electrónica.
- 2.- Conducción Electrolítica
- 3.- Conducción Dieléctrica
- 4.- Permeabilidad Magnética

La Conducción Electrónica (Ohmica) es el mecanismo normal que se presenta en los materiales que contienen electrones libres, tales como los metales; los cuales se estudian ampliamente en la parte electrotécnica; es decir, se trasladan solamente los electrones, pasando de un átomo a otro sin que los átomos o moléculas cambien de posición.

Los cuerpos eléctricamente conductores lo son porque permiten el paso a través de ellos de los portadores de cargas eléctricas. Los cuerpos con Conductividad electrónica se clasifican a su vez en dos grupos: el de conductores propiamente dichos o metales y el de semiconductores; veamos el cuadro adjunto :



En los mecanismos de la Conductividad de los metales, puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse entre la red cristalina que estos forman sin vinculación a ninguno determinado.

Según esto, los metales están constituidos por una red regular de iones positivos, entre los cuales se mueve una especie de gas electrónico, que actúa como cemento del conjunto. La facilidad del movimiento de los electrones y el gran número de estos (del orden de 10^{22} por cm^3) redundan en una conductividad muy elevada; es más, según la mecánica cuántica, si la red iónica fuese perfectamente regular y, sus átomos inmóviles, la resistencia eléctrica del metal sería nula. Dicha resistencia aumenta pues, con la temperatura con el contenido de impurezas, y con la presencia de defectos y dislocaciones en la red.

La resistividad de los metales a temperatura normal, oscila entre 10^{-8} y 10^{-07} Ω - m. Son pocos y escasos los componentes de la corteza terrestre que poseen conductividad metálica, entre ellos se encuentran los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño) y quizá algún mineral poco abundante, como la Ullmanita (Ni Sb S)

En la Conducción Electrolítica (ó Disociación Electrolítica), el transporte de electricidad se realiza por medio de la "conducción iónica" por moléculas o átomos que tienen un exceso o una deficiencia de electrones en estado disuelto,

ello se debe a que la sal o ácido disuelto se disocia, dando origen a iones portadores de carga eléctrica positiva o negativa; puesto que en general, las rocas son malas conductoras de la electricidad, sus resistividades deberían ser en principio, muy elevadas; pero que generalmente contienen poros que se llenan de líquidos, principalmente agua; no resulta siempre así, y su resistencia entonces, varía con la movilidad, concentración y grado de asociación de iones, lo cual finalmente depende de la Constante Dieléctrica de los solventes.

Como es sabido, los portadores de las corrientes eléctricas en las disoluciones acuosas son los cationes y aniones. Al aplicar un campo eléctrico, unos y otros se ponen en marcha según su signo hacia los respectivos electrodos. La velocidad de los iones es proporcional a la intensidad del campo eléctrico aplicado y, depende también de la temperatura, la concentración y el tamaño del ión. Se llama Movilidad de un ión a la velocidad constante que adquiere en un campo eléctrico unidad. Si se mide la velocidad en m/s y el campo en V/m , la movilidad se expresará en $m^2/V \times S$ (metros cuadrados / voltios x segundos).

La resistividad de un electrolito será la resistencia eléctrica presentada por un volumen de electrolito de forma cúbica y un metro de lado, cuando se establece una diferencia de potencial unidad entre dos caras opuestas . Si esta d. d. p. fuese un voltio, la intensidad obtenida será numéricamente, la inversa de la resistividad como la longitud del conductor es de un metro, cada segundo llegará a uno de los electrodos; un número de iones igual al total de estos multiplicado por su velocidad, que en este caso será igual a la movilidad; pues el campo aplicado es igual a un V/m . El número de iones presentes se hallará multiplicando la concentración en equivalentes gramos por metro cúbico por el factor de disociación " α ", pues no todas las moléculas están disociadas.

La carga de cada equivalente gramo es $F = 96,487$ Coulombios (Faraday) ; por lo tanto, la intensidad de corriente medida en amperios será:

$$I = F . \alpha . c . m$$

m = movilidad de iones a la temperatura del experimento

Hasta aquí se ha considerado un sólo tipo de ion; como habrán de existir varios (al menos un catión y un anión) la intensidad debida a todos ellos será

$$I = F \sum \alpha_i c_i m_i$$

y la resistividad, en virtud de lo dicho al comienzo del párrafo vendrá dada por

$$\rho = \frac{1}{F \sum \alpha_i c_i m_i} \dots\dots\dots (1.1)$$

en ohm-m.

Para la aplicación de la fórmula (1,1), puede suponerse que $\alpha_i = 1$, siempre que se trate de Electrolitos fuertes que proporcionan disoluciones altamente conductoras (como el cloruro de sodio, ácido nítrico), como suele ocurrir. En tabla adjunta se indican los equivalentes químicos de los iones más corrientes.

ión	Equivalente Químico	Equivalente en Cl Na	Movilidad a 18 °C en m ² / V.s
K ⁺	39.10	—	6.55 x 10 E -08
Na ⁺	23.00	1.00	4.47 x 10 E -08
Ca ⁺⁺	20.04	0.95	4.62 x 10 E -08
Mg ⁺⁺	12.15	2.00	4.55 x 10 E -08
Cl ⁻	35.46	1.00	6.65 x 10 E -08
HCO ₃ ⁻⁻	61.02	0.27	3.95 x 10 E -08
CO ₃ ⁻⁻	30.00	1.27	6.07 x 10 E -08
SO ₄ ⁻⁻	48.03	0.50	6.95 x 10 E -08

Tabla 1.1 Movilidad y Equivalente Químico de los Iones más corrientes

Los iones más abundantes en las aguas naturales son el Cl⁻ y el Na⁺. En la figura 1.2 se representa en un gráfico logarítmico, la resistividad de las soluciones de Cl Na en función a su concentración en gr / lt a 18 °C de

temperatura. Frecuentemente se calcula la resistividad de las aguas, reduciendo las concentraciones de los diversos iones a la cantidad de equivalentes de Cl Na.

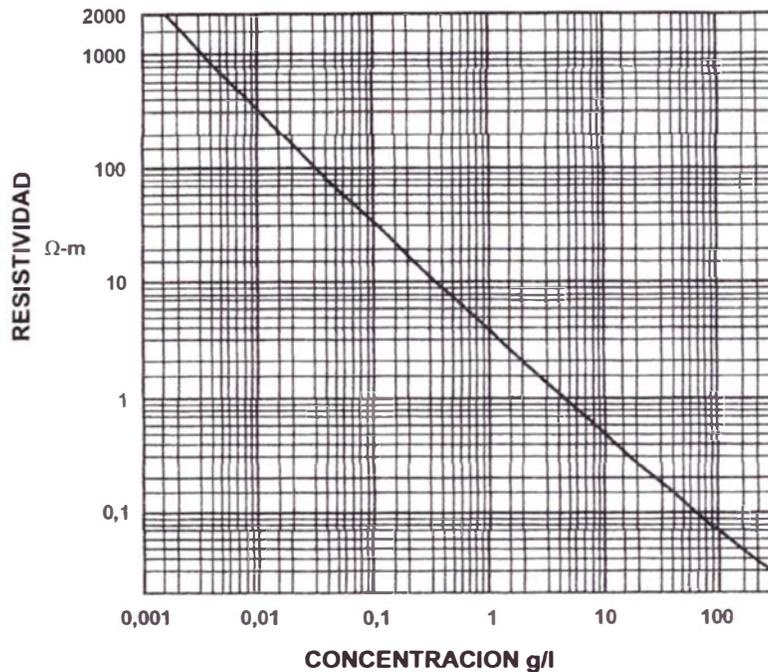


Fig.1.2 Resistividad de las disoluciones de Cl Na en función de su concentración en g /l, a 18°C. (Según Dakhnov.)

Hasta aquí se ha considerado la cuestión de determinar la resistividad de un electrolito de composición conocida. En la práctica, se presenta muchas veces el problema de medir dicha magnitud directamente sin análisis químico previo, esto puede realizarse por medio de un puente de conductividad o conductímetro que consiste en un puente de corriente alterna (puente de Kohlraush), cuya resistencia incógnita es la presentada por el electrolito situado entre dos electrodos fijos. El empleo de corriente alterna tiene por objeto eliminar la polarización de los electrodos, la cual falsearía las emisiones. Existen en el comercio, conductímetros de lectura directa de marcas Philips, Geotrón (española), etc.

En la Conducción Dieléctrica, el mecanismo de conducción – Corriente de Desplazamiento - tiene lugar en aisladores o pobres conductores cuando el campo eléctrico externo cambia en el tiempo. El parámetro significativo en la Conducción Dieléctrica es la constante "K" , $K (\epsilon r)$ que a veces se llama

también “Capacitancia Inductiva ” específica del medio.

Se denomina Constante Dieléctrica de cualquier sustancia, a un coeficiente igual a la relación entre la intensidad de un campo eléctrico en este material y la intensidad del campo en el vacío.

La constante dieléctrica, en la mayoría de los minerales constituyentes de las rocas, entre los cuales están todo el grupo de los silicatos oscila de 3 a 10 y raramente alcanza 25. La constante dieléctrica del agua es 81.

En los cuerpos dieléctricos o aisladores, los electrones están fuertemente ligados a los átomos, esto puede deberse a que existen enlaces covalentes en los que dos átomos comparten dos electrones, o enlaces iónicos; en los que un átomo cede al otro su electrón o electrones de valencia, quedando ambos con sus capas completas o como iones de signo opuesto. En este último caso, la red cristalina forma un electrolito sólido; la mayoría de minerales pertenecen a este grupo.

En este tipo de conducción, la corriente fluye muy lentamente en comparación con la Conducción Iónica y el movimiento representa un real transporte de material que, generalmente; resulta en una transformación química. En esta clase de mecanismos, la corriente de desplazamiento tiene lugar en aisladores o conductores pobres; cuando el campo eléctrico externo cambia con el tiempo, entonces bajo la influencia de la variación externa del campo, los electrones se desplazan ligeramente respecto a sus núcleos; esta relativamente ligera separación de cargas negativas y positivas, es conocida como Polarización Dieléctrica del material.

La Polarización Iónica y molecular puede ocurrir en materiales con liga iónica y molecular . En estos casos, la Conducción Dieléctrica es el resultado del cambio electrónico, iónico o molecular; causada por el campo eléctrico alternante. La Constante dieléctrica de rocas y minerales, es una medida de la polarización resultante de la aplicación de un campo eléctrico. Esta polarización puede ser electrónica, iónica o molecular. El primer tipo es

característico de todos los metales.

El desplazamiento iónico ocurre en muchas rocas formadas de minerales, mientras en el agua y los hidrocarburos son los únicos materiales comunes que muestran polarización molecular; debido a la relativamente lenta movilidad de los portadores de carga, la Polarización Molecular - el mayor de los tres efectos - y, la polarización iónica son insignificantes a muy altas frecuencias. La Constante Dieléctrica, la cual es proporcional al grado de polarización, varía inversamente proporcional con la frecuencia. Esto también es indicativo de la cantidad de agua presente; ya que el agua tiene una constante dieléctrica de 80 a bajas frecuencias.

Valores típicos de constante dieléctrica de algunas rocas son

Galena	= 18	Basalto	= 12
Ematita	= 25	Arena Compacta (Seca o húmeda)	= 3.9 a 29.4
Calcita	= 7.8 a 8.5	Suelo (seco ó Húmedo)	= 3.9 a 29.4
Yeso	= 5 a 11.5	Arenisca (Seca ó Húmeda)	= 4.7 a 12
Hielo	= 3.0 a 4.3	Petróleo	= 2.7 a 2.14
Berilio	= 5.5 a 7.8	Agua a 20 ° C	= 80.36
Feldespató	= 3 a 5.8	Gneiss	= 8.5
Cuarzo	= 4.2 a 5.5		

La mayoría de estas mediciones se han hecho a frecuencias de 100 Khz y más. Para muy bajas frecuencias, los valores podrían ser mayores en 30% aproximadamente.

A las temperaturas normales, los electrolitos sólidos presentan resistividades muy altas, generalmente superiores a $10^7 \Omega \cdot m$.

Otros minerales que se comportan como dieléctricos y, entre los más abundantes, tenemos:

Anhidrita
Azufre

Hornablenda
Limonita

Blenda	Micas
Cinabrio	Olivino
Estibina	Piroxeno
Feldespatoïdes	Sal gema
Fluorita	Silvina
Otras Sales	Otros Silicatos

Si bien las corrientes de desplazamiento son de importancia secundaria, en los materiales de la Tierra, deben tenerse siempre presentes.

La Permeabilidad Magnética es la relación entre la inducción magnética y la intensidad de campo magnética; es respecto al magnetismo, lo que la conductividad es respecto a la electricidad. Es una propiedad del material y así, cuando se emplean fuentes electromotrices (E M) el voltaje inducido en un conductor bajo la superficie varía, no solo en la relación del campo magnético, sino también con la permeabilidad magnética del conductor.

De la ecuación de Maxwell

$$\nabla \times E = -\mu \partial H / \partial t$$

se desprende que las Corrientes Inducidas en la tierra son multiplicadas por el factor $\mu = B / H$ en Henrios / mts; sin embargo prácticamente, considerando que las susceptibilidades máximas, aún de los materiales magnéticos, raras veces son mayores de 0.2 c. g. s. u.; los valores de la permeabilidad son apreciablemente mayores que la unidad, solo en casos muy raros. Por ello el efecto de " μ " es muy ligero, excepto en la magnetita concentrada. Algunos valores típicos de permeabilidad de materiales de roca son:

Magnetita	= 5	Rutilo	= 1.0000035
Pirrotita	= 2.55	Calcita	= 0.999987
Ilmenita	= 1.55	Cuarzo	= 0.999987
Hematita	= 1.05	Hornablenda	= 1.00015
Pirita	= 1.005		

La Conductibilidad y su inversa la Resistividad, la Constante Dieléctrica y la Permeabilidad Magnética, son las magnitudes fundamentales de las expresiones matemáticas de la Ingeniería de Puesta a Tierra, y ello según la clase de corriente que se traspase al suelo; es decir, según se trate de la Corriente estacionaria, casi estacionaria, alterna, rápida o de impulsos de corriente, de rayo o de maniobras. Así, en el caso de corriente estacionaria, sólo interviene la conductividad ohmica (γ), pero en las tres clases de corriente ya se debe manejar una conductividad compleja en la cual interviene la Constante Dieléctrica y la Permeabilidad Magnética.

1.3 RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como aislantes en la inmensa mayoría de los casos; puesto que el cuarzo, la calcita, los silicatos, las sales, etc., lo son prácticamente. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores en cantidad apreciable, podría considerarse como conductora, es decir lo serían las menas conductoras.

A una roca como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido, mineral, de líquidos y gases; afortunadamente, todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, de lo que resulta que un conjunto de rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable; según los casos.

En la resistividad de tal agregado, influyen los siguientes factores :

- La resistividad de los minerales que conforman la parte sólida de la roca (su esqueleto)
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca;
- La Humedad de la roca
- La Porosidad de la roca
- La Textura de la roca ; y la forma y distribución de sus poros.

- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral

En las Tablas 1.2 y 1.3, se tienen los valores de la resistividad de los minerales principales que constituyen las rocas y menas; como se ve en las mismas, la resistencia de los minerales constituyentes de las rocas, entre ellos todos los minerales del grupo silicatado, es muy grande y oscila entre 10^6 y $10^{15} \Omega - m$.

La resistencia de los metales nativos que poseen conductividad electrónica, oscila entre 10^{-6} y $10^{-4} \Omega - cm$. Por ejemplo, se pueden presentar resistividades pequeñas como $1 \Omega - m$ y tan grandes como $10^7 \Omega - m$, un rango de variación mayor se tiene en la plata, pues la plata nativa presenta una resistividad de $1,6 \times 10^{-8} \Omega - m$, pero en el sulfuro puro llega a $1 \times 10^{16} \Omega - m$.

Al conductor, se le puede definir como el material que presenta una resistividad menor de $1 \times 10^{-5} \Omega - m$, mientras que el aislador tiene una resistividad mayor a $1 \times 10^7 \Omega - m$; entre tales límites se tienen a los elementos semiconductores. Dentro de esta agrupación, los metales y el grafito son todos conductores; contienen un gran número de electrones libres, cuya movilidad es muy grande.

Los semiconductores también conducen corriente por medio de electrones, pero tienen pocos de ellos. Los aisladores se caracterizan por el enlace iónico, así que los electrones de valencia no son libres de moverse; los transportadores de cargas son iones que deben vencer grandes barreras de potencial que existen, ya sea en semiconductores o conductores.

Tabla 1.2 Clasificación de los tipos de rocas. Las cifras se basan en secuencias de columnas (Tomado de "The description of rock masses purposes ", Anon, 1977)

Grupo genético	Sedimentarias detríticas	Proclásticas	Químico Oripánicas	Melamórficas	Igneas	Rocas ultrabásicas
Estructura común	Estratificadas	Estratificadas		Foliadas	Masivas	
Composición	Granos de roca, cuarzo feldespatos y minerales	Por lo menos 50% de los granos son carbonatos	Por lo menos 50% de los granos son roca volcánica de grano fino	Cuarzo, felderepatos, micas, minerales, oculares, oscuros	Los minerales de color claro son cuarzo, feldespatos, mica y minerales similares al feldespatos	Minerales oscuros
De grano muy grueso	Granos de fragmentos de roca	Granos redondeados Aglomerado(31) Granos angulosos: Brecha volcánica (32)	Granos redondeados Aglomerado(31) Granos angulosos: Brecha volcánica (32)	Migmatita(51)	Roca corneana Marmol (62) Granito (71)	Rocas intermedias básicas Rocas ultrabásicas
Grano grueso	Granos redondeados conglomerado (10) Granos angulosos Brecha (11)	Calcinudita (21)	Rocas Salinas Halita (41) Anhidrita (42) Yeso (43)	Gucian (52) Capas alternas de minerales granulares y laminares	Diorita (82) Grabro (92)	Piroxenita (01) y Peridotita (02) Serpentinas (03)
Grano medio	Arenas Los granos de arenisca son principalmente fragmentos de minerales Arenisca de cuarzo (12): 95% de cuarzo, poros vacíos o cementados Arcos a (13): 75% de cuarzo, hasta 25% de feldespatos; poros vacíos o cementados Arenisca arcillosa (14): 75% de cuarzo, 15 + material detrítico fino	Calcarenita (22)	Caliza (no diferenciada)	Pilita (54) Pizarra (55)	Cuarcita (64) Micro-granito (72)	Micro-diorita (83) Dolerita (93)
Grano fino	Fangolita (15) Pizarra arcillosa (16) fangolita fibrosa Limolita (17): 50% partículas de grano fino Argilitas (18): 50% partículas de grano muy fino Fangolita calcárea (19)	Calci- molita (23)	Toba (33) Toba (34) de grano fino	Sillex (44) Pedernal (45) Carbón (46) Milonita (56) Otros (47)	Anfibolita (65)	Andemita (64) Basalto (94)
Grano muy fino	Arclitosa lútilica	Calciculita (24)		Obsidiana (74) y retinita (85)		Taquilita (95)

Tabla 1.3

Resistencia		10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁵	10 ¹⁶
Minerales		ohm m																								
Minerales naivos	Oro	_____																								
	Cobre	_____																								
	Estaño	_____																								
	Platino	_____																								
	Mercurio	_____																								
	Plata	_____																								
Minerales	Arsenopirita	_____																								
	Bornita	_____																								
	Bauxita	_____																								
	Galena	_____																								
	Hematites	_____																								
	Grafito	_____																								
	Ilmenita	_____																								
	Covelina	_____																								
	Limonita	_____																								
	Marcasita	_____																								
	Magnetita	_____																								
	Molibdena	_____																								
	Pirita	_____																								
	Pirrotina	_____																								
	Siderita	_____																								
	Componentes Rocosos	Calcopirita	_____																							
Anhidrita		_____																								
Halita		_____																								
Cuarzo		_____																								
Calcita		_____																								
Micas		_____																								
Azufre		_____																								
Feldspatos		_____																								
Fluorita		_____																								
Petróleo		_____																								

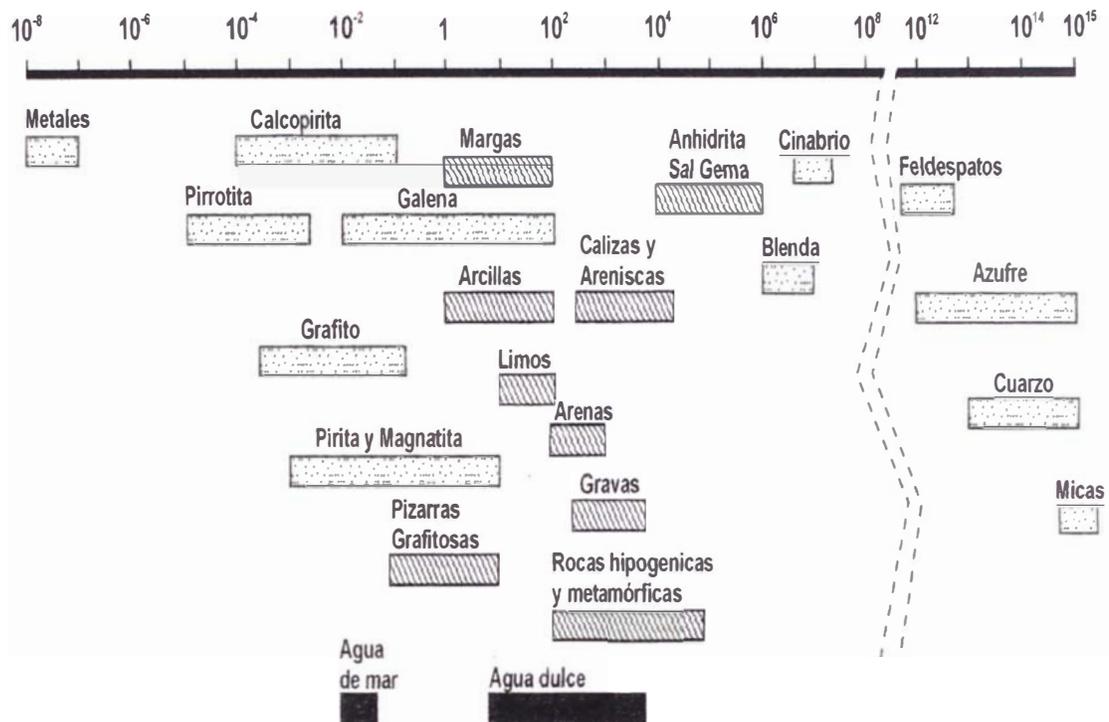


Fig. 1.3 Distribución de Resistividades ($\Omega \times m$)

Otra diferencia entre conductores y semiconductores es su respectiva variación con la temperatura; la primera varía inversamente proporcional con ella y puede tener sus altas conductividades en la región de $0^\circ K$. Los semiconductores, por otro lado; son prácticamente aisladores a bajas temperaturas.

En una clasificación relativa, las rocas y minerales, son considerados como buenos, intermedios y pobres conductores; dentro de los rasgos siguientes de resistividad: Minerales buenos conductores entre 1×10^{-8} y $1 \Omega - m$, minerales intermedios entre 1 y $1 \times 10^7 \Omega - m$; y pobres conductores, los minerales y rocas con resistividad superior a $1 \times 10^7 \Omega - m$.

El rango de variación de diferentes clases de aguas, es notablemente menor que para minerales sólidos; la resistividad de los fluidos que saturan las rocas puede variar entre amplios límites. En la mayoría de los casos estos líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, entre las cuales juega un papel importante el cloruro sódico $Na Cl$. La resistividad del agua que llena

los poros de las rocas, está en relación inversa a la concentración de la sal en disolución.

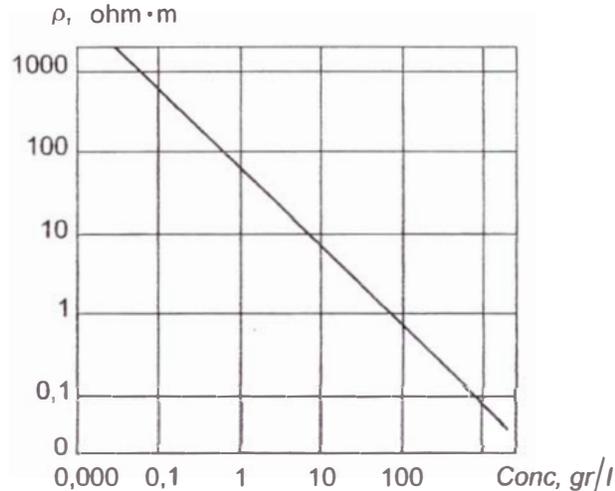


Fig. 1.4 Relación entre la resistividad y una solución de NaCl y su concentración en el agua.

Por ejemplo, agua meteórica de $1 \times 10^3 \Omega - m$, agua de subsuelo con $100 \Omega - m$ y agua salina al 20% con $0.05 \Omega - m$. Esto es importante, ya que el agua es sin duda, el factor integrante de control en muchas rocas, pues un pequeño cambio en su porcentaje afecta enormemente el valor de su resistividad. Por ejemplo, el granito, con un contenido de agua del 0,31 % presenta una resistividad de $4,4 \times 10^3 \Omega - m$, con 0,19 % la resistividad de $1,8 \times 10^6 \Omega - m$ y, con 0,06 % de agua, la resistividad es de $1,3 \times 10^8 \Omega - m$.

A título orientativo se da a continuación una lista de los márgenes de variación de la resistividad de las aguas naturales, basada en datos de diferentes autores.

Agua de lagos y arroyos de alta montaña	10^3 a $3 \times 10^3 \Omega - m$
Aguas dulces superficiales	10 a $10^3 \Omega - m$
Aguas salobres superficiales	2 a $10 \Omega - m$
Aguas subterráneas	1 a $20 \Omega - m$
Aguas de lagos salados	0.1 a $1 \Omega - m$
Aguas marinas	$\approx 0.2 \Omega - m$
Aguas de impregnación de rocas	0.03 a $10 \Omega - m$

Asimismo, el basalto con un contenido de agua de 0,95% presenta una resistividad de $4 \times 10^4 \Omega - m$, con 0,49 % una resistividad de $9 \times 10^5 \Omega - m$, con 0,26% una resistividad de $3 \times 10^7 \Omega - m$ y con 0 % de agua, la resistividad llega a $1,3 \times 10^8 \Omega - m$.

Se acepta en principio, que las rocas ígneas tiene la más alta resistividad; las sedimentarias, las más bajas y , las metamórficas; valores intermedios, sin embargo existen grandes diferencias entre ellas. Además, la resistividad de tipos particulares de rocas varían con la edad y la litología, puesto que la porosidad de la roca y la salinidad del agua contenida son afectadas por ambos. Por ejemplo, el rango de la resistividad del Precámbrico Volcánico es de 200 a 5000 $\Omega - m$ mientras que, para las rocas Cuaternarias de la misma clase es de 10 a 200 $\Omega - m$.



Fig.1.5 Peculiaridades del suelo peruano según su edad y litología.

1.4 MINERALES FORMADORES DE ROCAS

Las corrientes eléctricas de tierra circulan a través de la corteza terrestre, que es la capa superficial de la misma, constituida por rocas ligeras con un espesor de alrededor de 30 Km; en general, tales corrientes circulan a una profundidad relativamente pequeña, es decir, prácticamente por el denominado suelo en

la geotécnica y, en casos especiales circulan por el fondo y / o lecho de mar: así pues, las corrientes de tierra circulan a través de suelos de muy diversa naturaleza geológica, es decir, de rocas formadas por muy distintos minerales y procesos geológicos, así como con diversas estructuras geológicas. Conviene, por lo tanto repasar algunos aspectos relacionados con la composición de las rocas y de las estructuras que la conforman.

En principio, se entiende por roca a cada una de las masas minerales que constituyen la corteza terrestre, o bien; la sustancia mineral que por su extensión forma parte importante de la masa terrestre y, en realidad, se le puede describir de diferentes maneras según la ciencia que las trate y los objetivos particulares de cada una de ellas (en la geología, en la geotécnica, en la geoléctrica, etc.). Así, desde el punto de vista geológico que, por supuesto es el fundamental, las rocas se describen con base en la composición y textura química, así como de su origen mineral (cómo se han originado) teniéndose así, la primera clasificación de rocas : Sedimentarias, Metamórficas y Eruptivas o ígneas.

Las rocas están formadas por diversas clases de minerales, principalmente por compuestos de Sílice (silicatos) -en cuyo caso, cuando contienen más del 65 % de tal mineral se les denomina rocas ácidas y si contienen menos del 55 % se les llama rocas básicas-; así como de carbonatos, al mineral se le define como una sustancia de origen natural y composición química definida que se encuentra en la corteza terrestre y; en geología incluye a todas las sustancias formadas por procesos naturales que constituyen las rocas.

Por lo general, alrededor del 95 % de una roca está constituida por tres o cuatro clases de Minerales; pero el 5 % puede contener hasta 20 clases diferentes de minerales. Los minerales formadores de rocas tienen una estructura interna definida, compuesta por la combinación de grupos de átomos (aislados, cadenas simples, láminas, capas, etc.) .

La composición química de algunos minerales es variable, debido a que determinados elementos pueden ser sustituidos por otros en la estructura. El análisis químico de las rocas que se encuentran en las capas superiores de

la corteza terrestre indica que casi todas se componen de los elementos siguientes, citados en orden de importancia: oxígeno, sílice, aluminio, hierro, potasio, sodio, calcio, magnesio, titanio y fósforo. Los primeros cuatro minerales constituyen 80% de la composición media de las rocas, siendo considerados como elementos raros los siguientes metales: Plomo, Zinc, Cobre, Manganeso, Estaño, Oro, Plata y Platino.

A continuación se dan ejemplos de estructuras geológicas formadas por procesos de sedimentación, intrusión magmática, derivada continental de las masas rocosas, como son: el estrato (o capa), buzamiento, plegamiento, falla, diaclasa, discordancia e intrusión ígnea.

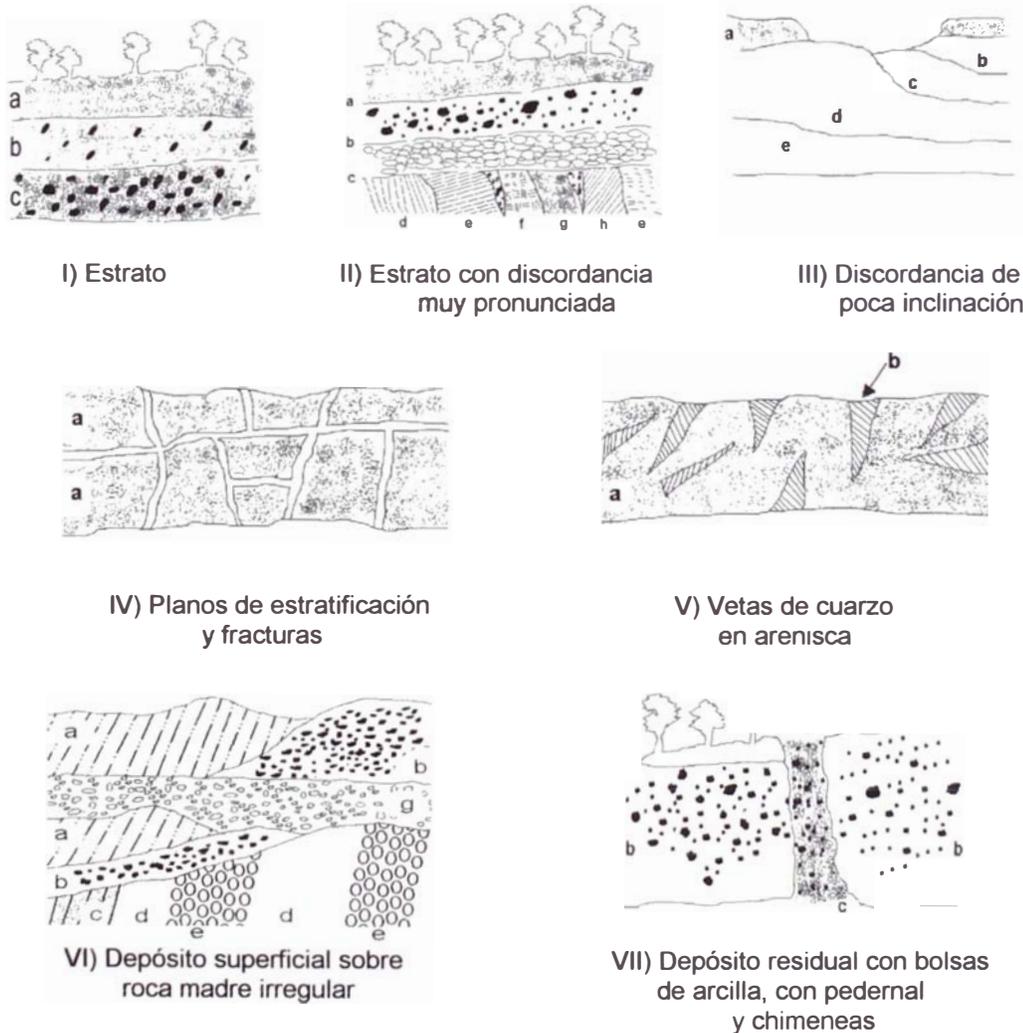


Fig. 1.6

1.5 PROCESO DE FORMACION DE ROCAS.

A partir de los minerales formadores de roca, las rocas y masas rocosas se forman por medio de tres procesos fundamentales:

- Igneas (eruptivas),
- Sedimentarias y
- Metamórficas.

Las rocas ígneas se forman debido a la cristalización del mineral fundido de silicatos en la corteza, o bien, en la superficie terrestre; arrojados ahí por una erupción volcánica. Esta roca fundida se conoce como “magma” y se forma en el interior de la corteza y en el manto superior por los mismos procesos que provocan el levantamiento de la corteza y la formación de cadenas montañosas.

La roca fundida puede penetrar a regiones donde se están formando montañas y al enfriarse y cristalizarse, constituir su basamento de roca ígnea o sólida. Este proceso genera la formación de grandes masas rocosas ígneas, de cientos o miles de kilómetros de longitud que siguen las líneas de las cadenas montañosas, sierras y cordilleras; sin embargo, alguna parte del magma puede permanecer en forma líquida y salir en forma de lava y también, por la fuerza explosiva del vapor, convertirse en polvo, el cual se asienta en capas y puede encontrarse a cientos de kilómetros del centro de la erupción; el polvo más fino; en cambio, se transporta alrededor de la tierra y, finalmente, se deposita sobre el suelo.

Se caracterizan por presentar los valores más altos de la resistividad; esto es imputable enteramente a que el grupo dado de rocas tiene una porosidad propia muy pequeña en comparación con la porosidad de las demás rocas. La resistividad de las rocas eruptivas compactas se mide por miles y a veces decenas de miles de Ω - m. La resistividad de las rocas eruptivas fisuradas, en el caso de que las fisuras sirvan como vías para la circulación de las aguas subterráneas, es más baja que la resistencia de estas mismas rocas en estado masivo; la resistividad de las rocas muy fisuradas, alcanza centenas de Ω - m .

Las rocas sedimentarias se forman bajo el agua, en mares y lagos y en depósitos de arena y polvo transportados por el viento o el hielo. Cuando se forman bajo el agua estos sedimentos, tienen cantidades variables de dos componentes:

- 1) Detritus, producto de la erosión transportados al mar por los ríos, principalmente cuarzo, mica, arcilla y fragmentos de roca, y;
- 2) Minerales precipitados a partir de soluciones de agua, primordialmente carbonatos de calcio y magnesio; sulfuros y óxidos e hidróxidos de hierro y sílice en forma de cuarzo.

Las rocas sedimentarias comunes incluyen capas de arcilla, lodo, arena y grava; se caracterizan por presentar resistencias bajas en comparación con los otros tipos de rocas. Esto se explica por su gran porosidad y, en caso de yacer bajo el nivel de las aguas subterráneas, también por su humedad elevada. Sin embargo, entre las rocas de este grupo se pueden encontrar algunas rocas que se caracterizan por presentar una resistencia elevada. A ellas pertenecen, por ejemplo: las arenas secas, y los sedimentos hidroquímicos compactos y de baja porosidad: yeso, anhidrita y otros.

Es característico, dentro de las rocas sedimentarias, que la resistividad de las arcillas sea habitualmente menor que la resistividad de las arenas. Esto se explica por una parte, por la considerable influencia del agua vinculada a la superficie de separación de las fases sólida y líquida y, por otra, a que en las arcillas a causa de su baja permeabilidad, las aguas subterráneas se estancan y aumenta la mineralización a cuenta de las sales minerales preexistentes en el esqueleto sólido de la roca.

La mineralización de esas mismas aguas en rocas arenosas que filtran bien, por lo general es más baja, especialmente en caso de saturación de las mismas con precipitaciones atmosféricas dulces. La resistividad de las rocas congeladas es mucho mayor que la resistencia de esas mismas rocas desheladas.

Así, por ejemplo; la resistividad de las rocas friables congeladas durante muchos años oscila entre varios millares y algunas decenas de millares de Ω - m. Pequeña en comparación con la de un banco de hielo, la resistencia de las rocas heladas se explica fundamentalmente porque, para las temperaturas que se encuentran en las condiciones naturales, parte de las soluciones que se hallan en los poros de las rocas (agua vinculada) no se congela.

La resistividad de las rocas saturadas de petróleo crece con el aumento de dicho contenido en petróleo; el aumento de la resistencia de las rocas saturadas de petróleo con el aumento de la saturación en dicho petróleo; se caracteriza por un coeficiente "Q", igual a la relación de la resistividad de esta misma roca a una saturación total con agua en sus poros.

Las rocas metamórficas se forman a partir de las rocas ígneas o sedimentarias que han sido afectadas por calor y/o presión, pudiéndose llegar a verse sometidas a ulteriores procesos metamórficos; se tiene entonces el llamado proceso metamórfico dinámico cuando sólo la presión ha sido el agente metamórfico; en cambio, se logra el proceso metamórfico térmico cuando se produce el calentamiento de la roca cercana a una intrusión ígnea que ha penetrado en rocas formadas con anterioridad; el proceso metamórfico dinamotermal o regional, toma forma cuando se origina por altas presiones, y altas temperaturas sobre la roca madre.

En cuanto a su resistividad ocupan una posición intermedia entre las rocas Sedimentarias y las Eruptivas. La porosidad y humedad de las rocas metamórficas depende principalmente del grado de metamorfización; por ello la resistividad de las rocas es tanto mayor cuando lo sea el grado de su metamorfismo.

Así por ejemplo, la resistividad de los neises muy metamorfizados se mide por miles de Ω - m, es decir; próximo a la resistencia de los granitos; la resistencia de los esquistos arcillosos, en estado suficientemente húmedo, puede valer sólo algunas decenas de Ω -m.

Tabla 1.4 Propiedades físicas fundamentales de las principales rocas y de los minerales constituyentes y algunos accesorios de las rocas, confeccionada a partir de datos tomados de los trabajos [43, 50, 56, 127 y 129]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Denominación de los minerales y rocas	Densidad $d \cdot 10^{-3}$ kg/m ³	Resistividad eléctrica r , ohm·m	Actividad de difusión-adsorción $A_{ab} \cdot 10^3$, V	Actividad electro-química inductiva, $A_v \cdot 10^3$	Suceptibilidad magnética $A \cdot 10^6$	Actividad gamma natural volu-métrica $\frac{Ra}{kV}$, pkg-eqv m ³	Actividad de neutrones, $A_{n,0} m^{-1}$	Resistividad térmica $\frac{B}{m \cdot ^\circ C}$	Conductividad a temperatura $a \cdot 10^7$, m ² /s	Velocidad de propagación de las ondas elásticas v , m/s	Tiempo de tránsito $Dt \cdot 10^6$, s/m
Anhidrita	2,96	$10^8 \frac{1}{2} \cdot 10^{10}$	≥ 0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$< 0,15$	1,24	0,175 $\frac{1}{2}$ 0,33	14 $\frac{1}{2}$ 16	6200	161
Agua (para 25° C)	0,997	$10^5 \frac{1}{2} \cdot 10^6$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	2,2	1,7	19,03	1510	162
Dolomita	2,87	$10^{10} \frac{1}{2} \cdot 10^{12}$	($\frac{1}{2}$ 10) $\frac{1}{2}$ (0)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$< 0,15$	0,48	0,2	10	8000	125
Illita	2 $\frac{1}{2}$ 2,75	$< 100^*$	≥ 70	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	4 $\frac{1}{2}$ 10	1,35	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$< 3000^*$	> 333
Calcita	2,71	$10^{10} \frac{1}{2} \cdot 10^{12}$	($\frac{1}{2}$ 10) $\frac{1}{2}$ (0)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$< 0,3$	0,72	0,185 $\frac{1}{2}$ 0,23	8 $\frac{1}{2}$ 10	5500 $\frac{1}{2}$ 7800	128 $\frac{1}{2}$ 180
Caolín	2,58 $\frac{1}{2}$ 2,63	$< 1000^*$	40 $\frac{1}{2}$ 60	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$< 0,3$	1,16	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Cuarzo	2,65 $\frac{1}{2}$ 2,66	$10^{12} \frac{1}{2} \cdot 10^{14}$	≥ 0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	2,15	0,43	0,08 $\frac{1}{2}$ 0,15	13,6	6000 $\frac{1}{2}$ 6300	160 $\frac{1}{2}$ 167
Xenolima	4,45 $\frac{1}{2}$ 4,56	$10^{12} \frac{1}{2} \cdot 10^{14}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	600 $\frac{1}{2}$ 20 000	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Magnetita	5,2	$10^8 \frac{1}{2} \cdot 10^2$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	(1 $\frac{1}{2}$ 20) $\cdot 10^8$	$< 0,5$	9,1	0,19 $\frac{1}{2}$ 0,33	$\frac{1}{2}$	7410	135
Montmorilinita	2 $\frac{1}{2}$ 2,52	$< 100^*$	≥ 70	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,9 $\frac{1}{2}$ 1,3	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$< 3000^*$	> 333
Feldespatos	2,5 $\frac{1}{2}$ 2,55	$10^{10} \frac{1}{2} \cdot 10^{12}$	0 $\frac{1}{2}$ 10	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1,25 $\frac{1}{2}$ 5	1,3 $\frac{1}{2}$ 1,4	0,24	$\frac{1}{2}$	5440 $\frac{1}{2}$ 6600	152 $\frac{1}{2}$ 184
Micas	2,56	$10^{13} \frac{1}{2} \cdot 10^{15}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$10^2 \frac{1}{2} \cdot 10^3$	$\frac{1}{2}$	1,5 $\frac{1}{2}$ 1,6	1,6 $\frac{1}{2}$ 2,17	$\frac{1}{2}$	5810 $\frac{1}{2}$ 7210	138 $\frac{1}{2}$ 172
Sulfuros	3,25 $\frac{1}{2}$ 8,2	$\cdot 10^7 \frac{1}{2} \cdot 10$	$\frac{1}{2}$	10 $\frac{1}{2}$ 500	2,5 $\cdot 10^2 \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	6 $\frac{1}{2}$ 700	0,026 $\frac{1}{2}$ 0,038	28 $\frac{1}{2}$ 30	3580 $\frac{1}{2}$ 7910	126 $\frac{1}{2}$ 279
Circón	4,66	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	2,5 $\cdot 10^3$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,17	$\frac{1}{2}$	8400 $\frac{1}{2}$ 8700	114 $\frac{1}{2}$ 119
Anhidritas	2,4 $\frac{1}{2}$ 2,9	$10^4 \frac{1}{2} \cdot 10^6$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,1 $\frac{1}{2}$ 3,0	1,24 $\frac{1}{2}$ 2,37	0,2 $\frac{1}{2}$ 0,3	14 $\frac{1}{2}$ 26	5000 $\frac{1}{2}$ 6000	160 $\frac{1}{2}$ 200
Basaltos	1,7 $\frac{1}{2}$ 3,0	$5 \cdot 10^2 \frac{1}{2} \cdot 10^5$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$10^2 \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^4$	0,3 $\frac{1}{2}$ 9,0	2,10 $\frac{1}{2}$ 2,22	0,3 $\frac{1}{2}$ 0,9	3 $\frac{1}{2}$ 22	4000 $\frac{1}{2}$ 6000	160 $\frac{1}{2}$ 250
Agua de estrato	0,9 $\frac{1}{2}$ 1,2	$8 \cdot 10^3 \frac{1}{2} \cdot 50$	0	0	$\frac{1}{2}$	$< 1,0$	2,2 $\frac{1}{2}$ 12,5	1,8 $\frac{1}{2}$ 2,2	8 $\frac{1}{2}$ 11	1400 $\frac{1}{2}$ 1750	570 $\frac{1}{2}$ 715
Arcillas	1,5 $\frac{1}{2}$ 2,6***	0,8 $\frac{1}{2}$ 30	20 $\frac{1}{2}$ 70	0,01 $\frac{1}{2}$ 25	$10 \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^3$	0,4 $\frac{1}{2}$ 25**	1,0 $\frac{1}{2}$ 1,2	0,8 $\frac{1}{2}$ 2,5	2 $\frac{1}{2}$ 12	500 $\frac{1}{2}$ 4000***	250 $\frac{1}{2}$ 2000**
Neises	2,6 $\frac{1}{2}$ 3,1	$10^2 \frac{1}{2} \cdot 10^4$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$10 \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^4$	0,8 $\frac{1}{2}$ 25**	0,7 $\frac{1}{2}$ 1,1	0,4 $\frac{1}{2}$ 1,0	4 $\frac{1}{2}$ 10	4500 $\frac{1}{2}$ 6500	150 $\frac{1}{2}$ 230
Granitos	2,5 $\frac{1}{2}$ 2,8	$5 \cdot 10^2 \frac{1}{2} \cdot 10^5$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$10 \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^4$	1,2 $\frac{1}{2}$ 14	0,7 $\frac{1}{2}$ 1,1	0,2 $\frac{1}{2}$ 0,6	5 $\frac{1}{2}$ 25	4500 $\frac{1}{2}$ 6800	150 $\frac{1}{2}$ 215
Dolomías	1,5 $\frac{1}{2}$ 3,1***	1 $\frac{1}{2}$ 5 $\cdot 10^3$	($\frac{1}{2}$ 7) $\frac{1}{2}$	0,01 $\frac{1}{2}$ 2	0,10 ³	0,1 $\frac{1}{2}$ 12	0,45 $\frac{1}{2}$ 3,5**	0,2 $\frac{1}{2}$ 1,0	4 $\frac{1}{2}$ 20	3000 $\frac{1}{2}$ 6500	150 $\frac{1}{2}$ 340
Calizas	1,4 $\frac{1}{2}$ 2,9***	2 $\frac{1}{2}$ 5 $\cdot 10^3$	($\frac{1}{2}$ 7) $\frac{1}{2}$	0,01 $\frac{1}{2}$ 3	0 $\frac{1}{2}$ 500	0,1 $\frac{1}{2}$ 10	0,70 $\frac{1}{2}$ 3,6**	0,4 $\frac{1}{2}$ 1,5	3 $\frac{1}{2}$ 20	1500 $\frac{1}{2}$ 6000***	160 $\frac{1}{2}$ 670
Conglomerados	1,5 $\frac{1}{2}$ 2,8***	$10 \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^3$	(70) **	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,2 $\frac{1}{2}$ 20	0,7 $\frac{1}{2}$ 3,2**	0,2 $\frac{1}{2}$ 3,0	3 $\frac{1}{2}$ 20	2000 $\frac{1}{2}$ 4000	250 $\frac{1}{2}$ 580
Margas	1,5 $\frac{1}{2}$ 2,8***	3 $\frac{1}{2}$ 500	20 $\frac{1}{2}$ 70	$\frac{1}{2}$	20 $\frac{1}{2}$ 3 $\cdot 10^3$	0,2 $\frac{1}{2}$ 25**	0,8 $\frac{1}{2}$ 3,0	0,5 $\frac{1}{2}$ 1,5	2 $\frac{1}{2}$ 15	1500 $\frac{1}{2}$ 3800***	260 $\frac{1}{2}$ 670**
Petroleo	0,7 $\frac{1}{2}$ 1,0	$10^8 \frac{1}{2} \cdot 10^{16}$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	7,5 $\frac{1}{2}$ 9,0	5 $\frac{1}{2}$ 9	1000 $\frac{1}{2}$ 1400	710 $\frac{1}{2}$ 1000
Arenas areniscas friables	1,2 $\frac{1}{2}$ 2,2	0,3 $\frac{1}{2}$ 10 ²	($\frac{1}{2}$ 5) $\frac{1}{2}$ (10)	0,05 $\frac{1}{2}$ 1,5	10 $\frac{1}{2}$ 10 ³	0,1 $\frac{1}{2}$ 10	0,4 $\frac{1}{2}$ 5,0**	0,3 $\frac{1}{2}$ 3,5	1,5 $\frac{1}{2}$ 20	1000 $\frac{1}{2}$ 4000***	250 $\frac{1}{2}$ 1000**
Areniscas compactas	2,0 $\frac{1}{2}$ 3,0	20 $\frac{1}{2}$ 5 $\cdot 10^3$	7 $\frac{1}{2}$ 20	0,05 $\frac{1}{2}$ 15	10 $\frac{1}{2}$ 10 ⁴	0,2 $\frac{1}{2}$ 15	0,45 $\frac{1}{2}$ 3,0	0,2 $\frac{1}{2}$ 0,8	5 $\frac{1}{2}$ 30	2500 $\frac{1}{2}$ 5300	180 $\frac{1}{2}$ 400
Esquistos Arcillosos	1,8 $\frac{1}{2}$ 2,7	20 $\frac{1}{2}$ 5 $\cdot 10^2$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	10 $\frac{1}{2}$ 10 ⁴	0,5 $\frac{1}{2}$ 40	1,0 $\frac{1}{2}$ 1,5	0,3 $\frac{1}{2}$ 0,7	7 $\frac{1}{2}$ 30	2000 $\frac{1}{2}$ 4500	220 $\frac{1}{2}$ 500
Sal gema	2,1 $\frac{1}{2}$ 2,2	10 ⁴ $\frac{1}{2}$ 10 ⁸	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0,1 $\frac{1}{2}$ 2,0	50 $\frac{1}{2}$ 72	0,15 $\frac{1}{2}$ 0,2	10 $\frac{1}{2}$ 30	4000 $\frac{1}{2}$ 5500	180 $\frac{1}{2}$ 250

* En estado húmedo
 ** Valor máximo extremadamente raro
 *** Valor mínimo extremadamente raro

Entre las rocas metamórficas de resistividad baja, se tienen las rocas grafitizadas y carbonificadas, principalmente esquistos. La resistencia de estas rocas se reduce a causa de la presencia del grafito, conductor electrónico, y al material carbonoso disperso fuertemente metamorfozado.

Para un contenido alto de grafito, la resistencia de los esquistos grafitizados puede medirse por décimas de $\Omega \cdot m$; normalmente oscila entre unidades y algunas decenas de $\Omega \cdot m$.

En las rocas metamórficas, a causa de la influencia dinámica a que han sido sometidas, es característica, la textura esquistosa, por la cual las partículas de roca y por consiguiente también los poros se extienden en la dirección de esa esquistosidad. En relación con esto, hay que hacer constar que la resistencia de las rocas en la dirección de la esquistosidad es menor que en la dirección perpendicular a ella; por consiguiente, las rocas metamórficas a menudo presentan anisotropía eléctrica.

Se tienen pues, una gran variedad de tipos de rocas dentro de estas tres clases fundamentales y por supuesto, cada una tiene sus propiedades particulares químicas, mecánicas y eléctricas; en Tabla 1.4 se presenta información de algunas de las más conocidas.

1.6 ENFOQUE MACROSCOPICO DE LOS SUELOS.

Sin duda, la mayor limitante en el diseño de sistemas de puesta a tierra, la representa el hecho de no poder manejar valores precisos de las propiedades de los terrenos en los cálculos.

Conviene por ello, analizar un poco el comportamiento macroscópico de suelos al paso de la electricidad y detectar claramente los integrantes fundamentales de variación de sus propiedades; así como el grado de influencia de cada uno de ellos. Para tal efecto se debe, primeramente, enfocar la parte de la corteza terrestre por la cual prácticamente circulan las corrientes eléctricas; es decir, el suelo y, después analizar la estructura del material rocoso

y su interrelación con ciertos factores tanto internos como externos, que originan cambios en sus propiedades y; finalmente, el grado en que cada uno afecta el comportamiento del suelo.

Aunque tal cuestión representa en sí un amplio y muy particular campo de la geotécnica dando lugar a la elaboración de varios libros dedicados exclusivamente a tal asunto; solamente nos referimos a un conocimiento general fundamental de tal sistema problemático.

Si bien, como ya se ha mencionado antes, existen definiciones geológicas y geotécnicas del suelo, se puede hablar de el lenguaje común de varias clases de suelo, por ejemplo: ordinario, arenoso, poligonal silicio, calcáreo, arcillosos, humífero, rojo de grava, etc., según sea el material predominante en sus constituyentes.

Los principales componentes de los suelos son :

- Arena, que solamente representa un papel físico y es el más abundante de todos ;
- Caliza, la cual puede ser disuelta por las aguas cargadas de gas carbónico y juega un papel no sólo físico, sino también químico ;
- Arcilla, formada por granos de menos de dos milímetros con todos los materiales orgánicos de los suelos, que sirve de cementante a los demás elementos del mismo y que, a la vez fija silicatos y otras sustancias minerales;
- Materias Orgánicas, constituyentes en detritos de Plantas, microorganismos y animales en descomposición y/o descompuestos; en cuyo caso constituyen el mantillo que, según la proporción en que se encuentre mezclado a la arcilla, influye sobre el poder absorbente del suelo ;
- Agua, cuyo porcentaje, presentación y característica puede variar mucho, por ejemplo, la resistividad del agua meteórica puede variar entre 30 y 1000 Ω - m agua superficial (en rocas ígneas) entre 100 y 3000 Ω - m; agua superficial (en rocas sedimentarias) entre 10 y 100 Ω - m; agua natural (en rocas ígneas) entre 0,5 y 150 Ω - m; agua natural (sedimentos) entre 1 y

100 Ω - m; agua de mar promedio 0,2 Ω - m; agua salina al 3 % en promedio 0,15 Ω - m ;

- Minerales, sustancia de la corteza terrestre que no es animal, ni planta; y que contiene metales o metaloides aprovechables de diversas categorías (mineral primario, mineral secundario y mineral accesorio que se forma accidentalmente como parte de una roca sin modificar el carácter general de la misma, entre otros);
- Rocas , y
- Depósitos superficiales.

1.7 INTEGRANTES FISICOS Y NATURALES DEL SUELO.

Entre los integrantes físicos y naturales del suelo mencionaremos al Esqueleto mineral, la porosidad, La textura de la roca, y los fluidos saturadores.

a) Esqueleto Mineral :

La manera en que están dispuestas las partes constituyentes de las rocas influye en el valor de su Conductividad o resistividad. Con base en ello se les distingue como rocas isotrópicas y rocas anisotrópicas. Las primeras son aquellas en las cuales sus poros están orientados en el espacio de una manera desordenada; como se muestra en la figura 1.7 a), por cuya razón el valor de la resistencia mecánica y eléctrica serán las mismas en cualquier dirección, en cambio, las rocas anisótropas tienen un esqueleto mineral y poros en forma alargada, como se puede ver en la figura 1.7 b); por ello, en esta clase de rocas las condiciones de paso de la corriente serán diferentes, pues presentarán mayor resistividad cuando sean recorridas por la corriente en la dirección del eje transversal y menor en el caso de ser recorrida en dirección del eje longitudinal; lo cual, por supuesto, influye también en sus propiedades mecánicas.

A la relación entre la máxima y la mínima resistividad se le llama coeficiente de anisotropía, o bien si ρ_n es la resistividad en el sentido normal y ρ_t es la resistividad en el sentido longitudinal en la roca anisótropa, entonces; se tiene

que ρ_n es mayor que ρ_t , ($\rho_n > \rho_t$) y la relación $\lambda_\mu = \sqrt{\rho_n / \rho_t}$, se le denomina Coeficiente de Microsotropía. Estos coeficientes varían entre 1 y 2 en las rocas isótropas (piedra caliza, pizarra, riolita, etc.) entre otras.

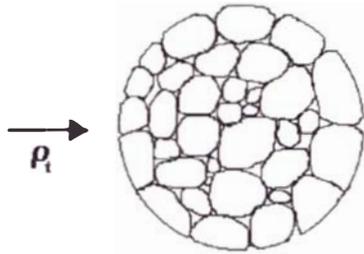


Fig. 1.7 a) Roca isótropa

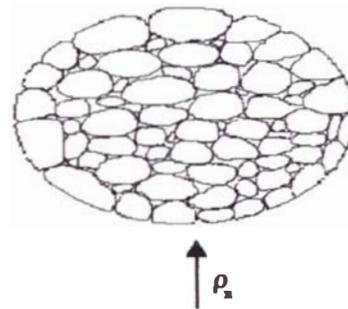


Fig. 1.7 b) Roca anisótropa

b) Porosidad de la Roca:

La porosidad, es decir, los huecos que quedan entre las fibras, granos o partículas constituyentes de la materia sólida, es un factor determinante en la creación de los potenciales electrocinéticos, y por lo tanto, de su conductividad. Dentro de la físico-química, el estudio de un capilar por el que se hace pasar un electrolito debido a una diferencia de presión hidrostática a la entrada A y a la salida B, muestra que en el límite entre la solución y la materia sólida se forma una capa eléctrica binaria; la capa externa (fija), cuyo revestimiento consiste en iones negativos absorbidos y la capa interna (positiva), que a su vez consta de dos partes, una fija relacionada con la tracción electrostática del revestimiento negativo y otro móvil, distribuida por difusión según la sección transversal del capilar.

Finalmente, entre el final B y el principio A del capilar, surgen diferencias de potenciales proporcionales a la caída de presión hidrostática, que dependen también de las constantes eléctricas del líquido, cuyo valor se puede calcular por medio de una fórmula deducida para tal fin. Así, la diferencia de potencial entre los extremos del capilar produce una corriente eléctrica dirigida contra la del líquido y que impide la acumulación de las cargas en el extremo del capilar.

Los poros de las rocas se pueden considerar como sistemas complejos de capilares, en cada uno de los cuales se producen tales procesos químicos. Por tanto, en la superficie de separación de las fases líquida y sólida de que constan las rocas, es decir, en el contacto del esqueleto mineral y del líquido de los poros, se forma la capa eléctrica binaria .

El mecanismo es el siguiente: en el contacto ocurre un proceso de adsorción de iones, generalmente aniones, que al ser absorbidos en la superficie del esqueleto mineral forman un revestimiento de una capa eléctrica binaria fuertemente enlazada en él; los iones que estaban en exceso en la solución de signo opuesto forman entonces el segundo revestimiento de la capa binaria. La parte interna de este revestimiento está rígidamente enlazada con la superficie de separación de las fases, y la externa tiene una estructura difusa la concentración de sus cargas disminuye al alejarse de la superficie de separación. En su conjunto, la capa eléctrica doble y en ausencia de un campo eléctrico externo es eléctricamente neutra.

El proceso de formación de las capas eléctricas binarias es muy importante, ya que la Conductancia de las rocas crece a medida que aumente la extensión de la superficie de separación entre las fases sólida y líquida, debido a que , en los límites de esa capa, el líquido de los poros normalmente tiene una mayor concentración de iones y, por lo tanto, de conductividad eléctrica.

En virtud de que las rocas poseen una conductividad variable bajo la influencia del campo eléctrico en las zonas de circulación de las aguas subterráneas, se originan las corrientes eléctricas.

Así, los campos eléctricos naturales que se originan por la filtración de las aguas subterráneas en las rocas porosas existen prácticamente en todas partes, ya que los procesos de filtración ocurren universalmente; sin embargo, en general, estas fuerzas electrocinéticas son insignificantes y el campo eléctrico relacionado con ellas es débil y, por ende, las corrientes lo son también; sin

embargo, pueden ser la causa de las ocasionales grandes anomalías asociadas con la topografía.

Sólo en casos particulares y aislados, tales campos eléctricos se intensifican hasta tal punto que se pueden utilizar para la solución de algunos problemas de carácter hidrogeológico y geotécnico.

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

Ahora bien, en la observación de campos naturales relacionados con cuerpos minerales, los campos de filtración se superponen a ellos, constituyendo una interferencia característica que es de suma utilidad para la técnica de la exploración eléctrica. Pero también en las rocas que contienen en sus poros soluciones de una misma sal con diferentes concentraciones, o bien, soluciones de diferentes sales se originan potenciales por difusión, es decir, de origen químico.

Si bien las corrientes eléctricas que se originan por aquellos campos no son significantes por su magnitud, si revisten interés para la clara comprensión de ciertos mecanismos básicos de las corrientes telúricas, así como de una parte de los procesos electroquímicos que se presentan en la práctica y que si son de trascendencia tecnológica, como lo es, por ejemplo la corrosión.

En un primer caso se originan las corrientes de difusión a causa de que la movilidad de los iones de distintos signos es diferente en el electrolito, en el proceso de nivelación de las concentraciones de iones de mayor movilidad, produciéndose a un lado del contacto la acumulación de iones principalmente de signo contrario. En un segundo caso, también se produce la separación de los iones de mayor movilidad y la acumulación correspondiente de cargas contrarias a cada lado del límite de contacto de las soluciones. Una nueva

distribución de los iones conduce así mismo a la creación de un campo eléctrico.

En el medio geológico, las fuerzas electromotrices de naturaleza electroquímica se presentan en aquellos casos en que las rocas del medio poseen conductividad iónica y existe acumulación de minerales buenos conductores con conductancia electrónica (Pirita, Bornita, Calcopirita, magnetita, etc.); en tales circunstancias el cuerpo mineral junto con las rocas circundantes forman un elemento galvánico natural, originándose entonces la capa eléctrica binaria, caracterizada por un salto de potencial cuya magnitud y signo dependen de los factores determinantes del potencia, como son las propiedades, composición y estado del conductor en el medio circundante, las cuales participan en el proceso de formación de la capa eléctrica doble; consecuentemente el conductor electrónico, en relación con el medio circundante, adquiere un potencial que se le designa como potencial de electrodo.

c) La Textura de la Roca.

Los factores básicos determinantes del potencial son :

- La composición química de las aguas subterráneas que circulan en las rocas e impregnan el cuerpo mineral ;
- La composición mineral.
- Las características de textura; es decir, la disposición de los distintos elementos de que consta, por ejemplo, textura granular, textura vítrea, entre otras y;
- Estructura del cuerpo mineral. La influencia de estos factores se manifiesta en su dependencia de las condiciones físico-geológicas tales como resistividad de las rocas y minerales, velocidad de circulación de aguas subterráneas e interacción de las mismas con las rocas y minerales, motivo por el cual varía la composición de tales aguas, en primer lugar, y su grado de oxidación y contenido de iones de sulfuro de hidrógeno y de hierro.

Si el valor y signo del potencial de la doble capa eléctrica permanece constante en toda la superficie del conductor, entonces éste cerrará uniformemente la superficie polarizada no creándose en el medio circundante un campo eléctrico. La condición necesaria para la creación de un campo eléctrico en el medio externo es la diferencia de valor o signo del salto de potencial de la capa eléctrica binaria en las diversas zonas de la superficie polarizada .

En un medio geológico el valor del salto del potencial en las diferentes partes de la superficie polarizada normalmente es diferente (cuestión de suma importancia para la técnica de la exploración eléctrica).

d) Los Fluidos Saturadores.

La resistividad de los fluidos que saturan a las rocas pueden variar entre amplios límites; en la mayoría de los casos tales líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, entre las que juega un papel importante el cloruro de sodio. Se conoce que la resistividad del agua que rellenan los poros de las rocas está en relación inversa con la concentración de la solución de la sal diluida. En condiciones naturales las aguas profundas fuertemente mineralizadas y las aguas marinas poseen la resistividad mínima, la cual es de $1 \Omega - m$ o menos aún; la resistividad de las aguas subterráneas varía según su grado de mineralización entre 10^{-2} a $10^2 \Omega - m$; las aguas fluviales débilmente mineralizadas tienen resistividades muy altas, del orden de decenas y centenas de $\Omega - m$, y las aguas de lluvia presentan aún mayores valores de resistividad, debido al bajo grado de mineralización. Por otro lado, la temperatura influye en el valor de la resistencia del agua que rellena los poros de las rocas. La relación entre ellas se expresa por medio de la siguiente fórmula

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

En la cual ρ_t es la resistencia de la solución a la temperatura $T^\circ C$, $\rho_{18^\circ C}$ es la resistencia de la solución a la temperatura de $18^\circ C$ y α es un coeficiente de temperatura de la conductividad eléctrica que en promedio vale $0.025 / ^\circ C$.

Empero, en el caso de electrolitos puros, la relación entre la resistividad de las rocas y la temperatura es mas complicada que la indicada en la fórmula anterior. Los poros de las rocas pueden estar rellenas también de petróleo, por lo que la resistividad de tales rocas resulta elevada; ya que la resistividad del petróleo es muy alta, pudiendo llegar a ser del orden de $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$. ($10^{14} \Omega \cdot \text{m}$), es decir el petróleo es prácticamente un aislante.

De lo expuesto se sigue que el esqueleto mineral de las rocas habitualmente conduce la corriente mucho peor que las soluciones que rellenan sus poros de éste modo en las rocas, la corriente eléctrica discurre prácticamente sólo por el electrolito que rellena sus poros. En relación con esto la conductividad eléctrica de las rocas es esencialmente electrolítica (iónica), de aquí se deduce que la humedad de las rocas debe influir fuertemente en su resistividad.

1.8 CAMPOS DE ACCION DE LA GEOELECTRICA

La Geoelectrica es una de las especialidades de la Geofísica Aplicada y cuyos conocimientos se utilizan dentro del sistema problemático de la Puesta a Tierra, para la final determinación de los conocimientos tecnológicos de la acción; así como de las reglas tecnológicas para la resolución de problemas de la práctica; son los correspondientes a las diferentes clases de corrientes de tierra siguientes, de manera muy resumida :

1) Corrientes de Tierra Estacionaria.

- Definiciones físico-matemáticas fundamentales de las corrientes estacionarias
- Teoría de los electrodos elementales
- Teoría de los electrodos múltiples
- Efectos de la heterogeneidad de los terrenos sobre el comportamiento de los electrodos
- Efecto de las impedancias dentro del sistema de electrodos y,
- Los procesos térmicos en electrodos y terreno.

Un análisis con buen nivel, involucra el manejo de alrededor de 691 funciones físico–matemáticas.

2) Corrientes de Tierra Casi Estacionaria.

- Definiciones físico-matemáticas fundamentales de corrientes casi – estacionarias.
- Retorno de corrientes de Líneas aéreas de cte. alterna a través de terreno homogéneo.
- Propagación de la corriente de retorno de líneas de corriente alterna a través de capas superficiales de terreno conductor.
- Influencia de las corrientes de tierra sobre los sistemas de comunicaciones eléctricas.
- Distribución de corrientes de tierra por defectos de aislamiento sobre cables de guarda y estructuras metálicas de líneas aéreas de corriente alterna.
- El efecto piel en los carriles de fierro (vías de ferrocarril, etc.)
- Procesos esenciales en los ferrocarriles eléctricos con cte. alterna.

El análisis riguroso de esta temática, requiere del manejo de aproximadamente 300 funciones físico–matemáticas.

3) Corrientes de Contacto Con tierra originadas por un Defecto en el Aislamiento de Líneas Aéreas de Corriente Alterna Trifásicas.

- Circuito equivalente de conexión a tierra.
- Corriente Capacitiva de conexión a tierra.
- Disminución de la Resistencia a la Propagación de torres con corriente de tierra capacitiva.
- Extinción de corrientes de tierra.
- La corriente de cortocircuito a tierra (en las redes con el punto Estrella puesto a tierra directa o indirectamente).
- La presencia de ondas electromagnéticas originadas por contactos a tierra en líneas aéreas.

Este análisis involucra el manejo de más o menos 160 funciones físico matemáticas relacionadas

4) Corrientes Alternas Rápidas (Alta Frecuencia) hacia tierra .

- Teoría de radiaciones que se propagan a través de un medio homogéneo.
- Sistema Lecher de Telegrafía.
- Teoría de electrodos para alta frecuencia (para antenas).
- Teoría de puestas a tierra capacitiva (para antenas).

En el análisis riguroso de tal cuestión se deben manejar alrededor de 130 funciones físico matemáticas.

5) Corrientes a Tierra que se propagan como ondas electromagnéticas debido a fenómenos atmosféricos o a maniobras durante la operación de redes eléctricas.

- El campo de conexión de un dipolo.
- Corrientes de conexión y/o maniobras en cables de energía subterráneos.
- Corrientes de maniobra en líneas aéreas a través de terreno homogéneo.
- Corrientes de Conexión a tierra a través de capa superficial conductora de terreno.
- La influencia del terreno sobre la fuente de ondas de impulso.
- El comportamiento del electrodo de Banda (o conductor cilíndrico) cuando es recorrido por corriente de impulso.

Este estudio involucra el tratamiento de 171 funciones físico–matemáticas.

De tal descripción de los campos de problemas que enfoca la geoelectrónica, se ve ya de manera objetiva como se interna; dentro de los diversos sectores tecnológicos en la electrotecnia tanto en corriente alterna como en continua, en la técnica de las comunicaciones eléctricas e informática, en la técnica de los transportes eléctricos, etc.

Para los análisis del trabajo en campo, la geoelectrica hace uso de modelos en cortes geoelectricos a los cuales, se le puede considerar como una parte del relleno con materiales de propiedades electricas diferentes γ ; como una característica de la estructura geológica de una particular región de la tierra. Tales propiedades electricas, junto con los parámetros geométricos del medio (espesor, profundidad, buzamiento de las rocas, etc.) y, las características de los electrodos; determinan lo que se puede realizar como el corte geoelectrico.

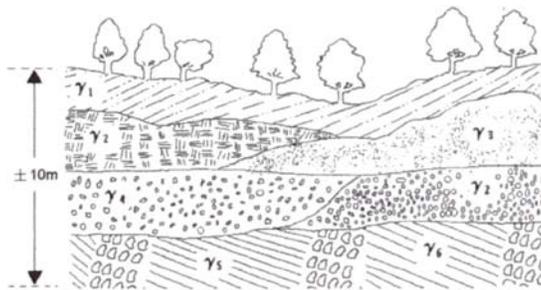


Fig.1.8 Sistema geológico compuesto con: γ_1 , suelo temporizado; γ_2 , tilita; γ_3 , arena; γ_4 , grava; γ_5 , lutita; γ_6 , basalto.

Fig.1.9 Sistema geológico compuesto con: A, zona intemperizada (suelo); B, cabecera de roca; C, lecho de roca.

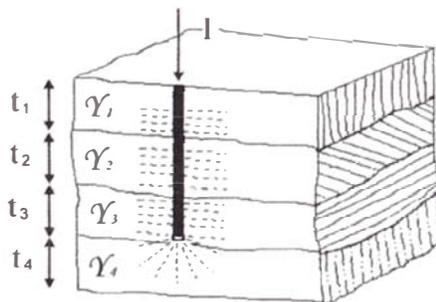


Fig.1.10 Estructura geológica foliada, por ejemplo, con las posibilidades:

- a) $\gamma_1 > \gamma_2 > \gamma_3 > \gamma_4$
- b) $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3 < \gamma_4$

Asimismo, se le puede considerar también como un sistema característico eléctrico de la estructura geológica de un determinado terreno o de una región; sin embargo, cabe señalar que las superficies de separación del corte

geoeléctrico no coinciden siempre con los límites geológicos determinados por las características litológicas, genéticas y geológicas en general, pues a veces un paquete geológico homogéneo de rocas se subdivide en varios horizontes geoeléctricos y, a la inversa; varias formaciones geológicas se unen en un mismo horizonte geoeléctrico.

Los estudios de corte geoeléctrico pueden ser hechos con fines diversos y enfoques, por ejemplo; con propósitos cognoscitivos, o bien, con fines utilitarios y aún dentro de estos últimos con diferentes objetivos prácticos; como puede ser para la exploración eléctrica o para el diseño de instalaciones de puesta a tierra entre otras. Empero, en todos ellos se utilizan los conceptos fundamentales de la geoeléctrica.

El corte geoeléctrico más sencillo de estudiar es sin duda, el correspondiente a un semiespacio homogéneo (terreno homogéneo), por lo que generalmente con el se inicia el análisis, el cual además sirve de patrón para el estudio de los otros cortes geoeléctricos más complejos. En tal caso, la introducción de la corriente en el suelo se hace por medio de un electrodo semiesférico, cuya superficie plana queda limitada por la atmósfera y el semiespacio inferior es embebido en el terreno homogéneo; y la densidad de corriente "J" se introduce por el centro de la superficie plana.

En realidad, este sencillo arreglo físico representa el sistema de tierra más simple, los elementos de tal sistema son el electrodo y el conductor de tierra por medio del cual se introduce la cte. (corriente estacionaria) y las condiciones del terreno quedan comprendidas dentro de los llamados factores integrantes físicos y/o naturales, tales como: la geología, la geografía, la topografía y el clima.

El objetivo del estudio del corte geoeléctrico es el de investigar cómo se comportará este sistema en función de las condiciones de los diversos integrantes durante la realización del proceso. En principio, se debe indagar su respuesta física, técnica y social; por ejemplo en información relativa con campos de corriente, resistencia a la propagación del electrodo, corriente

peligrosa del electrodo, la zona peligrosa para la salud y/o la vida de los seres vivos, el calentamiento del electrodo, entre otros; la solución de un problema concreto.

Los resultados trascendentes tanto gráfica como físicamente en la vecindad del electrodo, en un corte del terreno y en la superficie vecina, es como se muestra en la figura 1.11.

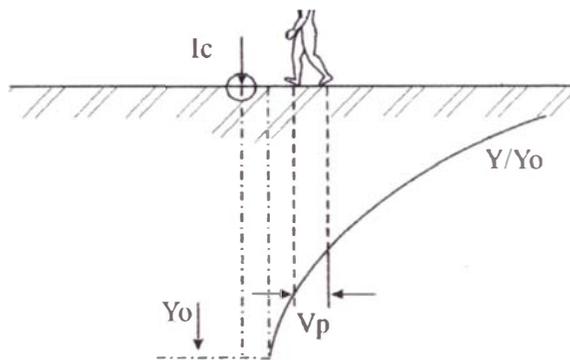


Fig.1.11 Efectos fisiológicos sobre el cuerpo; el voltaje de paso (V_p) origina la circulación de corriente a través de él (I_c)

La solución de un problema concreto de diseño de puestas a tierra requiere del estudio del corte geoléctrico con diferentes formas geométricas y dimensiones de electrodos, para saber a ciencia cierta cual de ellos satisface mejor (eficiencia, seguridad, economía, fiabilidad) los requisitos de los integrantes del sistema.

1.9 ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LOS SUELOS.

En el estudio científico de los suelos, el interés químico y las dificultades experimentales aumentan a medida que el tamaño de las partículas del material disminuye. Las cualidades fisicoquímicas del suelo están relacionadas con las fracciones más finas, tanto minerales como orgánicas; de ahí que el interés principal de la actividad química en el suelo radica en las partículas coloidales, pues de hecho, se considera que las porciones más activas del suelo están en estado coloidal.

Los dos tipos de materia coloide (orgánica e inorgánica) existen en una íntima mezcla. El primer tipo de materia coloidal orgánica está representado por el "Humus", mientras que los coloides inorgánicos están representados, casi

exclusivamente , por las arcillas de varias clases como la baritina, la Bentonita por excelencia , etc.

Las partículas coloidales son tan pequeñas que deben ser observadas – en una suspensión diluida – con la ayuda de un microscopio donde se advierte un constante movimiento vibratorio conocido como “ movimiento Browniano “ y debido a esta cualidad, las partículas pueden permanecer en suspensión durante largos períodos de tiempo. En cuanto a tamaño las partículas minerales coloidales deben ser menor de 1 micra ($0.001 <$), y los valores comúnmente aceptados van de 0.5 hasta 0.2 micras (cabe señalar que no toda la arcilla es estrictamente coloidal). Se reconocen dos tipos de arcillas :

- a) Arcillas Silíceas, que son características de regiones áridas y templadas.
- b) Arcillas de óxidos hidratados de fierro y de aluminio , características de regiones tropicales y semitropicales.

Se ha considerado ya, que las partículas coloidales pueden considerarse como pequeñas láminas cuyo tamaño y forma individual dependen de las circunstancias bajo las que se han desarrollado y de su condición mineralógica (véase fig. 1.12).

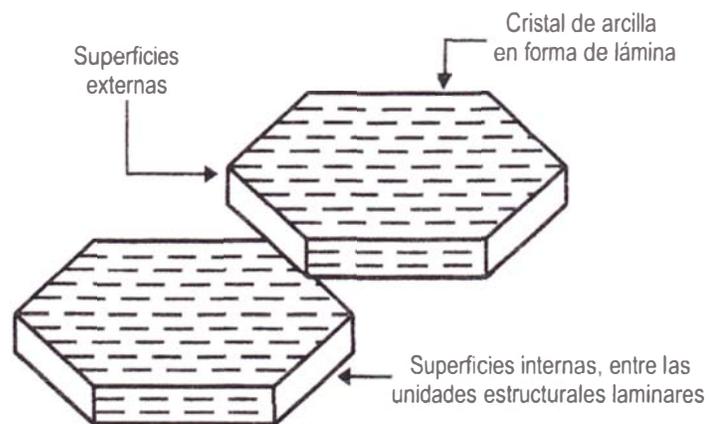


Fig.1.12 Superficies que presentan las partículas coloidales.

La característica esencial de cualquier sistema coloidal radica en que uno de los componentes está presente en un estado finamente dividido y el otro en un medio en un medio continuo, al componente finamente dividido se le conoce como Fase

Dispersa (definida por las partículas sólidas tanto minerales como orgánicas), y al componente continuo como Fase Dispersante (definido por la solución del suelo). Ambas fases pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas.

Las cargas de las partículas coloidales son debido a las capas superficiales de los iones absorbidos por las mismas, estas capas, que rodean a la partícula, no son rígidas y su densidad disminuye con la distancia a la interfase. La partícula cargada con Fase Difusa compensadora se conoce con el nombre de "micela" y el líquido o medio dispersante continuo como líquido intermicelar, la constitución de la micela es descrita por Gorbunov como sistema individual disperso que, consta de un núcleo cargado, rodeado de una atmósfera iónica dispersa, tal y como se muestra en la figura 1.13.

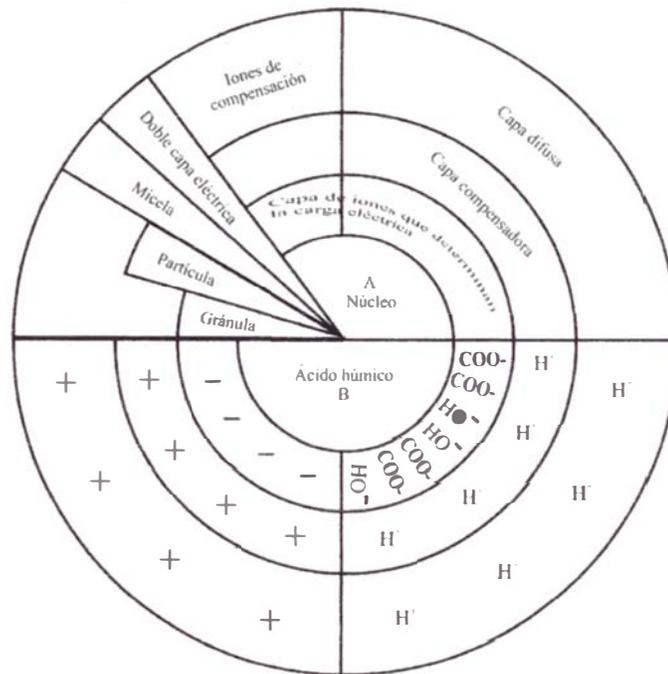


Fig.1.13 Constitución de los coloides del suelo. A) Esquema general de la micela, B) Micela del ácido húmico

Al núcleo de la micela unido a la capa de iones que determinan la carga eléctrica o potencial lo conocemos como gránula, si a este le agregamos la capa compensadora de iones unidos rígidamente la llamaremos, entonces, "partícula ". Finalmente, si a ambas capas añadimos la capa difusa de iones, este compuesto coloidal tomará el nombre de micela.

Debido, principalmente, a la colocación dipolar, toda micela coloidal lleva cierta cantidad de medio de dispersión firmemente unido a ella (cuyo espesor se conoce como doble capa), el cual depende, no sólo de la concentración de iones presentes, sino de su grado de hidratación. La carga eléctrica que poseen las partículas coloidales determina su estado en las soluciones del suelo: cuando el medio de dispersión tiene un exceso de iones con carga opuesta a la micela, los coloides se encuentran en estado de dispersión y, cuando las cargas son contrarias, se neutralizan, observándose la floculación o coagulación de las partículas coloidales.

Los coloides del suelo, por el tipo de carga de las micelas, se dividen en

- a) Coloides electropositivos o Basisoides : a los cuales pertenecen los hidratos de hierro y aluminio (FeOH_3 , AlOH_3) con particularidades de bases débiles . Floculan bajo la acción de los ácidos.
- b) Coloides electronegativos o acidoides a estos pertenecen las arcillas, ácidos húmicos y también los complejos de hierro y silicio que contemplan cualidades débiles. Floculan en medio ácido y se dispersan bajo la acción de las bases.

Ambos tipos de micelas pueden observarse en la figura 1.14

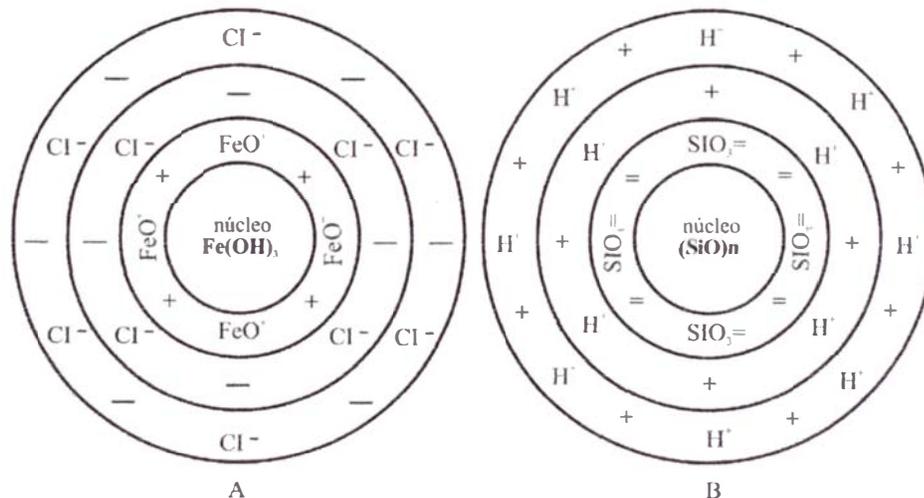


Fig.1.14 Micela coloidal en medio ácido. A) Electropositiva; B) Electronegativa.

Estas características son las que nos ilustran el comportamiento químico de los suelos al paso de una corriente, en especial el uso de las arcillas como la Bentonita sódica que debe reemplazar a la Tierra de Chacra en los sistemas de Puesta a Tierra ya que se trata de una tierra ecológica especial para el agricultura; evitando con esto la depredación sistemática de áreas vitales para el cultivo de productos de consumo humano, y que es una situación que se esta dando en este tipo de infraestructura de protección con el consiguiente perjuicio a la comunidad.

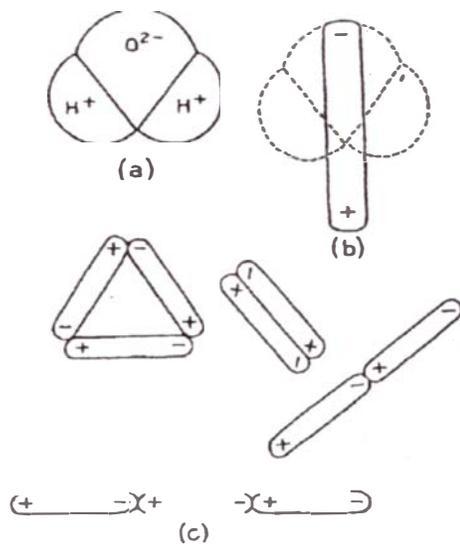
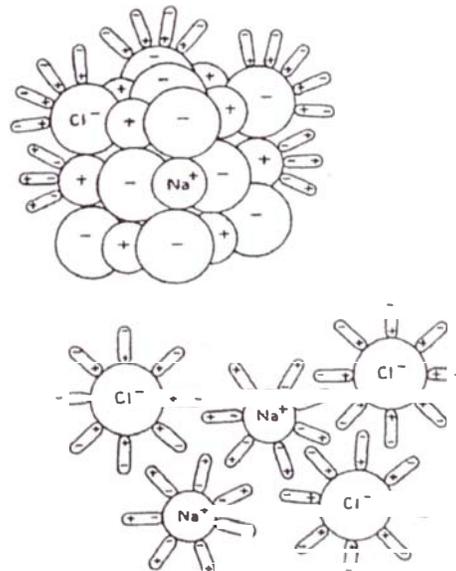


Fig. 1.15 Carácter dipolar del agua. El oxígeno ha ganado en efecto, 2 electrones y con ello una doble carga negativa, mientras que los átomos de hidrógeno han perdido cada uno los servicios efectivos de un electrón y representan cargas positivas. Así, la molécula de agua actúa como una pequeña varilla con una carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro como se indica en la parte (b). Las combinaciones de las moléculas de agua están representadas en (c).

Fig. 1.16 Mecanismo mediante el cual el agua disuelve la sal. Los dipolos de agua se adhieren a los iones que componen la sal y vencen las atracciones iónicas que mantienen unida a la sal común sólida. Cada ión de Na^+ y Cl^- es entonces "escortado" por cierto número de dipolos de agua para ser incorporado al interior del cuerpo del líquido.



Dentro de la conducción iónica es muy importante apreciar características del comportamiento del agua y de la sal común llamada también halita, elementos trascendentes en la construcción de los pozos de tierra.

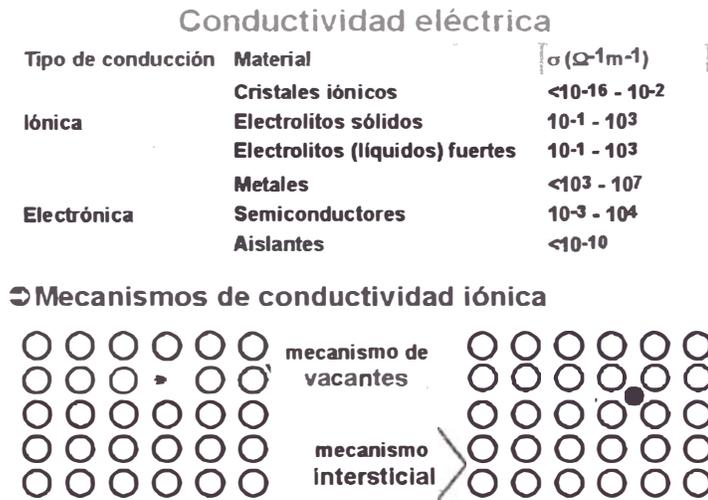


Fig.1.17 Contraste de la conductividad eléctrica iónica con la metálica o electrónica

La molécula del agua es un dipolo (dos polos) siendo conocida por esta características como un compuesto dipolar. Este hecho confiere al agua propiedades especiales que la convierten en un agente excepcional en los procesos geológicos. El mecanismo con el que el agua disuelve la sal (fig.1.16), es un ejemplo de la facilidad con que el agua disuelve varias sustancias y participa en el intemperismo y en otras actividades geológicas relacionadas a las puestas a tierra.

De la figura 1.17 podemos observar que electrolitos líquidos fuertes presentan una conductividad eléctrica similar a la de los metales que es una característica muy apreciada para desviar sobrecorrientes o sobretensiones hacia la tierra para finalmente, neutralizarlas.

CAPITULO II

PROCESO FISICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTES EN EL SUELO Y MEDICION DE LA RESISTIVIDADES.

En este Capítulo se desarrollará el Proceso Físico de Distribución de la Corriente, considerando la Toma de Tierra Elemental y la Distribución de Corriente dentro de la tierra, especificando la Tensión de Paso y la Tensión de Contacto. Se definirán también algunos aspectos geoelectricos.

Además, se tratará sobre la Resistividad de un suelo, que se define como: la medida del agua en sus poros, y la medida del contenido de minerales en esa agua. La Resistividad depende de la porosidad de la roca, el grado de saturación, la salinización del agua, etc., entre otros.

Se desarrollará el cálculo para obtener la Medición de Resistividad y la aplicación con los Métodos de Wenner y Schlumberger, consignando sus características y la ventaja de cada configuración.

2.1 PROCESO FISICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA CORRIENTE.

2.1.1 TOMA DE TIERRA ELEMENTAL

A continuación se hace el estudio acerca de una toma de tierra constituida por un electrodo semiesférico. Se trata de una instalación totalmente ideal pues, aunque este tipo de electrodo no es utilizado en la práctica, por su sencillez es muy adecuado para el estudio del comportamiento de las tomas de tierra. Los resultados e ideas derivadas de este estudio, son aplicables a otros sistemas electródicos.

Consideremos una toma de tierra constituida por un electrodo semiesférico de radio "a", instalada en un terreno homogéneo, es decir, de resistividad eléctrica constante. Al hacer circular por la toma de tierra una corriente eléctrica de valor "I", las líneas de corriente por el terreno serán radiales, debido a la propia simetría del electrodo y la homogeneidad del terreno; esto se muestra en la figura 2.1.

Se puede considerar, por tanto, que la corriente atraviesa una serie de capas concéntricas con el electrodo, donde "r" es el radio de la superficie semiesférica considerada tal como se puede ver en la figura 2.2, siendo cada una de estas superficies equipotenciales.

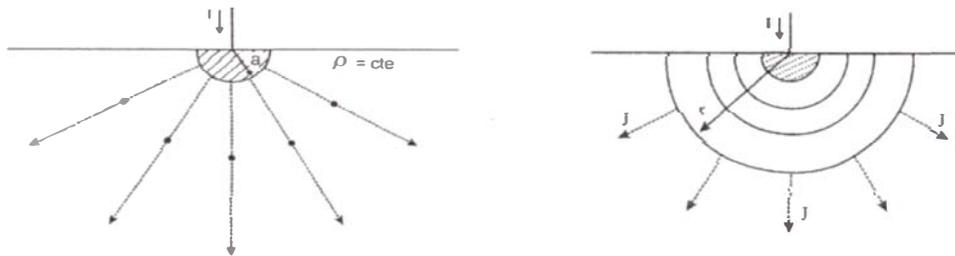


Fig. 2.1 Electrodo Semiesférico. Líneas de Corriente Fig. 2.2 Superficies Equipotenciales

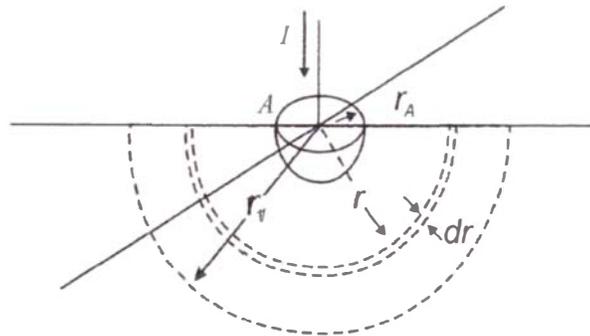


Fig. 2.3

La diferencia de potencial entre dos puntos del terreno "A" y "B", pertenecientes a superficies equipotenciales diferentes y de radios "r_a" y "r_b", viene dada por la fórmula:

$$V_A - V_B = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right)$$

Para calcular el potencial eléctrico en un punto, es necesario hacerlo respecto a un punto de potencial nulo, el cual se considera situado en el infinito. De esta forma, si en el resultado anterior, suponemos el punto "B" en el infinito,

$$r_b \rightarrow \infty$$

$$V_B = 0$$

por lo que el potencial en el punto "A" será:

$$V_a = \frac{\rho I}{2\pi A}$$

y de una forma genérica, el potencial en un punto cualquiera a una distancia "r" del centro del electrodo será:

$$V_{(r)} = \frac{\rho I}{2\pi r}; r > a$$

El potencial al que se encontrará sometido el propio electrodo será constante, y teniendo en cuenta la ley de continuidad de los potenciales, se obtiene que el electrodo se encuentra al potencial:

$$V_{(a)} = \frac{\rho I}{2\pi a}$$

Según esto podemos calcular la resistencia del electrodo semiesférico como:

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

En la figura 2.4 se representa los valores del campo y del potencial eléctrico en el terreno, en función del radio "r" de la superficie equipotencial correspondiente. Para la construcción de las curvas se han tenido en cuenta las ecuaciones:

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

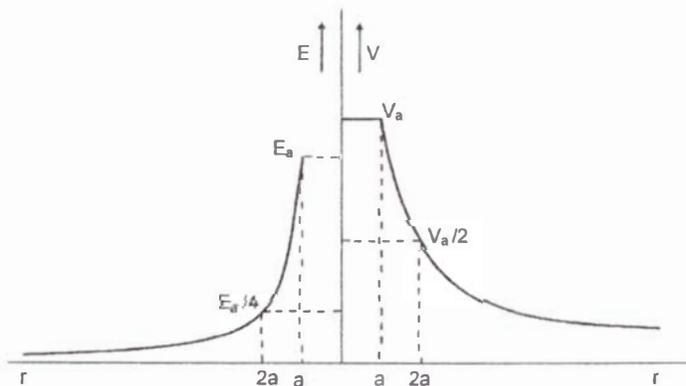


Fig.2.4 Distribución del Campo y el Potencial

Hay que recordar que por ser de material conductor el electrodo, el campo en su interior será nulo y se encontrará a un potencial constante “ V_a ”.

De la expresión del potencial, se desprende que para $r > a$ el potencial del terreno depende únicamente del tipo de sustrato (de su resistividad) y de la corriente disipada por el electrodo. En la figura 2.5, queda reflejada gráficamente esta idea, pues se observa que para tres electrodos de radio diferente, se verifica que para $r > a_3$ la distribución de potenciales coincide para los tres casos.

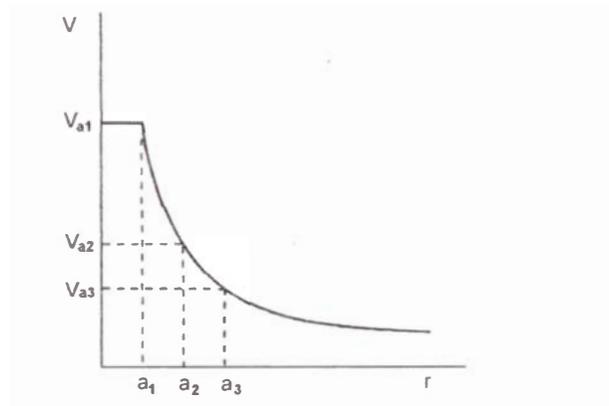


Fig. 2.5 Influencia del Tamaño del Electrodo

2.1.2 DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE.

La figura 2.6 muestra la distribución de corriente dentro de la tierra. La corriente circula de la superficie de la toma de tierra 1, va por dentro de la tierra a la toma de tierra 2, en donde la corriente vuelve a salir a la superficie.



Fig. 2.6 Distribución de Corriente dentro de la tierra

Condicionado por la sección transversal pequeña, junto con la resistencia grande, existen pérdidas de tensión grandes en la zona cercana a la toma de tierra, y

disminuye a medida que nos alejamos de la misma. Si se puede medir la tensión dentro de la toma de tierra y en los puntos de superficie de tierra, variando progresivamente la distancia, se da una curva en forma de embudo, esta curva da origen al embudo de tensión, ver figura 2.7.

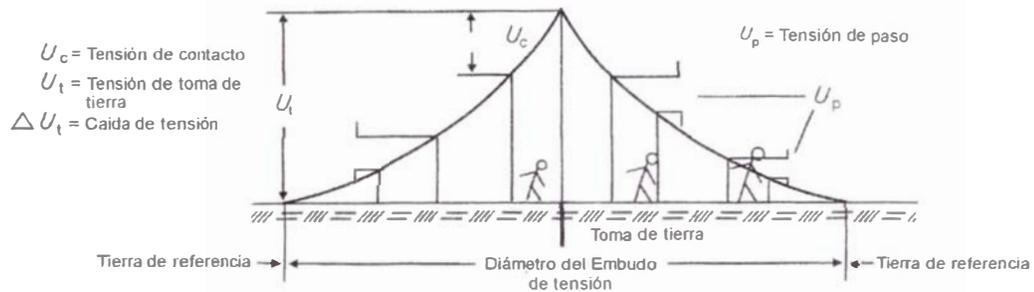


Fig. 2.7 Distribución de la Tensión

Si se alcanza por medición un punto de tierra donde no se altera la tensión dentro de la superficie de tierra y la toma de tierra, y se está en la sección de tierra de referencia, esta sección tiene el potencial cero, es decir, dentro de cualquier punto, en esta zona no hay tensión. La expansión del embudo de tensión depende de la resistividad del suelo, el embudo de tensión es más pequeño si la resistividad es baja.

Los potenciales originados en el terreno por un electrodo de tierra, tienen una gran importancia, tanto desde el punto de vista de los problemas técnicos, que pueden originarse sobre estructuras metálicas enterradas en la proximidad del electrodo de tierra, como desde el punto de vista de seguridad del personal, como puede verse a continuación, al hablar de las tensiones de “paso” y de “contacto”.

2.1.3 TENSIÓN DE PASO

En la figura 2.8 se observa la distribución en planta de los potenciales que aparecen en el plano superficial del terreno.

Como ya se ha indicado, las variaciones más rápidas del potencial (mayores diferencias de potencial entre dos puntos a igual distancia) tienen lugar en las proximidades del electrodo.

Se define la tensión de paso, como la diferencia de potencial que puede aparecer entre dos puntos separados por una distancia igual a la de un paso humano (0.7 metros aproximadamente).

Esta es la tensión a la que puede verse sometida una persona cuando está pisando el terreno, en funcionamiento de la toma de tierra. De este modo, la tensión de paso será:

$$V_p = V_{(x)} - V_{(x=0.7)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_x + 0.7} \right)$$

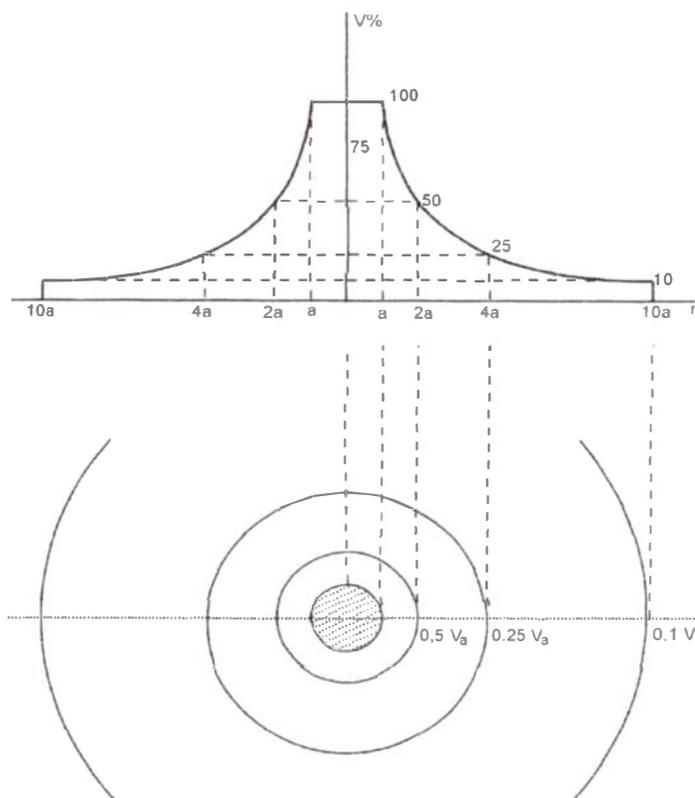


Fig. 2.8 Distribución de Potenciales

El caso más desfavorable será cuando se verifique la igualdad $r(x)=a$, de modo que:

$$V_p(\text{max}) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a + 0.7} \right)$$

Según nos alejamos del electrodo, la tensión de paso va disminuyendo, tal como puede comprobarse en el gráfico de la figura 2.9.

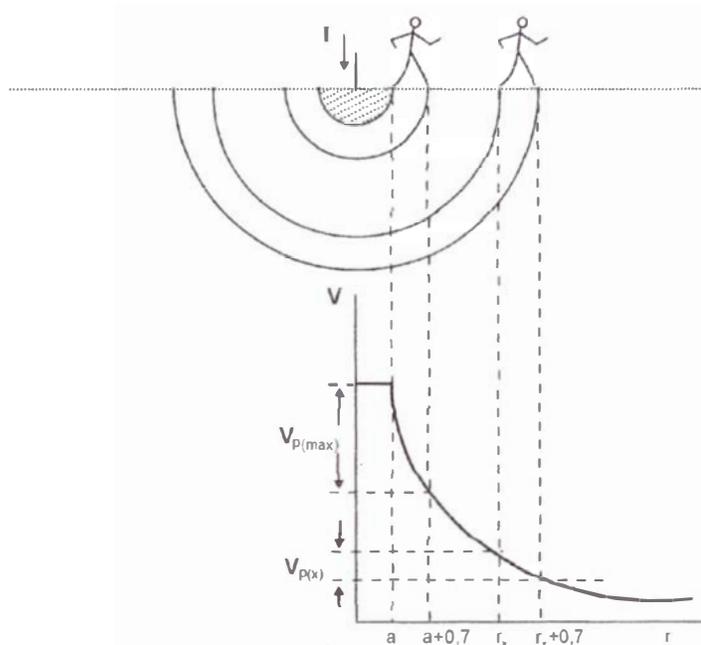


Fig. 2.9 Tensión de Paso

2.1.4. TENSIÓN DE CONTACTO

Se entiende por tensión de contacto aquella a la que puede verse sometido el cuerpo humano al estar en contacto con alguna estructura metálica, puesta a tierra y los pies en el terreno. Esta distancia suele ser de 1 metro aproximadamente, y su valor máximo, vendrá dado por:

$$V_c(\text{max}) = \frac{\rho l}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+1} \right)$$

La variación de la tensión de contacto con la distancia, aparece en la figura 2.10.

Un fenómeno importante es el que tiene lugar al enterrar el electrodo de la toma de tierra a una determinada profundidad, ya que los gradientes de potencial que se ponen de manifiesto en la superficie del terreno son menores. Este hecho hace disminuir la tensión de paso, disminuyendo tanto más cuanto más profundo se encuentre el electrodo. Por el contrario, el enterramiento del electrodo trae como consecuencia el incremento de la tensión de contacto, tanto más cuanto más profundo se encuentre el electrodo.

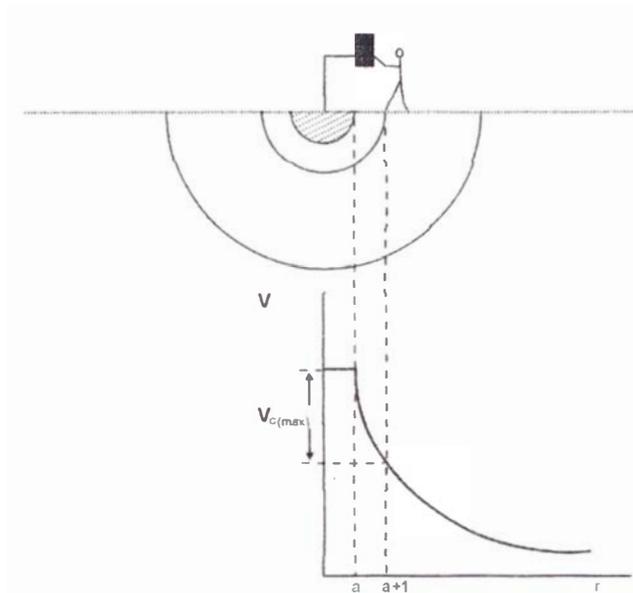


Fig. 2.10 Tensión de Contacto

Estos fenómenos se ponen de manifiesto gráficamente en la figura 2.11, en la que se supone un electrodo puntual disipando una corriente, pudiendo diferenciar dos posiciones diferentes del mismo, así como las tensiones por él originadas en la superficie del terreno en ambas situaciones.

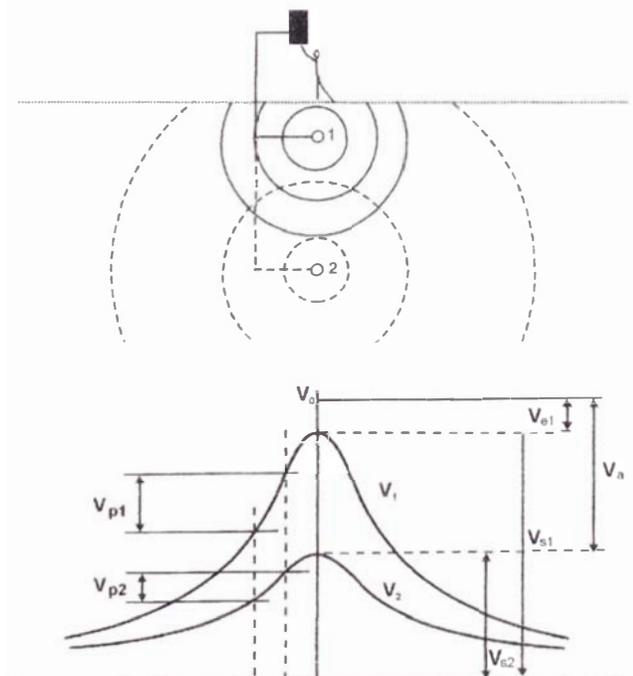


Fig. 2.11 Tensiones de los Electrodos Enterrados

En la figura considerada “V” representa el potencial del electrodo, siendo por tanto el potencial al que también se encuentran sometidas las estructuras metálicas a él conectadas “V_Z” representa al valor máximo del potencial observando en la superficie del terreno.

2.1.5 ASPECTOS GEOELÉCTRICOS.

En las fórmulas de la resistencia de puesta a tierra, se asume que el suelo es homogéneo y que, por tanto, la resistividad es igual en todo el volumen del terreno alrededor del dispersor. En la práctica, se da la “inhomogeneidad” de los terrenos, y existen muchos factores que influyen en el valor de la resistividad, que tendrá variaciones de un lugar a otro, y también de acuerdo a las condiciones climáticas.

Uno de los principales factores que influye en el valor de la Resistividad, es el aspecto geológico del terreno, ya que la mayoría de los terrenos, como no son homogéneos, están formados por diversos estratos normalmente horizontales, y paralelos a la superficie del suelo. Sin embargo, hay casos que, a consecuencia de fallas geológicas, se presentan inclinados. Debido a la estratificación del terreno, la dispersión de la corriente, en cada capa, se da de acuerdo a su resistividad.

La resistividad es una magnitud física que se mide según procedimientos que permiten comprobar la veracidad y exactitud de las fórmulas que se manejan para su cálculo. Uno de los principales procedimientos consiste en Mediciones Geoeléctricas, realizadas en la superficie del terreno.

Este procedimiento tiene la ventaja de que las medidas se realizan “in situ”, y las rocas se estudian tal como se encuentran en la naturaleza. Además, la medida afecta a un volumen grande de roca, por lo que los resultados no se verán gravemente interferidos por circunstancias locales. El inconveniente que puede presentar este procedimiento es la ambigüedad en la interpretación de los resultados de las medidas de campo, en algunos casos. En cuanto a los aspectos netamente eléctricos, es necesario considerar los efectos de la tensión y la corriente, y la magnitud de los daños que pueden causar, cuando no existe una Puesta a Tierra efectiva.

2.1.6 CORRIENTES.

Los diferentes tipos de tensiones que se presentan cuando un aterramiento está sometido a falla, ocasionan en las personas, animales y equipos, corrientes que pueden producir daños, desde los más leves, hasta muerte o deterioro, dependiendo de la magnitud de las tensiones, características resistivas del cuerpo humano, del animal, aislamiento de equipos, y el tiempo que dure la falla.

2.1.7 CORRIENTES POR EL CUERPO HUMANO.

El paso de las corrientes por el cuerpo humano, y sus efectos, se siguen estudiando desde hace mucho tiempo, habiéndose encontrado que la gravedad del daño ocasionado, no sólo depende de la tensión y de la corriente, sino también de la región del cuerpo que atraviesa (ver Fig.2.12), el tiempo de exposición y la frecuencia de la corriente, siendo mayor los estragos, cuanto más alta es la frecuencia.

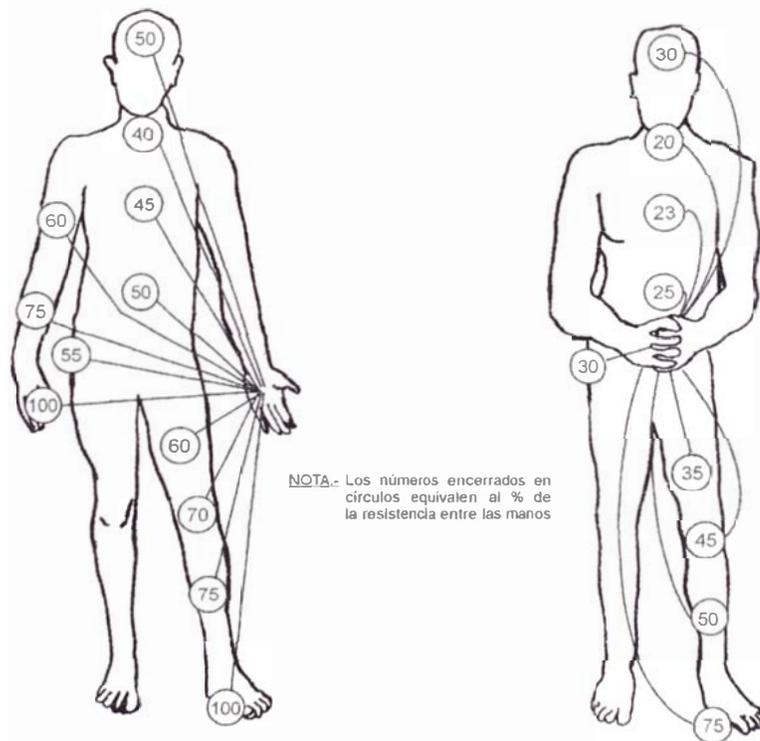


Fig. 2.12 Resistencia del Cuerpo Humano al paso de la corriente según la región que atraviesa.

Salvo condiciones especiales, el contacto con la electricidad, se hace con la piel; la resistencia de la superficie de la piel será la que limite el valor de la corriente, ya que por la parte interna del cuerpo, la corriente fluye por la sangre y tejidos con mucha facilidad. La resistencia del cuerpo disminuye notablemente, a medida que se humedece la piel, segrega adrenalina (por el estado de ánimo), ingiere líquido, y/o aumenta el voltaje.

2.1.8 EFECTOS DE LA CORRIENTE SOBRE EL CUERPO HUMANO.

Sobre los efectos que pueda ocasionar la corriente según su magnitud, no existe uniformidad de criterios, y la comprobación experimental sólo llega a niveles que no ocasionan daños a las personas, por lo que son incompletos. La Tabla 2.1 muestra un resumen de estos efectos.

Tabla 2.1

EFECTOS FISIOLÓGICOS	INTENSIDAD DE CORRIENTE (mA)		
	Consejo Nacional de Seguridad de EE.UU. De N.A.	Norma IEC 479	
		Varón	Mujer
- Ausencia de sensación y mal efecto	Hasta 1	1.2	0.6
- Nivel mínimo de percepción y produce choque indoloro (cosquilleo)	1 a 8	5.2	3.5
- Produce choque doloroso con pérdida de control muscular	9 a 15	9.0	6.0
- Choque doloroso y fuertes contracciones musculares y dificultad para respirar	20 a 50	62.0	41.0
- Puede causar fibrilación ventricular y muerte	50 a 100 (*)	(*)	(*)
- Causa muerte por fibrilación	100 a 200 (*)	(*)	(*)
- Produce quemaduras graves, paraliza el corazón y muerte por asfixia	200 a más (*)	(*)	(*)
Son valores estimados en base a experimentos con animales			
(*) No reportan valores			

2.1.9 CORRIENTE MÁXIMA ADMISIBLE POR EL CUERPO HUMANO.

El valor de la corriente máxima admisible que puede recorrer a través del cuerpo humano, no ha sido rigurosamente determinado. Usualmente se define como la mayor corriente que recorre una trayectoria que incluye al corazón, y provoca el inicio de fibrilación ventricular o un paro cardíaco.

Siendo por lo general evaluado con la fórmula experimentalmente obtenida:

$$I = \frac{116}{\sqrt{t}} (mA)$$

IEC, recomienda utilizar la fórmula

$$I = I_p + \frac{Q}{t} (mA)$$

Donde: I = Corriente de Fibrilación
I_p = Corriente de percepción (Orden de 10 a 20 mA)
Q = Carga eléctrica (se asume 10 mC)
t = Duración del choque (seg.)

2.1.10 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES POR EL CUERPO HUMANO.

En la Tabla 2.2, para cada caso de tensión, producto de fallas, se muestran los esquemas, el circuito equivalente y las expresiones que permitan evaluar las corrientes que atraviesan por el cuerpo humano, cuando una persona se encuentra expuesta a la acción de éstas.

Las fórmulas que se presentan en esta Tabla, han sido desarrolladas para condiciones desfavorables, considerando que la persona no cuenta con zapatos ni guantes, que presenten alguna resistencia de aislamiento.

TIPO TENSION	ESQUEMAS	CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE	FORMULA
			<p>Exacta</p> $I_{cht} = \frac{V_t}{(R_{ch} + R_c/2)}$ <p>Aproximada</p> $I_{cht} = \frac{V_t}{1000 + 1.5}$
			<p>Exacta</p> $I_{cht} = \frac{V_p}{(R_{ch} + 2R_c)}$ <p>Aproximada</p> $I_{cht} = \frac{V_p}{1000 + 1.5}$
			<p>Exacta</p> $I_{cht} = \frac{V_{tr}}{(R_{ch} + R_c/2)}$ <p>Aproximada</p> $I_{cht} = \frac{V_{tr}}{1000 + 1.5}$
<p>Donde : Tensiones y corrientes de Toque, Paso y Transferencia (V_t), (I_{cht}); (V_p), (I_p) y (V_{tr}), (I_{chtr}) respectivamente. (R_{ch}) : Resistencia del cuerpo humano, en promedio 100 Ω (R_c) : Resistencia de contacto superficial con el suelo y resistencia de apoyos, (según IEEE-80 puede asumirse $R = 3$)</p>			

Tabla 2.2 Esquemas de Tensiones Producidas por Fallas.

2.2 MEDICION DE RESITIVIDAD

La resistividad o resistencia especifica de un material, se define como la resistencia en corriente continua, entre las caras paralelas opuestas de una porción de material de longitud unitaria y sección unitaria uniforme.

La característica principal del terreno es la resistencia que ofrece al paso de la corriente, estando directamente relacionada con el parámetro de RESISTIVIDAD (ρ)

La resistividad se mide normalmente por resistencia cúbica del material y se expresa en Ohm-metro (Fig. 2.13)

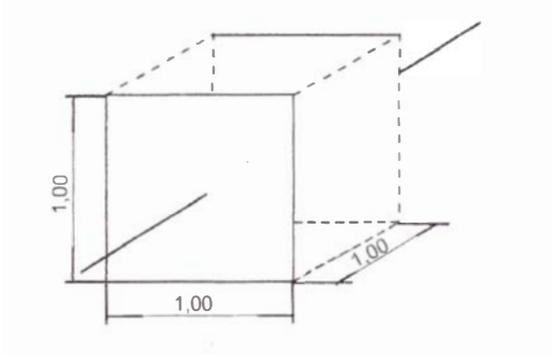


Fig. 2.13

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

$$\rho = \frac{RS}{L} \left(\frac{\Omega m^2}{m} \text{ o, bien } \Omega m \right)$$

La resistividad de un terreno es variable, y dependen principalmente de:

- Carácter geológico del terreno
- Carácter químico del terreno (sales, electrolitos)
- Temperatura del terreno
- Humedad del terreno

El factor que influye más directamente sobre la resistividad, es el carácter geológico del terreno.

En la Tabla 2.3 se indican valores para diferentes tipos de suelos.

Tabla 2.3

Valores de resistividad para rocas y terrenos comunes

<u>Terreno</u>	<u>Resistividad</u> (Ω - m)
Granito compacto – Gneiss seco	10 ⁶
Carbono, Diorita, Sienita, Gneis diorítico	10 ⁵
Basalto, Lava basáltica	10 ⁴
Granito mojado	2,000
Calcáreo mesozoico	1,500 ÷ 150
Yeso seco, arena fina seca	1,000
Calcáreo miocénico	1,000 ÷ 50
Arena normal	500 ÷ 250
Formaciones cristalinas metamórficas	500 ÷ 80
Lava antigua, puzolana	500 ÷ 30
Turba seca	300 ÷ 150
Arena Arcilla	200 ÷ 80
Aluviones embebidos de agua dulce	200 ÷ 20
Arena cascajos mojados	150 ÷ 100
Aluviones secos	100 ÷ 50
Arena arcilla en estratos alternados	100 ÷ 20
Arena arcillosa mojada	50
Arcilla normal	60 ÷ 20
Margas secas	50
Arcilla escamosa	20 ÷ 3
Arcilla ferrosa, piritosa, margas, turbas, arcilla	10
Mioceno, plioceno (Arcilla marga)	10 ÷ 1
Aluviones embebidos de agua salada	5 ÷ 1
Esquistos gráfícos secos	3,5
Agua de mar	1
Esquistos gráfícos mojados	1 ÷ 0,5
Mineral conductor	0,1
Solución salina	0,1 ÷ 0,01

• Fuente : Impianti di messa a terra. ENPI Serie C n° 38

En las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se observan las variaciones de resistividad en función de la temperatura, humedad y contenido de sales.

VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD CON LA TEMPERATURA

Terreno arcillo-arenoso con 15% de humedad

Tabla 2.4

° C	20	10	0 agua	0 hielo	- 5	- 15
ρ (Ω m)	75	100	138	300	790	3,300

VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD CON LA HUMEDAD

Terreno arcillo-arenoso a 10 °C

Tabla 2.5

% agua	2,5	5	10	15	20	30
ρ (Ω m)	1500	430	185	105	63	42

VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD CON EL CONTENIDO DE SALES

Terreno arcillo-arenoso con 15% de humedad a 10 °C

Tabla 2.6

% sales	0	0,10	1	5	10	20
ρ (Ω m)	107	18 -	4,6	1,9	1,3	1

* Fuente : Impianti di messa a terra. ENPI Serie C n° 38

Como se ve, la resistividad el terreno puede tener valores muy distintos en función del tipo de terreno de que se trate (de $10^6 \Omega$ m a 0.1Ω m) y además, para un mismo terreno, está sujeta a variaciones de origen climático, como son la humedad y la temperatura.

Estas variaciones son suficientemente importantes como para tenerlas en cuenta a la hora del diseño de la toma de tierra, de forma que no se alcancen valores de resistencia de tierra demasiado elevados en las épocas de sequía y frío. Esto se consigue, evidentemente, sobredimensionando los electrodos de toma de tierra.

A título orientativo, cabe decir que, en los terrenos donde la humedad está en función de las lluvias, la variación de la resistividad media, se produce con un

cierto desfase. En general, en el hemisferio norte, los valores más bajos se alcanzan de Julio a Setiembre, los más altos se alcanzan en Enero – Febrero, en especial por las bajas temperaturas.

2.2.1 ELECTRODOS DE TOMA DE TIERRA.

Los electrodos pueden ser objetos metálicos enterrados en el suelo, cuya misión es difundir la corriente de defecto a tierra, logrando una resistencia lo más baja posible.

Dado que el terreno tiene un resistividad muy elevada (del orden de 10^7 mayor que la de los metales), para conseguir resistencias bajas, será preciso disponer de superficies de contacto muy grandes.

El paso de corriente del electrodo hacia el terreno, tiene lugar en todas direcciones alrededor del mismo, dirigiéndose hacia el otro electrodo que cierra el circuito con tierra.

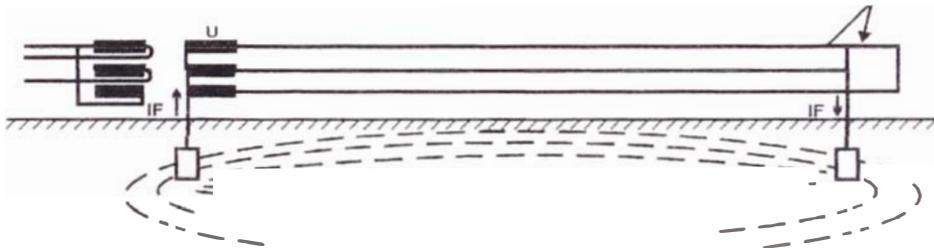


Fig. 2.14 Paso de corriente por tierra entre dos electrodos

Si la resistividad eléctrica de las rocas dependiese únicamente de la de los minerales constituyentes, habrían de considerarse en la mayoría de las ocasiones como aislantes, puesto que el cuarzo, los silicatos, la calcita, etc., tienen resistividades muy elevadas, por lo que pueden considerarse como aislante (muy malos conductores).

Solamente en el caso de que la roca contuviese minerales conductores en cantidades importantes, podría considerarse ésta como conductora. Afortunadamente, todas las rocas tienen poros en una mayor o menor proporción, los cuales suelen estar ocupados, total o parcialmente, por electrolitos, lo que facilita que en la roca tenga lugar una conducción iónica. Este fenómeno hace que las

rocas se comporten como conductores con resistividades que varían dentro de un margen muy amplio.

De la idea desarrollada anteriormente, se deduce que el estudio de las resistividades de las rocas, hace necesario llevar a cabo el estudio de la resistividad eléctrica de cuerpos heterogéneos, los cuales, en el caso más sencillo, estarán compuestos de dos tipos de elementos, uno de los cuales, de resistividad " ρ_2 " sirve de soporte o medio encajante, y otro caracterizado por una resistividad " ρ_1 ", que se encuentra disperso en el seno del primero.

2.2.2. FACTORES DE LOS QUE DEPENDE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

De lo dicho anteriormente, se deduce que, entre los numerosos factores que contribuyen a determinar la resistividad eléctrica de una porción localizada del terreno, cabe destacar los siguientes:

- El tipo de suelo de que se trate (su naturaleza)
- La composición química de las sales disueltas en el agua, que estando contenida en las porosidades del terreno, actúa como electrolito.
- El nivel freático del lugar, es decir, la abundancia de aguas subterráneas contenidas en el subsuelo.
- La temperatura ambiental, sobre todo cuando se encuentra en las proximidades de la temperatura de congelación del agua, punto crítico en el comportamiento eléctrico del terreno.
- La granulometría del suelo, es decir, el tamaño de las partículas que lo componen, lo cual determinará una mayor o menor porosidad y, por tanto, una mayor o menor aptitud para la conducción de la corriente eléctrica.
- El grado de composición del suelo.

En lo que se refiere al tipo de suelo, se ha de mencionar que la resistividad tiende a seguir la de las rocas originarias, y es tanto mayor cuanto mayor sea su edad geológica. Existen algunos compuestos que se pueden considerar como base en la formación de los suelos, entre ellos el óxido de silicio y el óxido de aluminio, que entre otras propiedades se caracterizan porque no son demasiado buenos

conductores. Junto con este tipo de materiales (malos conductores), coexisten diferentes tipos de sales, las cuales contribuyen favorablemente a la disminución de la resistividad del suelo.

Se puede concluir diciendo que, debido a la naturaleza no homogénea de la constitución del subsuelo, la resistividad es una propiedad muy particular y localizada de una determinada zona de terreno, variando, normalmente, en función del punto donde se efectúe la medida y de la profundidad a la que esta medición tenga lugar, fenómeno en cierta medida debido a la estratificación del subsuelo. Por ello, el dato de la resistividad del suelo, no tiene demasiado sentido ni aplicabilidad, si no va acompañado de todas las coordenadas necesarias para su perfecta localización.

2.2.3. RESISTIVIDAD DE DIFERENTES TIPOS DE SUELO.

El tipo de suelo desempeña un papel muy importante en lo relativo a la resistividad. Por desgracia, los tipos de suelo no están definidos muy claramente. Por ejemplo, el término "arcilloso" se aplica a una gran variedad de suelos. Hay que limitarse, pues, a decir en forma muy general que un suelo arcilloso o un tipo cualquiera de suelo de ese género, tiene una resistividad de tantos Ohmios-metro. Además, se encuentra el mismo tipo general de suelo en ubicaciones diversas y, a menudo, se comprueba que la resistividad difiere de un lugar a otro. El nivel de las aguas subterráneas ejerce gran influencia en la resistividad (véase el Tabla 2.7).

Contenido de Agua (% del peso)	Valor General de la Resistividad en $\Omega \times m$	
	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	

Tabla 2.7 Influencia de las Aguas Subterráneas en la Resistividad del Suelo

2.3 OBJETIVOS DE LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD.

El principal objetivo de las Mediciones, es la evaluación de los parámetros que nos indican la naturaleza geológica del terreno en que se desea desarrollar la instalación de Puesta a Tierra es decir, la resistividad de los tipos de estratos y de sus espesores correspondientes a priori ; calculándose la profundidad a la cual se ejecutará la implantación del sistema de electrodos, para efectuar luego las excavaciones correspondientes .

Otro objetivo es la de aplicar los resultados a las técnicas de diagnóstico de corrosión, y verificar el diseño de ánodos de protección catódica. Las mediciones constituyen un apoyo técnico esencial, ya que su ejecución requiere una base racional.

Actualmente, en la mayor parte de las obras, simplemente se cavan pozos en tierra y, ni siquiera se consideran los costos para la evaluación de Resistividad o, en algunos casos, se aplican reglas de la práctica empírica que se aconsejan en los manuales técnicos simplificados y que no necesariamente corresponden a cada realidad o aplicación.

Se hace necesario por lo tanto conocer la resistividad y espesor de los diferentes estratos hasta la profundidad adecuada, que dependerá de la zona de influencia de la puesta a tierra, para ejecutar la protección ad hoc al tipo de red o equipo a proteger.

2.3.1 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DE LOS SUELOS.

El conocimiento, lo más exacto posible, de las características eléctricas de un terreno, es de importancia fundamental para un proyecto exitoso de una puesta a tierra. Algunos proyectistas de sistemas de puesta a tierra, pretenden obtener un conocimiento de la resistividad de un terreno por simple inspección ocular de la zona. Aún suponiendo una vasta experiencia en cuanto a la resistividad de un terreno de acuerdo a sus características generales, esta inspección ocular conduciría a conclusiones sólo válidas para el terreno superior visible. La

resistividad de las capas inferiores que son, en la mayoría de los casos, fundamentales para la determinación de una resistividad equivalente, no es posible determinarla por inspección visual, a menos que se realicen sondeos mecánicos.

En otros casos, se pretende extrapolar conclusiones obtenidas de mediciones realizadas en zonas cercanas o estimadas como similares a la zona en cuestión. La experiencia dice que generalmente estas extrapolaciones conducen a valores que distan mucho de la realidad. Un proyecto realizado con valores errados de resistividad, puede resultar subdimensionado y, por lo tanto, deficiente desde el punto de la seguridad y el servicio; o sobredimensionado, lo que significa gastos innecesarios.

En vista de lo anterior, se juzga necesario abordar el problema de medición de resistividad de suelos, con cierta profundidad, de forma que el proyectista de instalaciones a tierra, obtenga de sus mediciones en terreno, conclusiones válidas dentro de un límite aceptable de aproximación.

2.3.2 INHOMOGENEIDAD DE LOS TERRENOS.

Salvo casos muy especiales, lo normal es que los terrenos no sean homogéneos. Por lo general, las inhomogeneidades se presentan por razones geológicas, en forma de estratos o capas de diferentes materiales más o menos paralelas a la superficie del terreno, como se muestra en la figura 2.15. Todas las teorías de interpretación de mediciones que se verán a continuación, suponen la existencia de estratos paralelos.

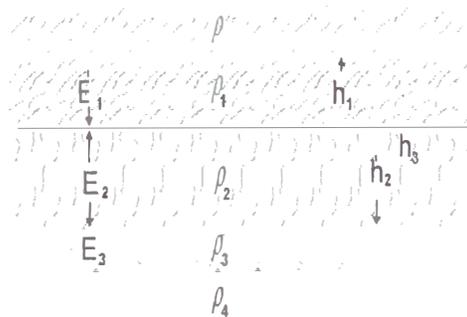


Fig. 2.15

2.4 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD.- METODO DE LOS 4 ELECTRODOS.

El método general de medición de resistividad mediante 4 electrodos, consiste en inyectar al terreno una corriente mediante un par de ellos, y medir la diferencia de

potencial entre los otros dos. La corriente inyectada puede ser corriente continua o corriente alterna de baja frecuencia (por lo general hasta unos 200 c/s) por razones de acoplamiento entre conductores, o corriente continua conmutada, también de baja frecuencia.

Se supone, para el análisis, que no existe un campo de potencial perturbador, como podría ser, por ejemplo, el de una puesta a tierra cercana al lugar de medición, que estuviese conduciendo a tierra, corrientes residuales permanentes, por desequilibrio de transformadores. Si el campo de potencial es, aproximadamente constante en la zona de medición, su influencia es despreciable. En la figura se muestra el esquema de medición mediante 4 electrodos.

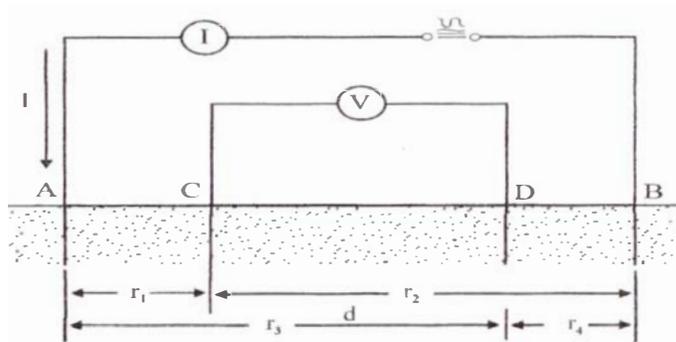


Fig. 2.16

Entre los electrodos A y B se inyecta una corriente I y, entre los electrodos C y D, se mide la diferencia de potencial. (En términos generales no es requisito que los electrodos de potencial se ubiquen en la línea de unión entre los electrodos de corriente A y B). A partir de los electrodos de corriente, se definen las distancias a los electrodos de potencial.

Si la profundidad de enterramiento de los electrodos es pequeña, comparada con la distancia entre electrodos, puede suponerse una distribución radial de la corriente, y aproximar estos electrodos a semiesferas o electrodos puntuales.

Para un electrodo puntual, el potencial producido a una distancia x en un medio homogéneo, vale:

$$\phi x = \frac{\rho I}{2 \pi x}$$

Aplicando esta expresión al esquema de medición, se tiene que la corriente que entra en A al terreno produce en C el potencial :

$$\phi C_{(A)} = \frac{\rho I}{2 \pi r_1}$$

la corriente que sale del terreno por B, produce en C el potencial,

$$\phi C_{(B)} = \frac{\rho I}{2 \pi r_2}$$

El potencial total de C vale :

$$\phi C = \phi C_{(A)} + \phi C_{(B)} = \frac{\rho I}{2 \pi r} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

ya que por tratarse de magnitudes escalares pueden sumarse algebraicamente.

En forma similar, el potencial de D, vale :

$$\phi D = \phi D_{(A)} + D_{(B)} = \frac{\rho I}{2 \pi r} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)$$

La diferencia de potencial medida por el voltímetro o considerada por el instrumento que mide resistencia, vale :

$$V = \phi C - \phi D = \frac{\rho I}{2 \pi r} \left\{ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) \right\}$$

de donde se obtiene que la resistividad vale :

$$\rho = \frac{2 \pi V}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right)}$$

Esta es la ecuación fundamental para la medición de resistividad mediante 4 electrodos.

2.4.1 MEDICION DE TERRENOS INHOMOGENEOS.

En la deducción de la ecuación fundamental de medición de resistividad mediante 4 electrodos, se ha considerado un terreno de resistividad homogénea. Si la medición se efectúa en un terreno con esta propiedad, entonces el valor de resistividad medido, corresponderá la valor único de resistividad presente en el terreno. Si el medio no es homogéneo, el valor de ρ obtenido de aplicar la ecuación fundamental, tendrá un valor ficticio, que no corresponde en general a ninguna de

las resistividades presentes en el terreno, sino a una cierta combinación de ellas. A este valor ficticio de resistividad, se le llama “resistividad aparente” y se designa como ρ_a .

La forma en que varía esta resistividad aparente, al variar la separación entre electrodos, dará la pauta para interpretar y determinar la constitución del terreno investigado. Obviamente, en un terreno homogéneo, la resistividad leída o calculada, corresponderá a la resistividad real del terreno, y su valor será independiente de la separación entre electrodos.

2.5. METODO DE WENNER

2.5.1. CONFIGURACION DE WENNER.

En esta configuración, los cuatro electrodos, ubicados sobre una línea recta, están separados a igual distancia A entre ellos.

En este caso :

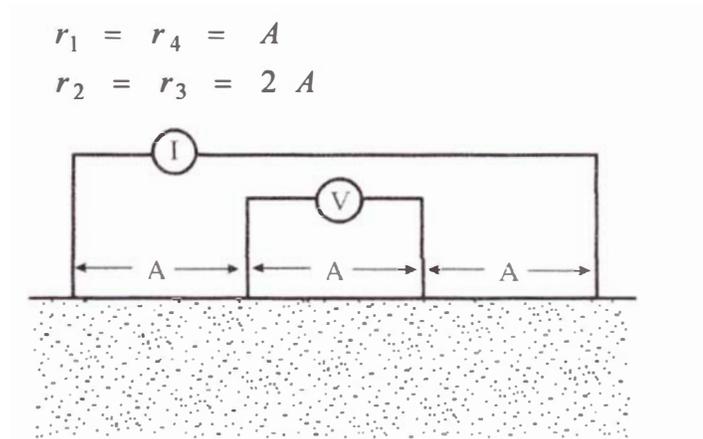


Fig. 2.17

Reemplazando estos valores en la ecuación fundamental se obtiene :

$$\rho_{a_w} = \frac{2\pi V}{I} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{A} - \frac{1}{2A}\right) - \left(\frac{1}{2A} - \frac{1}{A}\right)} = 2\pi \frac{V}{I} \cdot A$$

Si el valor de V/I , calculado o medido directamente con un instrumento, se designa como R (tiene la dimensión de una resistencia, pero carece de sentido físico real), se tiene que:

$$\rho_{a_w} = 2\pi R.A$$

Existe una variante de la configuración de Wenner, que consiste en ubicar uno de los electrodos de corriente, en un punto distante de los otros tres (en el límite teórico, al infinito). En estas condiciones:

$$\begin{aligned} r_1 &= A & r_3 &= 2A \\ r_2 &= \infty & r_4 &= \infty \end{aligned}$$

y por lo tanto:

$$\rho'_{a_w} = 2\pi R \cdot \frac{1}{\frac{1}{A} - \frac{1}{2A}} = 4\pi R.A = 2\rho_{a_w}$$

Los valores resultantes de emplear esta variante son el doble de los obtenidos con la configuración normal. Esta variante de la configuración de Wenner es poco usada. Podría, sin embargo, tener alguna ventaja en la medición de capas superficiales de alta resistividad, con un instrumento que posee un límite superior de R , ya que el rango de resistividad, se duplica con respecto a la configuración normal. Es necesario, sin embargo, disponer de las curvas teóricas para esta variante.

2.5.2. METODO DE WENNER.- OTRO ENFOQUE.

El método de Wenner, que se describe a continuación, requiere el siguiente material para hacer las mediciones:

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

La longitud de los cables es variable, dependiendo de la profundidad a la que se quiera medir la resistividad. Como orientación diremos que, para calcular la

resistividad hasta 45 m. de profundidad, harán falta dos rollos de 90 m. y otros dos de 30 m. Los cables deberán ir colocados sobre bobinas montadas en ejes deslizantes, para facilitar la extensión y la recogida de los cables. Además, los cuatro cables, deberán ser de colores diferentes, para facilitar la operación de medida.

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

Las picas auxiliares, no es necesario que sean muy largas, pues con introducirlas en el terreno 30 cm es suficiente para obtener medidas fiables. Las picas auxiliares normales, que vienen con los equipos, suelen tener 50 cm de longitud.

El método de Wenner consiste en calcular la resistividad aparente del terreno, colocando los cuatro electrodos, o picas, a distancias iguales, simétricamente separados de un punto central 0, debajo del cual queremos medir la resistividad del terreno.

El espesor de la capa de terreno de la que estamos midiendo la resistividad, es directamente proporcional a la separación entre picas, como se puede apreciar en la figura 2.18, y su valor es:

$$h = \frac{3}{4} a$$

Donde: h = profundidad para la medida de la resistividad media
 a = separación entre electrodos.

Al introducir una intensidad I en el terreno, a través de los electrodos de intensidad A y B , aparecerá en los electrodos de tensión C y D , una diferencia de potencial V , que mediremos con el aparato.

El medidor tiene una resistencia variable en su interior, que es la que varía la intensidad I que se introduce en el terreno. El medidor también registra la tensión V que se detecta entre los bornes de tensión (fig. 2.18).

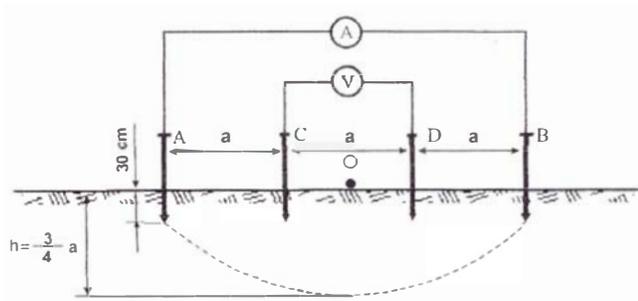


Fig. 2.18 Método de Wenner. Esquema de montaje.

La relación entre la V y la I es el valor de la resistencia variable que se registra en el medidor:

$$R = V / I$$

El valor de la resistividad aparente que calcularemos para un estrato de espesor h será:

$$\rho_a = \frac{2\pi aV}{I}$$

como $R = V / I$

$$\rho_a = 2\pi aR$$

y como

$$h = \frac{3}{4} a$$

$$\rho_a = 8 / 3\pi hR$$

Con este método y este cálculo, hemos obtenido el valor de la resistividad media de todas las capas del terreno entre la superficie y una profundidad h .

EJEMPLO:

Veamos cómo se calcula la resistividad de diferentes estratos de terreno, y la metodología, utilizando el método de Wenner.

Supongamos que tenemos un terreno de tipo arenoso, con una capa de material orgánico tipo humus vegetal, y una capa acuífera a una profundidad aproximada de 3 m. Colocamos los cuatro electrodos auxiliares, los dos de intensidad, y los dos de tensión, separados unos de otros, una distancia de "a" metros. Conectamos las

picas más extremas, que denominamos picas de intensidad, a los bornes de intensidad, y las dos picas intermedias, que denominamos picas de tensión, a los bornes de tensión del aparato. Activando la batería del aparato introducimos en el terreno una intensidad I a través de las picas de intensidad, que provocará una caída de tensión en las picas centrales. La resistencia R se mide directamente en el aparato, y es el resultado de dividir la tensión, o caída de tensión, producida en los bornes de tensión, y la intensidad introducida en el terreno, como se ha calculado antes:

$$R = V / I$$

Vamos aumentando progresivamente la distancia a de las picas, y medimos los valores de R en el aparato. Calculando el valor de h , obtendremos el valor de la resistividad aparente ρ_a , que se representa en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Variación de resistividades en función de la profundidad.

a Metros	h Metros	R Ohmios	ρ_a ohmios.metro
2	1.5	90	1,131
4	3	21.5	540
8	6	10	502
12	9	5.5	415
24	18	3	452
40	30	2	502
49.2	37.5	1.5	463

A continuación, se representa el esquema de conexión, para la medida de resistividad (fig.2.19).

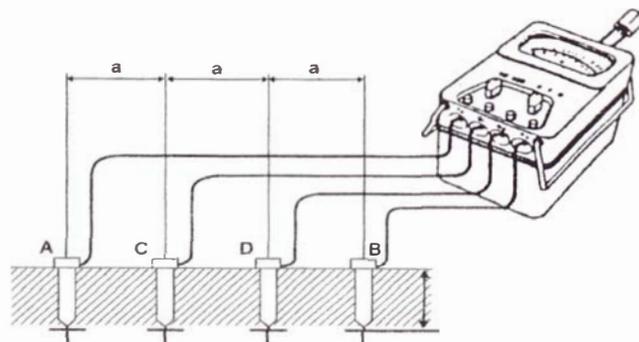


Fig. 2.19 Esquema de montaje para la medida de resistividad

2.5.3. PARAMETRO DE DISEÑO CON MEDIDAS WENNER.

Simplificando el método Wenner, y su interpretación, con dos sondeos de pequeña penetración, a 1.0 m y 2.0 m para cubrir la profundidad virtual de 4.0 m, máxima para la instalación.

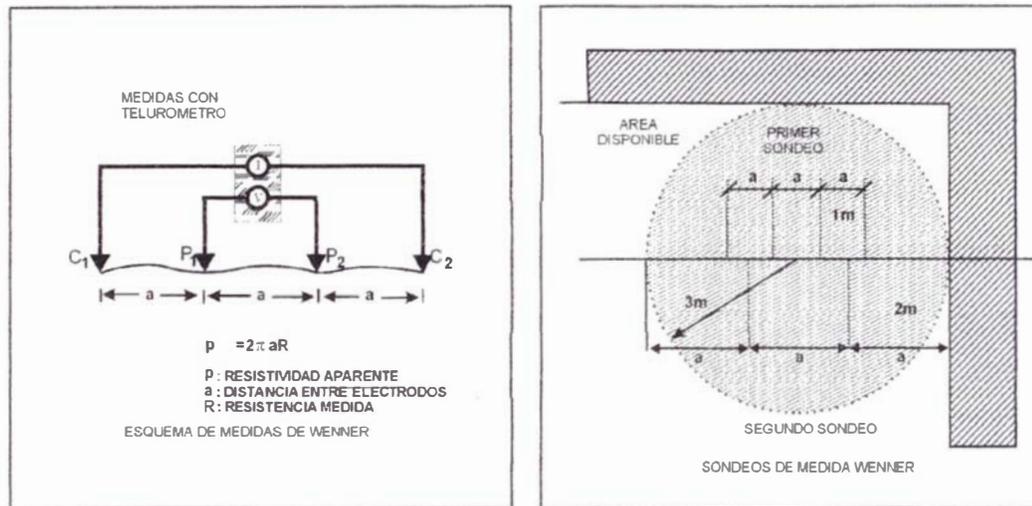


Fig. 2.20 Esquemas de medidas de Wenner y sondeos de medida Wenner.

- Condiciones Previas del Sitio.
El espacio útil para las medidas, deberá tener por lo menos un radio de 3.0 m en el sitio elegido, y estar libre de otras instalaciones.
- Medidas y obtención del Parámetro.
Los resultados de los dos sondeos de Medida con (a = 1.0 m) y (a = 2.0 m) se promedian para obtener la Resistividad de Diseño.

$$\rho = \frac{\rho_a + \rho_b}{2}$$

Resistividades mayores a 200 Ohm-m indican Subsuelo Pedregoso y se obtendrán Resistencias de Dispersión del orden de 10 Ohm; por debajo de 200 Ohm-m, se podrán obtener Resistencias próximas a 6 Ohm.

2.5.4. VENTAJAS DE LA CONFIGURACIÓN DE WENNER.

- La interpretación de los valores de R (ver punto 2.5.1) medidos en terreno, es más directa en términos de Resistividad, lo cual permite visualizar con facilidad la tendencia de la curva.
- Los instrumentos pueden ser de menor sensibilidad que los que requiere el Método de Schlumberger ya que, a medida que se alejan los electrodos de corriente, también se alejan los de potencial.

2.6. METODO DE SCHLUMBERGER.

2.6.1 CONFIGURACION DE SCHLUMBERGER.

En esta configuración, los cuatro electrodos se ubican en una línea recta. Los dos electrodos de potencial, se disponen simétricamente, con respecto al centro de medición elegido, y a una distancia entre sí pequeña (1 a 3 m). Los electrodos de corriente, se ubican también simétricamente con respecto al centro de medición.

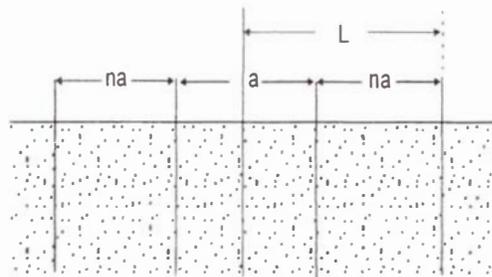


Fig. 2.21

Durante toda la serie de mediciones, los electrodos de potencial permanecen fijos, trasladándose sólo los de corriente (es decir los de los extremos). De acuerdo a la figura 2.21:

$$\begin{aligned} r_1 &= n.a & r_3 &= (n+1)a \\ r_2 &= (n+1)a & r_4 &= n.a \end{aligned}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación fundamental, resulta:

$$\rho_{a_{sch}} = \pi . R . n . (n + 1) . a$$

Si, por ejemplo, se toma $a = 1$ m, el valor de n corresponde a la distancia en metros, entre el electrodo de corriente y el de potencial adyacente. Si las distancias entre electrodos se designan de acuerdo a la figura, entonces:

$$r_1 = L - \frac{MN}{2}$$

$$r_2 = L + \frac{MN}{2}$$

$$r_3 = L + \frac{MN}{2}$$

$$r_4 = L - \frac{MN}{2}$$

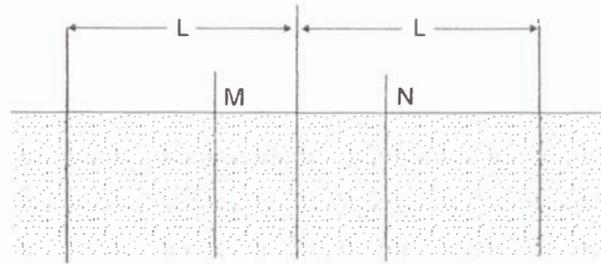


Fig. 2.22

y resulta :

$$\rho_{a_{sch}} = \pi \cdot R \cdot MN \cdot \left\{ L^2 / MN^2 - \frac{1}{4} \right\}$$

ecuación equivalente a la anteriormente deducida.

Para la configuración de Schlumberger, existe también una variante, tal como en el caso de Wenner, en la cual también los valores de resistividad son el doble de los de configuración normal.

$$\rho_{a_{sch}} = \pi \cdot R \cdot n \cdot (n + 1) \cdot a$$

o bien :

$$\rho_{a_{sch}} = \pi \cdot R \cdot MN \cdot \left\{ L^2 / MN^2 - \frac{1}{4} \right\}$$

Fuera la configuración de Schlumberger, se elige por lo general un valor de $a = 1$ m. Si al aumentar n , el voltaje leído es muy pequeño, o el instrumento llega a un límite inferior errático, convendrá el valor de a , por ejemplo hasta 3 m.

2.6.2 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODO DE SCHLUMBERGER.

HOJA DE RESISTIVIDAD POR EL METODO DE SCHLUMBERGER MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS

A	B	C	D
ESPACIAMIENTO	ESPACIAMIENTO	RESISTENCIA	RESISTIVIDAD
OA	MN	R	=PI*L 2*R/a
2.00	1.00	8.79	110.46
2.50	1.00	6.72	131.95
3.16	1.00	5.10	159.99
4.00	1.00	3.86	194.02
5.00	1.00	2.93	230.12
6.30	1.00	2.07	258.11
8.00	1.00	1.36	273.44
10.00	1.00	0.93	292.17
12.50	1.00	0.61	299.43
16.00	1.00	0.34	273.44
20.00	1.00	0.19	238.76
25.00	1.00	0.11	215.98
31.60	1.00	0.00	0.00
CONCLUSIONES:			
$\rho_2 / \rho_1 =$	1.86	CURVA DE AJUSTE	
$\rho_3 / \rho_2 =$	0.33	CURVA DE AJUSTE	
$\rho_1 =$	240	Resistividad de la primera capa en ohms-m	
$\rho_2 =$	446	Resistividad de la segunda capa en ohms-m	
$\rho_3 =$	147	Resistividad de la tercera capa en ohms-m	
E1 =	0.90	Espesor de la primera capa en m.	
E2 =	2.10	Espesor de la segunda capa en m.	

Tabla 2.9

PLOTEO DE DATOS SCHLUMBERGER

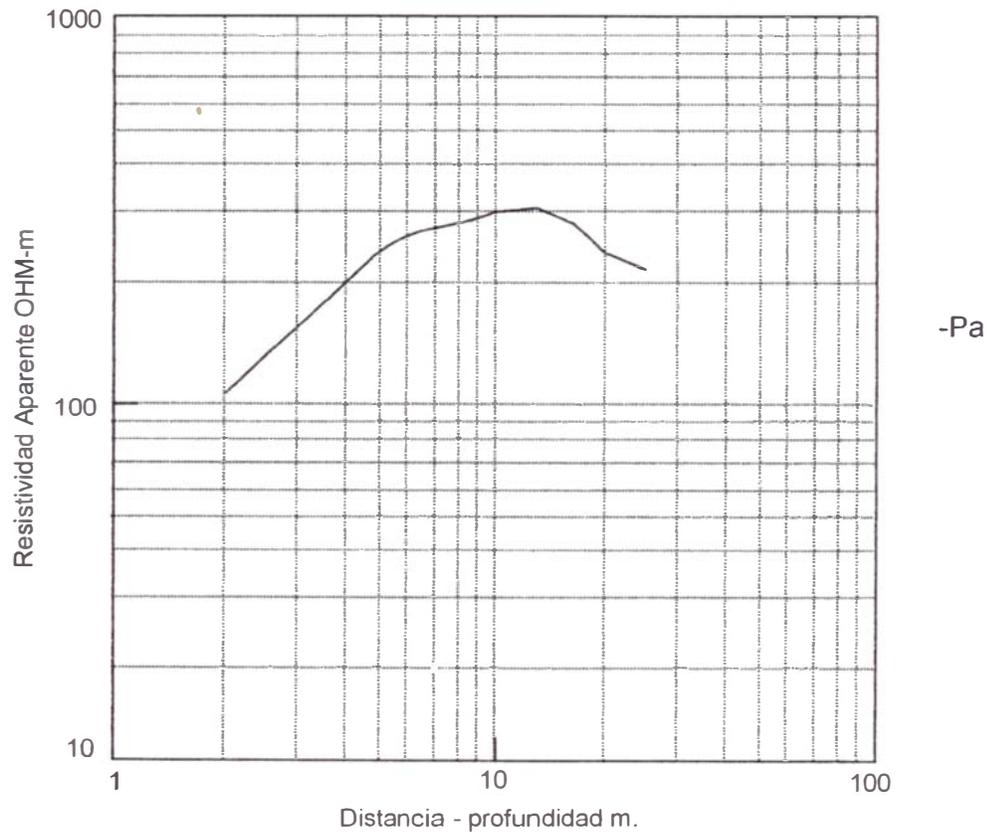


Fig. 2.23

Tabla 2.10

	CASO 1	CASO 2	
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	446	446	Ohm-m
LONGITUD	28	56	m.
PROFUNDIDAD	0.50	0.50	m.
DIÁMETRO CONDUCTOR DE COBRE	0.00	0.009	m.
LADO MAYOR / MENOR RETICULADO : A / B	1.00	2.00	
AREA TOTAL DEL RETICULADO	49	128	m ²
RESISTENCIA RETICULADO	33.3	20.73	Ohms.
ELECTRODOS			
PROFUNDIDAD EFECTIVA DEL ELECTRODO	1.5	1.5	m.
DIÁMETRO	0.01	0.015	m.
NUMERO DE ELECTRODOS	4.0	6.0	
RESISTENCIA ELECTRODOS	72.7	49.84	Ohms.
RESISTENCIA MUTUA	19.8	13.97	Ohms.
RESISTENCIA TOTAL	30.6	19.66	Ohms.
K1	1.22	1.24	
K2	5.01	5.36	
Reducción por Cambio del Terreno y Tratamiento químico con:			
1 Dosis Thor-Gel x m3	6.12	3.93	Ohms.
2 Dosis Thor-Gel x m3	4.59	2.95	Ohms.
3 Dosis Thor-Gel x m3	3.06	1.97	Ohms.
NOTA:			
CASO 1 CORRESPONDE A UN RETICULADO DE 7 x 7 m.			
CASO 2 CORRESPONDE A UN RETICULADO DE 8 x 16 m.			
Los resultados en la práctica pueden tener un margen de error de + / - 25%			

2.6.3 VENTAJAS DE LA CONFIGURACIÓN DE SCHLUMBERGER

- Esta configuración es menos sensitiva a las variaciones laterales del terreno, o buzamiento de los estratos, debido a la inmovilidad de los electrodos de potencial.
- La realización práctica de medidas en terreno, es más rápida, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente.

CAPITULO III

SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA

En este capítulo se desarrollará, inicialmente, la terminología básica de la puesta a tierra, y los parámetros relativos a ella. Se definirán, luego, los tipos de electrodos y la Resistencia de Puesta a Tierra para cada tipo, con sus respectivos cálculos de resistencia. A continuación, se especificarán los elementos que influyen en la resistividad del terreno, tales como:

- Naturaleza del terreno
- Humedad
- Temperatura
- Salinidad
- Estratigrafía del terreno
- Variaciones estacionales
- Factores de naturaleza eléctrica
- Compactación del terreno alrededor de los electrodos y
- Tratamiento químico del suelo.

En la parte final del capítulo, se tratará sobre varios factores, por los cuales se dividen los sistemas de Puesta a Tierra, tales como:

- Por área que ocupan para su instalación
- Por ubicación de las tomas de tierra
- Por impedancia de la conexión a tierra y
- Por función que cumplen.

3.1 TERMINOLOGIA

Es conveniente definir algunos términos que tienen relación con el tema de Puesta a Tierra.

Varias normas pertinentes tienen sus propias definiciones, no siempre concordantes unas con otras. Se ha estimado conveniente adoptar las siguientes definiciones:

Puesta a tierra. Es una unión, intencional o casual, mediante la cual un circuito eléctrico o equipo, se conecta a tierra o a un cuerpo conductor de dimensiones relativamente grandes, que hace las veces de tierra. El objetivo es establecer y mantener el potencial de tierra (o del cuerpo conductor) o, aproximadamente, ese potencial en los conductores conectados a ella, y conducir la corriente de tierra desde la tierra o cuerpo conductor.

Conexión a tierra. Es una conexión usada para establecer una puesta a tierra.

Malla de tierra. Es un sistema de electrodos de tierra, formado por conductores desnudos, interconectados y enterrados, de modo de proporcionar una puesta a tierra común a los equipos y estructuras metálicas de una instalación. Puede estar conectada a electrodos de tierra auxiliares, para disminuir su resistencia a tierra.

Malla equipotencial. Es un conjunto de conductores desnudos, ubicado sobre o bajo tierra, conectado a una puesta a tierra, para dar protección contra eventuales voltajes de contacto peligrosos.

Sistema de Puesta a Tierra. Consiste en la interconexión de todas las puestas a tierra, en un área especificada.

Resistencia a tierra. Es la resistencia existente entre un electrodo o malla de tierra, y un punto denominado tierra remota. Se define como el cociente entre el potencial eléctrico y la corriente de tierra.

Tierra remota de referencia. Es un punto o área de la tierra distante, tal que la resistencia mutua con el electrodo, malla o sistema en consideración, sea cero. A la tierra remota se le asigna el potencial cero.

Línea equipotencial. Es la que une todos los puntos de igual potencial en un instante dado.

Perfil de potencial. Es un gráfico del potencial, como función de la distancia a lo largo de una trayectoria especificada.

Gradiente de potencial. Es la pendiente del gráfico de perfil de potencial, cuya trayectoria intersecta en ángulo recto las líneas equipotenciales.

Voltaje entre pies. Es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos sobre el terreno, separados entre sí a una distancia de un paso, la cual se supone de un metro, en la dirección de máxima gradiente de potencial.

Resistividad. Es numéricamente igual a la resistencia en corriente continua, entre las caras opuestas paralelas de una porción de material, de longitud y sección uniforme unitaria.

Conductividad. La conductividad es igual al valor recíproco de la resistividad.

Conductor de tierra. Conductor o conjunto de conductores, que enlazan la puesta a tierra al colector de tierra; esta definición es válida, únicamente para los tramos aislados eléctricamente del terreno, mientras que los tramos en contacto con el terreno, son parte de la puesta a tierra.

Colector de tierra. Conductor en forma de barra o de anillo, al que están conectados, de un lado, el conductor o conductores de tierra y, del otro lado, el o los sistemas de distribución de tierra.

Sistemas de distribución de tierra. Conductor o conjunto de conductores que enlazan al colector de tierra las distintas partes que han de ponerse a tierra.

Instalación de tierra. Conjunto general de tierra, formado por la(s) puesta(s) a tierra, el(los) sistema(s) de distribución de tierra (Ver figura 3.1)

Instalación de tierra de servicio. Instalación de tierra, utilizando para el funcionamiento de equipos electrónicos de control, procesamiento de datos y de comunicaciones; como continuidad de pantalla.

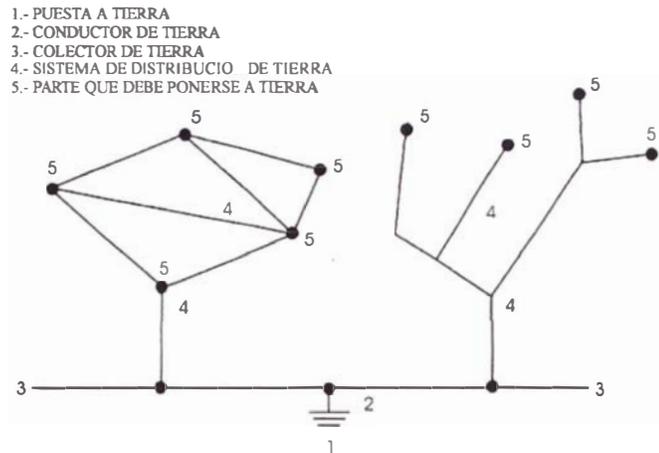


Figura 3.1

Instalación de tierra de protección. Instalaciones de tierra, empleadas para limitar y eliminar los fenómenos eléctricos transitorios y accidentales, de origen atmosférico e industrial.

Instalaciones de tierra separadas. Instalaciones de tierra, con puestas a tierra distintas, concebidas de tal manera que, durante su funcionamiento, la influencia recíproca de una, no sea sensible a la otra (desde el punto de vista del riesgo, o del funcionamiento entre equipos).

Poner a tierra. Conectar un equipo determinado, a una instalación de tierra adecuada al tipo de servicio.

Tensión de contacto. Tensión a la que puede estar sometido el cuerpo humano, como consecuencia del contacto con partes metálicas accesibles que, por regla general, no deben estar bajo tensión pero que, por defectos de aislamiento o por otras causas, podrían encontrarse bajo tensión.

Interconexión para la igualación 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 puedan constituir un peligro para el personal, y para los equipos.

Conductor conectado a tierra. Cuando se discute sistemas y circuitos, el término conductor conectado a tierra se usa muy a menudo, porque juega un papel muy importante en un sistema puesto a tierra. Para aclarar el concepto, sólo se usará un alambre monofásico.

La palabra que hay que considerar en la figura 3.2 es "intencionalmente". Esto indica que no puede ser accidentalmente, o un error, un conductor intencionalmente conectado a tierra cuando se realiza la instalación.

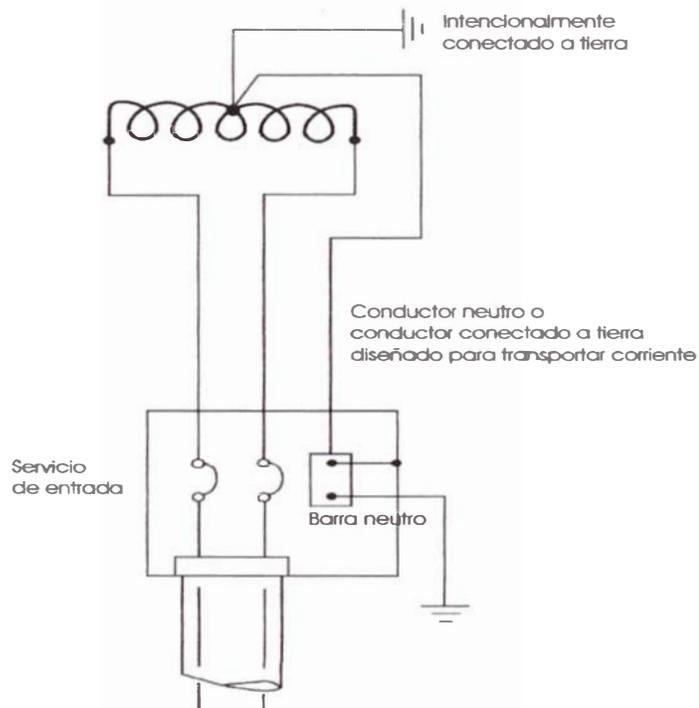


Fig. 3.2 Definición de conductor conectado a tierra

Terminología de voltaje. Dos términos muy importantes, usados en sistemas de puesta a tierra son:

- Voltaje a tierra
- Neutro

La figura 3.3 ilustra la definición de voltaje a tierra. Existen dos aspectos muy importantes en esta definición. Estas son:

1. Para circuitos puestos a tierra, el voltaje entre un conductor y el punto o conductor del circuito puesto a tierra.
2. Para un circuito no puesto a tierra, el mayor voltaje entre un conductor y otro conductor del circuito.

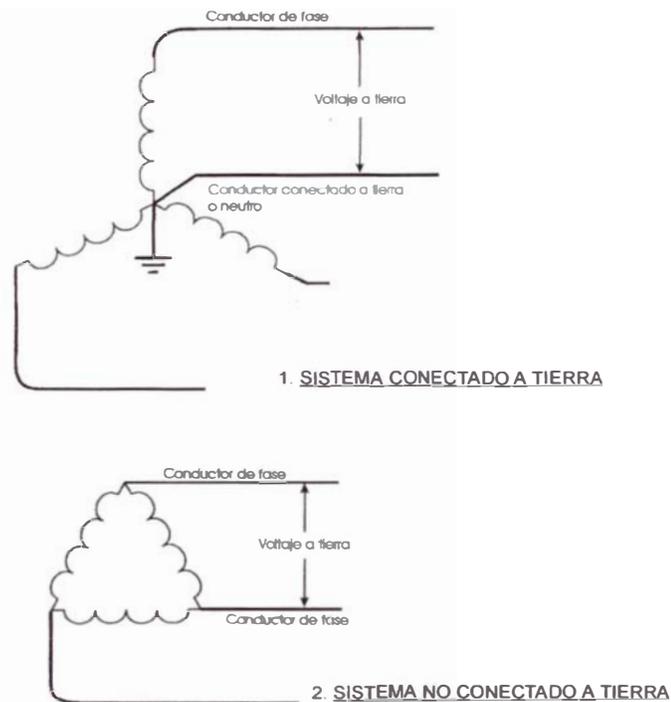


Fig. 3.3 Definición de voltaje a tierra

Cuando el sistema es puesto a tierra, existe un punto neutro, el conductor de circuito conectado al punto neutro, se llama conductor neutro. Con pocas excepciones, el conductor conectado a tierra es el conductor neutro. El conductor conectado a tierra se define como el neutro de un sistema monofásico de tres hilos.

Sistemas de corriente directa. La figura 3.4 ilustra un sistema de dos hilos, de corriente directa con el conductor conectado a tierra. Este sistema debe ser conectado a tierra cuando suministra una instalación.

Como se puede ver en la figura, cuando la fuente de suministro se encuentra ubicada fuera del edificio, e conductor del electrodo de tierra, se instala en la fuente.

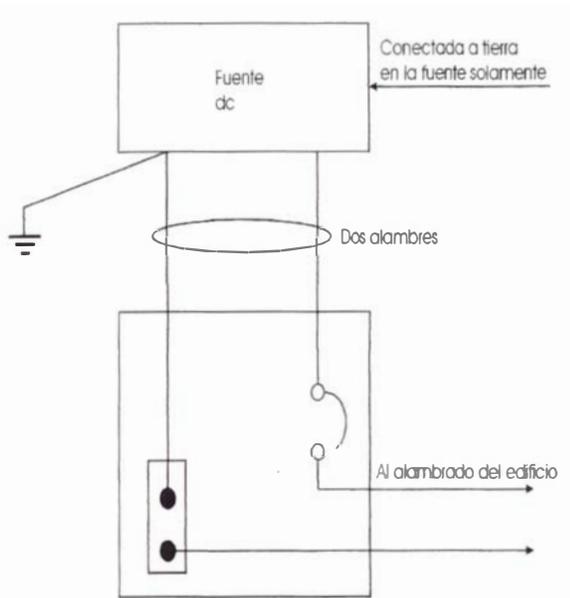


Fig. 3.4 Conectando a tierra un sistema de 2 hilos

La figura 3.5 demanda que el conductor neutro de un sistema de tres hilos de cc, el cual suministra el alambrado de un edificio, sea conectado a tierra. El código eléctrico no indica voltajes máximos o mínimos, y no menciona ninguna excepción. De nuevo, el conductor del electrodo de tierra, no se une al segundo conductor del electrodo de tierra en el servicio, como es el caso de sistemas conectados a tierra de corriente alterna.

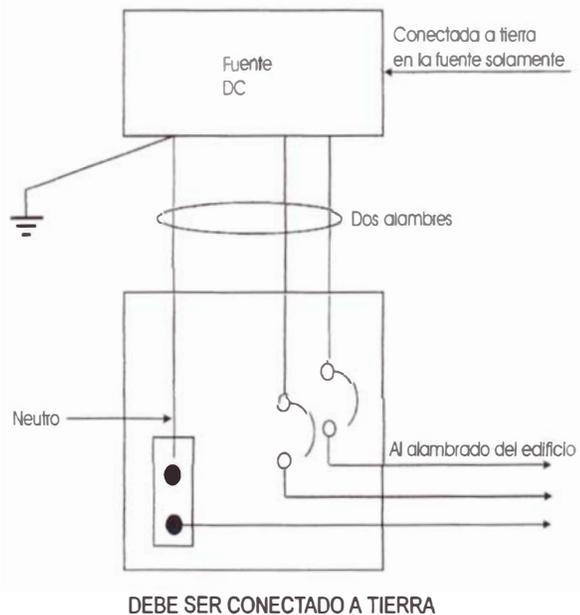


Fig. 3.5 Requerimiento para un sistema de 3 hilos.

3.2 TIPOS DE ELECTRODOS

Es aconsejable utilizar como electrodos de tierra los materiales indicados:

- Electrodo
- Acero galvanizado
- Cobre
- Acero cobreado.

Advertencias:

1. Si se recurre al empleo de materiales ferrosos, dar preferencia a los tipos galvanizados en baño caliente, o cobreados.
2. Evítese la colocación de electrodos en terrenos sujetos a hundimientos o corrimientos de tierra (fenómeno de “desmoronamiento”, o sea, acción de la lluvia y de aguas torrenciales que arrastran la tierra).

3.2.1 EMPLEO DE LA CANALIZACION DEL AGUA

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

Conviene recordar, sin embargo, que se va extendiendo el uso de tubos de material aislante, en cuyo caso, la eficacia de la conducción del agua como electrodo, es nula.

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

La capa de protección contra la corrosión que, eventualmente pueda recubrir el tubo(pintura), deberá eliminarse cuidadosamente, a fin de obtener un buen contacto

entre el conductor de tierra y el tubo metálico. Luego, se aplicará de nuevo la capa protectora contra la corrosión, por encima del conexionado.

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

Prescindiendo del empleo de la conducción del agua como electrodo, la conexión entre ésta y la instalación de tierra de las redes de tuberías metálicas destinadas al aporte, distribución y descarga del agua en el interior del edificio, adquiere una importancia particular a los efectos de equipotencialidad de las masas. Además, es necesario recordar, en este caso, que los empalmes entre las distintas tuberías, no garantizan una perfecta conexión eléctrica y, por lo tanto, será conveniente cortocircuitarlos mediante puentes.

3.2.2 CASOS NO RECOMENDABLES PARA MEDICIONES

Teniendo en cuenta que toda medición, en época de lluvias o en estaciones invernales con fuerte humedad ambiental y neblina, dará resultados optimistas, que pueden conducir a errores de diseño, también se pueden enunciar algunos casos que deberán servir de orientación, para la ejecución de las campañas de medición.

En previsión de errores en los resultados.

1. Durante alta humedad ambiental, neblina o rocío, con ligero humedecimiento del suelo.
2. Después de una lluvia en que el suelo ha absorbido agua, y la filtración es lenta.
3. Cuando hay conductores pelados, o cuando no se logran buenos contactos con el conexionado.

En previsión de accidentes.

1. Durante horas de lluvia y tormentas en otro tramo de la misma línea.
2. Durante horas de humedad en que se escucha el chisporroteo en los aisladores.

3. Durante la ejecución de trabajos de mantenimiento preventivo o correctivo sobre la línea.

3.2.3 PRECAUCIONES PARA UNA BUENA MEDICION

1. * Los electrodos de exploración deberán ser clavados en forma de establecer un buen contacto con el suelo.
 * La profundidad de introducción para la medida de resistividad debe ser del orden de 10 a 30 cm. en terreno compacto.
 * Para la medida de la resistencia, se debe asegurar en el electrodo de corriente C2, un contacto óptimo con el suelo, si es posible introduciéndolo a una profundidad de 40 a 50 cm., después de humedecer el punto de clavado.
2. Si el terreno es deleznable, remover el material suelto, hasta encontrar tierra firme y elevar en él, el electrodo.
3. Si el suelo tiene una capa gruesa de arena o material suelto, verter agua en el punto de elevación de los electrodos.
4. Verificar el correcto contacto en los puntos de conexión de la bornera del instrumento, y en los puntos de toma de los electrodos.
5. Verificar los conductores aislados para evitar puntos de desgaste o degradación de aislamiento.

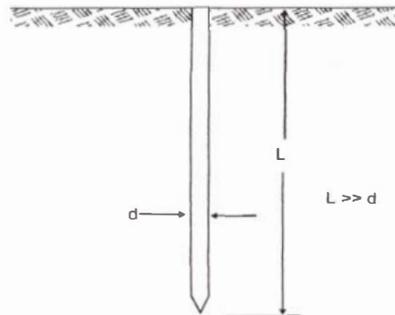
3.2.4 TIPOS DE ELECTRODOS

Los electrodos pueden clasificarse, por su posición, en Verticales y Horizontales.

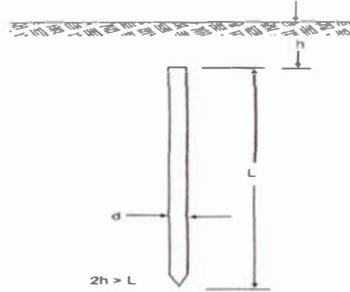
3.2.4.1 ELECTRODOS VERTICALES O JABALINAS.

- a) Al nivel del Ancho.

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \frac{4L}{d}$$



b) Enterrado a profundidad "h".



$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \left[\frac{2L}{d} \sqrt{\frac{4h + 3L}{4h + L}} \right]$$

c) Grupos de Jabalinas paralelas, teniendo en cuenta la resistencia de puesta a tierra de una de ellas.

$$R = R_1$$

- Dos Jabalinas:
$$R_2 = R_1 \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right)$$

- Tres Jabalinas:
$$R_3 = R_1 \left[\frac{2 + \alpha - 4\alpha^2}{6 - 7\alpha} \right]$$

- Cuatro Jabalinas:
$$R_4 = R_1 \left[\frac{12 + 16\alpha - 23\alpha^2}{48 - 40\alpha} \right]$$

Donde:
$$\alpha = \frac{r}{a}$$

α : Coeficiente de reducción

r : Radio de la semiesfera equivalente en m.

a : Distancia entre electrodos m.

Expresión aplicable a Jabalinas
$$r = \frac{4}{L_n} \frac{4L}{d}$$

TABLA 3.1 Radios de la semiesfera equivalente para diferentes longitudes de jabalina (r, en metros y en pies)

Radio Longitud	0.0127 ½"	0.0254 1"	0.0508 2"	0.0762 3"
4' 1.220	0.708 0.216	0.807 0.246	0.940 0.286	1.038 0.316
6' 1.830	0.993 0.302	1.121 0.342	1.288 0.393	1.410 0.430
7' 2.135	1.123 0.342	1.270 0.387	1.452 0.442	1.588 0.484
8' 2.440	1.262 0.385	1.418 0.432	1.616 0.493	1.749 0.548
9' 2.745	1.406 0.430	1.562 0.476	1.773 0.540	1.929 0.588
10' 3.050	1.524 0.465	1.702 0.520	1.931 0.588	2.095 0.639

3.2.4.2. ELECTRODOS HORIZONTALES O CONTRAPESOS.

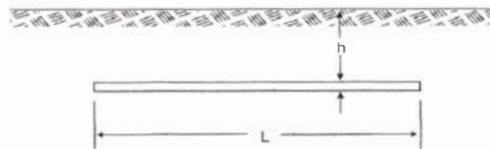
a) Al nivel del suelo.

$$R = 0.732 \frac{\rho}{L} \log \frac{4L}{d}$$

b) Enterrado a profundidad h.

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \frac{L^2}{hd}$$

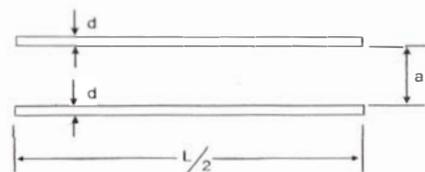
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \frac{L^2}{1.85 hd}$$



c) Dos contrapesos a profundidad h.

- Disposición Paralela

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \operatorname{Ln} \frac{L^4 / 16}{3.42 hdaA}$$

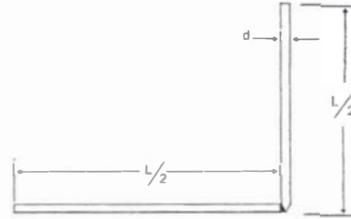


Donde :

$$A = \sqrt{a^2 + 4h^2}$$

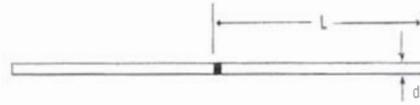
- Disposición Perpendicular

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L n \frac{L^2}{1.27 h d}$$



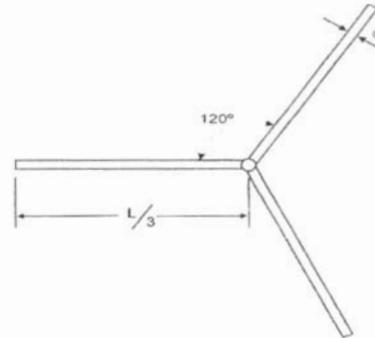
- Disposición en Oposición.

$$R = 0.183 \frac{\rho}{L} \left(\log \frac{4L}{\alpha} + \log \frac{L}{h} - 0.25 \right)$$



d) Tres contrapesos a profundidad h.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L n \frac{L^2}{0.767 h d}$$



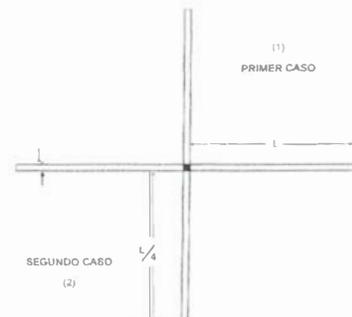
e) Cuatro contrapesos a profundidad h.

- Disposición ángulo Recto.

$$R = 0.0915 \frac{\rho}{L} \left(\log \frac{4L}{\alpha} + \log \frac{L}{h} + 1.265 - 0.93 \frac{h}{L} \right)$$

Donde L : longitud de un brazo (1)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L n \frac{L^2}{0.217 h d}$$



Donde L : Longitud total (2)

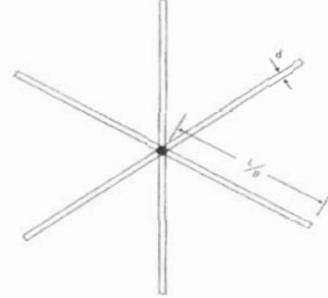
f) Seis contrapesos a profundidad h.

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \left(Ln \frac{4L}{36 dh} + 2.98 - 8.16 \frac{h}{L} \right)$$

Donde L : Longitud total

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} Ln \frac{L^2 \times 10^3}{9.42 hd}$$

Donde L : Longitud total.



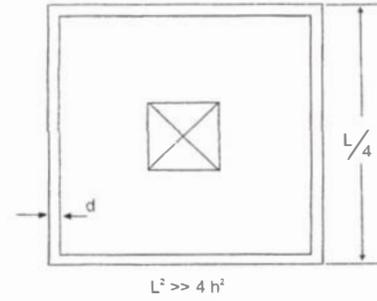
g) Cuadrángulo a profundidad h.

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \log \frac{4.25 L^2}{dh}$$

Donde L : Longitud total

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} Ln \frac{1.621 L^2}{dh}$$

Donde L : Longitud total.



h) Anillos a profundidad h.

$$R = 0.366 \frac{\rho}{L} \text{Log} \frac{8 L^2}{\pi hd}$$

$$R = \frac{\rho}{\pi l} Ln \frac{1.27 l}{a}$$

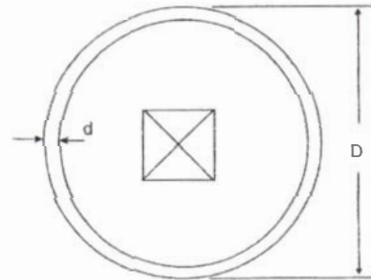
Donde:

$$l = \pi D$$

$$a = \sqrt{dh}$$

$$D = \frac{L}{\pi}$$

D = Diámetro del Anillo



i) Malla enterrada a profundidad h.

$$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{L}$$

Donde L : Longitud total

D : Lados iguales

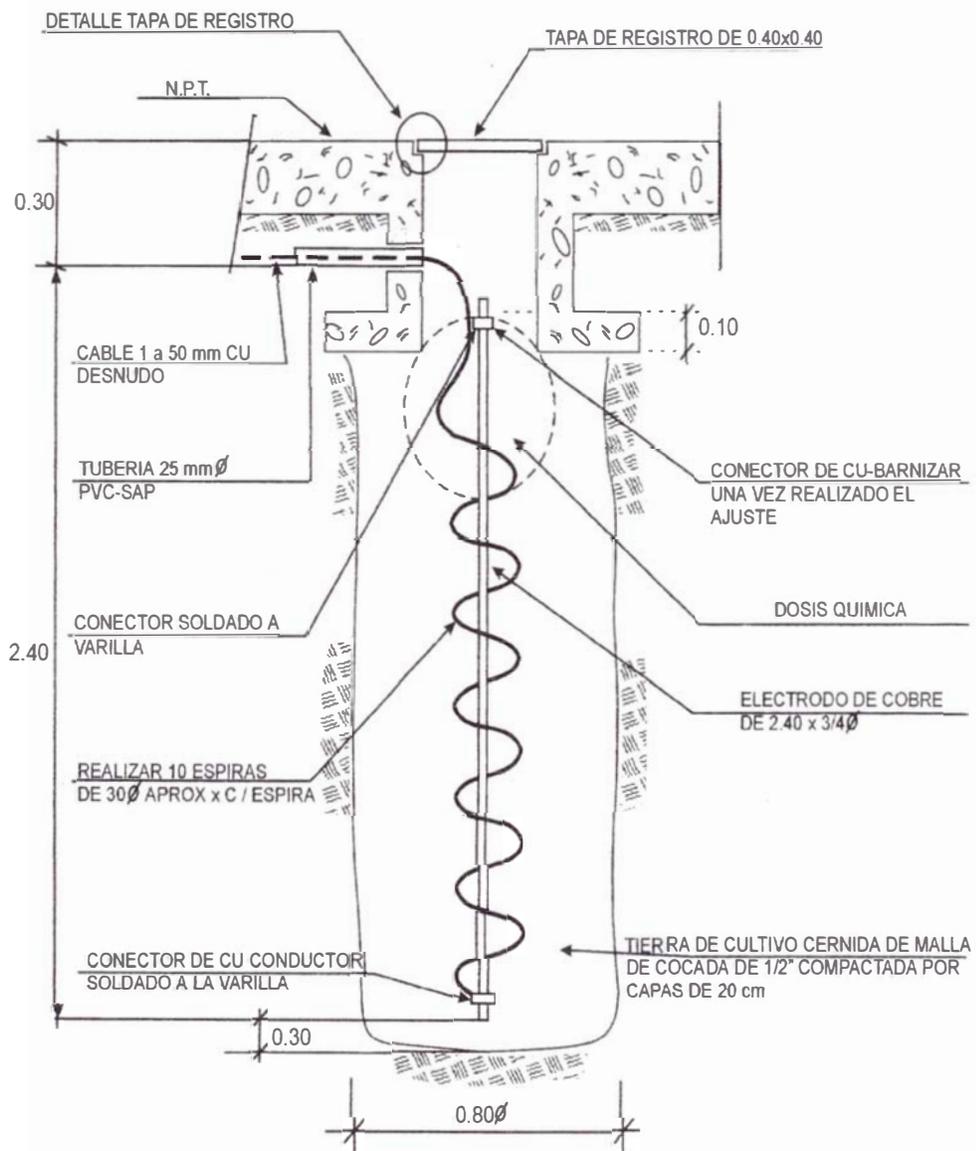
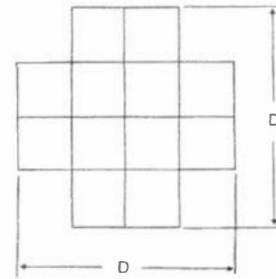


Figura 3.6 Detalle típico de pozo de tierra

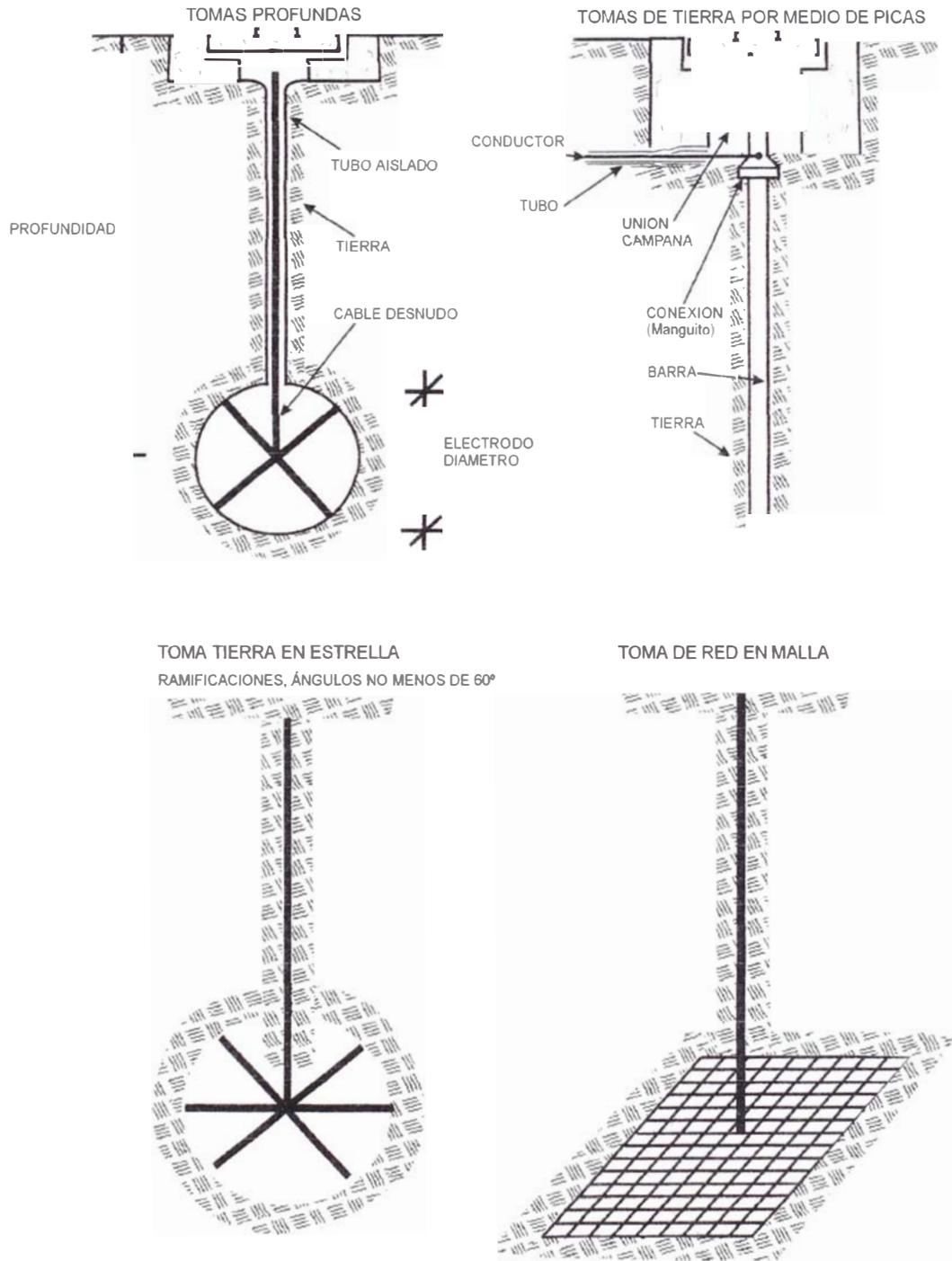


Fig. 3.7

También los Sistemas de Puesta a Tierra se pueden dimensionar por varillas verticales, en paralelo, alineadas, en triángulo, en cuadrado vacío, en cuadrado lleno y en círculo.

3.2.5 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE ATERRAMIENTO COMPUESTOS POR ASTAS VERTICALES

Una de las formas más simples de aterramiento es la de una única asta, enterrada en el suelo. El valor de la resistencia del aterramiento conseguido de esta forma, puede ser determinado por la fórmula siguiente:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi l} L^n \frac{4l}{d}$$

donde: ρ_a = Resistividad aparente del suelo en el local de funcionamiento del asta
(Ω x mts)

l = Comprimento clavado del asta (mts.) = longitud del clavado.

d = Diámetro equivalente del asta (mts.)

No obstante, no siempre una simple asta nos posibilitará obtener el valor de la Resistencia del Aterramiento que deseamos. En este caso, podemos utilizar varios medios de reducir el valor de la Resistencia del Aterramiento, tales como aumentar el comprimento (longitud enterrada) del asta a ser utilizada, tratar químicamente el suelo alrededor del asta, interligar varias astas en paralelo, o soluciones mixtas de estas alternativas.

A continuación, analizaremos cada alternativa en particular, anotando sus efectos en la reducción de la Resistencia del Aterramiento; presentaremos un estudio Técnico-Económico, que propicie la mejor alternativa.

3.2.6 AUMENTO DEL DIÁMETRO DE LAS ASTAS

3.2.7

Si aumentamos el diámetro de las astas utilizadas, tenemos una pequeña reducción en el valor de la resistencia, que es dada por la fórmula, pero presenta una "saturación", para diámetros encima de los valores producidos por los fabricantes,

conforme pueden ser vistos en la figura 3.8.

Nótese, por tanto, que no es ventajoso aumentar demasiado el diámetro de las astas, pues esto encarecería el producto, y se proporcionaría pequeñas reducciones en el valor de la Resistencia del Aterramiento.

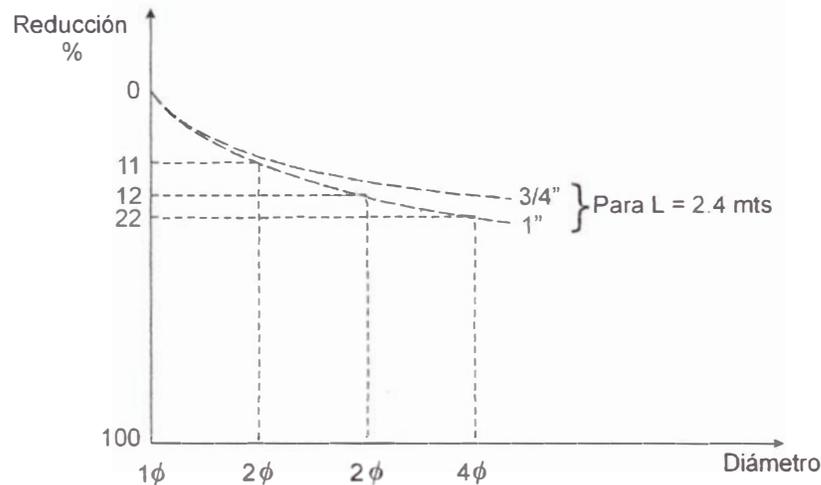


Fig. 3.8

3.2.7. AUMENTO DE LA LONGITUD DE PENETRACIÓN DE LAS ASTAS (COMPRIMENTO)

Si aumentáramos el comprimento efectivamente clavado en el suelo, alcanzaríamos camadas más profundas del suelo que, normalmente, presentan resistividades menores que las camadas superficiales. (Esto se verifica en la mayoría de los suelos, debido al mayor porcentaje de humedad en las camadas profundas).

En caso de suelos con camadas inferiores, constituidas de lecho rocoso, acontece lo contrario, pues las rocas tienen alta resistividad. Con todo, en este caso no sería aplicada esta alternativa a la imposibilidad de clavado de las astas.

Con esto, tenemos una reducción en el valor de la resistencia del aterramiento de las astas, pues analizando la fórmula, tenemos reducción debido al aumento del comprimento, y a la disminución de la resistividad. Esta alternativa es aplicable, y técnicamente ideal, pues la variación de la resistividad del suelo, en las camadas más próximas es despreciable, ya que, con las variaciones maduras, apenas las

camadas de las superficies sufren variaciones de resistividad, manteniendo prácticamente invariable el valor de la resistencia de aterramiento.

Esta alternativa, no obstante, tiene limitaciones económicas para grandes profundidades, pues el clavado a grandes profundidades, implica una utilización de equipamientos especiales, para el clavado, armado y ensamblaje, en los tramos a introducirse en las referidas profundidades.

3.2.8. INTERLIGAZON DE ASTAS EN PARALELO

EL efecto de aumentar el número de astas interligadas en paralelo, disminuye el valor de la resistencia del aterramiento equivalente. Sin embargo, debido al efecto de la resistencia del aterramiento de un asta, está concentrada en torno de la misma.

A continuación, presentaremos los coeficientes de Reducción (relación entre el valor de la resistencia del aterramiento de las astas en paralelo, y el valor de la resistencia del aterramiento de una única asta), para varillas interligadas en paralelo, en diversas configuraciones, teniéndose en cuenta que la resistividad aparente del suelo, sea constante en el local del clavado de las astas.

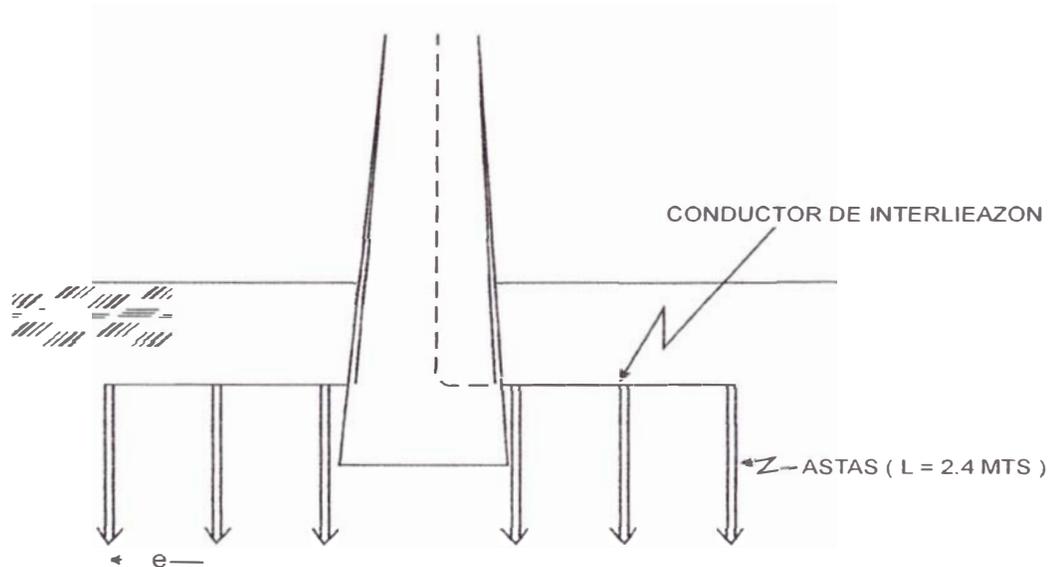


Fig. 3.9 Astas alineadas

Tabla 3.2
 $D = \frac{1}{2}"$ $L = 2.4$ mts

e(m)	2	3	4	5
No.de astas				
2	0.5449	0.5633	0.5475	0.5380
3	0.4379	0.4033	0.3959	0.3754
4	0.3516	0.3181	0.3011	0.2909
5	0.2961	0.2644	0.2484	0.2388
6	0.2571	0.2273	0.2122	0.2031
7	0.2280	0.1999	0.1857	0.1772
8	0.2053	0.1788	0.1655	0.1574
9	0.1871	0.1621	0.1494	0.1418
10	0.1721	0.1484	0.1363	0.1291
11	0.1596	0.1369	0.1255	0.1186
12	0.1489	0.1273	0.1163	0.1098
14	0.1316	0.1117	0.1017	0.0957

Tabla 3.3
 $D = \frac{1}{2}"$ $L = 3$ mts

e(m)	2	3	4	5
No.de astas				
2	0.6146	0.5764	0.5573	0.5459
3	0.4593	0.4177	0.3967	0.3841
4	0.3723	0.3320	0.3117	0.2994
5	0.3157	0.2776	0.2584	0.2468
6	0.2755	0.2397	0.2216	0.2107
7	0.2453	0.2116	0.1946	0.1843
8	0.2217	0.1898	0.1738	0.1641
9	0.2016	0.1725	0.1573	0.1481
10	0.1868	0.1582	0.1438	0.1351
11	0.1725	0.1464	0.1326	0.1243
12	0.1622	0.1362	0.1231	0.1152
14	0.1439	0.1200	0.1080	0.1007

Tabla 3.4
D = 1" L = 2.4 mts

e(m)	2	3	4	5
No.de astas				
2	0.6066	0.5711	0.5533	0.5427
3	0.4507	0.4118	0.3923	0.3806
4	0.3639	0.3263	0.3074	0.2960
5	0.3078	0.2722	0.2543	0.2435
6	0.2681	0.2346	0.2150	0.2077
7	0.2383	0.2068	0.1910	0.1814
8	0.2150	0.1854	0.1704	0.1614
9	0.1963	0.1682	0.1541	0.1455
10	0.1803	0.1542	0.1408	0.1327
11	0.1679	0.1425	0.1297	0.1220
12	0.1568	0.1326	0.1204	0.1130
14	0.1389	0.1166	0.1504	0.0987

Tabla 3.5
D = 1" L = 3 mts

e(m)	2	3	4	5
No.de astas				
2	0.6283	0.5855	0.5641	0.5513
3	0.4740	0.4276	0.4042	0.3901
4	0.3865	0.3416	0.3189	0.3052
5	0.3291	0.2867	0.2652	0.2523
6	0.2881	0.2482	0.2280	0.2158
7	0.2572	0.2196	0.2006	0.1892
8	0.2328	0.1974	0.1795	0.1687
9	0.2132	0.1796	0.1627	0.1524
10	0.1969	0.1650	0.1490	0.1392
11	0.1831	0.1528	0.1375	0.1282
12	0.1714	0.1424	0.1278	0.1190
14	0.1523	0.1257	0.1122	0.1041

3.3 ASTAS FORMANDO FIGURAS GEOMÉTRICAS

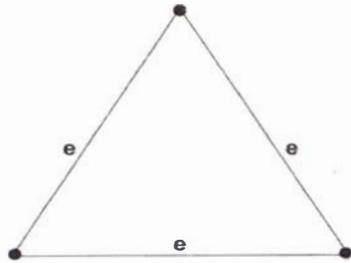


Fig. 3.10 Astas en Triángulo

Fig. 3.11 3 Astas en Triángulo

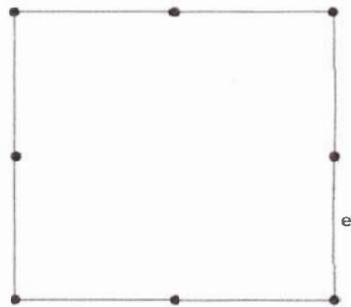
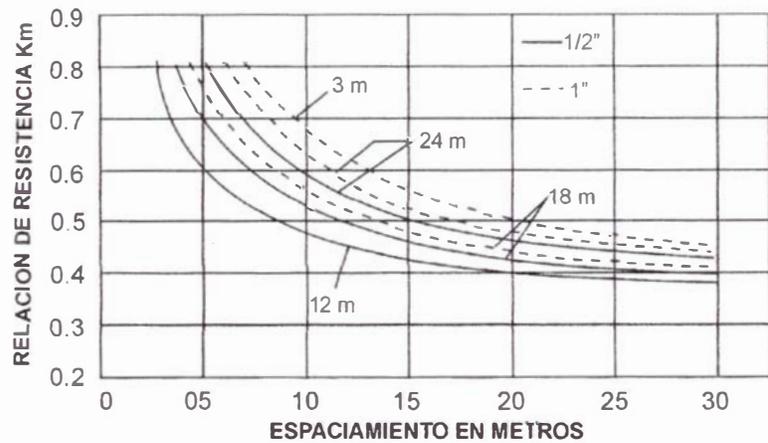
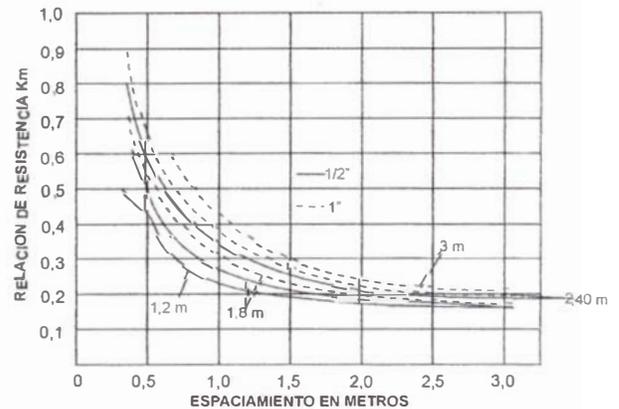


Fig. 3.12 Astas en Cuadrado Vacío

Fig. 3.13 8 Astas en Cuadrado Vacío



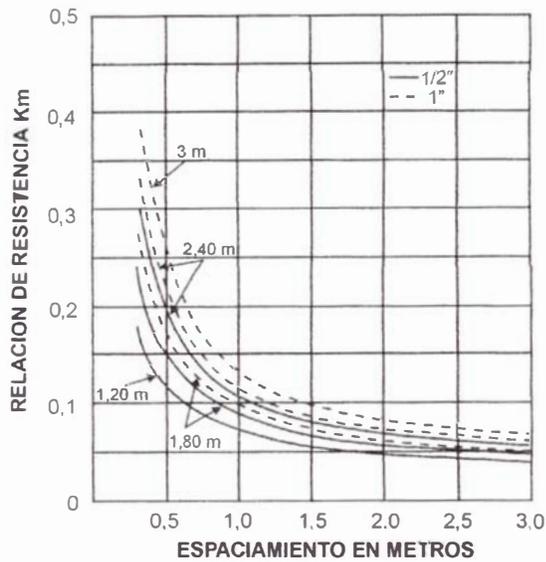


Fig. 3.14 36 Astas en Cuadrado Vacío

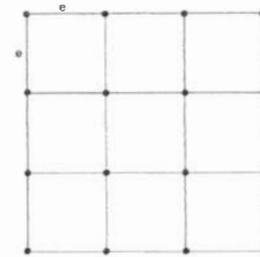


Fig. 3.15 Astas en Cuadrado Lleno

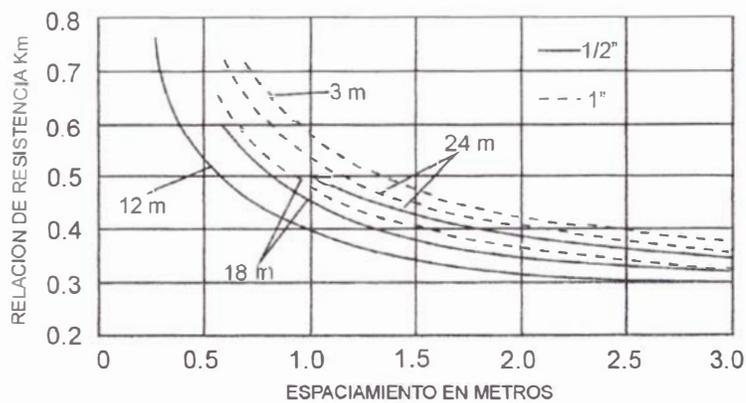


Fig. 3.16 4 Astas en Cuadrado Lleno

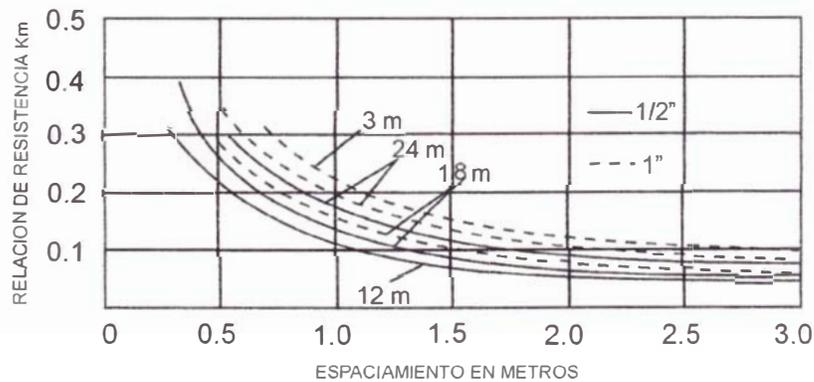


Fig. 3.17 36 Astas en Cuadrado Lleno

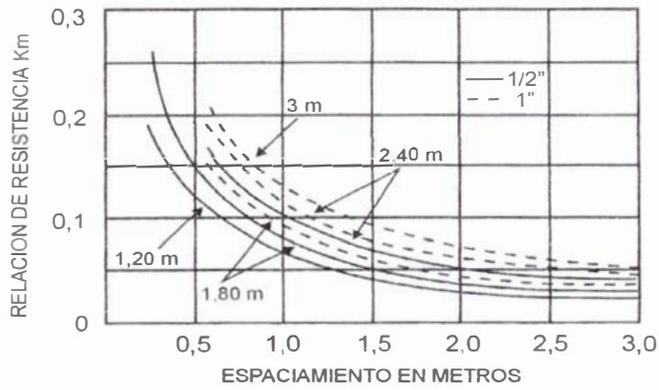


Fig. 3.18 100 Astas en Cuadrado Lleno



Fig. 3.19 Astas en Círculo

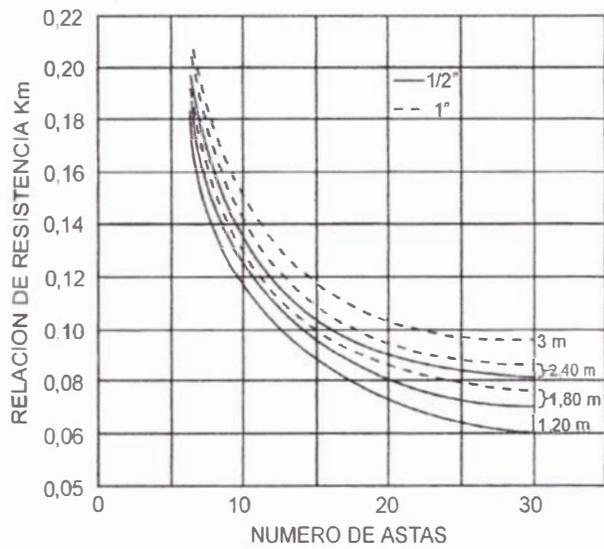


Fig. 3.20 Astas en Círculo con 9 mt. de Radio

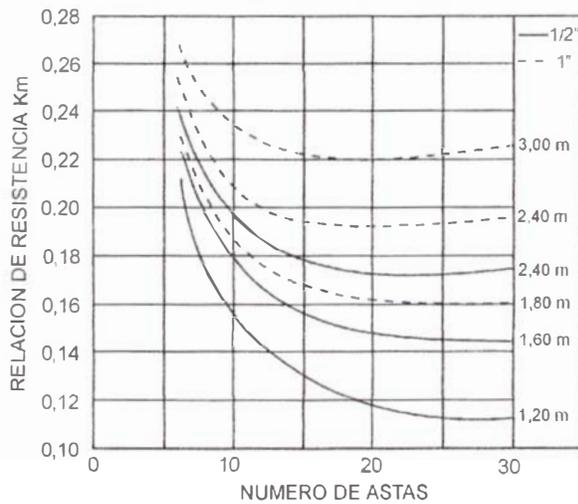


Fig. 3.21 Astas en Círculo con 3 mt. De Radio

También se puede calcular la Resistencia de electrodos paralelos, en forma de L, en forma de cruz y en forma de cuadrado con abertura al centro.

3.4 ELECTRODOS PARALELOS

Cuando 2 fajas de electrodos de longitud "L" y ancho "W" se conectan, como se muestra en la figura 3.22, la resistencia combinada se calcula, usando la siguiente fórmula.

$$R = \frac{\rho}{2.73 L} \cdot \frac{1}{2} \left(\log_{10} \frac{2L^2}{WD} + \log_{10} \frac{2L}{a} \right)$$

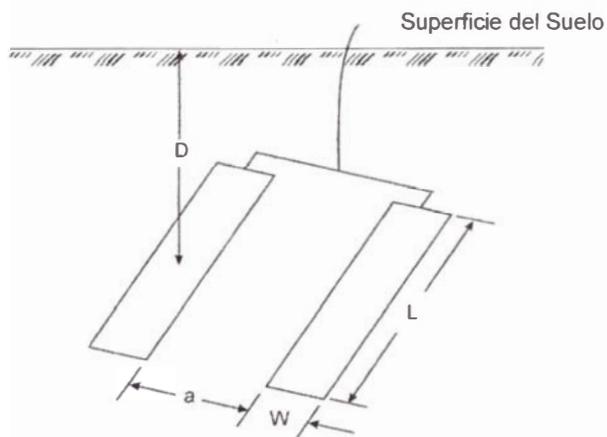


Fig. 3.22 Electrodo Paralelos

3.5. ELECTRODOS EN FORMA DE L

Cuando 2 fajas (tiras) de electrodos se conectan en forma de letra L, cada uno con longitud "L/2" y ancho "W", a una profundidad "D", como se muestra en la figura 3.23, la resistencia combinada, se expresa en la fórmula:

$$R = 1.03 \times \frac{\rho}{2.73 L} \log_{10} \frac{2L^2}{WD}$$

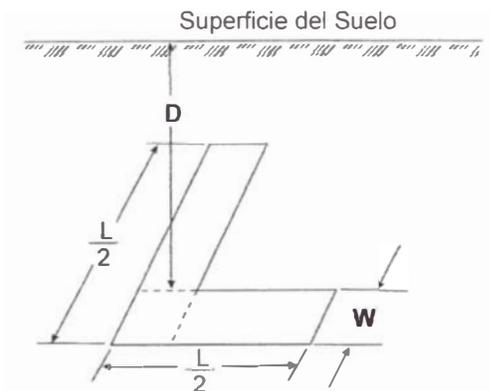


Fig. 3.23 Electrodo en forma de L

3.6 ELECTRODOS EN FORMA DE CRUZ Y EN FORMA DE CUADRADO (PERIMETRO)

Cuando 2 tiras de electrodos se conectan en forma de cruz y, cada uno, tiene una longitud "L/2" y ancho "W", y están enterrados a una profundidad "D", la resistencia combinada se expresa por la fórmula 1.9. La misma fórmula expresa la resistencia de 4 tiras de electrodos, conectados en forma de un cuadrado en el cual, cada lado mida "L/4", como se muestra en la figura 3. 24.

$$R = 1.12 \times \frac{\rho}{2.73 L} \log_{10} \frac{2L^2}{WD}$$

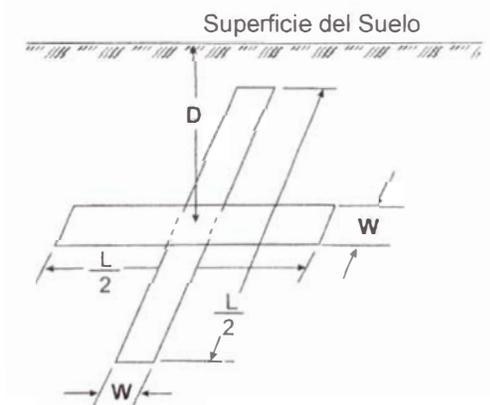


Fig. 3.24 Electrodo en forma de Cruz

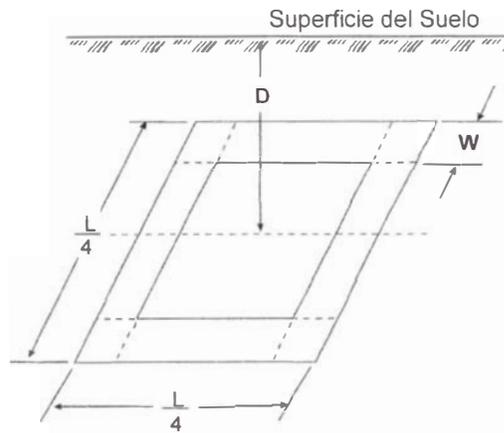


Fig. 3.25 Electrodo en forma de Cuadrado con abertura al centro (perímetro)

3.7 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA DE ELECTRODOS DE VARIAS FORMAS.

La Tabla 3.6, a continuación, muestra los valores de resistencia a tierra, cuando una faja de 20 metros de longitud se conecta en varios modelos. Con una resistividad $\rho = 100 \text{ Ohms} \times \text{mt}$, ancho $W = 0.5 \text{ mt}$ y profundidad $D = 0.5 \text{ mt}$, los valores de resistencia para las diversas formas, se muestran en la siguiente Tabla:

FORMA DE ELECTRODO	RESISTENCIA
Faja (en línea recta)	6.4
Fajas en paralelo (donde $a = 5 \text{ m.}$)	6.4
Fajas en forma de L	6.6
Fajas en cruz	7.1
Cuadrado con abertura al centro	7.1

Tabla 3.6 Forma de Electrodo-Resistencia

A continuación, se muestran 2 gráficos que contrastan la Resistencia versus la Resistividad. El primero, muestra los valores de una varilla simple a tierra para 1, 2, 3 y 4 piezas.

El segundo, muestra los valores de una alambre de contrapeso a tierra, desde 3 metros, hasta 100 metros.

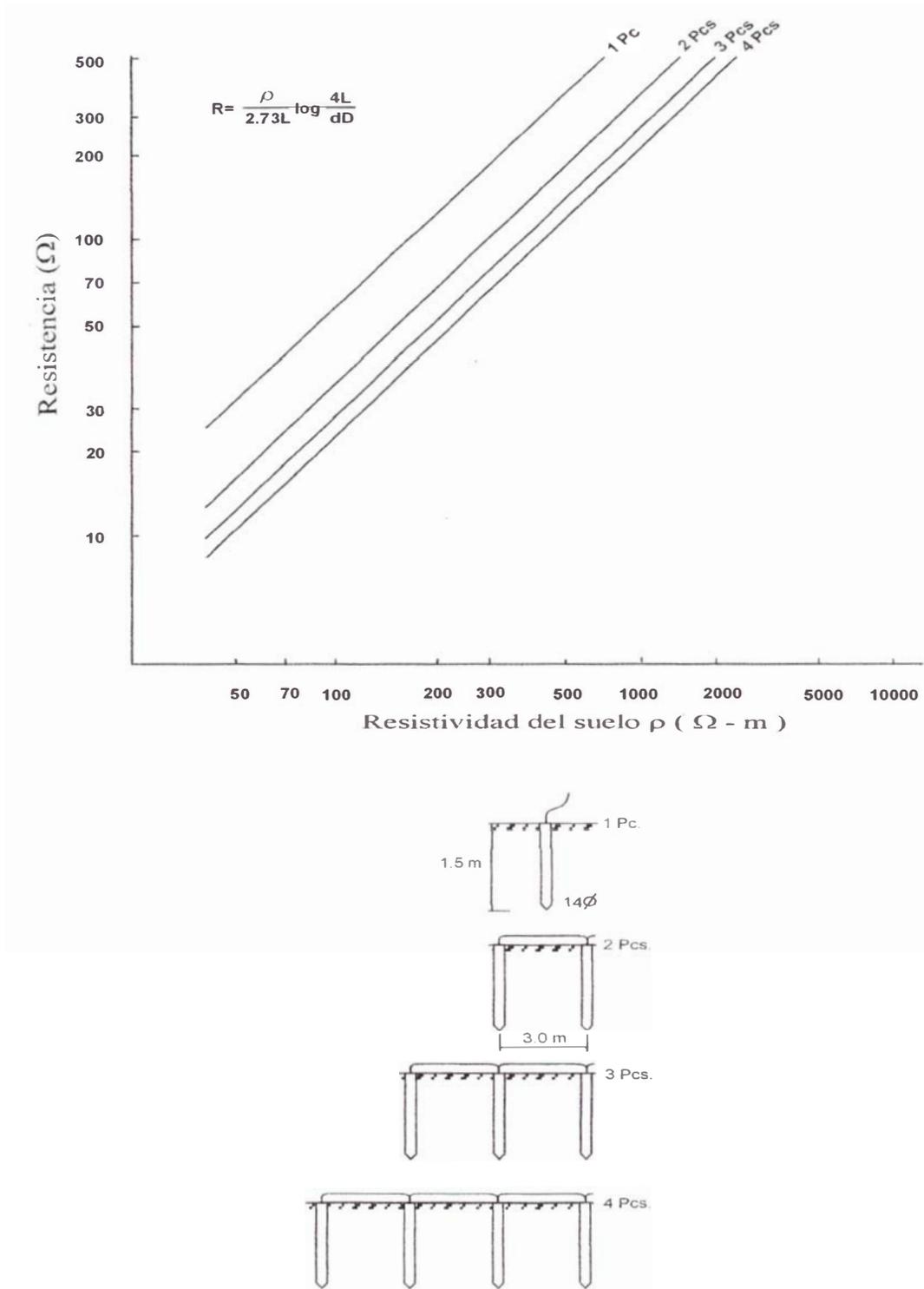


Fig. 3.26 Resistencia vs. Resistividad – Varilla simple a tierra

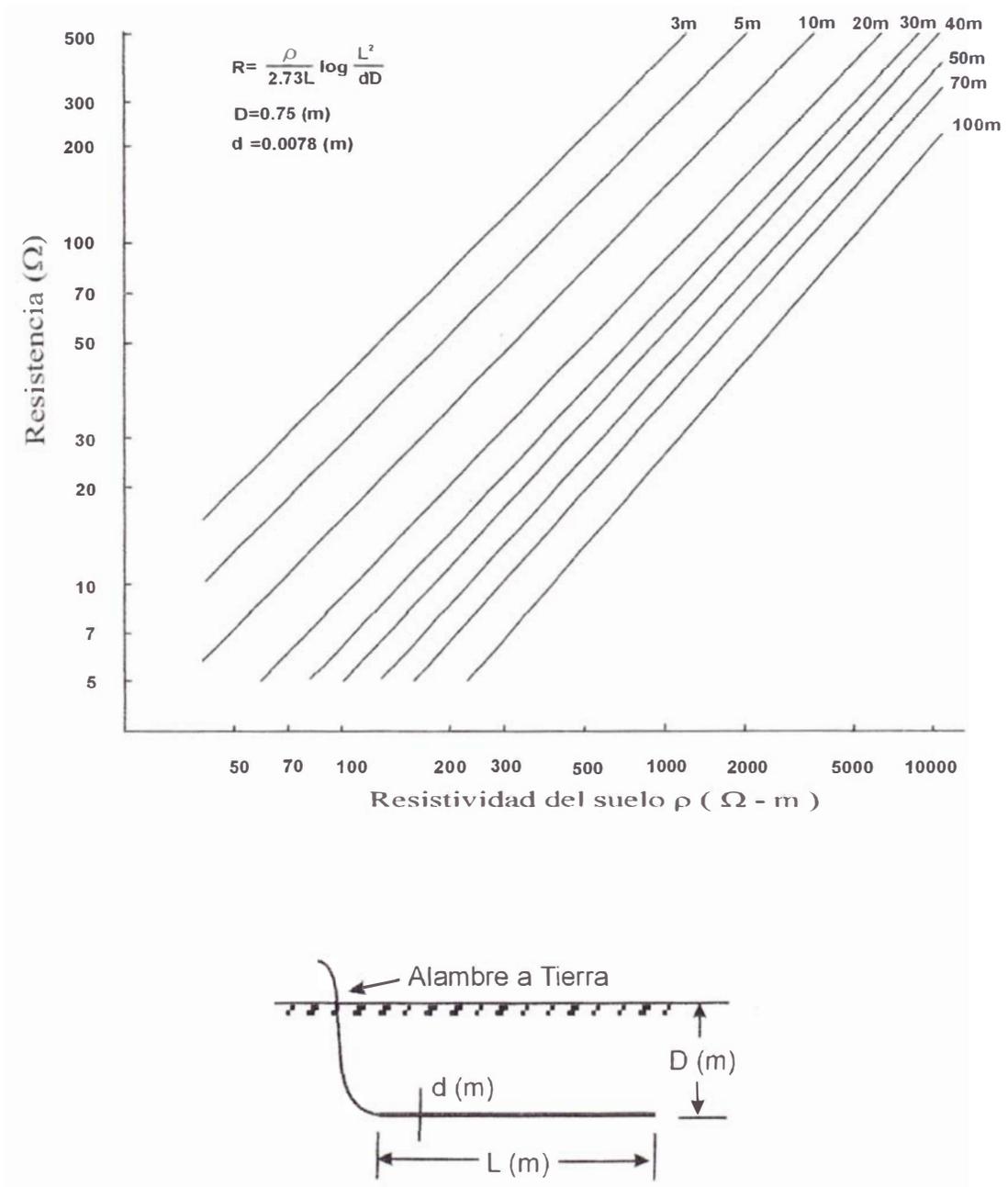


Fig.3.27 Resistencia vs. Resistividad – Alambre de contrapeso

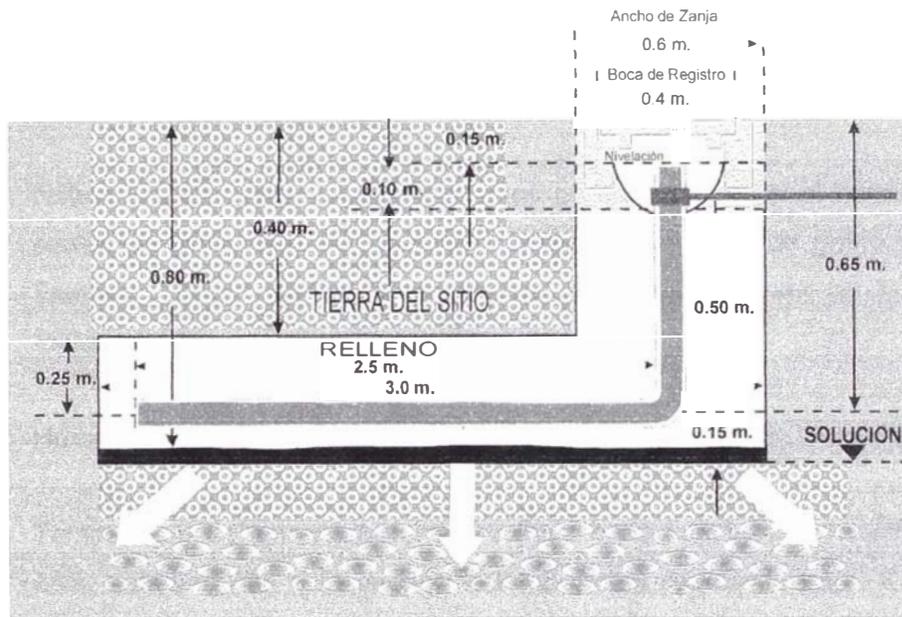
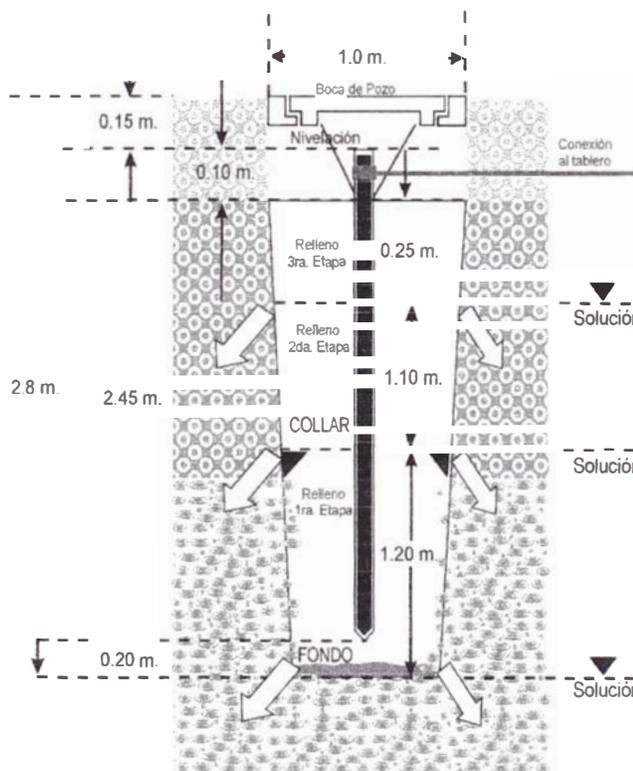


Fig. 3.28 Ejecución de una puesta a tierra puntual tipo contrapeso en zanja.



LEYENDA

EXCAVACION (Pozo Circular)

- Profundidad : 2.8 m.
- Diametro : 1.0 m.

ELECTRODO (Varilla de cobre)

- Jabalina : $l = 2.45 \text{ m.}$, $d = 0.013 \text{ m.}$
- Grapa de Presión : $d = 0.019 \text{ m.}$

TRATAMIENTO : (Cloruro de Sodio)

- En grano : Fondo, Collar (15+10 Kg)
- En solución : 3 Niveles (25 Kg)
- (Solución : 25 Kg Na Cl / 150 l. Agua)

RELLENO (2.0 m. de Profundidad)

- Tierra cementada : 2.0 m³
- Bentonita : 50 Kg/m³
- (Humedad : 300 l. Agua / m³ Mezcla)

COBERTURA (0.25 m de Espesor)

- Nivelación : Tierra de Sitio

Alternativa

- (Acabado : Caja de Registro - Tapa)
- (Electrodo : Hoyo con 0.10 m libre)

Fig. 3.29 Ejecución de una puesta a tierra puntual tipo jabalina en pozo.

3.8 ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Los principales elementos que influyen en la resistividad del terreno son:

1. Naturaleza del terreno, desde terrenos pantanosos hasta el basalto. Los suelos de grano fino son mejores conductores que los de grano grueso. También existen medios heterogéneos, que se componen de 2 ó más materiales.
2. Humedad del terreno, que es inversamente proporcional a la resistividad.
3. Temperatura del terreno que, al disminuir, hace aumentar la resistividad y ésta, aumenta aún más cuando la temperatura desciende bajo 0 grados Celsius.
4. Salinidad del terreno, que es inversamente proporcional a la resistividad.
5. Estratigrafía del terreno, por causa de la cual, la resistividad será una combinación de la resistividad de las diferentes capas, y sus respectivos espesores.
6. Variaciones estacionales, que influyen en la resistividad, siendo ésta menor en épocas de lluvias, y mayor en el período de sequía.
7. Factores de naturaleza eléctrica, como el gradiente de potencial y la magnitud de la corriente de defecto a tierra.
8. Compactación del terreno alrededor de los electrodos que, cuando es grande, disminuye la resistividad. Influyen el aumento del número de electrodos en paralelo, el aumento de longitud y diámetro de los electrodos, y el aumento de la distancia entre ejes de los electrodos.
9. Tratamiento químico del suelo, para el cual se consideran: alto porcentaje de reducción inicial, tiempo de vida útil, estabilidad, y facilidad para su

aplicación y reactivación.

Acerca de estos elementos que influyen en la resistividad del terreno, es necesario señalar, previamente, que la resistencia del electrodo depende de su longitud, y de la resistividad del terreno en que se establece.

$$R = \rho / L$$

siendo ρ : resistividad del terreno

L : longitud del electrodo

El valor de la resistividad en Ω -mt es numéricamente igual a la resistencia de un cubo de 1 mt de arista. Este valor está influenciado por los 9 factores mencionados anteriormente.

El terreno es un elemento totalmente heterogéneo, de modo que su valor de resistividad varía de una dirección a otra, conforme al material del que está compuesto, de la profundidad de sus capas y de su formación geológica.

Una propiedad importante del terreno es su capacidad de retención de humedad, influenciado a su vez por la porosidad del terreno. Esta capacidad permite que, durante el paso de altas corrientes, el calentamiento resultante no provoque rápida evaporación, no permitiendo pérdida de la propiedad de dispersión de corrientes, sin elevar los potenciales de tensión a niveles no permisibles.

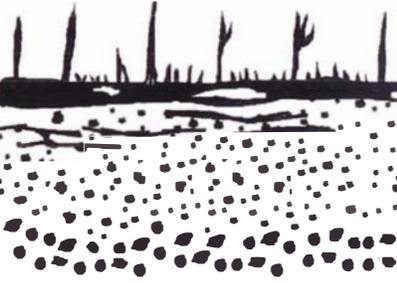
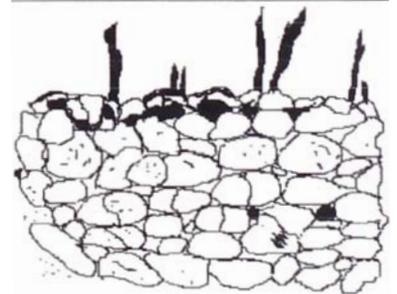
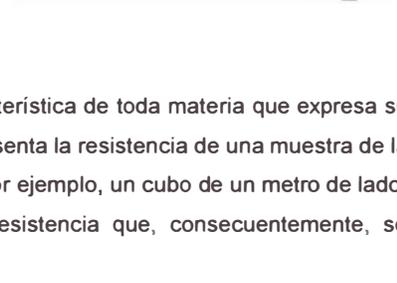
A continuación, se desarrollará en detalle las características de cada uno de los 9 elementos que influyen en la Resistividad del terreno.

3.8.1 NATURALEZA DEL TERRENO

Los terrenos son buenos, regulares o malos conductores, en función de su naturaleza. El conocimiento de su naturaleza es el primer paso para la implantación de una adecuada toma de tierra.

Cuanto menor sea la resistividad del terreno, tanto más fácilmente se pueden

alcanzar valores bajos para la resistencia de la instalación de tierra.

Resistividad (*) Ohmios-metro	Tipo de terreno	Ejemplo
10 a 100	Terreno orgánico húmedo	
100 a 200	Terreno orgánico pero no húmedo	
400 a 800	Terreno guijoso	
1000 ó más	Terreno rocoso	

(*) Resistividad (o resistencia específica): magnitud característica de toda materia que expresa su aptitud para la conducción de corrientes eléctricas. Representa la resistencia de una muestra de la materia considerada, cuyas dimensiones son la unidad, por ejemplo, un cubo de un metro de lado; dicho cubo se sitúa entre dos placas y se mide su resistencia que, consecuentemente, se expresará en ohmios por metro (Ω -m).

Fig. 3.30 Resistividad-Tipo de terreno-Ejemplo

Tabla 3.7 Valores de resistividad en función de la naturaleza del terreno.

Naturaleza del terreno	Resistividad (Ω -m)
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Turba húmeda	5 a 100
Humus	10 a 150
Limo	20 a 100
Margas del jurásico	30 a 40
Arcilla plástica	50
Pizarras	50 a 300
Arena arcillosa	50 a 500
Arcilla con 40% de humedad	80
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Calizas blandas	100 a 300
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Tierra de jardín con 50% de humedad	140
Arena silíceo	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Arcilla con 20% de humedad	330
Tierra de jardín con 20% de humedad	480
Calizas agrietadas	500 a 1000
Rocas de mica y cuarzo	800
Calizas compactas	1000 a 5000
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Granito y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Basalto	10000 a 20000

Tabla 3.8 Valores medios de la resistividad

Naturaleza del Terreno	Valor medio de la resistividad Ω -m
Terrenos cultivables, fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

En las tablas se puede observar que, a medida que la roca es más compacta y más antigua, la resistividad es mayor.

EL agua de río, de pozos, o de mar (con sales disueltas) es buena conductora, poco resistiva, comparable a los buenos terrenos.

Los suelos de grano muy fino o fino,. Son buenos conductores por lo general, mejores que los de grano medio y éstos, a su vez, mejores que los de grano grueso.

Los terrenos se pueden clasificar, de grano fino a grueso así:

- a. Arcilla (greda)
- b. Arena finísima
- c. Arena fina
- d. Arena gruesa
- e. Cascajo grava
- f. Piedra suelta
- g. Roca

3.8.1.1 RESISTIVIDAD DE LOS MEDIOS HETEROGÉNEOS

Los medios heterogéneos, en su caso más sencillo, se compondrán de dos materiales, uno de los cuales, de resistividad ρ_2 sirve de matriz, o medio encajante a otro de resistividad ρ_1 que está disperso en el interior del primero. Este problema fue planteado por Maxwell (1891) quien, para el caso de que el medio de resistividad ρ_1 adoptase la forma de esferas pequeñas distribuidas aleatoriamente en el interior del medio de resistividad ρ_2 demostró la fórmula:

$$\rho_{12} = \frac{2 \rho_1 + \rho_2 + p (\rho_1 - \rho_2)}{2 \rho_1 + \rho_2 - 2 p (\rho_1 - \rho_2)} \rho_2$$

donde p es la fracción del volumen total ocupado por las esferas (que si éstas son poros, sería la porosidad) y ρ_{12} la resistividad del medio heterogéneo. Se supone que el radio de las esferas es pequeño, comparado con la distancia que las

separa. Si se representa por ρ' la relación de resistividades de ambas sustancias, ρ_1/ρ_2 la fórmula toma la forma más expresiva.

$$\rho_{12} = \frac{2\rho' + 1 + p(\rho' - 1)}{2\rho' + 1 - 2p(\rho' - 1)} \rho_2$$

Vale la pena detenerse en algunos ejemplos numéricos, deducidos de la fórmula anterior. En la suposición de que la resistividad ρ_2 de la matriz vale 1 y las inclusiones tienen resistividad $\rho_1 = 0.1$ ó $\rho_1 = 10$, con porosidad de 0.2, ρ_{12} vale 0.65 ó 1.31, respectivamente, lo que señala el mayor efecto relativo de las inclusiones conductoras, respecto de las resistivas. En los casos límites, en que las inclusiones sean perfectamente conductoras, o completamente aislantes, ρ_{12} vale 0.44 ó 1.64, respectivamente lo cual, aparte de confirmar lo dicho, indica el papel predominante de la resistividad de la matriz. Si ésta fuese aislante, lo mismo ocurriría con el medio conjunto y, si fuese perfectamente conductora, lo sería también en dicho medio. En el caso de una matriz de resistividad finita ρ_2 con inclusiones de resistividad nula, la fórmula anterior se reduce a:

$$\rho_{12} = \frac{1 - p}{1 + 2p} \rho_2$$

Diversos autores han estudiado tanto teórica, como experimentalmente, la resistividad de medios heterogéneos o agregados, construyéndolos experimentalmente en algunos casos, con inclusiones esféricas, o en forma de elipsoides de revolución o triaxiales. En el caso de que las inclusiones sean alargadas y con orientación uniforme, el agregado manifiesta anisotropía. Los resultados de estos estudios aclaran el comportamiento de los suelos con minerales conductores diseminados, en lo concerniente a su resistividad.

La resistividad de un medio heterogéneo con inclusiones conductoras, disminuye notablemente si éstas están en contacto entre sí. Este fenómeno es de gran importancia en las rocas con conductos formados por poros rellenos de electrolito, por lo que conviene considerarlo de modo detallado y cuantitativo.

Según lo dicho, las rocas pueden considerarse como medios de matriz aislante, en

donde el coeficiente F recibe el nombre de factor de formación. Esta es, pues, la relación entre la resistividad global del suelo, y la del electrolito que llena sus poros. Queda claro que el éxito de un tratamiento químico reside en retener, por mayor lapso, un contacto continuo, entre los poros del terreno, y el electrodo o conductor del pozo.

3.8.2 HUMEDAD DEL TERRENO

El agua que contiene el terreno, su estado higrométrico, influye de forma apreciable sobre la resistividad: al aumentar la humedad, disminuye la resistividad y, al disminuir la humedad, aumenta la resistividad. En cualquier caso, siempre que se añada agua a un terreno, disminuye su resistividad respecto a la que tendría en seco.

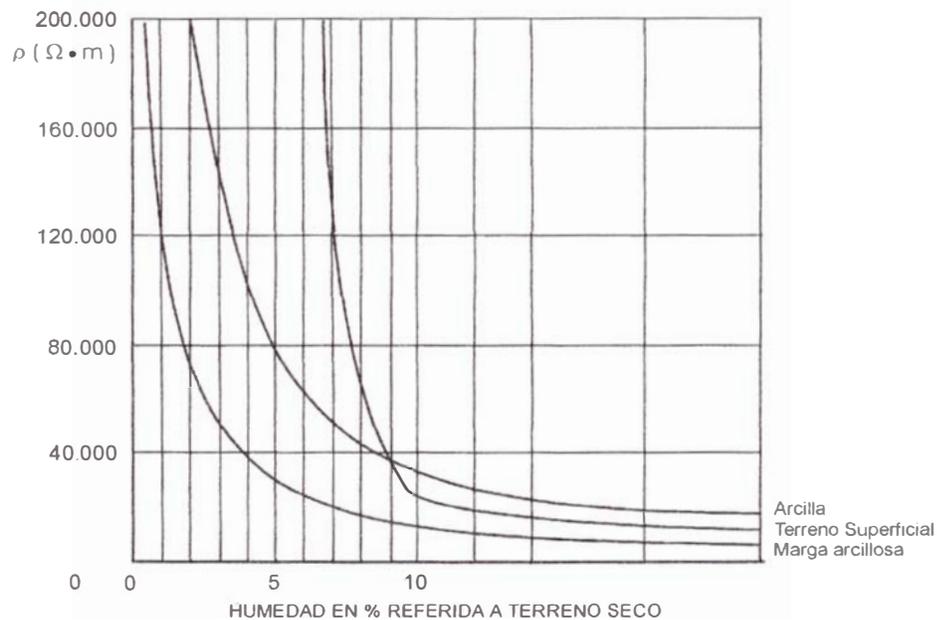


Fig. 3.31 Variación de la resistividad en función de la humedad del terreno.

Se dice que un terreno está “saturado de agua” cuando todos sus intersticios están llenos de agua. Una vez pasada la causa de la “saturación”, el agua contenida en los espacios entre los diferentes agregados, debido a la gravedad, se dirigirá hacia abajo, quedando estos interespacios ocupados por aire, en el interior de los agregados, al ser superior la fuerza de capilaridad que la gravedad. El agua contenida en ellos no se mueve y, en estas circunstancias, se dice que el terreno

los que existe una red de conductos irregulares y tortuosos llenos de electrolito, a los cuales se debe por completo la conductividad del conjunto. Si se toma una porción de roca, lo suficientemente grande para que sea representativo, de forma cilíndrica o prismática, con longitud "L" y sección "S", su resistencia valdrá:

$$R = \rho_r \frac{L}{S}$$

donde ρ_r es la resistividad media de la roca, matriz y poros incluidos. Como la conducción sólo se efectúa a través de los poros, llenos de agua con sales, de resistividad ρ_a se tendrá, por otra parte:

$$R = \rho_a \frac{L_e}{S_e}$$

donde L_e es la longitud efectiva media de los conductos, y S_e la sección total de los mismos, que es el área efectiva desde el punto de vista de la conducción. Combinando las dos expresiones anteriores, resulta:

$$\rho_r = \rho_a \frac{L_e}{L} \frac{S}{S_e} = \rho_a \left(\frac{L_e}{L} \right)^2 \frac{SL}{S_e L_e}$$

La relación $\frac{L_e}{L}$ entre la longitud media de los conductos de los poros, y la longitud del trozo de muestra (roca), se llama Tortuosidad, y se representa por T. La relación $\frac{S_e}{S}$ ha sido denominada coeficiente de disminución. En la fórmula anterior, el producto $S.L = V_r$, es el volumen real del trozo de roca considerado, mientras que $S_e.L_e = V_e$ es el volumen ocupado por los poros. Suele definirse como porosidad P la relación entre el volumen total de los poros y el de la muestra de suelo:

$$P = \frac{S_e . L}{S . L}$$

con lo que la porosidad se expresa en fracciones de la unidad, pero es muy frecuente darla en tanto por ciento del volumen total. La fórmula puede escribirse:

$$\rho_r = \frac{T^2}{P} \rho_a = F \rho_a$$

está “saturado de humedad”.

Por efecto de la evaporación natural de la superficie del terreno, se produce un empobrecimiento del agua contenida en los agregados, fenómeno que se propaga lentamente, desde la superficie, hacia los estratos más profundos. Este fenómeno tiene más importancia, cuanto más seco sea el clima del lugar, y cuanto más superficial sea la colocación de la pica de tierra.

Tabla 3.9 Efecto del índice de humedad en la resistividad del terreno

Indice de humedad (% por peso)	Resistividad suelo arenoso (Ω - m)	Reducción de la resistividad con relación a 0 %
0	10'000,000	-
2.5	1,500	6.666
5.0	430	23.255
10.0	185	54.054
15.0	105	95.238
20.0	63	158.730
30.0	42	238.095

El agua disocia las sales en iones y cationes, que se encargan de transportar los electrones por el terreno. Para comprender este fenómeno, sólo tenemos que recordar el comportamiento eléctrico del agua. El agua destilada es aislante y, aunque introduzcamos unos electrodos en el interior de un recipiente, conectados a una pila, no circulará energía eléctrica a través de ella. Si al agua le añadimos una sal, por ejemplo, cloruro de sodio o sal común, empezará a circular electricidad y, a medida que añadamos más sal, circulará más electricidad: los electrones se desplazan por el agua, gracias a los iones disociados.

En los lugares de lluvias estacionales, hay que tener muy presentes estos fenómenos, pues en la época de lluvias, el terreno presenta una resistividad muy baja, mientras que, en la época seca, la resistividad es muy alta. En algunas regiones donde estas oscilaciones estacionales son muy acentuadas, se deben fijar valores máximos admisibles de resistividad de los terrenos, uno para la época de

lluvias, y otro para la época seca.

3.8.3 TEMPERATURA DEL TERRENO

Las características térmicas del terreno dependen de su composición, de su grado de compactación, y del grado de humedad. La resistividad del terreno aumenta al disminuir la temperatura, pero cuando el terreno se enfría por debajo de 0 grados centígrados, la resistividad aumenta muy rápidamente (ver figura 3.32)

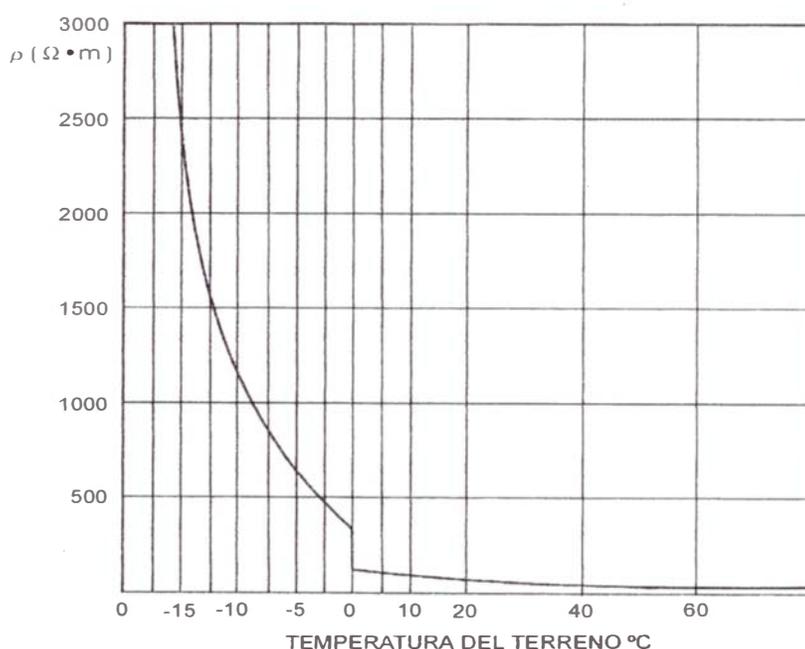


Fig. 3.32 Variación de la resistividad del terreno en función de la temperatura.

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

La evaluación de la temperatura del terreno a las profundidades normales de colocación de las picas de tierra, a lo largo del año, nos indican que, durante los meses de invierno, si la temperatura de la superficie es de $-10^{\circ}C$, a 90 cm de profundidad, será de $-4^{\circ}C$ y, a 2 mt de profundidad, tendremos una temperatura de $-1.5^{\circ}C$, como se muestra en la figura 3.33 (Escala de esta hipótesis en negrita)

Tabla 3.10 Efecto de la temperatura en la resistividad de la greda arenosa, 15.2 % de humedad

Temperatura °C	Temperatura °F	Resistividad Ω - cm
20	68	7,200
10	50	9,900
0 (agua)	32	13,800
0 (hielo)	32	30,000
-5	23	79,000
-15	14	330,000

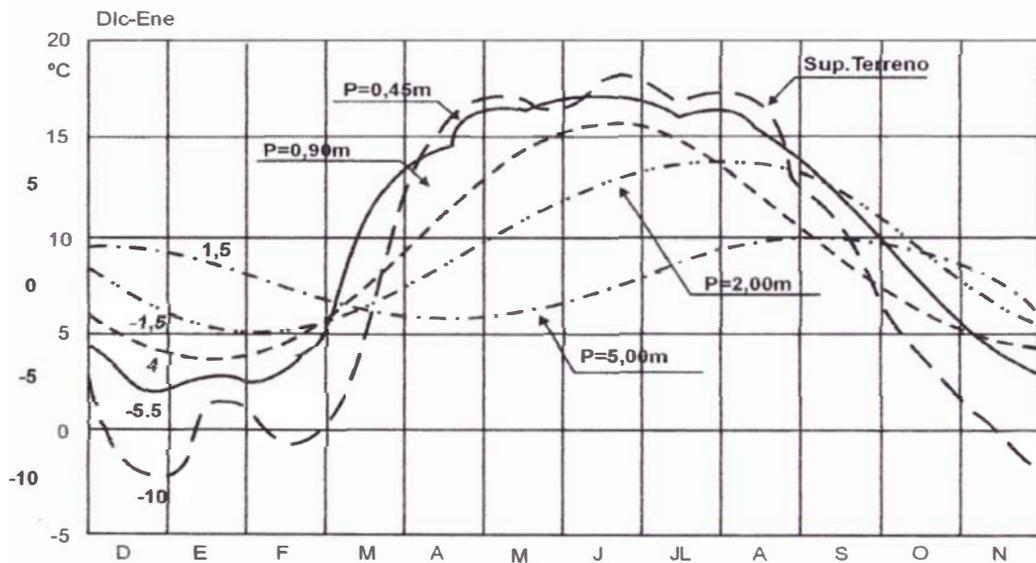


Fig. 3.33 Temperatura del terreno a diversas profundidades al variar la temperatura en las diferentes estaciones del año.

Por este motivo, sobre todo en las zonas con clima continental (inviernos fríos y veranos calurosos), deberán implantarse los electrodos de tierra a mayor profundidad, con el fin de paliar al máximo, el riesgo de alcanzar temperaturas por debajo de 0°C.

3.8.4. SALINIDAD DEL TERRENO

Al aumentar la salinidad del terreno disminuye la resistividad. Al hablar de la influencia del agua en la resistividad del terreno, se ha mencionado indirectamente,

la importancia que tiene la salinidad o el contenido de sales en el terreno. Un terreno puede mejorar sensiblemente su valor de resistividad aparente o, incluso, hacer bueno un terreno de alta resistividad, simplemente añadiéndole sales.

En la figura 3.34 se recoge la variación de la resistividad, con el contenido de sales.



Fig. 3.34 Variación de la resistividad en función de la salinidad en %.

El método más utilizado para la mejora de la resistividad del terreno es añadir sal, en las arquetas de los puntos de puesta a tierra, o cerca de los electrodos, si son accesibles y, después, regar. No se debe olvidar que el agua hace que las sales penetren hacia la parte profunda del terreno, hacia la capa de depósito, y que un riego excesivo, o unas lluvias excesivas, lavan el terreno y, por lo tanto, arrastran la sal que rodea los electrodos, aumentando la resistividad.

Tampoco es aconsejable la colocación de los electrodos en zonas cercanas a los cauces de los ríos, tanto superficiales como subterráneos, pues suelen ser terrenos muy lavados y, por lo tanto, más resistivos de lo normal por la pérdida demasiado rápida de sus sales.

3.8.5 ESTRATIGRAFIA DEL TERRENO.

Los terrenos están formados, en profundidad, por capas de diferentes agregados y, por lo tanto, de diferentes resistividades. Su resistividad será una combinación de la resistividad de las diferentes capas, y del espesor de cada una de ellas. La resistividad media, o resistividad aparente, será una combinación de las resistividades de todas las capas que componen el terreno.

El desconocimiento a priori de la resistividad de las capas inferiores, obliga al

estudio y medición de las mismas, si se necesita conocer el valor de la toma de tierra a una profundidad determinada.

En ningún caso se puede extrapolar el resultado de la capa superficial, pues la variación de la composición del terreno en capas inferiores, puede darnos sorpresas, como las que aparecen reflejadas esquemáticamente en la figura 3.35.

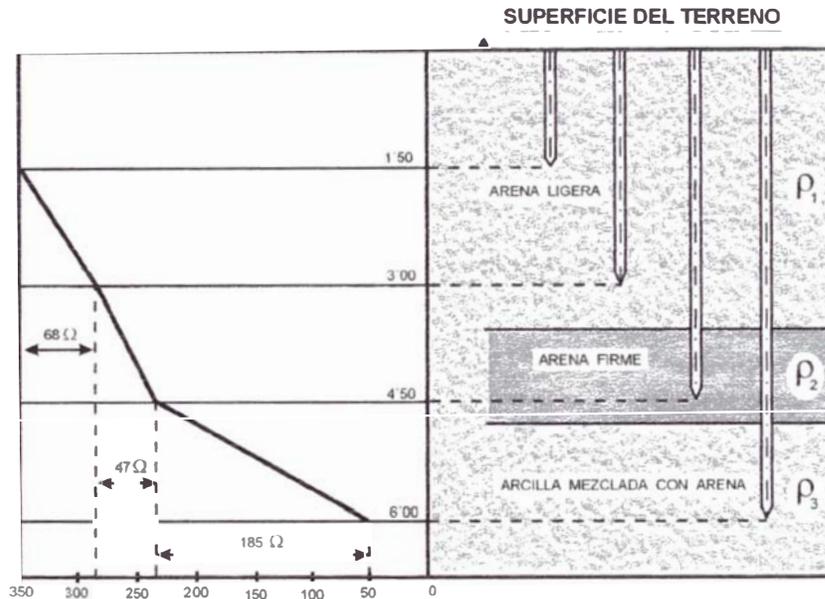


Fig. 3.35 Variación de la resistividad en función de la estratigrafía del terreno

Lo que no ha bajado la resistividad en 5 mt baja en sólo 1.5 mt, por encontrar una capa arcillosa muy buena conductora. También nos podría haber ocurrido lo contrario, y encontrar una capa muy resistiva, que no disminuyera la resistividad o, simplemente, una oquedad del terreno, que dejara el electrodo al aire.

Cabe señalar que, a la hora de colocar los electrodos de pica, siempre se suscita el dilema de, si colocarlas en profundidad, o en paralelo. El esquema de la figura 3.35 deja clara la incertidumbre de conocer la resistividad en profundidad, si no se hace una medición previamente, lo que implica costo y tiempo. Si las instalaciones y el terreno lo permiten, debemos aconsejar la instalación de electrodos en profundidad. Si el terreno es malo, o el número de picas por instalar es grande, o lo accidentado del terreno no lo permite, se colocarán en paralelo, pero sabiendo la incertidumbre y el riesgo que esta decisión supone.

3.8.6 VARIACIONES ESTACIONALES.

En épocas de lluvias, el nivel freático se aproxima a la superficie del terreno, presentando éste una resistividad menor que en el período de sequía, en el cual el nivel freático se aleja en profundidad de la superficie. Al detallar los elementos 2, 3 y 4, (Humedad, Temperatura y Salinidad del Terreno, ver 3.8), se han descrito una serie de factores que influyen en la resistividad del terreno y que, generalmente, suelen tener “variaciones estacionales”. A lo largo del año se presentan variaciones estacionales, que son más acusadas, cuanto más próximo a la superficie del terreno se encuentra el electrodo. Para conseguir mantener el valor de la resistividad lo más uniformemente posible, a lo largo del año, es conveniente instalar profundamente los electrodos en el terreno, y proteger lo más posible el terreno de las inclemencias del tiempo.

En la figura 3.36 se observa que, en verano, la resistividad es mayor que en invierno, y que los electrodos enterrados a mayor profundidad, tienen una variación estacional inferior a la de los electrodos enterrados superficialmente.



Fig.3.36 Variación de la resistividad en función de las variaciones estacionales.

Las revisiones periódicas de las instalaciones deben hacerse en las épocas más desfavorables para el terreno, siguiendo el ejemplo de la figura 3.36: en las zonas frías en invierno, en las zonas climáticas con lluvias estacionales en la época seca, y en las zonas normales de la meseta o litorales, al final del verano.

A medida que enterremos más los electrodos, o los coloquemos debajo de las cimentaciones del edificio, tendremos más garantías de mantener estable el valor de la resistividad.

3.8.7 FACTORES DE NATURALEZA ELECTRICA.

Hay varios factores de naturaleza eléctrica que pueden modificar la resistividad de un terreno. Los más significativos son: el gradiente de potencial, y la magnitud de la corriente de defecto a tierra.

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

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

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

3.8.8. COMPACTACION DEL TERRENO ALREDEDOR DE LOS ELECTRODOS.

Cuando la compactación del terreno es grande, disminuye la resistividad. Siempre que se coloquen electrodos de pica, la vibración de la máquina de penetración, dejará una separación entre la pica y el terreno, por lo cual habrá que compactar, para que se produzca un buen contacto pica-terreno. Se aconseja también la compactación alrededor de los electrodos de placa, y los electrodos de conductor enterrado.

La elección del electrodo, junto con su instalación y profundidad, es lo que determinará, junto con la resistividad del terreno, la bondad de la puesta a tierra de

la instalación.

Existen distintos métodos para lograr la reducción de la resistencia eléctrica, aunque todos ellos presentan un punto de saturación, que es conveniente conocer para evitar diseños antieconómicos. Los métodos para la reducción son los siguientes:

3.8.8.1 EL AUMENTO DEL NÚMERO DE ELECTRODOS EN PARALELO.

La acción de aumentar el número de electrodos conectados en paralelo, disminuye el valor de la “Resistencia Equivalente”, pero esta reducción no es lineal, puesto que la curva de reducción tiene tendencia asintótica, a partir del 6to ó 7mo electrodo y, además, existe el fenómeno de la resistencia recíproca.

Suponiendo un medio ideal, en el que la resistividad del terreno homogéneo es de $600 \Omega \cdot \text{mt}$, y se clava un electrodo de 2 mt :

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

donde:

$(\ln \frac{2l}{d}) / 2\pi l$ se considera = K y operamos la fracción vale 0.49454.... por lo tanto:

$$R = 600 \times 0.49454 = 300 \Omega$$

Según la ecuación de sumatoria de resistencias en paralelo, al aumentar un electrodo (el segundo), obtendríamos aproximadamente 150Ω ; al aumentar un tercer electrodo, 100 y, para llegar a 5Ω , tendríamos que clavar 60 electrodos, tal como se muestra en la figura 3.37

$$5 \Omega = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \dots + \frac{1}{X_{60}}}$$

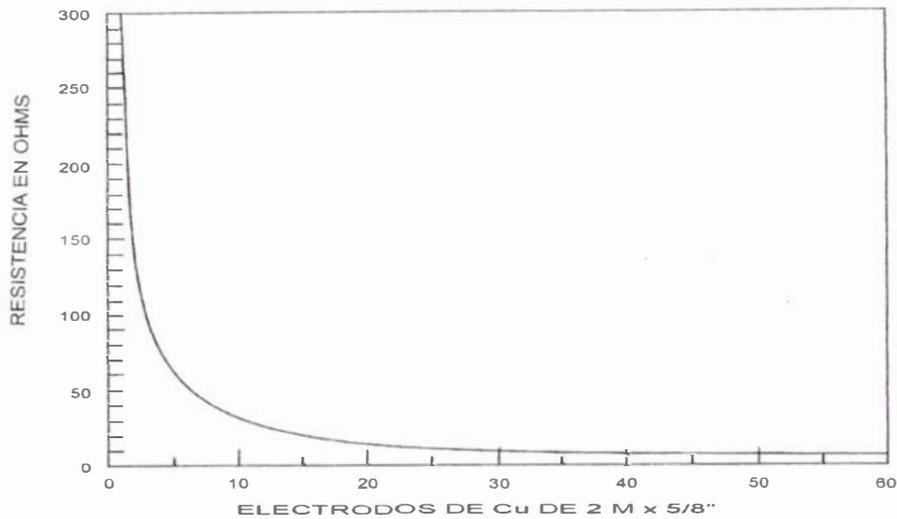


Fig.3.37 Reducción de resistencia por aumento del # de electrodos.

Resistividad aparente 600 ohms – m.

3.8.8.2 EL AUMENTO DE LA LONGITUD Y EL DIÁMETRO DE LOS ELECTRODOS.

La longitud de penetración del electrodo está en función a la resistividad y profundidad de las capas del terreno. Obviamente se prefiere colocar el electrodo dentro de la capa de menor resistividad.

Por otro lado, debemos indicar antes de proseguir con las demás variables, que los resultados están ligados íntimamente a la resistividad del terreno donde se está trabajando, teniendo valores variables, entre 200 y 600 Ω -m en condiciones normales. Si aplicamos la fórmula de la Resistencia ($R = \frac{\rho}{2\pi d} \ln \frac{2l}{d}$), en el mejor de los casos, conseguiremos una Resistencia de aprox. 0.5ρ , con un electrodo de dimensiones comunes y usuales. Luego, al aplicar la reducción recomendada, se podrá llegar, en el mejor de los casos, a aprox. 0.1ρ lo cual, en la práctica, nos resulta un valor de aproximadamente 20Ω para el caso más favorable, siendo este valor muy alto para Sistemas de Tierra usados en pararrayos convencionales e ionizantes, y Centros de Cómputo y Telefonía.

El aumento en el diámetro del electrodo tiene que ser mayúsculo, para que su

aporte reduzca significativamente la resistencia, debido a que en la fórmula de la resistencia, el producto de la longitud por el diámetro del electrodo, se multiplica por un logaritmo natural, por ejemplo.

Usando el ejemplo anterior, si el electrodo que utilizamos fue de 5/8, para incrementar ostensiblemente su conductancia, podemos añadir helicoidales de cable 1/0 AWG, cuyo diámetro de espiras estará en los 18 cm, y la separación entre éstas sea de 20 cm, lográndose una reducción de 30 % de la resistencia; sin embargo, el diámetro del electrodo creció de 1.6 (5.8" ϕ) a 18 cm (+1.025%), lo que equivaldría a utilizar un electrodo de 17" ϕ .

3.8.8.3 EL AUMENTO DE LA DISTANCIA ENTRE EJES DE LOS ELECTRODOS.

Normalmente, la distancia entre ejes de los electrodos debe ser, como mínimo, el triple de la longitud de los electrodos pero, en los casos donde se requiera obtener resistencias eléctricas muy bajas, y exista disponibilidad de área de terreno, las distancias entre ejes de los electrodos, deberán ser las máximas posibles pues, a mayor distancia entre ejes de electrodos, mayor será la reducción de la resistencia a obtener, por el fenómeno de la resistencia recíproca entre electrodos.

Una relación y visualización práctica referencial, se define por la siguiente ecuación:

$$k = n \frac{R}{R_1} \text{ en función de } D / L \text{ siendo :}$$

- n número de electrodos en paralelo
- R resistencia del grupo de electrodos
- R_1 resistencia individual de cada electrodo
- D distancia entre cada electrodo
- L longitud de cada electrodo.

La distancia entre dos electrodos colocados en paralelo (D), ha de ser al menos de 1.5 L , a fin de obtener los mejores resultados. En este caso, se obtiene:

No. de electrodos	Reducción (%) **
2	10
3	55
4	66

Tabla 3.11 Nro de electrodos/ Reducción(%) **

** Porcentaje de reducción referido a la resistencia de un electrodo. Ver figura 3.38.

La figura 3.39 señala los efectos típicos de la corrosión subterránea, comparando con el hierro y zinc. El diámetro del electrodo se determina por la dificultad de introducción en el terreno.

La figura 3.40 indica el pequeño efecto del diámetro del electrodo, en la resistencia de la puesta a tierra. La longitud del electrodo es la que nos da los valores de la resistencia eléctrica de la puesta a tierra, y ha de ser tal, que llegue a una profundidad en la que se encuentre un terreno de gran conductibilidad. Cuanto más profundo se hincó el electrodo, menor es la resistencia de puesta a tierra.

La figura 3.41 indica una disminución típica de la resistencia de puesta a tierra, al incrementar la profundidad de enterramiento, suponiendo un terreno de conductibilidad constante:

Terreno tipo A: Arcilla, pizarra y terrenos fangosos, con proporciones de arena y grava. Resistencia media: 15.800 Ω /cm.

Terreno tipo B: Arcilla, pizarra y terrenos fangosos, sin arena ni grava. Resistencia media: 4.060 Ω /cm.

Realmente, al lograr mayores profundidades de hincado, se encuentra terrenos más húmedos, aumentando por consiguiente, la conductibilidad, pudiéndose conseguir mayores reducciones de la resistencia de puesta a tierra, que las indicadas en la figura 3.41.

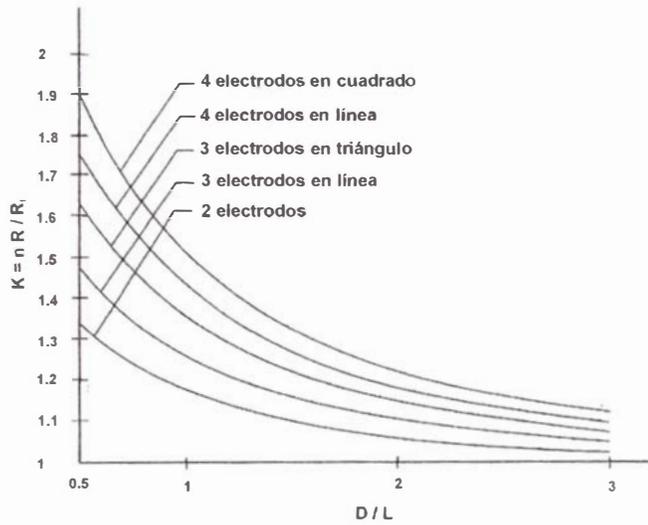


Fig.3.38 Coeficiente de mejora de resistencia K (buscar función D/L).

Fig.3.39 Efectos típicos de la corrosión subterránea (base de Cu).

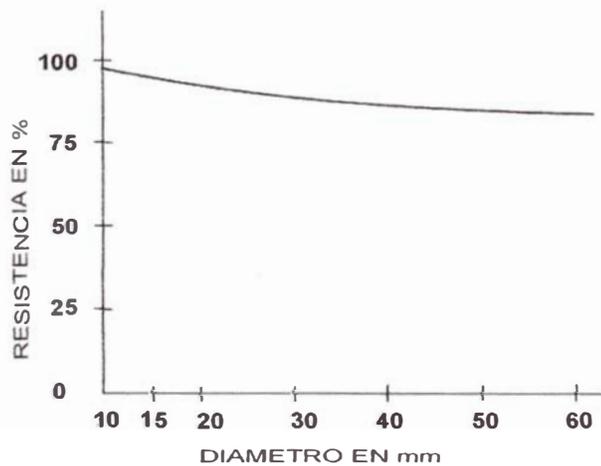
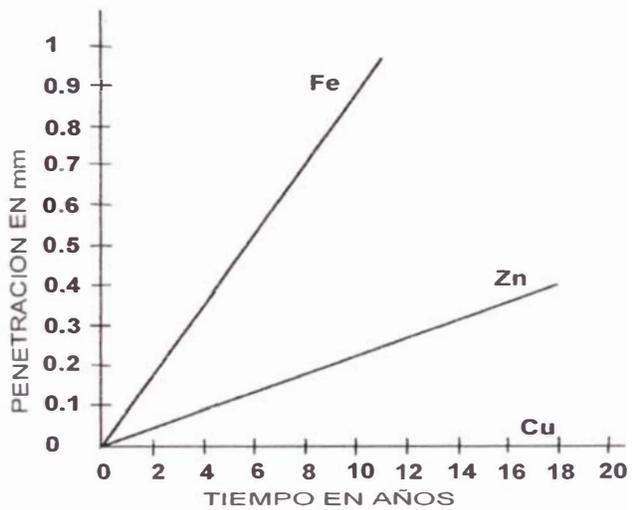


Fig.3.40 Efectos del diámetro del electrodo con relación a la resistencia de puesta a tierra.

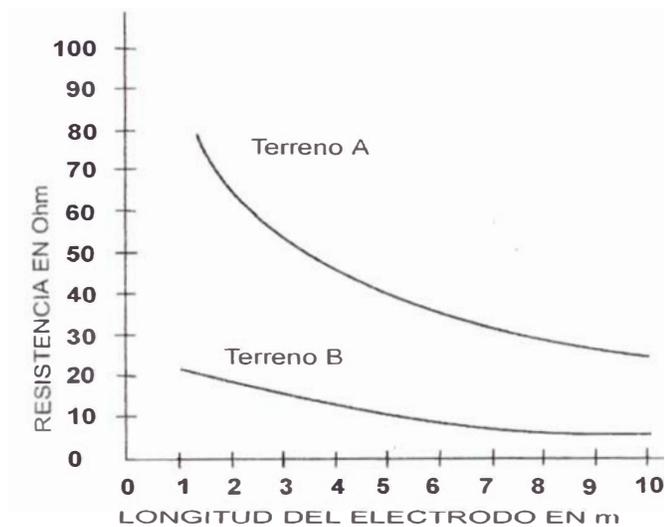


Fig.3.41 Influencia de la longitud del electrodo en la resistencia de puesta a tierra.

3.9. TRATAMIENTO QUIMICO DEL SUELO.

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos. Para elegir el tratamiento químico de un pozo de tierra, se deben considerar los siguientes factores:

- Alto porcentaje de reducción inicial
- Tiempo de vida útil (del tratamiento y de los elementos del pozo)
- Estabilidad (mantener la misma resistencia durante varios años)
- Facilidad para su aplicación
- Facilidad en su reactivación.

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

- Higroscopicidad
- No ser corrosivas
- Químicamente estables en el suelo
- Inocuas para la naturaleza
- Alta capacidad de Gelificación
- Alta conductividad eléctrica
- No ser tóxicas

3.9.1 TIPOS DE TRATAMIENTO QUIMICO

Existen diversos tipos de tratamiento químico para reducir la resistencia de un pozo a tierra:

- Cloruro de Sodio + Carbón Vegetal
- Bentonita
- Compuestos químicos complejos de marca registrada (ejemplo: THOR-GEL)

3.9.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS TRATAMIENTOS QUÍMICOS.

Ninguna Sal en estado seco es conductiva; para que los electrolitos de las sales conduzcan corriente, se pueden convertir en soluciones verdaderas, o en seudo soluciones (desde un punto de vista termodinámico). Por ejemplo: el cloruro de sodio en agua forma una solución verdadera, lo mismo que el azúcar; el mismo cloruro de sodio disuelto en benceno, formará una seudo solución, o dispersión coloidal, como también se le conoce.

Cuando una sustancia inorgánica es insoluble en agua, por ejemplo: el oro, la plata, el cobre, el sulfuro arsenioso y muchos más, llevados al estado coloidal, pueden formar seudo soluciones. Para lograr el estado coloidal, debe existir un medio dispersante, y una fase dispersa, que envuelve o aprisiona al medio dispersante. Así, el argirol es una dispersión coloidal, o seudo solución de plata en agua (usada como colirio); el vidrio rubí es una dispersión coloidal, o seudo solución de oro en el vidrio líquido.

3.9.3. CLORURO DE SODIO + CARBÓN VEGETAL

El Cloruro de Sodio forma una solución verdadera, y se precipita fácilmente junto con el agua, por efecto de la percolación, capilaridad y evapotranspiración. Un inconveniente del tratamiento convencional con sal y carbón es la elevada corrosión a la que se expone el electrodo, reduciendo ostensiblemente su tiempo de vida útil. Si bien es cierto que el cloruro de sodio disuelto en agua no corroe al cobre (por ser un metal noble), no es menos cierto que la presencia de una corriente eléctrica convertirá al sistema Cu-solución cloruro de sodio, en una celda electrolítica, con

desprendimiento de cloro y formación de hidróxido de sodio, en cuyo caso ya empieza la corrosión del cobre.

El objetivo de la aplicación del carbón vegetal molido (cisco de carbonería), es aprovechar la capacidad de éste, para absorber la humedad del medio, (ya que el carbón vegetal seco es aislante), y retener algunos de los electrolitos del cloruro de sodio, que se percolan constantemente.

3.9.4. BENTONITA

Las bentonitas constituyen un grupo de sustancias minerales arcillosas, que no tienen composición mineralógica definida, y deben su nombre al hecho de haberse descubierto el primer yacimiento, cerca de Fort Benton, en los estratos cretáceos de Wyoming, en 1848. Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí, en lo que respecta a sus propiedades, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

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

Las bentonitas molidas retienen las moléculas del agua, pero la pierden con mayor velocidad que con la que la absorben, debido a la sinéresis provocada por un exiguo aumento en la temperatura ambiente. Al perder el agua, pierden conductividad y restan toda compactación, lo que deriva en la pérdida de contacto entre el electrodo y el medio, elevándose la resistencia del pozo ostensiblemente. Una vez que la bentonita se ha armado, su capacidad de absorber nuevamente agua, es casi nula.

3.9.5. THOR-GEL(R)

Es un compuesto químico complejo, que se forma cuando se mezclan en el terreno soluciones acuosas de sus 2 componentes. El compuesto químico resultante tiene naturaleza coloidal, formando una Malla tridimensional micelar, cuyos espacios vacíos pueden ser atravesados por ciertas moléculas, pero no por otras. Esto lo convierte en una membrana semipermeable, que facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la Malla, de modo que pueden cruzarlos en uno u otro sentido, convirtiéndose en un excelente conductor eléctrico.

Tiene una gran atracción por el agua, de modo que puede aprisionarla, manteniendo un equilibrio con el agua superficial que la rodea. Esto lo convierte en una especie de reservorio acuífero.

Rellena los espacios intersticiales dentro del pozo, constituyendo una excelente conexión eléctrica, entre el terreno de cultivo (reemplazado) y el electrodo, asegurando una conductividad permanente. Esta condición se irá perdiendo con el tiempo (4 años), siendo posible reactivar el pozo de tierra, adicionando por disolución, nuevamente, los compuestos químicos que vienen en una dosis de THOR-GEL(R).

THOR-GEL(R) reduce el Ph del terreno y contiene sustancias anticorrosivas, por lo que la vida media de la puesta a tierra con este producto, será de 20 a 25 años, manteniéndola cada 4 años, en contraposición a los 2 años de vida media que ofrecen los tratamientos convencionales, cuya reactivación exige un reemplazo total de los componentes, lo que significaría hacer un nuevo pozo.

El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que, aglutinados bajo la forma de un Gel, mejoren la conductibilidad de la tierra, y retengan la humedad en el pozo, por un período prolongado. De esta manera, se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica, y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima. La cantidad de dosis por metro cúbico de tierra del pozo, varía de 1 a 3*, y está en función a la resistividad natural del terreno.

RESISTIVIDAD Ω - m	DOSIFICACIÓN
de 50 a 200	1 dosis x m ³
de 200 a 400	2 dosis x m ³
De 400 a más	3 dosis x m ³

Tabla 3.12 Resistividad-Dosisificación

La saturación en el tratamiento químico se presenta en la tercera dosis por metro cúbico. Esta dosificación se aplica igualmente en el tratamiento de las zanjas de interconexión.

3.10. TIPOS DE PUESTA A TIERRA

Los sistemas de Puesta a Tierra se pueden clasificar según 4 factores principales:

1. Por área de instalación, se dividen en: Puestas a Tierra formales, puntuales, de pequeña y gran cobertura.
2. Por ubicación, se clasifican en: Tomas de tierra de barra, superficial, y la combinación de ambas.
3. Por función, se clasifican en: Puesta a Tierra para protección, para funcionamiento y para trabajo.
4. Por impedancia de la conexión a tierra, pueden estar: sólidamente conectadas a tierra, efectivamente conectadas a tierra, y conexión a tierra de diversos tipos, con sus respectivos procedimientos de cálculo.

Para el caso de nuestra tesis, definiremos los tipos del 1 al 3, siendo el punto 4 de empleo exclusivo en instalaciones eléctricas de gran volumen, dado que para dicho cálculo se emplean parámetros eléctricos de mayor envergadura, propios del análisis de la fuerza eléctrica que es materia propiamente dicha de la Ingeniería eléctrica.

3.11. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA POR AREA DE INSTALACIÓN

Se clasifican en: formales, puntuales, de pequeña cobertura y de gran cobertura.

3.11.1. PUESTAS A TIERRA FORMALES.

Están destinadas principalmente a:

- El diseño no incluye control de potenciales de Toque y de Paso.
- Seguridad de las personas en contacto con aparatos susceptibles de fallar.
- Correcto funcionamiento de dispositivos electrónicos (automatismos, control, transferencia de datos, procesamiento).
- Correcto funcionamiento de la protección por reles.
- Evacuación de las corrientes de fuga y de falla, y su dispersión en el suelo.

Interesa principalmente su resistencia de dispersión, que normalmente debería tener bajos valores, dependiendo de las instalaciones y equipos asociados:

○ Servicio doméstico – Electrodomésticos	9 – 15 Ohms
○ Servicio doméstico – Electrónicos	6 - 9 Ohms
○ Servicio de oficina – Electrónicos + PC	3 - 6 Ohms
○ Servicio de oficina – Red de procesamiento	2 - 3 Ohms
○ Centrales de comunicaciones y datos	< 2 Ohms

3.11.2. PUESTAS A TIERRA PUNTUALES.

Se les denomina así por el mínimo espacio que ocupan para su instalación, sin requerir dicha área como servidumbre. Su instalación y prestaciones se destinan al largo plazo, salvo que se prevea mantenimiento.

Están constituidas por electrodos sólidos, que se instalan en función de las características del suelo, y de la resistividad del mismo.

- Electrodo tipo varilla: Jabalinas de cobre (0.013 mm) cuando hay escasez de espacio, en cualquier tipo de suelo.
- Electrodo tipo pletina: Contrapeso de cobre (<130 mm cuadrados), cuando se dispone de un espacio longitudinal en cualquier tipo de suelo.

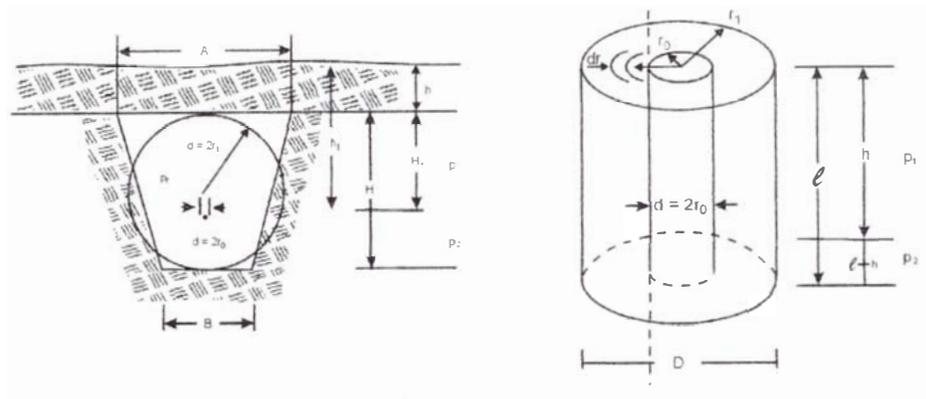


Fig. 3.42

Tratándose de Puestas a Tierra domésticas, en las que la exigencia de (R_t) no es de bajos valores, se puede hacer un diseño económico, basado en que:

- No es necesario establecer el perfil de resistividades del suelo. Rara vez están por debajo de $100 \Omega \cdot m$.
- El método de instalación con relleno neutro, determinará la resistividad equivalente.
- El uso de impregnantes y rellenos naturales da más bajas (R_t) y asegura larga duración.

3.11.3 PUESTAS A TIERRA DE PEQUEÑA COBERTURA.

- Requieren de un cierto espacio de suelo, necesario para su instalación aunque, posteriormente, no necesita la servidumbre.
- Sus instalaciones y prestaciones se destinan a largo plazo. En los casos de mayor exigencia de baja (R_t), será necesario prever mantenimiento
- Como electrodo horizontal o contrapeso, se utiliza un conductor de cobre como mínimo N° 2 AWG y, como electrodo vertical, jabalinas de cobre.
- El hecho de la instalación del conductor deberá ser de PH neutro, para evitar la corrosión.
- Tratándose de Puestas a Tierra comerciales, con exigencias de (R_t) bajas, generalmente menores a 3Ω , el diseño implica electrodo mixto: jabalinas unidas mediante contrapesos.

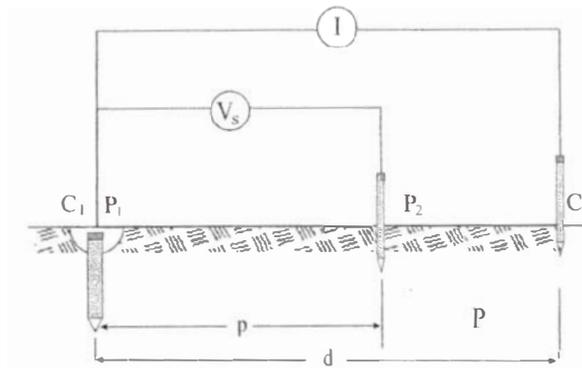


Fig. 3.43

- Se deberá establecer el perfil de resistividades del suelo, o bien, hacer una calicata, y tomar muestras para análisis de laboratorio (% de sales solubles, % de humedad, conductividad, PH).
- El método de la instalación será el mismo. Ocasionalmente requerirá el uso de soluciones conductoras (no son geles).
- Al finalizar la instalación, se deberá medir la resistencia de dispersión, necesariamente con un telurómetro.

3.11.4. PUESTAS A TIERRA DE GRAN COBERTURA.

Tratándose de instalaciones electromecánicas con maquinaria y equipos distribuidos, la puesta a tierra deberá ocupar un área similar. La instalación y prestaciones se destinan a plazo indefinido y, normalmente, no se prevén mantenimientos.

Están constituidos por una red de conductor de cobre desnudo, como mínimo N° 2 AWG ($> 35 \text{ mm}^2$) y, a veces, combinada con jabalinas de 0.013mm/ dia.

La durabilidad de las prestaciones y de la instalación, depende de los rellenos utilizados. No debe haber contacto electrodo-sales solubles.

El diseño deberá hacerse según el caso, en forma de aterramiento formal, o aterramiento de seguridad (cuando hay grandes potencias de corto circuito).

- Establecer el perfil de resistividades del suelo en modelo estratificado.
- El método de instalación será el mismo que utiliza rellenos neutros, con mínima

salinidad.

- Los empalmes subterráneos se hacen con el método de soldadura exotérmica.
- Las conexiones externas a las masas y carcasas se hacen con grapas de presión desmontables.
- Cuando se requiere control de potenciales, será suficiente igualar las tensiones de toque (admisible con la de la red).
- La red de puesta a tierra no necesita un cuadrillado uniforme.

3.12. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA POR UBICACIÓN

Se dividen en: Toma de Tierra de Barra, Superficial y Combinada.

Al adquirir la toma de tierra el potencial del terreno donde está ubicada, deberán tenerse en cuenta las posibles fluctuaciones del mismo, evitando colocarla junto a otras instalaciones, capaces de provocar acoplamientos galvánicos o de generar corrientes de origen atmosférico o industrial.

Para proyectar correctamente las tomas de tierra de una instalación, es preciso determinar los puntos más idóneos para la ubicación de los electrodos, teniendo en cuenta todas las variables que intervienen, al objeto de conseguir los fines previstos con la menor inversión posible.

A este respecto, es preciso que el proyectista, para conocer las posibilidades que ofrece el terreno, realice medidas de resistividad y un análisis del terreno, teniendo en cuenta la constitución granulométrica, poder higroscópico, tipo de vegetación, existencia de sedimentaciones producidas por el agua, cambios de naturaleza geológica, y todas las características del suelo, que evidencien la existencia de zonas favorables, para la ubicación de tomas de tierra.

Después de esta primera selección de las zonas más favorables, y una vez determinada teóricamente la separación máxima entre tomas de tierra, se procede a la elección de los puntos en concreto de puesta a tierra.

Se procura también evitar la instalación de tomas de tierra, en aquellos puntos del

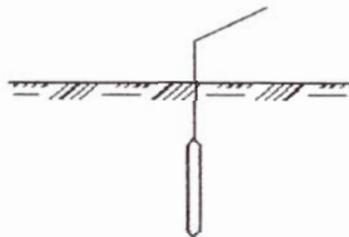
terreno próximos a otros, pertenecientes a otro tipo de instalaciones, como son las tomas de tierra de apoyos de líneas de energía, o instalaciones (subestaciones, centros de generación, etc.) de alta tensión.

A este respecto, siempre debe dejarse entre ambos sistemas de tierra una distancia de seguridad que, siendo función de la resistividad del terreno, la corriente máxima de defecto y del tipo de instalación telefónica, se procura que nunca sea inferior a 100m., garantizándose de este modo la protección contra acoplamientos galvánicos.

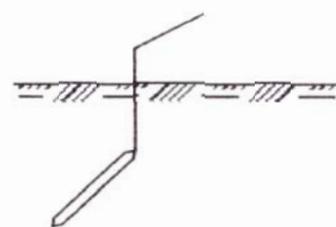
Otro factor a tener en cuenta, a la hora de situar los electrodos, es el perfil del terreno (terraplenes, bancales, etc.), por la importancia en el nivel de humedad de éste que, a su vez, influye enormemente en la resistencia de la toma de tierra.

3.12.1 TOMA DE TIERRA DE BARRA.

1. Varilla Vertical

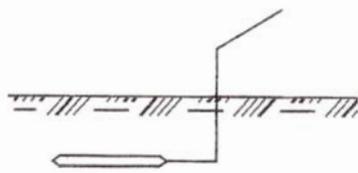


2. Varilla Oblicua

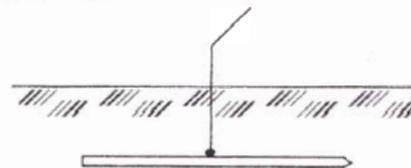


3.12.2. TOMA DE TIERRA SUPERFICIAL.

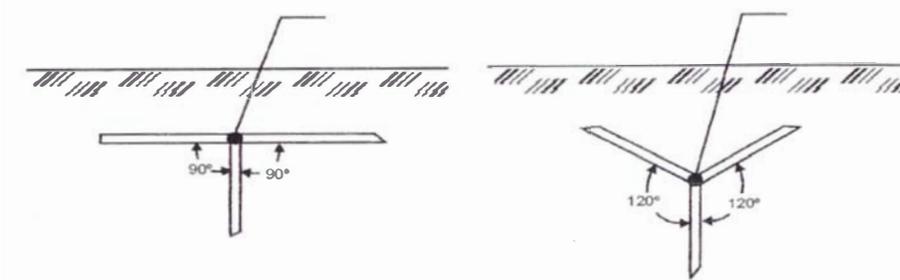
1. De un lado



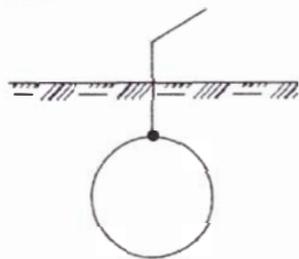
2. De dos lados



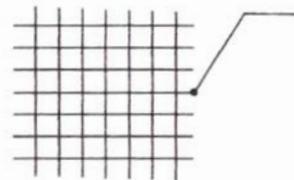
3. De tres lados



4. De Anillo

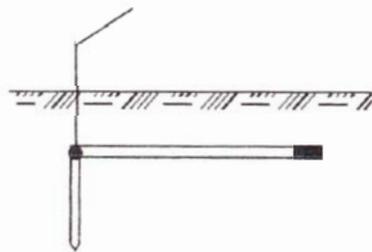


5. De Red

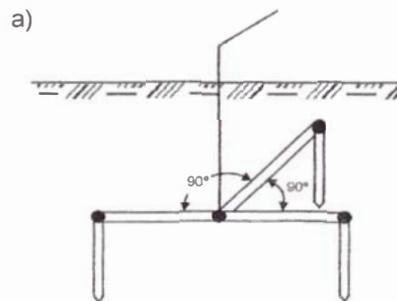


3.12.3 COMBINACIÓN DE TOMAS DE TIERRA.

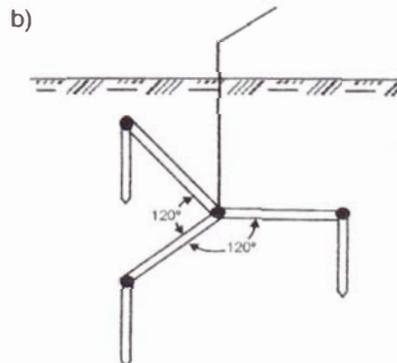
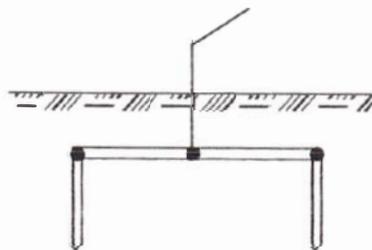
1. Varilla Vertical y Superficial Simple



2. Tierra Vertical y Superficial Múltiple



2. Tierra Vertical y Superficial Doble



3.13. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA POR FUNCION

3.13.1 PUESTA A TIERRA PARA PROTECCIÓN.

Partiendo de la base de que es necesario conectar eléctricamente al suelo todas aquellas partes de las instalaciones eléctricas que no se encuentran sujetas a tensión, normalmente, pero que pueden tener diferencias de potencial, a causa de fallas accidentales, tales partes pueden ser: los tableros eléctricos, el tanque de los transformadores o interruptores, la carcasa de las máquinas eléctricas, la estructura metálica de las subestaciones o las líneas de transmisión y, en general, todos los soportes metálicos de equipos y aparatos.

3.13.2 PUESTA A TIERRA PARA FUNCIONAMIENTO

Partiendo de la base de que es necesario establecer una conexión a tierra en determinados puntos de una instalación eléctrica, con el fin de mejorar el funcionamiento, una mayor seguridad, o una mejor regularidad de operación, estos puntos del sistema por conectar a tierra, pueden ser, por ejemplo: la conexión a tierra de los neutros de los alternadores de los transformadores en los devanados conectados en estrella, la conexión a tierra de los apartarrayos de los hilos de guarda, de los transformadores de potencial, y algunos otros.

3.13.3 PUESTA A TIERRA PARA TRABAJO.

Con frecuencia, durante las actividades de trabajo en una instalación eléctrica, como son mantenimiento, ampliaciones, reparaciones, etc., es necesario realizar conexiones a tierra temporales, con partes de la instalación puestas fuera de servicio, con el fin de que sean accesibles, sin peligro para los trabajos a realizar. En cualquiera de los casos de puesta a tierra mencionados anteriormente, no se deben exceder las "Tensiones de Seguridad" establecidas, e indicadas en el punto correspondiente.

CAPITULO IV

SEGURIDAD DE CENTROS DE COMPUTO

La seguridad de los centros de cómputo se divide en dos rubros principales:

- a. Seguridad Física
- b. Seguridad Lógica

a. Seguridad Física.

Puede contemplarse desde dos puntos de vista:

a.1 Protección contra fenómenos naturales:

- Fluctuación de voltaje y parámetros eléctricos.
- Descargas atmosféricas
- Humedad del suelo (inundaciones)
- Ruido en transmisión de datos
- Descargas electrostáticas
- Movimientos sísmicos
- Interferencia en videos de monitores
- Incendios

a.2 Protección interna del Centro de Cómputo

- Ubicación adecuada
- Vigilancia externa
- Sistema de detección de humo
- Alarmas contra incendio
- Extinguidores
- Ingreso autorizado

- Limpieza de equipos
- Equipos UPS para poder apagar el Sistema
- Tablero de control
- Interrupción de emergencia para corte de corriente
- Piso elevado
- Falso techo
- Puertas contraplacadas con cierrapuertas hidráulico
- Aire acondicionado
- Grupo electrógeno
- Luces de emergencia en caso de falta de fluido eléctrico
- Mantenimiento preventivo de equipos
- Cámara filmadora giratoria
- Mobiliario ergonómico
- Marcador de voltaje externo al centro de cómputo
- Prohibición de fumar.

b. Seguridad Lógica

Se refiere a la protección de la información:

- Software base de control de aplicativos.
- Niveles de seguridad, según perfil del individuo que va a ejecutar una tarea, de acuerdo a Passwords.
- Back-up de programas
- Back-up de archivos: abuelo-padre-hijo
- Guardar back-ups mensuales y anuales
- Dos personas deben tener llave del mueble con Back-ups
- Trasladar back-ups a otro edificio con seguridad
- Grabación automática intermitente de datos, para permitir reinicio desde última grabación.
- Documentación actualizada de programas y archivos
- Cuadro de manejo de archivos versus programas por aplicación
- Auditoría periódica de sistemas
- Triturador de papel para reportes
- Control de stock de discos, cintas, papel, etc.

- Protección contra virus
- Encriptación para transmisión de datos

En el presente capítulo se tratará sobre la Seguridad Física, bajo el punto de vista de la protección contra fenómenos naturales (4 a.1), incidiendo principalmente en los riesgos, daños y accidentes de origen eléctrico, que de no ser prevenidos, pueden perjudicar al personal de la empresa, los equipos, la información y hasta los inmuebles, que están íntimamente relacionados con la performance de las puestas a tierra, como primer mecanismo para desviar a tierra y neutralizar los posibles efectos colaterales de una sobre corriente, de una corriente de falla o defecto o corrientes parásitas, que puedan influir negativamente en una Red de Datos de un Centro de Cómputo o en el equipo o en el recurso humano que ejecuta las actividades operativas dentro del Área de Sistemas e Informática, causando deterioro en las partes y piezas de los equipos de la red de información.

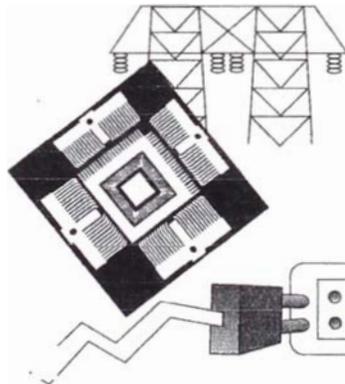


Fig.4.1 Medios de la infraestructura eléctrica que tienen incidencia en partes vitales de los equipos de cómputo.

4.1 USOS Y APLICACIONES GENERICAS DE LA ELECTRICIDAD.

La energía eléctrica, desde su invención y escalonada implantación a través de los años; ha ido aportando grandes adelantos técnicos y científicos, todos orientados hacia el confort, la obtención de alimentos, su manufactura, su conservación, su transporte; a aumentar el rendimiento y a sustituir el trabajo del hombre por las máquinas, etc., de forma que la

humanidad cada día va obteniendo más ventajas en el transporte, en la industria, en la vivienda; más tiempo disponible y libertad.

Todas las fases de la vida humana están suspendidas y ligadas en gran parte a la electricidad, haciéndola a esta imprescindible. Su falta significaría una paralización absoluta; todas las tareas se interrumpirían, puesto que funcionan en cadena (a partir de estos últimos años se está hablando y creemos que seguiremos haciéndolo por mucho tiempo, sobre su escasez, de su utilización restringida; como en el caso de California EEUU en el año 2001, o el de la inundación de la Central Hidroeléctrica de Macchu Picchu en el año 1998 o en el caso de la Central Hidroeléctrica de Paute en la Sierra del Ecuador en el año 2001, el caso de Brasil que en el año 2003 está presentando déficit de la energía debido a la fuerte sequía por la que está pasando este país actualmente; por mencionar algunos de estos casos, que han contribuido a impactar en estas economías regionales en forma negativa; de su ahorro, de su disminución de reservas y racionalización, etc.) constituyéndose hoy por hoy en un Commodity (Bienes Primarios o mercancías para uso y usufructo de intercambio internacional y que incluso se cotizan en las Bolsas de Valores Internacionales) donde países vecinos comercializan este tipo de bien o activo como es el caso de Perú/Bolivia, Perú/Ecuador, Ecuador/Colombia, Colombia/Venezuela, Paraguay/Brasil, etc. generando empleo sobre todo en horas punta para su mejor explotación industrial en países deficitarios de la energía eléctrica y con gran carga de trabajo coyuntural constituyendo un insumo trascendente.

La electricidad es la fuerza que fluye, desde las hidroeléctricas que la generan hasta el más insignificante dispositivo eléctrico. Está presente en el control de las grandes plantas industriales, de las empresas comerciales, de las empresas de servicios, de las telecomunicaciones, de construcción civil y arquitectónica, y en el hogar, se ha convertido en el elemento más importante, sólo comparable al suministro de agua.

Si en sus inicios, la electricidad sólo se utilizó en la iluminación, en la época actual, al suministrar energía a los aparatos electrónicos, permite realizar operaciones que, hace algunos años se consideraban imposibles, como el fax, los edificios inteligentes, la comunicación en tiempo real con aviones, barcos, trenes, buses y el

instrumento “estrella”: **la computadora** que, además de controlar las operaciones de la banca, el comercio, la industria, el transporte y las comunicaciones, permite transitar por la super-carretera de la información, “Internet”. A través de esta red, se transmite data en forma escrita, hablada, armónica, visual, animada, fotográfica, filmada y aún no existen límites para su desarrollo, utilizando la realidad virtual.

Por citar un par de ejemplos, que no se concebían hace una década, hoy un estudiante puede, desde su casa, obtener información sobre un tema, buscando material en Alemania, Méjico o Australia. Y una empresa, con sucursales en España y Puerto Rico, puede organizar una teleconferencia tripartita, conversando los ejecutivos de los 3 países entre sí, mientras se ven a través de una pantalla.



Fig 4.2 Estación de trabajo personal (Work Station), cuya implementación se puede ejecutar en espacios reducidos y con gran capacidad de interacción técnica.

Uno de los adelantos que antes parecía de ficción, es la robótica, que ya se utiliza en el Perú, en algunos Centros de Cómputo, para obtener los back-ups a cinta de archivos, y otras aplicaciones. En otros países, se han vuelto indispensables en las líneas de ensamblaje de automóviles y de relojes o instrumentos de alta precisión, y en aquellas operaciones que implican riesgo para los obreros, incluso en telemedicina para operaciones delicadas intercontinentales o interoceánicas.

El flujo de una corriente eléctrica desde las plantas de generación de energía hasta un aparato eléctrico cualquiera puede ser más fácil de comprender si se compara el sistema eléctrico de una país con un mapa vial. Las líneas de muy alto voltaje que llevan la electricidad desde las centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, nucleares, etc. Hasta las subestaciones de transformación son similares a las carreteras

principales (troncales). Las líneas de alto voltaje que van desde las subestaciones de transformación hasta las subestaciones de distribución son como las carreteras que se desprenden de las troncales y conducen a los distintos departamentos o regiones. Desde las subestaciones de distribución, la energía eléctrica se reparte a los abonados industriales de mediana tensión, a los centros de transformación y a los transformadores de distribución. Estas líneas son como las avenidas que se desprenden de las carreteras departamentales y conducen a los distintos pueblos y ciudades.

Las líneas que llevan la electricidad a su casa, fábrica u oficina desde los centros de transformación y los transformadores de distribución actúan como las avenidas pequeñas y medianas que llegan a los barrios. Finalmente, los cables que constituyen la instalación eléctrica encargada de alimentar los distintos aparatos son como las calles de su barrio.

Naturalmente, cuando las calles, carreteras y avenidas de una ciudad o un país están conectadas entre sí, la ciudad o el país se vuelven accesibles. Esto es similar a tener una corriente eléctrica fluyendo permanentemente desde las fuentes de energía hasta todos los tomacorrientes de una casa. Así como el flujo de vehículos en una carretera puede ser interrumpido por la presencia de un puente levadizo o caído, el flujo de corriente hacia una carga puede serlo por un interruptor o un fusible abiertos. Para que el tráfico (la corriente) vuelva a fluir, el puente levadizo o caído (interruptor o fusible) deben cerrarse.

Hemos llegado a un alto nivel de tecnología e industrialización en la inversión y construcción de aparatos eléctricos, electrónicos y electrodomésticos, aplicados tanto a la industria como en el hogar, destinados a hacer la vida más cómoda y alegre. Aunque ello represente a su vez un mayor riesgo, dependiente de la técnica y de la electricidad en sí, hoy no sería posible convivir en la tierra en las circunstancias actuales careciendo de la energía eléctrica para alimentar todos los aparatos que disponemos; todos nos aprovechamos de ella directa e indirectamente: las personas, comunidades, sociedad, pueblos y naciones.

Los grandes y pequeños aparatos eléctricos, todos ellos sin excepción y en

un momento determinado; pueden presentar un riesgo inminente y en consecuencia un accidente eléctrico para las personas, animales y cosas e incluso; ser capaces de producir la muerte. De hecho sucede en muchas ocasiones, como se verá, si no sabemos hacer uso apropiado de ellos, si no se cuidan y si no nos protegemos adecuadamente, si no somos responsables de nuestros actos, si no prevenimos, y si no nos convencemos de la necesidad de disponer de una seguridad personal y colectiva, con normas establecidas de seguridad mediante los elementos y aparatos destinados a la prevención y protección en el trabajo y en todas nuestras actividades.

Algunos de los muchos motivos por los cuales se pueden producir accidentes eléctricos son: la ignorancia, la imprudencia, el desconocimiento, la falta de preparación y, la seguridad técnica y personal; sin olvidar la negligencia, el exceso de confianza en la actividad laboral de su trabajo, en particular en aquellos que trabajan cotidianamente con la electricidad o tienen relación con ella. Cada vez más, el control electrónico reemplaza a los controles mecánicos y eléctricos; aunque en muchas ocasiones, nos olvidamos de proteger a estos equipos de alta tecnología de las descargas eléctricas producidas por la propia calidad de la energía (o conmutaciones) de que disponemos; por los fenómenos naturales e interferencias diversas, etc.

La telefonía, la informática, las alarmas antiincendio, el aire acondicionado, la calefacción, los hornos industriales, los equipos de energía y, los equipamientos electrónicos en general, ofrecen mayor calidad de vida personal e industrial; pero también nos ocasionan grandes perjuicios económicos cuando ha sufrido la veloz visita de una sobre tensión eléctrica, o de falla, como los flickers (efecto de parpadeo o variaciones rápidas de voltaje), los swells (amplificaciones), sags (depresiones), ruidos (wave notching), sobreintensidades transitorias tipo impulso y tipo oscilatorio que distorsionan la onda sinusoidal..

Para evitar y atenuar la peligrosidad de estos fenómenos en la vida y funcionamiento de los equipos se ha previsto la estabilidad, continuidad de funcionamiento y la protección de los mismos dispositivos que eviten el ingreso de estos transitorios a los sistemas eléctricos en fracciones de

segundos (Nanosegundos = $\cdot 10^{-09}$) y, sean dispersados por una ruta previamente designada como es la Puesta a Tierra, que es el Primer Dispositivo protector no solo del equipo delicado; sino también de la vida humana, evitando desgracias o pérdidas que lamentar.

El Sistema Dispensor o Puesta a Tierra, constituye el pozo infinito donde ingresan corrientes de falla o transitorios y que, no tienen retorno porque van a una masa neutra donde son realmente dispersados.

4.2 RIESGOS DE LA ELECTRICIDAD.

Es creencia natural y mundialmente reconocida que la electricidad es muy peligrosa y que un electrocutado significa una muerte casi segura, accidente que se divulga rápidamente entre el público con mucho sentimiento; pero, a pesar de su peligrosidad manifiesta y potencial, no existe una proporción de accidentes mortales tan numerosos como en otras ramas de la industria y la construcción, si se comparan con los accidentes de tránsito que actualmente representan una masacre. Vemos que hay una diferencia muy grande, ya que por cada muerte por electrocución o electrocución (por electricidad), se producen 50 por tránsito al año, por cada 250 mil habitantes.

No obstante, si se tienen en cuenta todos los accidentes laborales, sólo el cuatro por ciento (4 %) son mortales como consecuencia de la electricidad y no están en relación directa con las empresas eléctricas, sino que en su mayoría son ocasionados con mas frecuencia en la construcción, en toda clase de industria, etc.; sin olvidar las vidas que se cobra la electricidad en la vivienda. El accidente eléctrico se puede producir en función de muchos factores, en algunos casos, pueden concurrir una o más circunstancias, en otras, más influirán fallos humanos o técnicas y, la falta de prevención, tanto personal como directiva; falta de proyección y de realización de obra.

Los accidentes eléctricos se producen cuando una persona se pone en contacto con la electricidad por falta de prevención; por ignorancia, temeridad, fallas humanas, fallos técnicos y pocos conocimientos del comportamiento de

la electricidad, amén de muchas otras circunstancias: una instalación, un conductor, una máquina, un elemento eléctrico bajo tensión directa o indirecta, provocada esta última accidentalmente al hacer contacto una fase activa con una carcasa, una máquina, una masa metálica, un conductor, un aparato eléctrico cualquiera, etc., que ha quedado bajo tensión camuflada al producirse una avería o defecto de aislamiento, rotura, instalación defectuosa, fallo de las protecciones y sistemas de seguridad.

Muchas de las fallas en los aparatos eléctricos se deben a la existencia de una o más interrupciones en el trayecto de circulación de la corriente. Cuando se sospecha que un circuito está abierto, es necesario localizar el lugar donde se halla la interrupción. Este puede ser, por ejemplo, un cable fracturado o un interruptor defectuoso.

Todos los aparatos eléctricos están formados por circuitos y estos, a su vez, por fuentes de poder, conductores, cargas y controles. La fuente de poder puede ser una batería o la electricidad proporcionada por un tomacorriente de pared. Los conductores son generalmente alambres de cobre o pistas de circuito impreso. También puede servir como conductor el chasis o marco metálico de los aparatos.

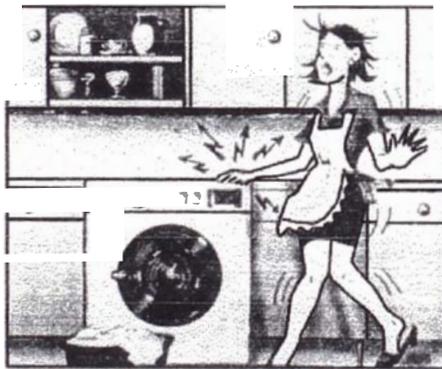
Las cargas son los componentes que realizan verdadero trabajo en un aparato. Por ejemplo, en una lavadora, los motores hacen girar la correa y el sistema de transmisión. Este, a su vez, gira el agitador. Otros ejemplos de cargas son los calentadores y los solenoides. Los controles regulan el flujo de corriente eléctrica a través de las cargas. Un elemento de control puede ser un interruptor operado manualmente por el usuario del aparato o automáticamente por el aparato mismo.

Cuando se habla de accidentes mortales causados por la electricidad casi siempre nos referimos a los causados por la alta tensión - (AT) - por ser esta extremadamente peligrosa, y en efecto, así es; pero también la baja tensión - (BT) - es un riesgo, no nos olvidemos de ello y esta es la que causa mas accidentes leves y mortales por ser con la que más se trabaja y más personas intervienen, tanto en la industria como en la vivienda; casi todos estamos familiarizados con el uso de aparatos eléctricos y electrodomésticos; ahora

bien, una persona electrocutada por alta tensión cobra una noticia que se propaga rápidamente, pasando a ser del dominio público como una conmoción general, además de los posibles daños devastadores que puede proporcionar. Así tenemos el caso producido en Bujaraloz - España en 1982 a causa de una fuerte descarga eléctrica sobre los transformadores de alta tensión, la red de baja tensión, pasó a ser de alta, con los consiguientes incendios y electrocuciones, en este caso de tres personas y cuantiosos daños materiales.

Un error que se comete muy frecuentemente cuando se produce un accidente eléctrico, al recibir una persona una descarga eléctrica; es considerarla como muerta. Hay que olvidar estos términos tan radicales y perjudiciales para la víctima y no diagnosticar a destiempo o por lo menos hasta pasadas muchas horas y habiendo aplicado con toda presteza y urgencia, la respiración artificial, hasta que los facultativos determinen que efectivamente ha muerto; tanto en el mismo lugar del accidente como en el transporte y traslado, se debe realizar la respiración artificial sin interrupción de ninguna clase.

Fig
4.3
Ac
cid
ent
es
elé
ctri
cos
por



contactos directos en el hogar como en los centros laborales.

Aquella primera creencia puede ser falsa muchas veces. Como se ha dicho, la respiración artificial, que salva muchas vidas y, si procede también; el masaje cardíaco. Estos primeros auxilios pueden salvar la vida, muchas veces después de muchos minutos o de unas horas de aplicación sin descanso ni interrupción. Desconocer estos términos de la muerte aparente y desconocer la técnica de la respiración artificial, supondrá que el accidentado pase de la muerte aparente a la muerte verdadera e irreversible. La electricidad, que es una fuerza

que suministra múltiples usos, también presenta algunos riesgos, que pueden traer consecuencias fatales.

En este punto se considerará a las tensiones de contacto y de paso, producción de incendios, choques eléctricos, descargas electrostáticas, humedad y tormentas eléctricas, etc, entre otros aspectos de las manifestaciones críticas de la energía eléctrica.

4.2.1 TENSION DE CONTACTO (V_c).

Es aquella tensión a la que puede verse sometido el cuerpo humano, como consecuencia de un contacto con las carcasas y estructuras metálicas de máquinas e instalaciones que normalmente no se hallan bajo tensión pero que, eventualmente, pueden estarlo a consecuencia de alguna avería interna.

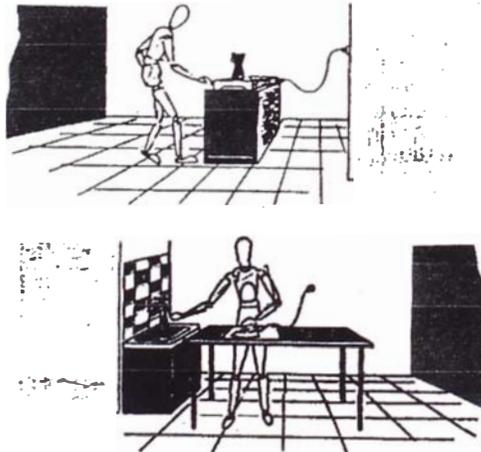


Fig.4.4 Tensión de contacto.

4.2.2 TENSION DE PASO (V_p)

Es la tensión que, durante el funcionamiento de una instalación de tierra, puede resultar aplicada entre los pies de una persona, situados a la distancia de un paso (1 metro). La protección contra las tensiones de paso, concierne en particular a las instalaciones de media y alta tensión.

Todos hemos escuchado historias de incendios, explosiones, injurias personales y

otros tipos de accidentes de origen eléctrico; granjas incineradas por tormentas eléctricas, casas destruidas debido a fallas en las instalaciones eléctricas, laboratorios explotados por un cortocircuito, personas electrocutadas en su casa al tocar partes metálicas energizadas, etc.

La mayoría de estos accidentes ocurren por imprudencia de los usuarios o porque los medios de seguridad previstos por los diseñadores de las instalaciones y artefactos eléctricos no fueron suficientes para garantizar la seguridad personal, no estuvieron correctamente aplicados o con el tiempo, se deterioran.

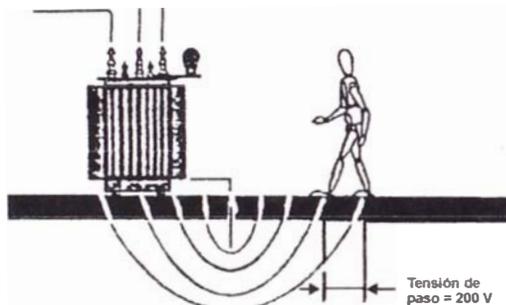


Fig. 4.5. Tensión de Paso.

Aunque no podamos tener control sobre las tormentas eléctricas, es necesario diseñar sistemas de protección de instalaciones altamente eficientes y perdurables. Podemos y debemos ser cuidadosos con la electricidad en nuestros hogares, industrias y oficinas, especialmente en lo que se refiere a la prevención de incendios, choques eléctricos, cortocircuitos y sobrecargas. A continuación, examinaremos algunos casos particulares.

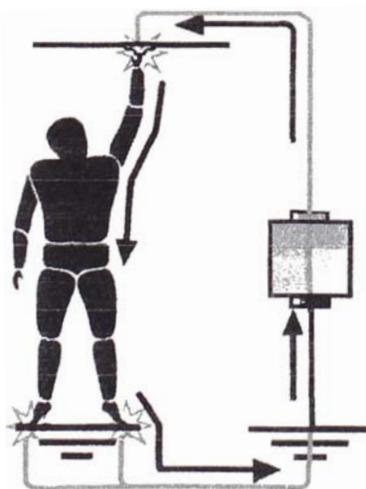


Fig. 4.6 La corriente pasa a través de una persona cuando ésta se convierte en el eslabón que cierra un circuito eléctricamente vivo, es decir conectado a una fuente voltaje activa.

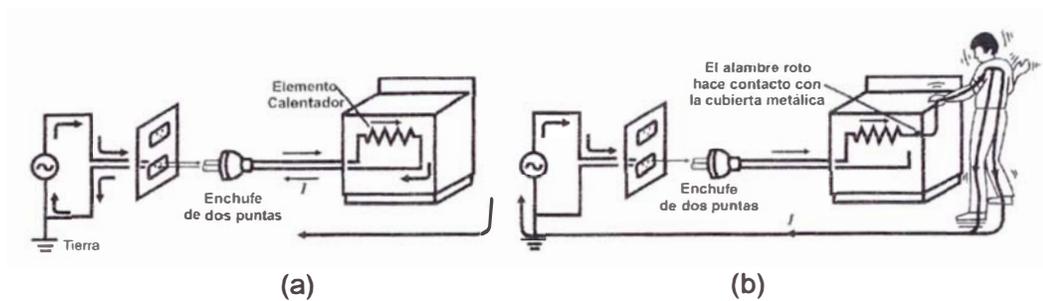


Fig. 4.7: a) Secadora de ropa en operación normal conectada a un enchufe de pared mediante una clavija de dos puntas, b) La secadora falla porque un cable interno toca la envolvente metálica. Una persona que toque la secadora puede recibir un choque eléctrico.

Una persona o un animal sometido a una tensión eléctrica se electriza. Según la importancia de la electrización, esta persona puede sufrir: Una molestia o dolor, una contractura muscular, una quemadura, un paro cardíaco, etc.

4.2.3 INCENDIOS DE ORIGEN ELECTRICO.

Las causas de un incendio de origen eléctrico son muy variadas, siendo la más común la sobrecarga. Un circuito está sobrecargado cuando fluye demasiada corriente a través suyo, produciéndose una sobre intensidad o una sobre tensión en la instalación que sobrepasa su capacidad de diseño de soportar esas sobrecargas para la cual ha sido previamente calculada y diseñada. Bajo esta condición, los conductores se calientan hasta el punto de derretir y quemar el aislante que los protege (efecto Joule). Como resultado, los alambres quedan expuestos y se unen entre sí, originándose acto seguido un cortocircuito.



Fig.4.8 Causa común de un incendio por sobrecarga de equipos eléctricos en la red.

!!!Las corrientes de más de 300 mA son peligrosas !!! y se sabe que el 30 % de los incendios se originan por fallas eléctricas.

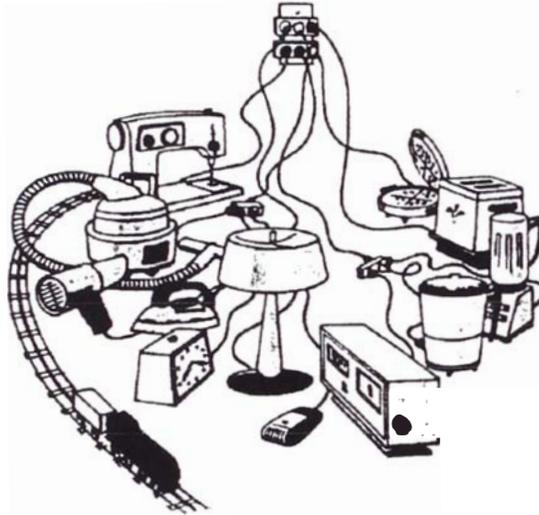


Fig. 4.9 La excesiva demanda de corriente por parte de un tomacorriente o una extensión, crea siempre riesgo latente de fuego.

Un circuito puede sobrecargarse, por ejemplo, al conectar demasiados aparatos a un tomacorriente no diseñado para transportar toda la cantidad de corriente que esos aparatos demandan (Ver figura 4.8). Con el fin de evitar sobrecargas por este motivo, los tomacorrientes domésticos se diseñan únicamente con dos salidas. Los que incluyen tres agujeros deberán necesariamente comprender al cable de tierra en su infraestructura.

No obstante, muchas personas pasan por alto esta característica de seguridad y, mediante el uso de extensiones y/o enchufes múltiples, logran conectar más de un aparato en una salida de tomacorriente. El mal uso de las extensiones y los enchufes múltiples es una de las principales fuentes de incendios, sacudidas y otros accidentes eléctricos.

Otra forma muy corriente de originar sobrecargas, es conectando calentadores, estufas y otros artefactos térmicos a circuitos no diseñados para transportar la corriente que estos aparatos demandan.. Podemos ver como ocurre la sobrecarga considerando el circuito de la figura N° 4.10 . La línea de alimentación se conecta a un tostador eléctrico que consume 8 A , a un calefactor que consume 10 A y a una lámpara que consume 2 A . Cuando solo está funcionando el calefactor, la corriente total en la línea es de 8 A , si también está funcionando el calefactor , la corriente

total aumenta hasta 18 A (8 A del tostador y 10 A del calefactor).

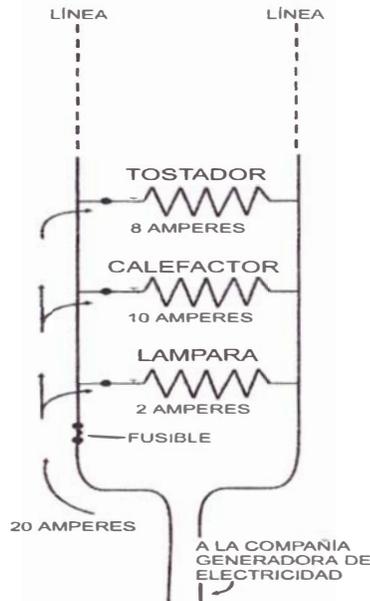


Fig. 4.10 Diagrama circuital para aparatos eléctricos conectados a una línea de alimentación doméstica. La resistencia de los aparatos se indican por medio de las líneas en forma de diente de sierra.

Al encender la lámpara se incrementa la corriente en la línea hasta 20 A , y conectar más aparatos eléctricos hace que pase todavía más corriente . La corriente que requieren estos equipos es, en general, muy superior a la que exigen otros electrodomésticos. Por esta razón, la mayoría de instalaciones eléctricas proveen circuitos separados para los electrodomésticos grandes o de gran consumo, individuales a cada equipo y que además, deben ser debidamente calculada su capacidad de conducción para el equipo que va a soportar a fin de evitar estas sobrecargas.

4.2.4 CHOQUES ELÉCTRICOS.

Un "shock" o sacudida eléctrica es la sensación física producida por la reacción de los nervios cuando circula una corriente a través del cuerpo. En casos menores, sólo se produce un ligero estiramiento de los músculos, mientras que en los casos más severos, la respiración se corta y los músculos del corazón se paralizan, llegándose incluso a la muerte. Este tipo de accidente letal se conoce como electrocución o electrocución.

Para que ocurra un choque eléctrico debe haber una diferencia de potencial eléctrico entre una parte y otra del cuerpo, la corriente pasará por el cuerpo

siguiendo una trayectoria que conecte estos dos puntos. Supóngase que una persona cae de un puente y que en su caída logra asirse de un cable de alta tensión (alto voltaje) que le permite detenerse; mientras no toque algo más de potencial eléctrico diferente, no recibirá choque alguno. Incluso si el alambre tiene algunos miles de voltios más que el potencial del piso y aún cuando se sostenga de él con las manos, no pasará corriente de una mano a otra; esto se debe a que no existe diferencia de potencial entre sus manos. No obstante, si se detiene con una mano y con la otra sujeta otro alambre de potencial diferente o, con un pie por lo menos toca el suelo o una estructura conectada al suelo entonces ocurre el accidente eléctrico, porque se constituye la diferencia de Potencial temida.

Todos hemos visto a los pájaros posados de los alambres de alta tensión, cada una de las partes de su cuerpo se encuentra al mismo alto potencial del alambre y no sienten efectos desagradables (ver fig. N°.4.11)



Fig.4.11 El pájaro puede posarse sin peligro sobre un alambre de alto potencial, ¡¡ pero haría bien en no alcanzar y tocar un alambre vecino !!

La cantidad de corriente que puede producir daños severos, varía de una persona a otra, y del tiempo que dure la descarga a través del cuerpo. Una corriente menor de 3 mA o milésimas de amperio (el amperio, abreviadamente A, es la unidad de medida de la corriente eléctrica) es prácticamente inofensiva y no representa mayor riesgo. Las corrientes entre 5 y 10 mA provocan contracciones involuntarias de los músculos, y pequeñas alteraciones del sistema nervioso.

Las corrientes entre 10 y 15 mA, por su parte, pueden producir tetanización muscular (parálisis) y contracciones violentas de las extremidades. En estado de tetanización, las personas pueden llegar a quedar pegadas al conductor eléctrico generador de la descarga, siendo incapaces de desprenderse por sus propios medios. Las corrientes entre 15 y 30 mA alteran el ritmo cardíaco y provocan contracciones violentas de la caja torácica. Por último, las corrientes superiores a

30 mA, pueden causar fibrilación ventricular cardíaca y la muerte por asfixia.

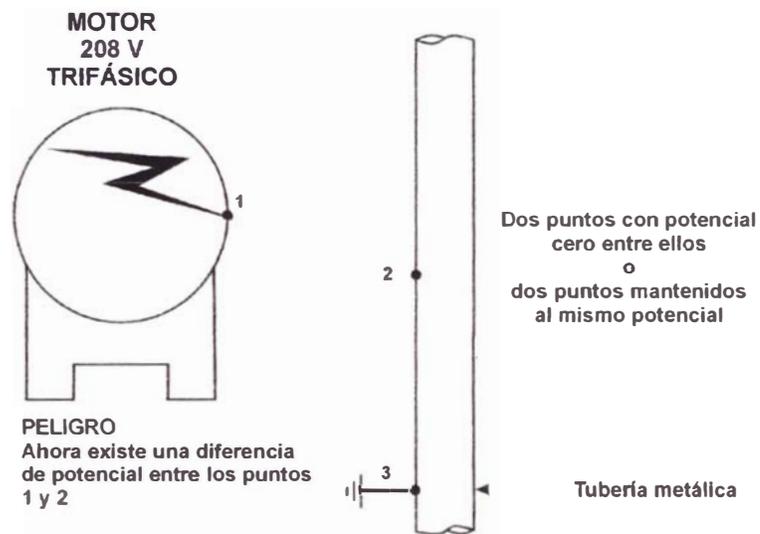


Fig. 4.12 Falla a tierra del motor. Existe un peligro. (diferencia de potencial)

La figura 4.12 muestra una falla o corto circuito dentro de un motor trifásico, 208 volts, de manera que el chasis del motor se puede considerar vivo o energizado. Una vez que ocurre una falla dentro del motor, la armazón metálica de éste se encuentra al mismo potencial a tierra que el conductor de fase. Ahora existe un peligro y las probabilidades de un accidente, en caso de que alguien toque al mismo tiempo el armazón del motor, y una superficie conectada a tierra. Existe un diferencia de potencial entre el punto 1 y los puntos 2 y 3.

La diferencia de potencial depende de qué tan efectiva es la unión de la fase al armazón del motor. Puede ser los 208 volts o una porción de éstos; pero existe de todas maneras, una diferencia de potencial entre el armazón del motor y cualquier superficie conectada a tierra.

La figura 4.13 muestra un accidente en el momento de ocurrir. Alguien toca el armazón metálico del motor, y una tubería metálica, al mismo tiempo. Esto crea un circuito eléctrico completo a través de la persona, quien ahora recibe un choque eléctrico. ¿Cuál sería el voltaje a través de la víctima? Todo depende qué tan efectivo sea el contacto de la persona para completar el circuito y de la impedancia del sistema y de la persona. Este no es el único peligro existente.

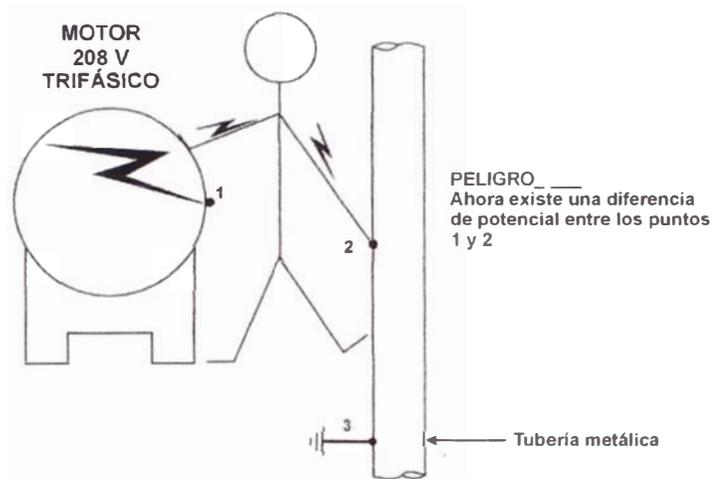


Fig. 4.13 Un choque eléctrico.

La figura 4.14 ilustra el segundo peligro. Una persona toca el armazón del motor y otra superficie conectada a tierra, del mismo potencial que la tubería metálica de agua. De nuevo, se puede observar la trayectoria de la corriente a través del cuerpo. La severidad del choque eléctrico de la víctima depende de la forma en que la víctima esté conectada al circuito eléctrico.

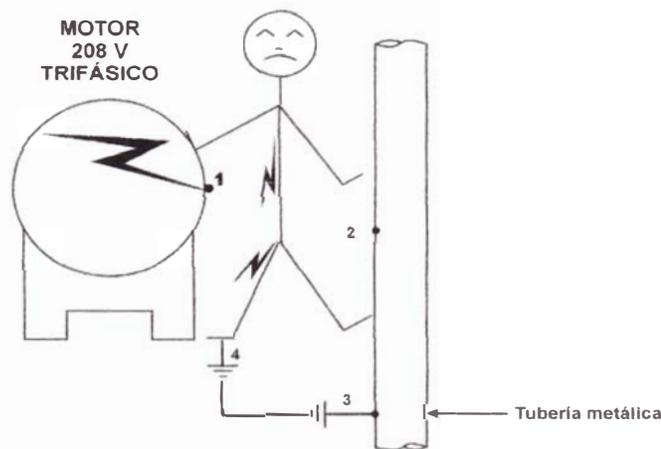


Fig. 4.14 Existe otro peligro de choque eléctrico (diferencia de potencial).

En la figura 4.15 se conectó un puente de unión. Esta instalación es parte de un sistema correctamente conectado a tierra, el cual elimina los peligros que existían anteriormente. Sin embargo, el puente de unión no se conecta individualmente al armazón del motor; este conductor de tierra se extiende en paralelo con los conductores de circuito.

Instalando este puente, la diferencia de potencial entre el armazón del motor y otras superficies conectadas a tierra, han sido eliminadas. Conectando el puente, se crea otra trayectoria, para que la corriente fluya y, muy posiblemente, permitirá que se activen los interruptores de circuito y, así, se eliminan los peligros de choque eléctrico, al tiempo que se protege el motor de un daño costoso.

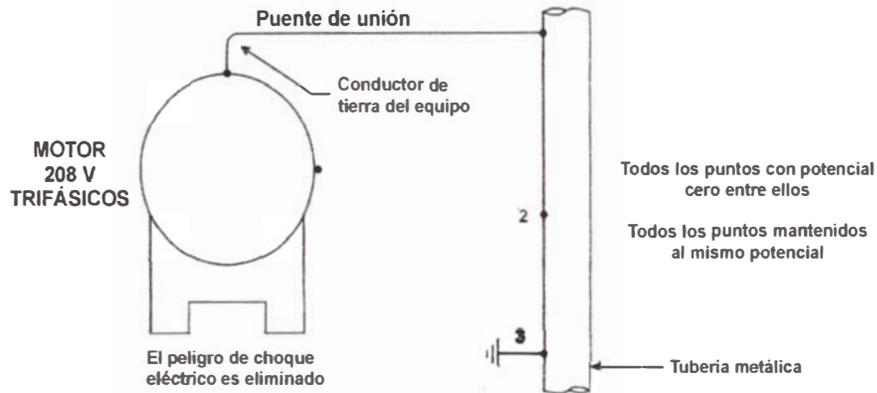


Fig. 4.15 El peligro se elimina instalando un puente de unión.

El choque eléctrico, además de trastornar el estado nervioso en general, afecta el centro nervioso que controla la respiración. Al rescatar víctimas, lo primero que se debe hacer es separarlas del suministro de electricidad utilizando un palo o cualquier otro material no conductor (aislante), para que el propio rescatador no resulte electrocutado; y después aplicar respiración artificial.

Para resumir: eliminada la diferencia de potencial no existirá una presión (voltaje), que empuje la corriente a través del cuerpo, y la baja impedancia de la trayectoria ofrecida, permite que la corriente circule en el conductor, y no a través del cuerpo humano.

4.2.5 DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS.

En la práctica, las cargas electrostáticas sólo son estáticas durante un tiempo muy breve. Las cargas suelen generarse en aislantes y, de ahí, se transfieren a otros aislantes o conductores, incluido el cuerpo humano. Cuando un conductor cargado se acerca a otro, puede saltar el arco y al producirse el contacto, hay una descarga de miles de volts, con tiempos de subida de nanosegundos y tiempos de decaimiento de cientos de nanosegundos. La potencia instantánea excede de lo

que pueden disipar los semiconductores.

El problema de descargas electrostáticas afecta no sólo a componentes individuales, sino también a los sub-sistemas o tarjetas de circuito impreso, y a sistemas completos. Las descargas electrostáticas (ESD), se producen cuando dos objetos de diferente potencial, se acercan o se tocan, produciéndose el salto del arco o chispa, para equilibrar estos potenciales.

Las cargas generadas por contacto y separación, en los movimientos ordinarios de un operario, o en los movimientos en una línea de montaje, o las cargas inducidas por un campo eléctrico, producen una elevación del potencial del cuerpo humano, o de un elemento en la línea, debido a su capacitancia respecto a tierra. Además, la acumulación de carga eléctrica, implica una acumulación de energía que se puede descargar a través de una parte sensible de un circuito electrónico, hacia la tierra o hacia otra parte del circuito.

Cuando los operarios, en una sala de computadoras o salas de trabajo donde se trabaja con tarjetas y circuitos integrados, caminan por el piso, pueden acumular cargas eléctricas de varios miles de volts, diferentes de los del equipo de cómputo. La solución al problema puede basarse en evitar la generación de cargas, o descargas de alto nivel, y en proteger los dispositivos. Si el operario entra en contacto con el equipo, antes de descargarse a tierra, la energía electrostática será balanceada a través del equipo, por medio del teclado u otro componente de control. Si la trayectoria de descarga es por medio de los componentes del circuito integrado (IC), el resultado puede variar entre la pérdida de datos o daño físico del circuito integrado.

La carga electrostática acumulada en el operador, debe igualar al voltaje de referencia del equipo, antes de permitir que el operador entre en contacto con éste. Una alfombra antiestática colocada a la entrada del centro de cómputo y conectado a la tierra del edificio, por medio del conductor de tierra, puede ecualizar la diferencia de potencial entre el operario y los equipos. La persona puede acumular cargas eléctricas cuando camine sobre el piso de la sala de cómputo, aún si éste tiene cubierta de vinilo. La conexión correcta de las estructuras metálicas y equipos,

mantiene el voltaje de la persona a una potencial de tierra igual al del equipo, mientras él se mueve dentro de la sala de trabajo.

En el caso de una sala de computadoras, la estructura de soporte metálico del piso, debe tener como referencia la misma unión neutral – tierra del equipo. Varios conductores de tierra se conectan a la estructura del piso levantado, y éstos son unidos en cierto punto debajo del piso. Este punto central de unión es conectado a la misma unión neutral – tierra del equipo. Una descarga electrostática contiene un gran nivel de ruido de alta frecuencia. Este ruido de alta frecuencia requiere una trayectoria de tierra, que proporcione baja impedancia a frecuencias mayores.

Estas altas frecuencias -a niveles menores de megahertz- son conducidas en la superficie exterior de cada hilo del cable. El cable de soldadura proporciona cientos de hilos, lo que produce más área de superficie que los típicos conductores de siete hilos y, por consiguiente, una impedancia mucho más baja a las altísimas frecuencias que ocurren con las descargas ESD. Por consiguiente, los conductores usados en la conexión a tierra del piso levantado deben de ser Cables de Soldadura. El Cable de Soldadura también debe ser extendido desde el punto común, hasta el punto de unión neutral – tierra, para la fuente derivada separadamente de la sala de cómputo.

4.2.5.1 SERIE TRIBOELECTRICA.

Para evaluar de forma simple la tendencia a la generación de cargas electrostáticas por contacto y separación (triboelectrificación), se emplea la llamada serie triboeléctrica; ver Tabla N° 4.1.

Al poner en contacto y luego separar dos materiales dentro de la serie triboeléctrica, la acumulación de carga en cada uno de ellos es tanto mayor, cuanto más distantes estén: las manos quedan más cargadas al frotar teflón que al frotar poliéster. Los materiales que se encuentran por encima del algodón, tienen la tendencia a ceder carga, por lo que quedan cargados positivamente, mientras que los que están por debajo, quedan cargados negativamente.

POSITIVO

- | | |
|-------------------|---------------------------------|
| 1. Aire | 16. Acero |
| 2. Manos | 17. Madera |
| 3. Asbesto | 18. Ambar |
| 4. Piel de conejo | 19. Lacre |
| 5. Vidrio | 20. Caucho duro |
| 6. Mica | 21. Milar |
| 7. Pelo humano | 22. Niquel, cobre |
| 8. Nylon | 23. Bronce, plata |
| 9. Lana | 24. Oro, platino |
| 10. Piel | 25. Azufre |
| 11. Plomo | 26. Acetato, rayón |
| 12. Seda | 27. Poliéster |
| 13. Aluminio | 28. Celuloide |
| 14. Papel | 29. Orlón |
| 15. Algodón | 30. Sarán |
| | 31. Poliuretano |
| | 32. Polietileno |
| | 33. Polipropileno |
| | 34. Cloruro de polivinilo (PVC) |
| | 35. Kel-F |
| | 36. Silicio |
| | 37. Teflón |

NEGATIVO

Tabla 4.1 Serie Triboléctrica

4.2.5.2 HUMEDAD RELATIVA PARA CONTROLAR DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS.

La Tabla 4.2 muestra los valores de los potenciales electrostáticos que se pueden alcanzar en algunas situaciones de trabajo.

La humedad relativa tiene una influencia importante. Cuanto más elevado es el valor de la humedad relativa, mejor es el comportamiento de los materiales frente a las descargas electrostáticas. A valores altos, se forma una superficie o película de agua sobre el material, proporcionando una superficie conductiva. Se mencionó

anteriormente, que la humedad no hace que el aire sea más conductivo; al contrario, la humedad neutraliza los iones en el aire, lo que lo hace aislante.

	Potenciales electrostáticos ev	
	Humedad relativa entre 65% y 90%	Humedad relativa entre 10% y 20%
Caminando sobre alfombra	1500 V	35,000 V
Caminando sobre suelo PVC	250 V	12,000 V
Al tocar equipos en una mesa de trabajo	100 V	6,000 V
Al abrir un sobre de PVC	1200 V	7,000 V
Al coger una bolsa de plástico común de una mesa de trabajo	1200 V	20,000 V
Al sentarse en una silla rellena de espuma de poliuretano	1500 V	18,000 V
Circuito integrado en tubo de plástico no antiestático	500 V	3,000 V

Tabla 4.2 Potenciales electrostáticos que se alcanzan en varias situaciones de trabajo donde hay electrificación por contacto directo.

Por esta razón, añadiendo humedad al aire, es uno de los métodos para combatir las cargas electrostáticas. Cuanto más humedad se añada, las cargas electrostáticas se disiparán con mayor facilidad. Pero, aún a los más altos niveles, los voltajes significativos electrostáticos, no pueden ser eliminados.

Los niveles altos de humedad pueden afectar el ambiente de trabajo; puede producirse corrosión de equipos y componentes, se pueden formar trayectorias de corrientes de fuga y, en los circuitos impresos, se puede producir crecimiento de hongos. Como valor práctico para el control de las descargas electrostáticas, se ha determinado un nivel entre 50% y 60%.

Especialmente en salas de computadoras, cuando se requiere el control de temperatura, el sistema de aire acondicionado produce secamiento del aire, lo cual aumenta las posibilidades de descargas electrostáticas. En tales casos, se utilizan ionizadores de aire, para producir aire de más alta conductividad.

Todo objeto tiene un potencial electrostático que puede ser medido con un

voltímetro electrostático. El voltaje generado puede oscilar entre 100 y 35,000 volts, como se muestra en la Tabla 4.2. Su amplitud depende de la velocidad de movimiento o separación, de los tipos de materiales, humedad, características de superficie, y la geometría de la superficie.

4.2.6 TORMENTAS ELECTRICAS.

En los lugares donde el nivel isoceraúnico (frecuencias de descarga anual de tormenta eléctrica en un determinado lugar) es alto, en el caso concreto del suelo peruano, no existe un mapa de nivel isoceraúnico; sin embargo, teniendo en cuenta los trabajos realizados aisladamente en las zonas con incidencia de tormentas, que corresponden a la sierra central, se tiene como valores preliminares: 40, 50 y 60. Ver figuras 4.16, 4.17 y 4.18 respectivamente

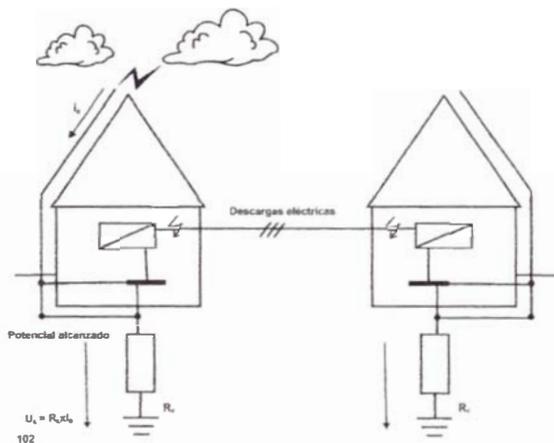
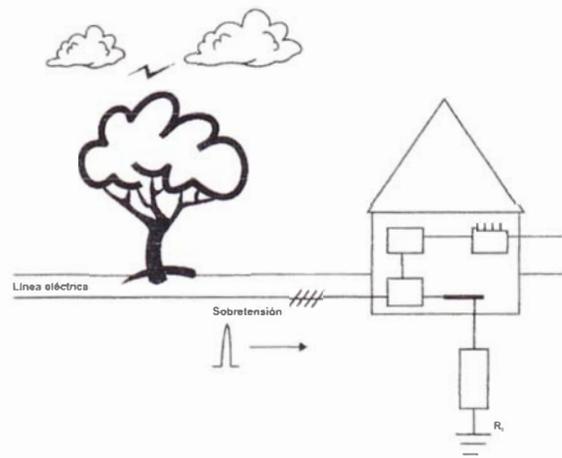


Fig. 4.16 Sobretensiones por descarga atmosférica directa.

Fig. 4.17 Sobretensión por descarga atmosférica alejada.



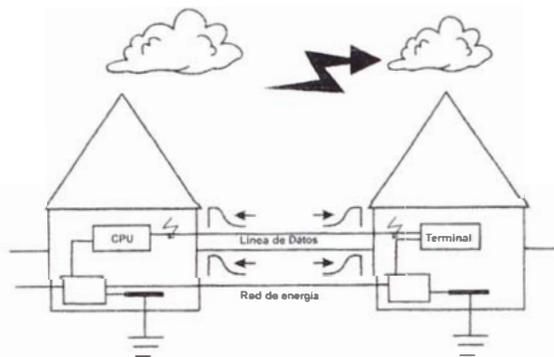


Fig.4.18 Sobretensiones por descargas atmosféricas entre nubes.

Tomando los lugares en consideración, las ciudades de la sierra central, que están ubicadas a 4,000 metros sobre el nivel del mar, teniendo en cuenta el peligro de tormentas, con descarga de rayo, resulta ser extremadamente alto, concordando esto con la propensión a las descargas. En vista de esto, muchos sistemas de comunicación y cómputo son seriamente afectados por las tormentas con rayo en numerosas ocasiones.

4.2.6.1 CAUSA DE LOS FUEGOS.

Son dos las causas principales de incendios cuando un relámpago (rayo, centella) cae en una unidad que contiene materiales inflamables:

Impacto directo sobre la instalación. Los materiales inflamables se sobrecalientan hasta llegar al punto de ignición, o quedan expuestos a la ruta del rayo.



Fig. 4.19 ¿ Porqué hay descargas ?

Efectos secundarios. Aquí se trata de cuatro fenómenos diferentes denominados: carga latente, pulsación electromagnética, pulsación electrostática y corrientes terrestres.

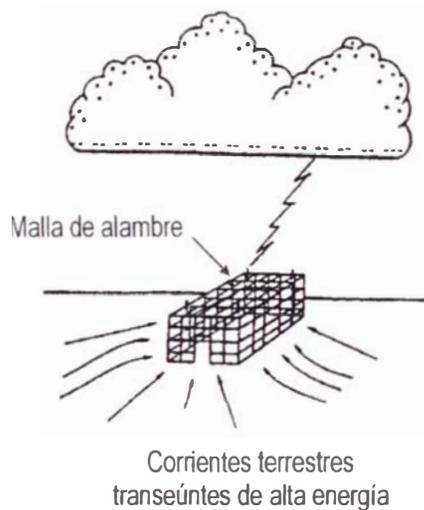


Fig. 4.20 La "Jaula de Faraday".

La causa más común de incendios en estructuras petroleras es la carga latente, y su resultante arco secundario (Fig. 4.19). Para entender este fenómeno, es necesario comprender cómo se forma la carga latente, y por qué el arco secundario ocasiona incendios. La "celda" de la tormenta reduce la carga eléctrica sobre cualquier objeto situado bajo ella. Dicha carga (de amperios-minuto) está relacionada con la carga eléctrica de la celda de la tormenta. El uso creciente de sistemas de instrumentación electrónica en industrias, con cortas líneas de transmisión para señales de corriente continua, y medias o largas, para pulsos de telemetría o transmisión de datos por líneas aéreas, han señalado la necesidad de protección de todo el sistema expuesto a descargas eléctricas.

La mayoría de los fabricantes, suministran instrumentos que pueden soportar, sin ningún circuito de protección, picos de tensión inducidos en sus líneas de entrada, salida o alimentación, de 3 ó 4 veces mayores que sus voltajes de operación normal, siendo por esta razón, que muchos instrumentos son utilizados sin ninguna protección. Sin embargo, cuando parte del equipo está radicado en áreas tormentosas, puede ser expuesto a descargas eléctricas directas o indirectas, y los consecuentes daños causados, pueden ser muy serios y costosos.

El más probable fallo de instrumentos durante una tormenta, se debe a picos de inducción indirectos, y no a la directa descarga del rayo, como se indica en las figuras 4.17 y 4.18

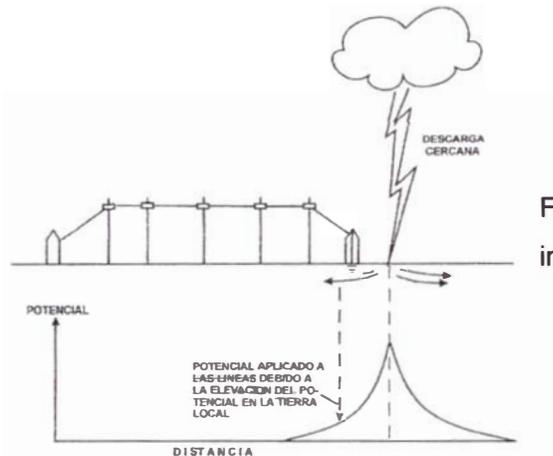


Fig. 4.21 Cómo descargas cercanas inducen potencial.

En esta figura se ilustra cómo un rayo puede inducir potencial en la línea. La corriente fluye radialmente hacia fuera, desde el punto de descarga, elevando localmente su potencial de tierra. La línea de transmisión, en virtud de su tierra local, también eleva su potencial, y se crea un voltaje de inducción en la línea. Aun cuando la línea no sea llevada directamente a tierra, su capacidad distribuida a masa, provee un paso efectivo. El voltaje puede también ser inducido capacitivamente, si la descarga pasa cerca de las líneas.

4.3 EL AMBIENTE ELÉCTRICO EN CENTROS DE COMPUTO

El ambiente eléctrico para computadoras incluye sus fuentes de potencia, sistema de tierra y las interfaces eléctricas con las líneas de comunicaciones, aire acondicionado y los sistemas de seguridad industrial. También incluye el sistema de alambrado y otros equipos ubicados en la sala de computadoras.

El ambiente eléctrico inmediatamente adyacente a la sala de computadoras, en la parte exterior debe ser también considerado, ya que las perturbaciones eléctricas se propagan a través de conductores, tubería, conductos metálicos y miembros estructurales del edificio o por medio de radiación como en el caso de ondas de radio.

Ningún equipo electrónico es inmune totalmente a las interferencias y perturbaciones. Sin embargo, la sensibilidad puede variar de un equipo a otro y de un tipo de perturbaciones a otra. Las interferencias o perturbaciones de alta energía puede causar fallas catastróficas o de algunos componentes. Las perturbaciones menores, pueda que no dañen los equipos, pero pueden corromper las señales de lógica y causar errores en los datos o control.

La utilización de computadoras o equipos con componentes electrónicos digitales se incrementa continuamente, ya sea en controles de tráfico aéreo, vehículos de despacho de emergencia. Administración de hospitales y control de comunicaciones. La seguridad pública puede ser afectada por las fallas de un sistema de computadoras.

Nosotros tenemos que notar que el ruido y los transitorios en el suministro de energía, pueden causar una multitud de problemas cuando se acoplan dentro de un circuito de señal sensitiva. Tenemos que discutir los pasos que se deben de tomar para minimizar estos problemas por un apropiado apantallamiento y/o aterramiento. Tenemos que descubrir que el debilitamiento de tales circuitos pueden ser bien el suministro de energía, donde los transitorios y los ruidos pueden ser acoplados y/o superpuestos en la señal.(ver figuras 4.22 y 4.23)

Los circuitos analógicos no son únicos en este respecto, instrumentos digitales, computadoras, equipo de procesamiento de datos y registradores son también vulnerables.

Las especificaciones del suministro comercial define los límites de variación de amplitud, de frecuencia y distorsión de armónicos de la tensión de suministro, pero no hacen mención oficial de las fluctuaciones, que duran desde 3 a 30 milisegundos que ocurren durante la distorsión de carga o compensación de fase. Alguna compañías, sin embargo, admiten que la variación de voltaje de 0% a 300%, durante 30 milisegundos a un minuto, son más probable que ocurra durante diversos instantes en un día, que en año. Su posición es indeseable, considerando que mucha de las fluctuaciones, transitorios e interrupciones no son causados por el equipo.

Por ejemplo, un refrigerador instalado en una zona residencial, detecta voltajes de 2500 voltios, que son generados por un horno eléctrico, y picos que exceden los 2500 voltios. Si tales condiciones son encontradas en zonas residenciales y comerciales, los transitorios y fluctuaciones en áreas industriales resulta ser espantoso, donde existen grúas eléctricas, soldadores de arco, montacargas, ascensores, motores eléctricos, lámparas de arco de mercurio y otro tipo de carga que requiere el uso de energía eléctrica para su normal funcionamiento son operados continuamente. Adicionado a esto máquinas de escribir, calculadoras, y otro tipo de máquina que están presentes en una oficina de un edificio, con sus transitorios producidos por la apertura de relés y/o interruptores.

Cuando observamos que parpadea la iluminación significa que el voltaje en la línea está fluctuando (flickers). Desafortunadamente, la mayoría de las fluctuaciones que aparecen en el suministro eléctrico duran tan solo unos pocos milisegundos o microsegundos, y nuestros ojos no pueden responder a los cambios de iluminación que ocurren a tales velocidades. Los circuitos electrónicos críticos, sin embargo, pueden dar respuesta a estas fluctuaciones de alta velocidad, causando errores de operación. En adición, los componentes de los circuitos van acumulando stress debidos a estos transitorios, pudiendo causar cambios intermitentes o averías de componentes cuando en la línea no existen transitorios.

Cuando nosotros, tomamos las precauciones del caso en el suministro de energía, normalmente asumimos que los errores de datos son producidos por causa del defecto del equipo. Asumir esto puede resultar en perdidas de horas/hombres en la solución del problema y análisis de la circuitería. Esto puede conllevar a la condenación del equipo, cuando el mal funcionamiento o falla son causados por los transitorios en la línea. Esto es vital luego de determinar si el suministro eléctrico está limpio. (llamada Calidad de la Energía Eléctrica)

Los sistemas de puestas a tierra conjugan una condición de contorno importante de satisfacer, (fig. 4.23) con el objetivo de minimizar las perturbaciones, las interferencias magnéticas, etc., producto de las expansiones o modificaciones en las oficinas, industrias, parques industriales, en los cuales no se han considerado o tomado en cuenta los aspectos antes señalados porque se desconoce su

importancia e impacto sobre las nuevas tecnologías y cómo ellas pueden afectar los dispositivos de bajo nivel con los que se han construido los nuevos equipos que integran instalaciones y sistemas en las plantas industriales modernas, edificios, oficinas, etc.; como se lo modela en la fig.4.22 Habitat y Factores, todos ellos se pueden ver degradados en su operación normal o sufrir fallas catastróficas.

Las figs. 4.22 y 4.23 nos muestran la interacción entre instalaciones, equipos y sistemas con un número de factores que pueden ocasionar trastornos en la operación de los sistemas, así como de su Medio Ambiente o Condiciones de Contorno. Cada uno de ellos tiene asociada una probabilidad de ocurrencia, en función del lugar específico que se trate. Además, se observa que el Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) es el punto común de confluencia de todas las variables.

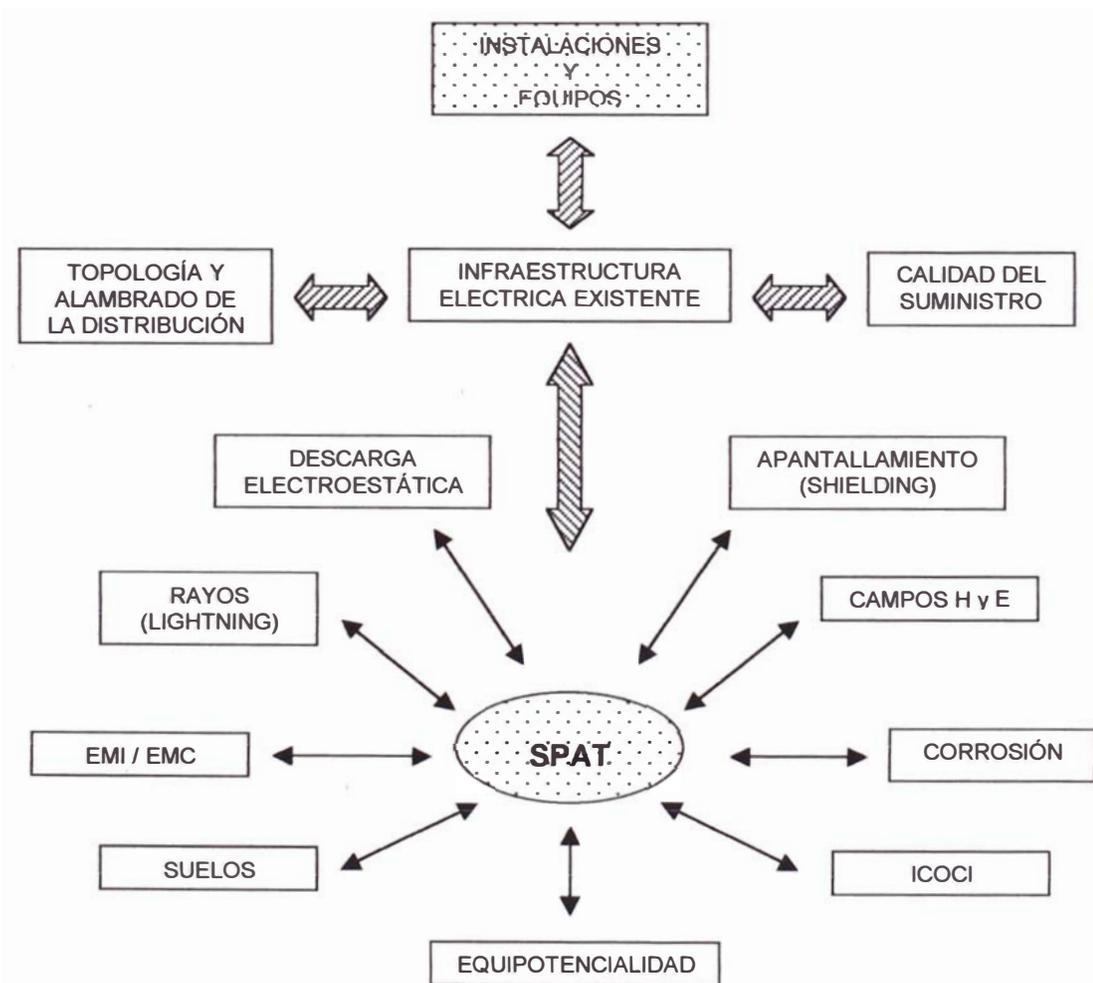


Fig. 4. 22 Habitat y Factores

Una de las variables importantes en el habitat eléctrico, es la red de alimentación o suministro de energía, la cual se ve afectada por múltiples perturbaciones o interferencias electromagnéticas originadas, ya sea durante la fase de transmisión, distribución, en muchos casos durante la fase de explotación, aplicación o uso, donde cierto tipo de cargas o maniobras de conexión / desconexión originan fenómenos de tipo transitorio o aleatorio que alteran la amplitud o forma de onda del voltaje y de la corriente.

Es la red de baja tensión, la fuente a partir de la cual se alimentan la mayor parte de las instalaciones para diferentes tipos de procesos, equipos electrónicos, informáticos y de telecomunicaciones; ocasionando un problema de compatibilidad entre los niveles de perturbaciones o interferencias electromagnéticas generados por unos y los niveles de inmunidad o susceptibilidad de otros.

CONDICIONES DE CONTORNO

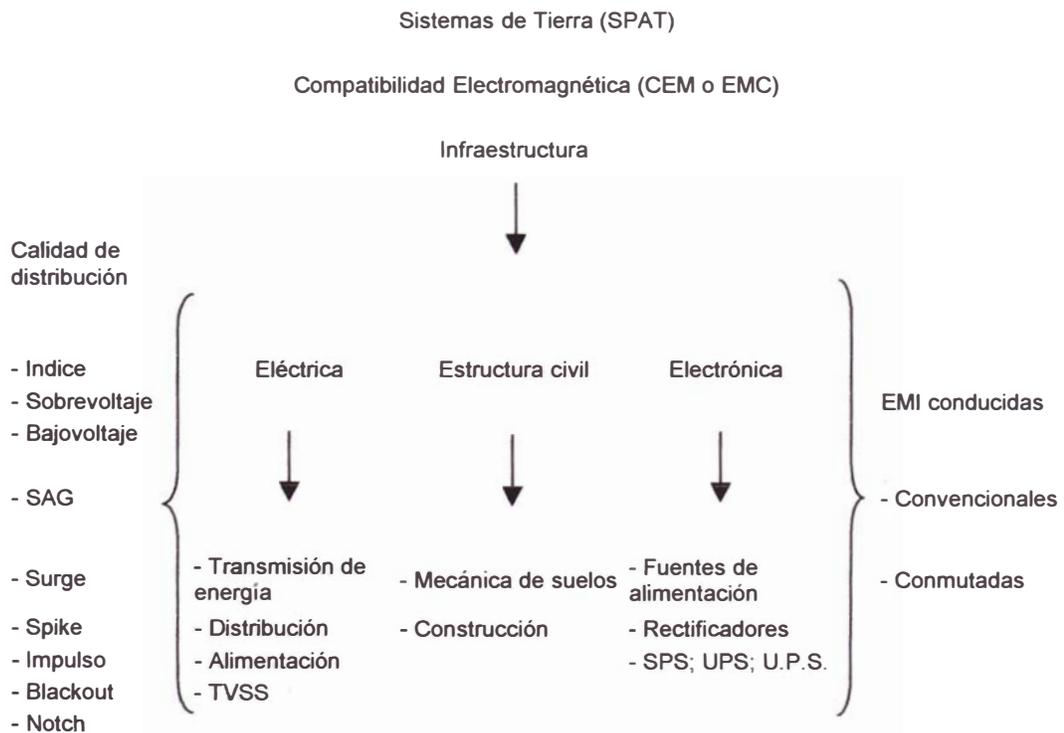


Fig.4. 23 Condiciones de Contorno del Habitat

La operación con falla de las unidades puede provocar situaciones no deseables, costosas y peligrosas, de ahí la importancia de analizar todos los factores que

intervienen en una red de Data. Los ordenadores actuales y sistemas basados en microprocesadores trabajan a mayores velocidades y aportan más características en un tamaño y peso reducido fruto del uso de complejos componentes de estado sólido, que son intrínsecamente susceptibles a sufrir daños y alteraciones por ruido eléctrico.

Esta tendencia actual hacia la incorporación de un mayor número de características, en un espacio más pequeño, ha contribuido en si misma a incrementar el problema del ruido. Ha conducido al desarrollo de circuitos digitales con muy altas frecuencias de conmutación, que pueden erigirse lo mismo en fuente de ruido eléctrico que en objeto susceptible del mismo.

La calidad de la energía eléctrica suministrada a los equipos electrónicos sensibles es por tanto, crítica para un funcionamiento fiable de los mismos.

Para todas las personas involucradas en el diseño, instalación, mantenimiento y operación de instalaciones que contienen estos equipos, es importante disponer de un conocimiento básico de estos asuntos, debiendo además conocer muy bien las opciones que les ofrece el mercado para solucionar los problemas causados por la “energía polucionada” o “contaminada” o de baja calidad.

4.4 RIESGOS EN EL SER HUMANO POR ACCION DE LOS PARÁMETROS ELECTRICOS.

Toda persona que se pone en contacto directo con la electricidad recibe un choque eléctrico cuyos efectos dependen de los parámetros básicos de la electricidad , vale decir de :

El valor de la intensidad de la corriente eléctrica

El valor de la Tensión o Voltaje

El valor de la Resistencia Ohmica que presenta el organismo

El tiempo de paso de la corriente eléctrica

La Trayectoria que sigue la corriente por el organismo

El valor de la Frecuencia en el caso de corrientes eléctricas

La capacidad de reacción del organismo.

Conviene recordar 2 hechos, antes de relacionar los factores que intervienen en un accidente eléctrico.

- a). Todo contacto fortuito supone un régimen transitorio, cuya duración e importancia depende de las características de la red y del valor de la fase de tensión en el momento de producirse el contacto, además de la resistencia óhmica del organismo
- b). El grado de peligrosidad de la corriente depende de su forma de onda, por lo que en corrientes periódicas tendrá una gran importancia el valor de la frecuencia.

El paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano se ha estudiado durante mucho tiempo, pero se tiene el impedimento que los experimentos son limitados a niveles que no ocasionan daños a las personas, por lo que son incompletos.

Se ha encontrado que la gravedad del daño ocasionado por el paso de la corriente depende no sólo del voltaje y corriente; sino de la región del cuerpo que atraviesa y del tiempo de exposición. Salvo condiciones muy especiales, el contacto con la electricidad se hace por la piel y, la resistencia de la superficie será la que limite el valor de la corriente; ya que en la parte interna la corriente fluye por la sangre y tejidos con mucha facilidad. Describiremos a continuación los parámetros más importantes que afectan al ser humano en caso de contactos directos o indirectos y, que son necesarios tenerlos en cuenta para tomar las medidas de protección pertinentes; evitando de esta manera situaciones que lamentar.

4.4.1 VALOR DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA.

Se suele llamar también "Umbral absoluto de la intensidad" y representa la máxima intensidad de corriente eléctrica que puede soportar una persona sin peligro, independientemente del tiempo que dure su exposición a la corriente y se da en mA (mili amperios). La corriente eléctrica necesita un camino fácil para fluir de un punto de mayor voltaje a otro de menor voltaje; este camino será más factible

cuando el conductor sea mas grueso y se encuentre cerrado entre los 2 puntos a diferente potencial eléctrico; ahora bien, si el conductor hace contacto en un punto inactivo intermedio, se producirá en él una fuga o defecto de corriente.

Cuando una persona toca un punto bajo tensión, la corriente busca una salida, un camino mas fácil de recorrer que al que se le obliga, que es el del receptor donde se presenta una resistencia, una dificultad conductora para que realice un trabajo; recorrerá el cuerpo humano, saliendo por una mano, un pie u otro punto de contacto con el suelo o parte metálica.

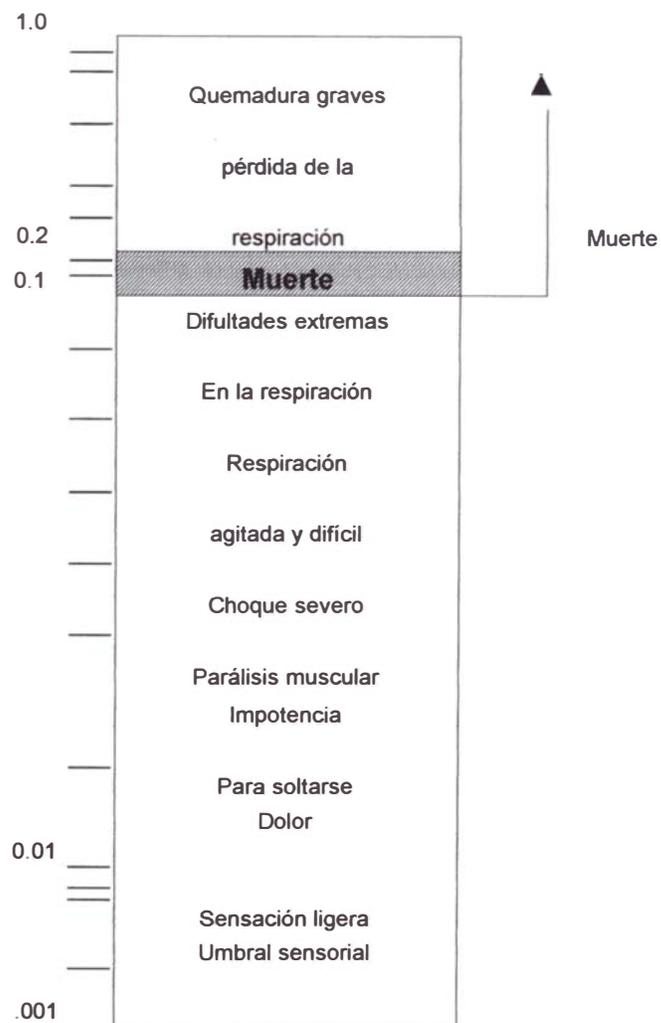


Fig. 4.24 Efectos fisiológicos de las corrientes eléctricas.

En el caso de corriente alterna a 50 Hz. de frecuencia, hay que considerar si se trata de valores medios, eficaces o máximos de la intensidad, ya que por desarrollarse en un régimen transitorio la forma de onda es irregular dependiendo del valor de la fase de la tensión en el momento de producirse el contacto.

También conviene establecer el criterio sobre el máximo efecto de la corriente que no resulte peligrosa para la persona, si consideramos que las corrientes eléctricas pueden producir en los seres vivos la muerte, lesiones orgánicas graves e irreversibles o, incluso, que queden pegados al contacto con ellos, debido a la tetanización de sus músculos, sin poderse desprender por sus propios medios.

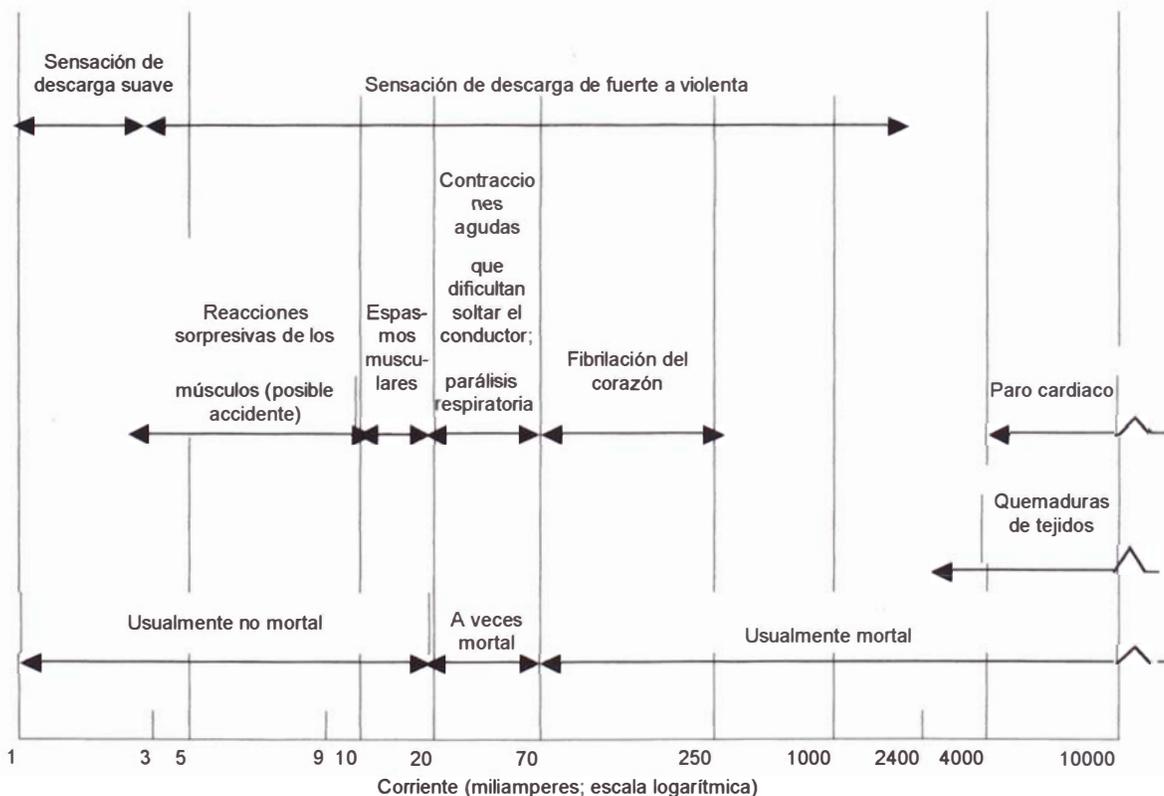


Fig. 4.25 Efecto de la corriente eléctrica alterna en el cuerpo humano.

La tetanización de los músculos supone un agarrotamiento de los miembros, manos y pies que se paralizan impidiendo su desprendimiento del contacto eléctrico. Esto supone un grave peligro por el factor tiempo ya que al coger el

conductor con la mano, el individuo puede quedar expuesto al paso de la corriente durante largo tiempo si no puede soltarse por si mismo del conductor. Así sufre dolores y quemaduras de diferentes grados.

Por todo esto, el criterio más aconsejable es considerar como valor umbral absoluto de intensidad el mayor valor que permita a la persona desprenderse del contacto por sus propios medios. Este valor se fija para la corriente eléctrica a 50 Hz. entre 10 y 15 mA según el sexo y la edad de las personas.

La figura 4.25 y Tabla 4.3 resume los efectos de la intensidad de la corriente eléctrica, tanto para corriente continua como alterna y, para hombre o mujer realizados por Charles F. Dalziel. El tramo de 20 a 70 miliamperios es mortal.

El camino más peligroso es el paso de la corriente eléctrica en las personas es de una mano a otra, de la mano izquierda al pie derecho, de la mano izquierda a la cabeza, de la mano derecha al pie izquierdo; en suma el camino que más se acerca al corazón; tal como se puede observar en la Fig. 4.27.

	Corriente continua		Corriente alterna			
			60 Hz		10000 Hz	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Ligera sensación en la mano	1	0.6	0.4	0.3	7	5
Umbral de percepción	5.2	3.5	1.1	0.7	12	8
Choque indoloro	9	6	1.8	1.2	17	11
Choque doloroso sin pérdida del control muscular	62	41	9	6	55	37
Choque doloroso: Let go current	76	51	16	10.5	75	50
Choque doloroso y grave. Dificultades de respiración	90	60	23	15	94	63
Principio de la fibrilación ventricular	200	70	50	35		
Choque de 3 segundos	500	500	100	100		

Tabla 4.3. Efectos de la intensidad de corriente eléctrica.

La duración del paso de la corriente también es importante, autoridades en la materia coinciden en que corrientes altas pero de corta duración no ocasionan

fibrilación.

La Universidad de Columbia, realizó pruebas que condujeron a la ecuación siguiente :

$$I_K \cdot t = 0.027$$

Donde :

I_K = Es el valor RMS de la corriente eléctrica que atraviesa el cuerpo, en amperios

t = tiempo de paso de la corriente.

Para un determinado valor de I_k , el tiempo “ t ” que resuelve esta ecuación indica que no se producirá fibrilación.

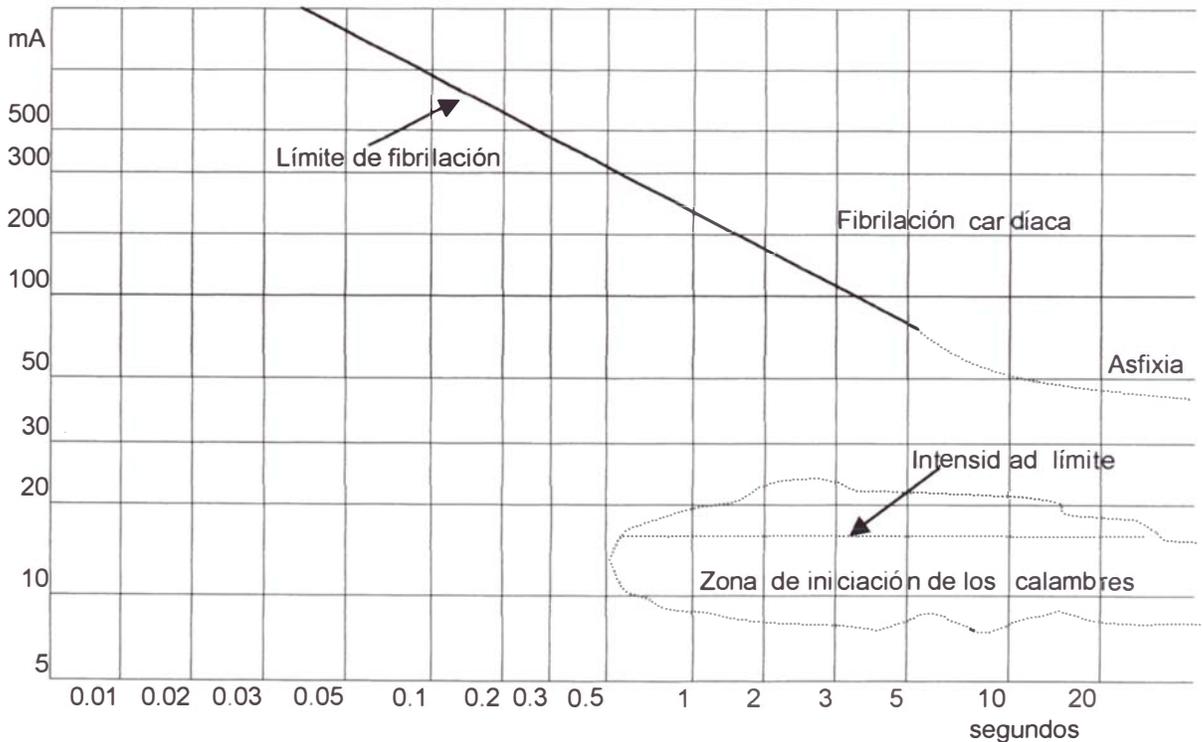


Fig. 4.26 Efectos de la corriente en el Cuerpo Humano

Desde luego, esta fórmula obtenida experimentalmente tiene límites y, no vale para valores altos de corriente y tiempo; se ha sugerido que el umbral es de 100 mA, debiendo tenerse en cuenta que con este valor podría producirse parálisis en la respiración. Las Normas Alemanas explican “que las corrientes eléctricas de bajas intensidades que pasan a través del cuerpo, producen calambres

musculares; pero si pasan por el corazón pueden producir fibrilación que degenera en parálisis”, en caso de intensidades elevadas se producen variaciones electrolíticas en los músculos y como consecuencia envenenamiento. En arcos voltaicos se producen quemaduras.

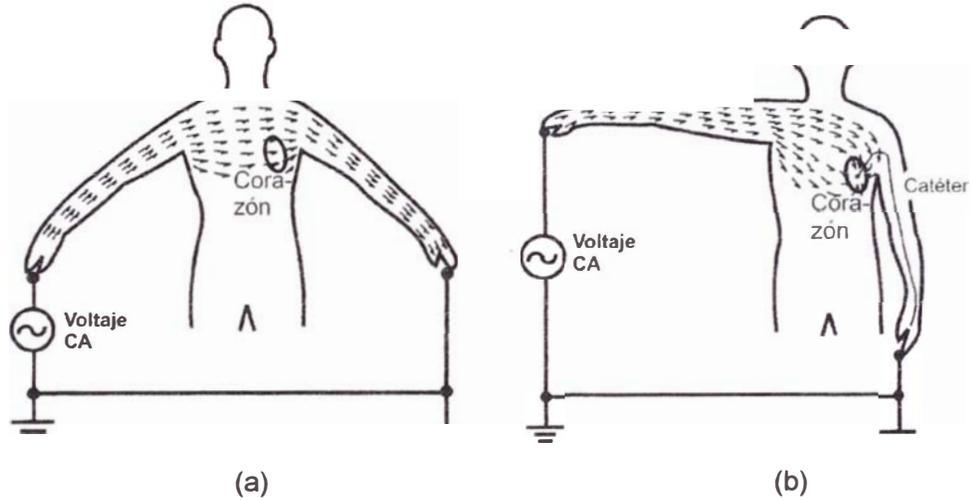


Fig. 4.27 a) Distribución de la corriente en macrochoque. b) Distribución de la corriente en microchoque.

4.4.2 EL VALOR DE LA TENSIÓN O VOLTAJE.

Ensayos llevados a cabo con personas con manos secas experimentaron las siguientes sensaciones:

VOLTAJES	EFFECTOS
A 40 Voltios	Un ligero cosquilleo en los dedos
A 50 Voltios	Cosquilleo en todas la palma de la mano
A 60 Voltios	Ligero dolor hasta el codo
A 80 Voltios	Contracción en las manos

En la repetición de la prueba, pero con las manos húmedas, se pudo comprobar que a 40 voltios ya no era posible abrir las manos. Si la piel está dañada en el lugar de contacto, la corriente y sus efectos aumentan notablemente. Entonces es recomendable secarse bien las manos antes de accionar algún componente eléctrico doméstico o herramienta manual ya que de acuerdo a la Norma IEC 364-4

-41 y DIN-VDE 0100 , se considera peligrosa toda Tensión superior a:

- 50 V RMS AC (en lugares secos)
- 25 V RMS AC (en lugares húmedos)
- 120 V DC (Corriente Directa O Continua)

Independientemente de los límites de las Tensiones peligrosas de Contacto, siempre se requiere una protección contra contactos indirectos , es decir para tensiones a partir de 0V empleando las herramientas y accesorios con los niveles adecuados de aislamiento

4.4.3 INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA OHMICA EN EL ORGANISMO.

Diversos estudios experimentales demuestran que la impedancia del cuerpo humano es siempre resistiva pura, considerándola como un dipolo; la intensidad de la corriente eléctrica disminuye al paso por el cuerpo humano, en razón directa del aumento de la resistencia que éste presenta; es decir, son factores inversamente proporcionales.

Esta resistencia es muy variable y depende de múltiples valores factoriales, no siempre fáciles de determinar. Por ello, para disminuir el valor de la intensidad al atravesar el cuerpo humano, debe aumentarse cuanto se pueda la resistencia; ahora bien, esto no siempre se puede conseguir y por eso debemos acudir a sistemas de protección: el personal y la instalación de dispositivos de seguridad.

El personal estriba en adoptar las medidas que en cada caso particular sean requeridas para evitar el riesgo y el peligro; aplicando las normas oficiales de seguridad y el Reglamento de cada puesto de trabajo. Las resistencias que ofrecen las manos como punto más débil y al alcance de producirse un accidente y, limitador del valor de la corriente, son tan variables de una a otra persona y tan dependiente del trabajo que efectúa y de los múltiples factores que lo condicionan, que se hace preciso hablar de condiciones agrupadas por su afinidad material, emocional, psicológica, ambiental, hidropésica, etc.; un ejemplo

lo tenemos en un oficinista que puede recibir una descarga mortal, mientras que en las mismas condiciones un obrero o un mecánico solo recibiría una tetanización o una sacudida más o menos desagradable; esto debido a que sus manos son menos conductoras por la rugosidad, callosidad y piel más basta o áspera presentando más resistencia al paso de la corriente .

Por lo tanto los grupos condicionantes son:

- Constitución de la persona: peso, cantidad de agua, grasas, obesidad, piel fina o áspera, manos rugosas o callosas, estado emocional u psicológico, humedad en las extremidades, etc.
- Camino recorrido por la corriente, entrada y salida de la corriente, diferencia de potencial en el punto de contacto.
- Prevención personal, empleo de los utensilios de protección necesarios y de las herramientas de trabajo aislantes y apropiadas a cada caso.

Considerando que el cuerpo humano, en condiciones normales de aislamiento, presenta unos 3000 ohmios de resistencia y, en vista de tantos factores particulares y generales que pueden influir en un contacto eléctrico, los investigadores dividen el valor de la resistencia en tres gamas:

Primera	.- En lugares húmedos y poco aislantes	de 500 a 1000 ohmios
Segunda	.- En lugares normales	de 1000 a 2000 ohmios
Tercera	.- En lugares secos o aislados	de 2000 a 3000 ohmios

Se ha comprobado igualmente que para corrientes alternas cuyas frecuencias sean superiores a 10 Khz. no provocan más efectos que el de calentar los tejidos por donde pasa la corriente. A 50 Hz. la resistencia óhmica del cuerpo humano no cumple con la ley de ohm, ya que su valor depende de la tensión que soporte, tratándose por tanto de un dipolo no lineal cuya resistencia es función decreciente de la tensión aplicada .

Respecto a Baja Tensión, se puede considerar el comportamiento de los dipolos del cuerpo humano aproximadamente lineal. El valor de la resistencia de

cada uno de ellos depende de diversas circunstancias, siendo la más importante, la humedad de la piel, que llega a valores de 100 000 ohmios cuando está seca o desciende considerablemente en estado de humedad hasta en casi el 50 % de su valor en condiciones normales.

En los gráficos y Tablas siguientes se representan variaciones de la resistencia del cuerpo humano en función de la tensión, así también se anexan varias tablas de resistividades en función al recorrido de la corriente por el cuerpo y área de contacto de la piel.

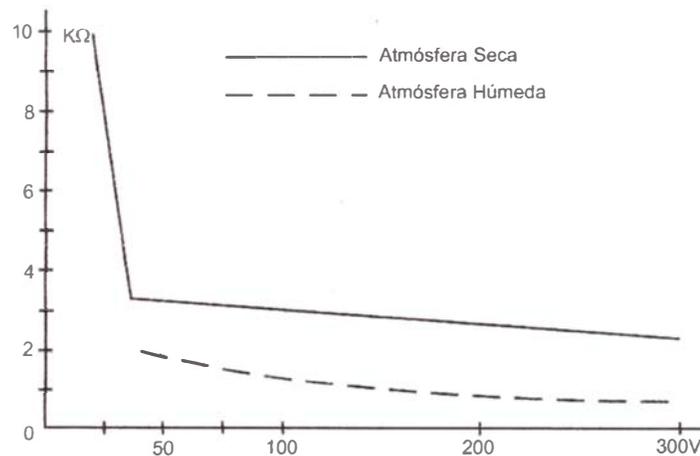


Fig. 4.28 Resistencia del organismo en función de la tensión a que está sometido.

Corriente	Voltaje de la corriente, suponiendo una resistencia corporal de		Efectos fisiológicos
	10 000 Ohm	1 000 Ohm	
1 mA	10	1	Umbral de la sensación
5 mA	50	5	Máxima corriente inofensiva
10-20 mA	100-200	10-20	Desagradable, hasta que aparecen contracciones musculares sin control. "No se puede soltar"
50 mA	500	50	Dolor considerable, pero generalmente no hay disfunciones cardiacas o respiratorias.
100-300 mA	1000-3000	100-300	Función respiratoria normal, pero se inicia la fibrilación ventricular
5 A	50 000	5 000	Se usa para la desfibrilación ventricular; paro de la función respiratoria

Tabla 4.4 Efectos fisiológicos de la corriente de 60 Hz.

De la Tabla 4.4 se puede constatar que en el intervalo de 10 a 20 mA se dan situaciones de agarrotamiento muscular siendo peligrosa ya esta intensidad de corriente por que impediría soltarse libremente en caso de hacer contacto con equipos de riesgo o cables pelados. Nótese que para resistencias de 1000 Ohm, con tan solo 20 Voltios se está en situación de alto riesgo.

Condición de la piel y tipo de contacto	Resistencia típica	
Toque ligero, dedo	Seco	50 k Ohm - 1 M Ohm
	Húmedo	5 k Ohm - 20 k Ohm
Asir el conductor con la mano	Seca	10 k Ohm - 50 k Ohm
	Húmeda	2 k Ohm - 6 k Ohm
Asir taladro eléctrico no aislado	Seco	0.5 k Ohm - 3 k Ohm
	Húmedo	0.2 k Ohm - 1 k Ohm
Mano sumergida en agua de la llave	200 Ohm - 500 Ohm	

Tabla 4.5 Resistencia corporal típica para varias condiciones de contacto en la piel.

De la tabla 4.5 se resalta la condición de la piel seca vs. la húmeda, que existen proporciones saltantes de 5 a 1 y hasta de 10 a 1 de resistencia al paso de la corriente.

Resistencia de la piel	Area de contacto y condición
200 k Ohm	Yema callosa y seca de un dedo
15 k Ohm	Yema callosa y seca de un dedo tocando un conductor húmedo
8 k Ohm	Dedos de una mano seca
5 k Ohm	Pies húmedos
1.6 k Ohm	Mano seca fuertemente empuñada
1 k Ohm	Mano Húmeda o electrodo EKG

Tabla 4.6 Valores de resistencia aproximados como una función de la condición y área de contacto de la piel.

De la tabla 4.6 destaca que la callosidad y sequedad de la mano (caso de operarios manuales, gente de edad mayor) es 125 veces mas resistente que una mano tersa no callosa de un oficinista por ejemplo.

Resistencia del Cuerpo	Recorrido
650 Ohm	Pecho - Mano (D)
750 Ohm	Pecho - Mano (I)
1000 Ohm	Mano (I) Pie (S)
1250 Ohm	Mano (D) Pie (D)
1400 Ohm	Espalda - Mano (D)
+ 1400 Ohm	Otros Puntos

Tabla 4.7 Resistencia del Cuerpo Humano en Función del Recorrido de la Cte.

Observamos que en la tabla 4.7 el recorrido de la corriente nos plantea que la zona del pecho y cercana al corazón tiene menos de la mitad de resistencia corporal que si la corriente entrara por los miembros inferiores, siendo mas riesgoso ese tipo de recorrido.

4.4.4 TIEMPO DE PASO DE LA CORRIENTE .

Se denomina “umbral absoluto de tiempo” y representa el mayor tiempo que una persona puede soportar sin peligro, el paso de la corriente eléctrica en baja tensión, cualquiera sea su intensidad; por su cuerpo. De investigaciones y estudios realizados se confirma que la fibrilación ventricular, de entre todos los efectos graves que origina la corriente eléctrica en el cuerpo humano, es el que necesita menos tiempo para producirse; sin embargo, no se produce si el tiempo de paso es del orden de 0,025 segundos o inferior .



Figura 4.29 Curva de Seguridad Personal

Casualmente, la duración del período de la corriente eléctrica de 50 Hz. es de 0,02 segundos (20 milisegundos mS), por lo que se considerará como umbral absoluto de tiempo; este valor. La figura 4.29 representa la correspondencia entre el valor eficaz de la corriente a 50 Hz en miliamperios y el umbral de tiempo en segundos.

Asimismo es importante citar otros experimentos efectuados en animales con peso similar al de personas en los que se deduce que el inicio de la fibrilación se presenta con corrientes de 100 mA .

Los efectos fisiológicos de la presencia de fibrilación durante cierto tiempo puede producir la muerte de la persona dentro de un lapso corto de tiempo (de 2 á 3 minutos). Esta clase de efecto de la corriente está catalogada como “realmente peligrosa para la vida” de las personas. Se presenta a continuación la Tabla 4.8 para detallar una relación de la intensidad de “corriente de fibrilación” versus el tiempo de aplicación de la corriente.

<u>Tiempo en Segundos</u>	<u>Intensidad de Cte. Peligrosa en mA</u>
3.0	100
2.0	130
1.0	180
0.6	220
0.3	250
0.2	400

Tabla 4.8 Intensidad de Ctes. Peligrosas en función del tiempo

Con tales valores de intensidad, sólo en 0.5 % de los objetos de ensayo se presentó la fibrilación ventricular.

De los resultados de aquellos experimentos se puede inferir que cuando los tiempos de aplicación de la corriente son cortos , el cuerpo humano puede soportar mayores intensidades de corriente sin correr peligro de muerte . Desde luego este asunto aún no está totalmente dilucidado, por lo que se debe tomar con las reservas y precauciones que ello amerita.

4.4.5 FACTORES FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA.

Los fenómenos fisiológicos que produce el paso de la corriente eléctrica en el organismo humano son debido al valor de la intensidad de corriente y no a la tensión, pudiendo provocar accidentes graves, incluso la muerte.

De las Tablas del punto 4.4 y de los gráficos dados en los subcapítulos anteriores, se resumen los efectos fisiológicos de la corriente alterna de 60 Hz en el individuo promedio. Obsérvese que el parámetro crítico es la cantidad de corriente que fluye a través del torso, no el voltaje entre los dos puntos de contacto. La mayor parte de la resistencia entre, digamos; la mano izquierda y la derecha se debe a la capa de piel, siempre que este relativamente seca y la corriente que entra se distribuye por todo el cuerpo en proporción a las conductividades de los huesos, líquidos y tejidos.

EFFECTOS FISIOLÓGICOS INDIRECTOS DE LA ELECTRICIDAD

Corriente alterna - Baja frecuencia

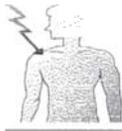
EFEECTO	MOTIVO	
Trastornos cardiovasculares	El choque eléctrico afecta al ritmo cardiaco: infarto-taquicardia, etc.	
Quemaduras internas	La energía disipada produce quemaduras internas: coagulación, carbonización.	
Quemaduras externas	Producidas por el arco eléctrico a 4000 °C.	
Otros trastornos	Consecuencias del paso de la corriente.	Auditivo, Ocular; Nervioso, Renal

Fig. 4.30 Efectos Fisiológicos Indirectos de la electricidad a Baja Frecuencia

Los fluidos corporales internos tienen iones en solución dada la cantidad de líquidos y sales que acumula el cuerpo humano; los cuales son conductores

moderadamente adecuados de la electricidad ("Conducción Iónica del Cuerpo Humano"). Esta es la causa de que sucedan tantos accidentes mortales en el cuarto de baño , el utilizar un secador de pelo con fallas de aislamiento o el salir de una regadera; pueden ser los últimos actos conscientes de un individuo por agarrar con manos húmedas equipos, herramientas accionados por la corriente eléctrica.

Una corriente eléctrica que pasa a través del cuerpo puede ser así de dañina por que las diversas partes de nuestro cuerpo se comunican mediante la transmisión de pulsos eléctricos; por lo tanto es muy vulnerable a cualquier corriente eléctrica pulsante.

EFFECTOS FISIOLÓGICOS DIRECTOS DE LA ELECTRICIDAD

$$I = \frac{V}{R}$$

Corriente alterna - Baja frecuencia

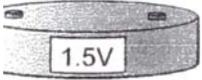
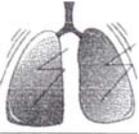
I	EFEECTO	MOTIVO	
1 a 3 mA	Percepción	El paso de la corriente produce picosquileo. No existe peligro.	
3 a 10 mA	Electrización	El paso de la corriente produce movimientos reflejos.	
10 mA	Parálisis	El paso de la corriente produce tracciones musculares, rotamientos, etc.	
25 mA	Paro respiratorio	Si la corriente atraviesa el cerebro.	
25 a 30 mA	Asfixia	Si la corriente atraviesa el tórax.	
60 a 75 mA	Fibrilación ventricular	Si la corriente atraviesa el corazón.	

Fig. 4.31 Efectos Fisiológicos Directos de la electricidad a Baja Frecuencia

Las corrientes que fluyen a través de los tejidos como resultado del contacto con una fuente externa interfieren con los impulsos nerviosos y musculares normales causando espasmos musculares .Las corrientes ligeramente más altas afectan las contracciones rítmicas del corazón ; es irónico que 60 hz es una de las frecuencias mas peligrosas a las que se pueda exponer el corazón provocando que lata débil e irregularmente a una velocidad más rápida para ser eficaz.

Las contracciones espasmódicas, rápidas y fuera de control del corazón o sea la fibrilación, pueden causar la muerte en corto tiempo. La respiración suspendida por un choque eléctrico se debe a un acalambamiento de los músculos responsables, como el diafragma y los intercostales que controlan la expansión de la caja torácica.

En la actualidad el método más efectivo para restablecer la función cardiaca normal es sujetando el corazón a un fuerte choque eléctrico , forzando una contracción general breve del músculo , después del cual a menudo el corazón reasume su ritmo normal y coordinado, bombeando sangre a través del cuerpo humano .

Respecto al concepto de baja o alta tensión, se debe tener en cuenta que la corriente eléctrica de baja tensión provoca la muerte por fibrilación ventricular, al contrario de la alta tensión, que lo hace por destrucción de los órganos, o por asfixia, debido al bloqueo del sistema nervioso. Los efectos fisiológicos creados en el cuerpo humano al paso de la corriente eléctrica varían en función del valor de la intensidad, de acuerdo con la Tabla 4.9

INTENSIDAD	EFFECTOS FISIOLÓGICOS
de 1 a 3 mA	Prácticamente imperceptibles, no hay riesgo.
de 5 a 10 mA	Contracciones involuntarias de músculos y pequeñas alteraciones del sistema respiratorio.
de 10 a 15 mA	Principio de Tetanización muscular, contracciones violentas e incluso permanentes de las extremidades.
de 15 a 30 mA	Contracciones violentas e incluso permanentes de la caja torácica. Alteración del ritmo cardíaco.

Tabla 4.9 Efectos Fisiológicos de la Corriente en Baja Tensión.

Todos estos valores y efectos se ven aumentados o disminuidos , dependiendo del tiempo que dure el paso de la corriente eléctrica. Los valores máximos de intensidad y corriente son:

- Para tiempos inferiores a 150 milisegundos no hay riesgo, siempre que la intensidad no supere los 300 mA.
- Para tiempos superiores a 150 milisegundos no hay riesgo, siempre que la intensidad no supere los 30 mA.

La “Fibrilación Ventricular del Corazón” la define el doctor Malboysson en su trabajo “Reanimación del electrocutado”, presentado en las V Jornadas de Medicina y Seguridad de las Empresas eléctricas como: “Una acción independiente de las fibras musculares cardíacas que produce una contracción incordinada y que entraña la supresión inmediata de la actividad fisiológica del corazón al no poder circular la sangre oxigenada y en particular, la imposibilidad de hacerla llegar al cerebro, produciendo lesiones cerebrolbulbares graves “ .

En los accidentes eléctricos de corta duración, inferiores a los del ciclo cardíaco, la fibrilación puede darse si el contacto se produce durante una cierta fase “ T ” (crítica), que comprende el 20 por ciento aproximadamente de la duración total del ciclo. En la figura 4.32 se representa un electrocardiograma en el que la zona sombreada corresponde a la fase crítica T. En el hombre, la duración media del ciclo cardíaco suele ser de 0,75 segundos; por lo que la fase crítica durará 0,15 segundos .

En los contactos eléctricos, cuya duración sea inferior a la de la fase crítica T, los valores de la corriente eléctrica se corresponden con los contactos que se provocan en esta fase, ya que fuera de ella no existe peligro de que se produzca la fibrilación ventricular. Esto nos indica la rapidez con que se debe interrumpir el paso de la corriente por el organismo. Existen otros fenómenos fisiológicos de la fibrilación ventricular y la tetanización de los músculos respiratorios, que pueden conducir a la muerte real, producidos por la intensidad de corriente eléctrica o por el trayecto seguido por esta, como: lesiones encefálicas, bloqueo de la Epiglotis, laringoespasma, espasmo coronario y shock global.

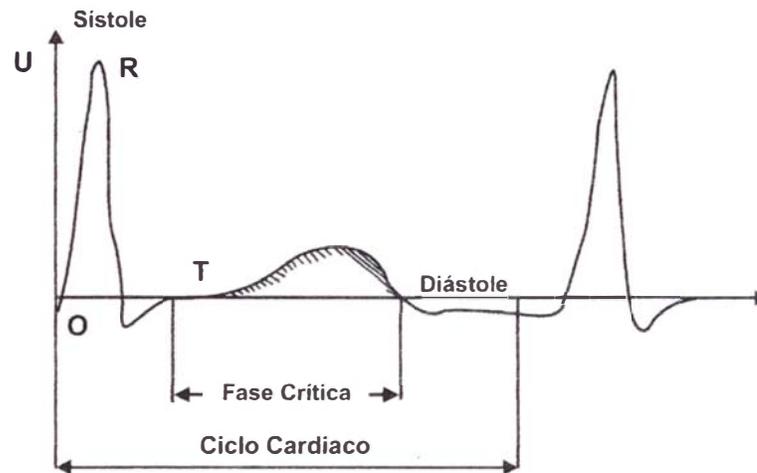


Fig. 4.32 Ciclo Cardíaco

Otra manifestación que puede provocar una descarga eléctrica en el cuerpo son las quemaduras, manifestadas en dos formas distintas (Ver Fig.4.33 Estructura de las accidentes eléctricos)

- En accidentes mediatos, la energía debida a un cortocircuito provoca una radiación originada por el arco eléctrico que da lugar a lesiones por quemaduras.
- En los accidentes inmediatos, los diferentes acoplamientos eléctricos provocan quemaduras internas y externas en el cuerpo.

Los efectos que ocasiona en el ser humano una corriente de rayo por ejemplo (Sobre intensidad del orden de los 10 a 20 K Amperios aproximadamente) se pueden resumir de la siguiente manera:

- Entumecimiento , en general reversibles , en particular de brazo (s) y pierna (s)
- Daños cerebrales , así como del sistema nervioso central
- Elevación de la presión sanguínea , a menudo durante meses
- Marcas de corriente en los lugares de entrada y de salida de la cte. de rayo
- Pérdida de conocimiento y trastornos mentales pasajeros
- Síncope y paro del corazón
- Fracturas, en particular del cráneo , columna vertebral y de extremidades, como consecuencia de caídas.

4.5 PREVENCIÓN DE ACCIDENTES ELÉCTRICOS.

La creciente utilización de la energía eléctrica en todas las aplicaciones de la vida actual aconseja crear la información precisa y dirigida al usuario de la electricidad para que se familiarice con los medios de protección y contra los riesgos propios de este tipo de energía.

Debe considerarse el hecho de que contribuyen a la provocación de los accidentes mortales en todo tipo de instalación; las descargas eléctricas debidas al contacto de personas con partes metálicas accidentalmente en tensión o con partes eléctricas bajo tensión.

Estudios realizados sobre accidentes por descargas eléctricas demuestran que, en la mayoría de los casos, los medios de seguridad previstos no fueron suficientes para garantizar la seguridad de las personas, o bien no estuvieron correctamente aplicados e incluso, que con el paso del tiempo su capacidad protectora había disminuido.

Para poder prevenir los accidentes debidos a la corriente eléctrica es necesario adoptar medidas de protección adecuadas a los posibles riesgos que puedan presentarse. Estas medidas implican la elección acertada de los elementos preventivos que hagan a las instalaciones eléctricas (de acuerdo con su tensión, tipo de instalación y emplazamiento) fiables y seguras, tanto para las personas como para los equipos e instalaciones.

En este punto, se plantean Reglas Generales de seguridad para trabajos eléctricos, así como el análisis de los daños de origen eléctrico, análisis de fallas, prevención.

4.5.1 ANALISIS DE LOS DAÑOS DE ORIGEN ELECTRICO.

En todo accidente eléctrico interviene una cantidad de energía eléctrica que se transforma. Esta transformación puede producirse, o bien directamente sobre la persona causándole lesiones orgánicas de origen eléctrico o desencadenando un proceso energético que de lugar a un accidente de otra naturaleza, siendo en este caso la corriente eléctrica la causa indirecta. A este tipo de accidentes se denomina accidentes mediatos.

El proceso mediante el cual una persona recibe energía eléctrica es un accidente directo o mediato, puede ser con una simple exposición a las radiaciones electromagnéticas, siendo mucho más frecuentes y graves los casos en que la víctima quede acoplada eléctricamente a la red.

En líneas generales, los tres tipos de acoplamiento posibles son: conductivo, capacitivo e inductivo, resultando el acoplamiento inductivo el más significativo para corrientes de alta frecuencia.

Igualmente, estos tres acoplamientos junto con las radiaciones, pueden considerarse como causas posibles de accidentes inmediatos por lo que es necesario conocer la naturaleza de los fenómenos que pueden desencadenarse a partir de ellos. Por otro lado, el estudio de los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano, tienen dos aspectos distintos pero en estrecha relación: el físico y el fisiológico.

Es preciso por tanto, examinar el grado de peligrosidad de la corriente eléctrica en función de sus variables físicas, anteriormente descritas como son: intensidad, frecuencia y tiempo de exposición o de duración. A la vez, deben ser analizados los valores de la impedancia que presenta el cuerpo humano y que dependerán de las distintas trayectorias seguidas por la corriente eléctrica, así como de la naturaleza y estado de los tejidos atravesados, para todos los valores posibles de la frecuencia, para que de los datos obtenidos se pueda establecer el grado de peligrosidad en función de la tensión para distintos valores de la corriente eléctrica.

En toda electrización corporal es importante considerar el establecimiento de un régimen transitorio de corrientes a través del cuerpo, cuya duración puede ser importante en función de los tiempos considerados como umbrales de peligro; por lo que los valores de intensidad, tensión e impedancia debe definirse con precisión.

En la Fig.4.33 se resume la estructura de los accidentes eléctricos y los efectos que desencadenan estos, así como en la figura 4.33 donde se ve gráficamente la impedancia del cuerpo humano respecto a una trayectoria específica de la corriente, de mano a pie.

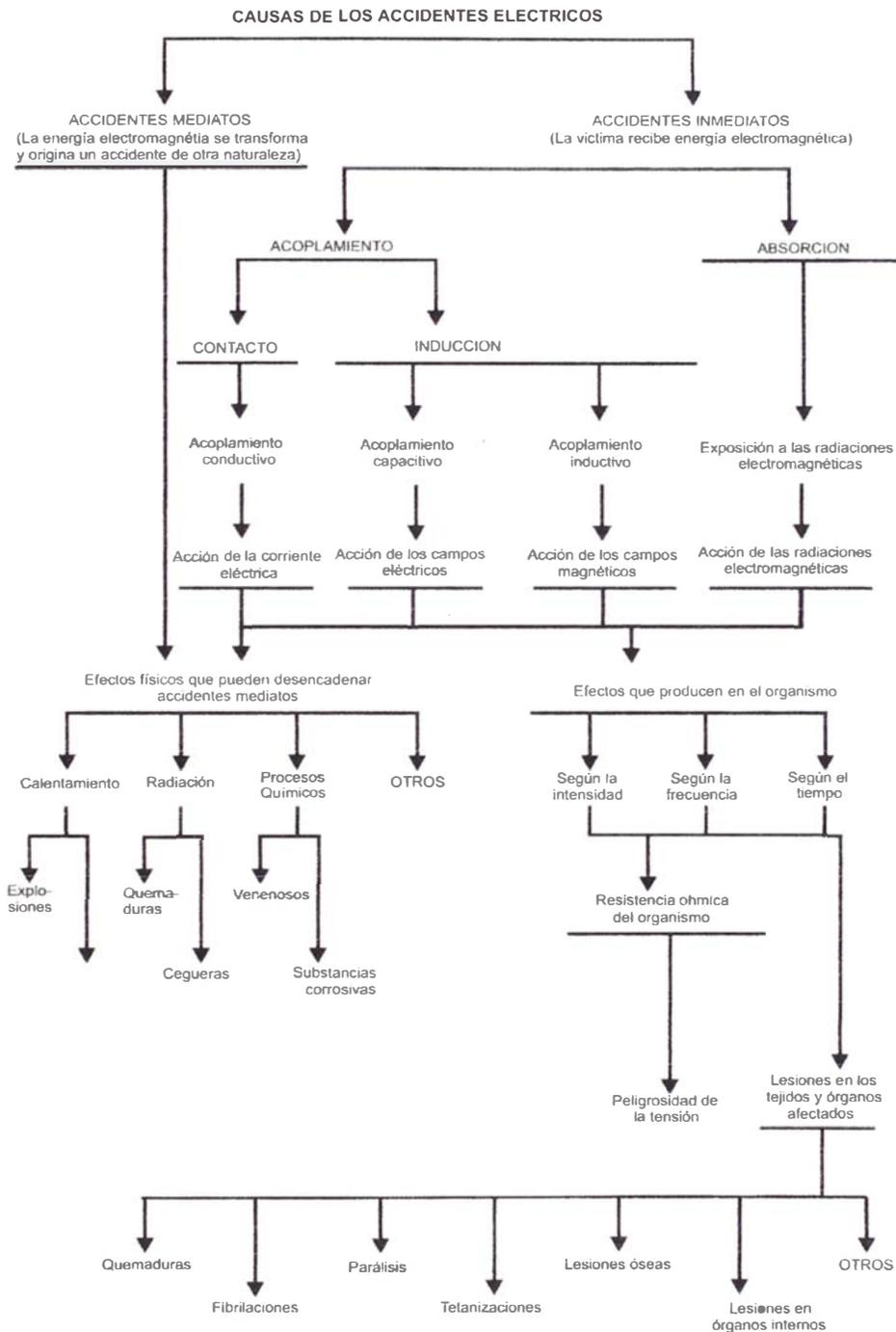


Fig.4.33 Estructura de los Accidentes Eléctricos.

En la Fig.4.34 se presenta la respuesta del cuerpo humano al aumento del calor. Este análisis es interesante porque sintetiza el comportamiento de nuestro cuerpo, para los casos de alto voltaje que traen consigo la incorporación de altas

temperaturas en el ser humano ocasionando en algunos de ellos, el recalentamiento de los líquidos corporales llegando incluso a su evaporación luego que la piel recalienta y hasta se perfora causando la muerte con grandes quemaduras inclusive (llamado efecto Joule) y/o carbonización, tanto internas como externas, de diferentes grados de peligrosidad.

Las altas intensidades de corriente a través del cuerpo son muy peligrosas, pues originan la destrucción de alúmina, así como la evaporación por cocción de la fluidez de los tejidos del cuerpo. Ello conduce frecuentemente, después de algunos días, hacia la muerte de la persona afectada, debido a que el cuerpo no puede eliminar y transformar los productos de la calcinación y, por lo tanto, se presenta un cuadro de envenenamiento.

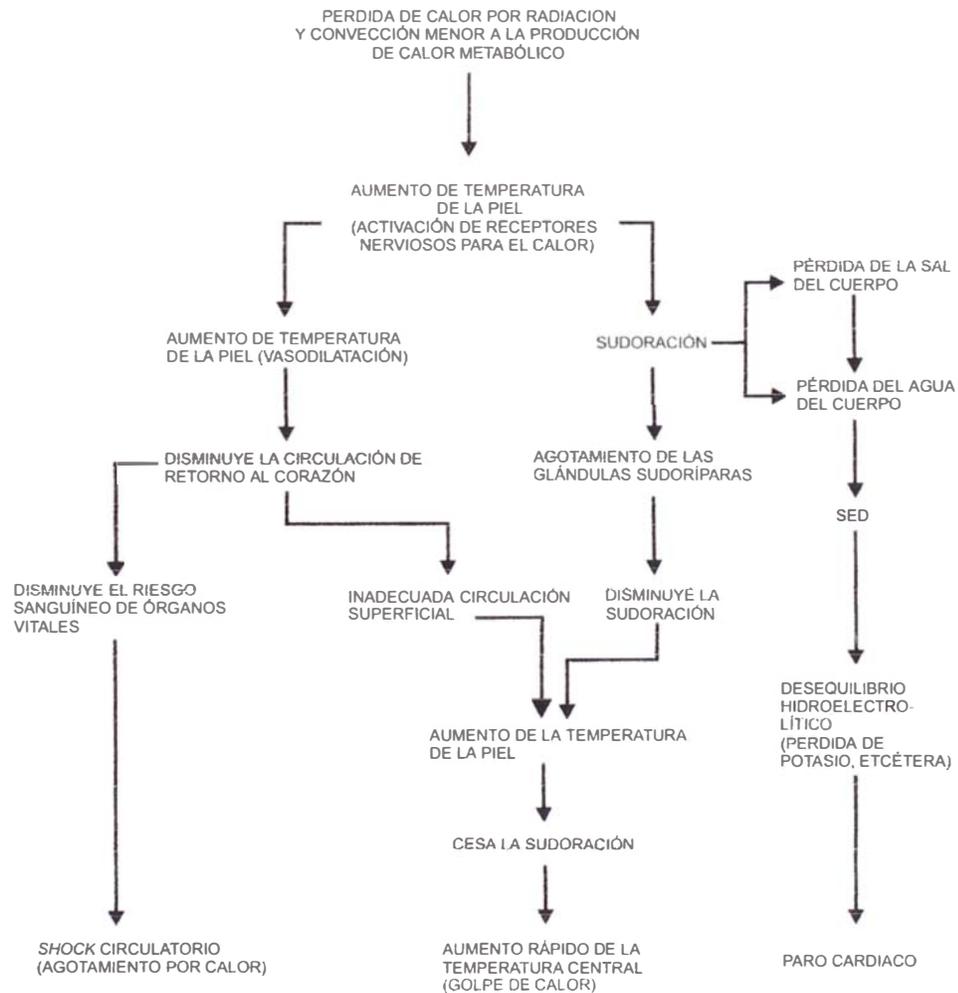


Fig. 4.34 Respuesta del Cuerpo Humano al Aumento de Calor.

4.5.2 ANALISIS DE FALLAS Y ACCIDENTES

El análisis de los accidentes y los incidentes (casi accidentes) es tan importante que ningún programa de seguridad e higiene de una instalación, una planta industrial, una oficina, está completo sin alguna revisión de los percances ocurridos, su único defecto es que es a posterior; esto es, el análisis se lleva a cabo después del hecho, demasiado tarde para evitar las consecuencias de un accidente ya ocurrido; pero, su valor para prevención de los accidentes es vital.

El análisis de los accidentes no se utiliza lo suficiente para fortalecer los otros enfoques para evitar riesgos. El enfoque coercitivo sería mucho mas tolerable para el usuario si la dependencia encargada pasara mas tiempo analizando los historiales de los accidentes, de forma que sólo enviara citatorios por las violaciones mas importantes. También el enfoque psicológico se reforzaría mucho si respaldara sus argumentos persuasivos con resultados de accidentes reales. El enfoque de ingeniería necesita el análisis de accidentes para saber dónde están los problemas y diseñar la solución para tratar todos los mecanismos del accidente.

Algunas veces un riesgo tiene varios orígenes y debe realizarse un análisis detallado de las posibles causas. Los ingenieros en confiabilidad utilizan un método llamado Análisis de Modos y Efectos de las Fallas (FMEA: Failure modes and effects analysis) para rastrear el efecto de las fallas de cada componente en la falla general o "catastrófica" del equipo; dicho análisis está orientado al equipo, no al riesgo

El análisis de modos y efectos de las fallas es importante para el Gerente de Seguridad e Higiene, cuando la falla de una pieza del equipo puede dar lugar a una lesión o una enfermedad industrial y si es una pieza vital para la seguridad o la higiene de los empleados, conviene que el gerente pida un informe de modos y efectos de las fallas realizado por el fabricante o comerciante potencial del equipo. Una forma provechosa de servirse del FMEA antes que ocurra un accidente es el mantenimiento preventivo.

Concordante con los aspectos de la Fig. 4.33 "Estructura de los accidentes

eléctricos” y la Fig.4.40 “Prevención de Accidentes Eléctricos” situaciones a los que pudiera incurrir una persona que labora en un Centro de Cómputo en donde los equipos que emplea y desarrolla su trabajo normal son accionados por la corriente eléctrica, de tal manera de tener una visión objetiva de los posibles riesgos en que se puede incurrir a efectos de evitar actos inseguros.

Adicionalmente para efectos de evaluación de fallas, se consigna: El Análisis por el Árbol de Fallas, que se concentra en el resultado final que es por lo regular un accidente o alguna otra consecuencia adversa. Los accidentes se originan con la misma frecuencia de errores de procedimiento que de fallas en el equipo y el análisis de árbol de fallas toma en consideración todas estas causas. El método fue preparado a comienzo de los años sesenta por Bell Laboratories, en un contrato con la Fuerza Aérea de los EEUU, el objetivo era evitar un desastre potencial en el sistema de misiles.

4.5.2.1 ANÁLISIS DEL ARBOL DE FALLAS

El término Árbol de Fallas, se debe a la apariencia del diagrama lógico utilizado para analizar las probabilidades de las diversas causas y sus efectos. Las hojas y ramas del árbol de fallas son las innumerables circunstancias o sucesos que pueden contribuir a un accidente. La base o tronco del árbol es el accidente catastrófico u otro resultado indeseable. La figura 4.38 plantea un ejemplo de un diagrama del árbol de fallas de la red de relaciones causales que contribuyen a la electrocución de un trabajador que maneja un taladro eléctrico portátil; el caso es extensible a un operador de equipo eléctrico y electrónico en una instalación de Informática o Centro de Cómputo de Datos el diagrama utiliza dos símbolos del código de las relaciones causales, en la siguiente figura:

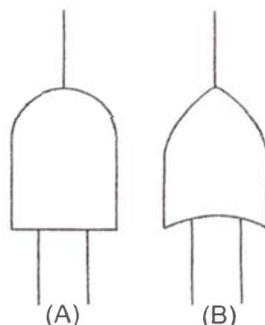


Fig.4.35 Código lógico de los diagramas de los árboles de fallas: (A) Símbolo de compuerta Y ; (B) Símbolo de compuerta O.

Es esencial que el analista sea capaz de distinguir las relaciones Y(AND) / O(OR) para las condiciones del suceso. Cuando estas condiciones están vinculadas a una compuerta Y, es necesario que estén presentes todas las condiciones causales para que ocurra un resultado; en cambio, cuando las condiciones están relacionadas por una compuerta O, es suficiente sólo una de ellas.

Por ejemplo, se requiere que estén presentes el oxígeno, el calor y el combustible para producir fuego, así que están conectados con una compuerta Y. En otro caso, una flama abierta como una chispa estática puede ser suficiente para producir calor de ignición en una sustancia, de forma que estas condiciones están conectadas con una compuerta O.

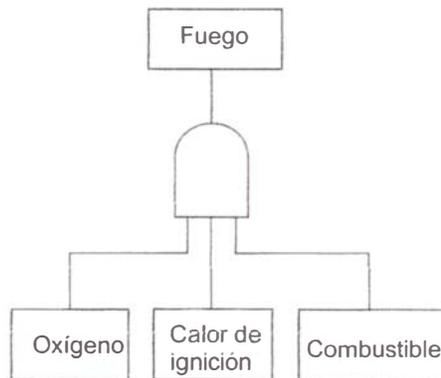
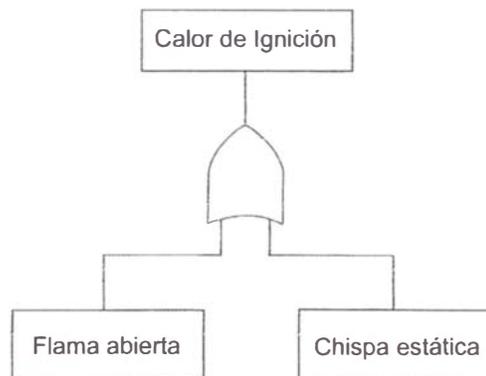


Fig.4.36 Ejemplo del uso de la compuerta Y en los diagramas de árbol de fallas

Fig. 4.37 Uso de muestra de la compuerta O en los análisis del árbol de fallas.



Obsérvese que estas formas de asociación o de representación de hechos podrían combinarse para iniciar a elaboración de una rama de una árbol de fallas. Una dificultad para este tipo de análisis, es que requiere que cada condición se enuncie en lenguaje absoluto de “si / no” o “pasa / no pasa”; el análisis se derrumba si una condición tal y como está enunciada puede o no causar un resultado específico.

Cuando el analista se enfrenta ante una situación de “quizás”, por lo general significa que la causa no ha sido analizada lo suficiente para lograr el resultado. La dificultad de tratar con una situación “quizás” obliga al analista a examinar con mas profundidad las relaciones de las fallas o accidentes, por lo que, después de todo, la “dificultad” puede convertirse en un beneficio.

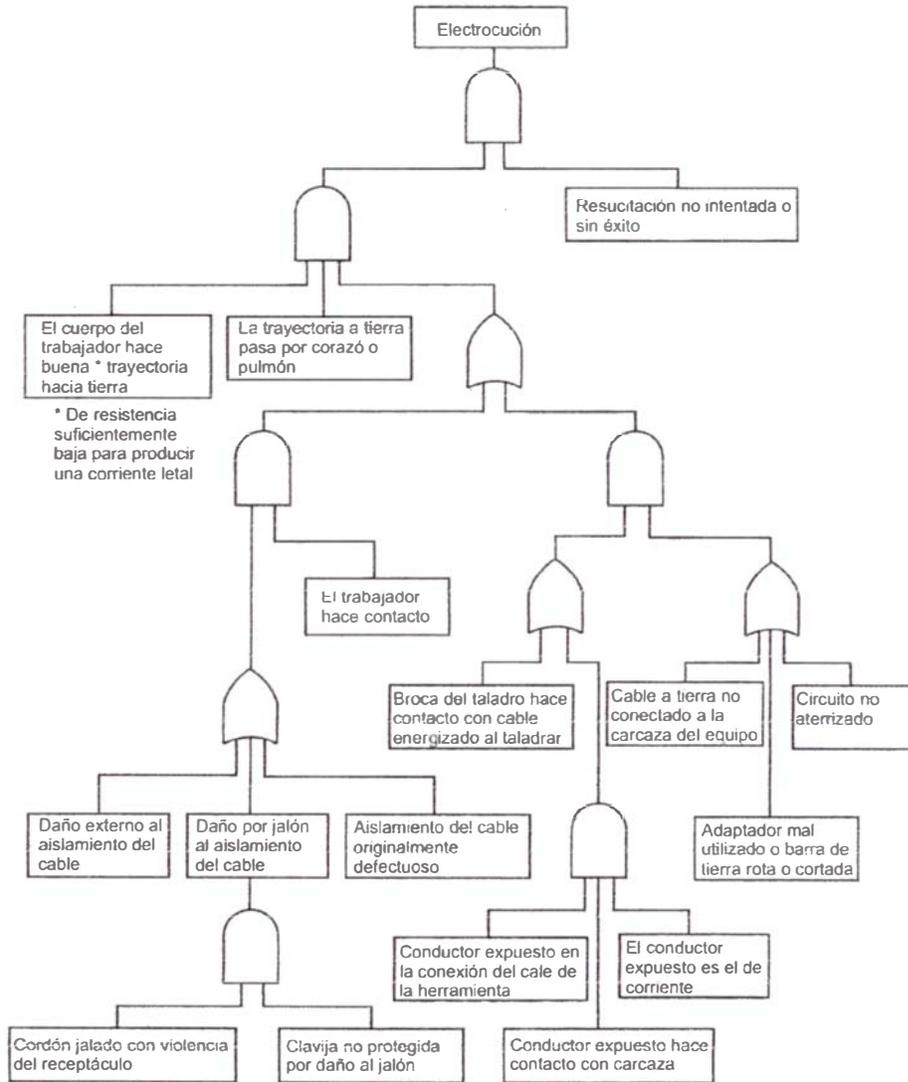


Fig. 4.38 Análisis del árbol de fallas de los orígenes de riesgos de electrocución con taladros electrónicos portátiles sin doble aislamiento.

4.5.3 ASPECTOS GRAFICOS DE LAS INTENSIDADES DE DEFECTO EN EL SER HUMANO

En los accidentes de defecto, pueden concurrir uno o más factores que en la protección influyen directa o indirectamente en causarlos. En este punto se van a estudiar aquellos factores que están íntimamente ligados de alguna forma, en función directa con la corriente "I" en amperios, la tensión "V" en voltios, la resistencia "R" en ohmios y el tiempo "t" de circulación de dicha corriente en segundos, además del camino recorrido por ella. Todos estos factores están relacionados directamente en las siguientes fórmulas:

Intensidad $I = V / R$, y cantidad Q de calor producido $Q = (V^2 \times t / R) \times 0.24$.

Examinando cada uno de ellos, se verifica la influencia que tienen en un posible accidente y en su gravedad. Así tenemos que la intensidad de corriente influye en forma directa por lo que es fundamental disminuirla en lo posible, puesto que a mayor valor, mayor es el peligro. El tiempo de duración considerado como peligroso en el paso de la corriente es superior a 0,2 segundos.

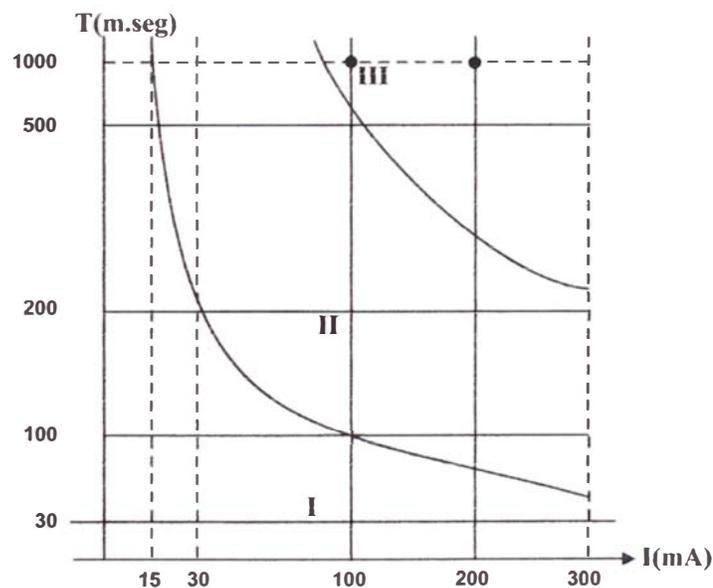


Fig 4.39 Tiempo vs. Amperaje de Interruptor Diferencial marca Siemmens de 30 mA.

La intensidad de corriente se divide en tres zonas, atendiendo a su influencia en el cuerpo. Sin embargo éstas zonas delimitadas no significan límites estrictamente exactos ni concretos; una corriente débil en ciertas circunstancias puede ser grave,

mientras que en otra puede ser leve con valores superiores al límite de seguridad según ciertas circunstancias de tiempo, estado y camino recorrido.

No obstante las zonas que de una forma general significan una mayor o menor peligrosidad son las señaladas en Fig.4.39 que es el correspondiente a un interruptor diferencial de 30 mA de la firma Siemens.

Zona I : La zona I comprende los valores de intensidad, medidos en miliamperios (mA) en función del tiempo, que es medido en milisegundos (mseg); ambos son muy pequeños generalmente. Si uno de los factores fuera grande, por ejemplo 300 mA o más, entonces el tiempo será muy pequeño; por ejemplo de los 0,2 segundos no hay peligro y la intensidad que corresponde a este tiempo es de 100 mA, el diferencial responde desconectando a los 30 mseg; límite de desconexión superior. Para tiempos superiores a un segundo, es decir a 1000 mseg, las intensidades son inferiores a 30 mA. Esta es la intensidad que no plantea peligros para el sistema cardíaco y nervioso, además, el diferencial dispara cuando alcanza el defecto de los 30 mA. Esta es la zona carente del peligro; quizás pueda causar cierto hormigueo o sensación de contracción muscular pero sin riesgo.

Zona II : Esta zona intermedia del gráfico produce calambres soportables e incluso de cierto riesgo. Es el intervalo de peligro relativo y siempre condicionado por otros factores concurrentes. Hay que desconfiar de esta zona, sobre todo entre los 100 y los 300 mA, con tiempo de disparo superiores a los 200 mseg.

Zona III : La zona tercera es la de verdadero peligro, con graves consecuencias en las que se incluye la electrocución. Puede haber: desmayo, inconciencia, fibrilación ventricular, paro cardíaco, tetanización, parálisis temporal, parálisis respiratoria, quemaduras, asfixia y muerte.

Las corrientes superiores a 50 mA, acompañados de un tiempo de exposición superior a un segundo, 1000 mseg., ya son peligrosas.

Cada uno de los factores característicos del fluido eléctrico no obra independientemente de los otros, si no que como se vio están íntimamente

relacionado entre sí.

Así la intensidad está en función directa de la tensión, pero también queda ligada por el tiempo; una misma intensidad, bajo las mismas condiciones de tensión y resistencia del circuito, puede ser grave o leve en función del tiempo de exposición a su paso. En consecuencia, como la complejidad es muy variada, el interruptor o relé diferencial debe reunir las suficientes cualidades de garantía como para proteger a las personas que pueden sufrir por cualquier causa un contacto directo o indirecto con valores enmarcados en las zonas II y III.

En efecto, para evitar el peligro, corriente de defecto no debe llegar a la persona con valores superiores a los 30 mA, y el tiempo máximo de desconexión no ha de ser superior a los 200 mseg. con una de las dos condiciones el peligro queda anulado, no obstante, los relés diferenciales cumplen ambas condiciones, siendo los guardianes de la salud y la vida de las personas.

Cualquier intensidad de escape, fuga o defecto I_d , que circule por la persona puede ser peligrosa e incluso mortal, según se ha visto en las zonas de peligrosidad estudiadas y experimentadas por los investigadores. Esto depende de ciertas circunstancias, características del circuito y condiciones personales.

Por desgracia, el valor de cualquier corriente de defecto y sus peculiaridades no son conocidas hasta que la avería o el accidente se ha producido. Es entonces cuando se suele tomar conocimiento de la precauciones. Con esto se quiere decir que se debe proteger ante cualquier eventualidad o posible situación de contacto directo o indirecto con antelación.

La corriente que habrá de soportar el paso por nuestro cuerpo o miembro será siempre:

$$I_d = \frac{V_d}{\sum R}$$

Siendo " V_d " la tensión derivada a tierra y que se descompone, como se verá más adelante, en una suma de tensiones. La mayor es la que soportará la persona y " R "

es la suma de todas las resistencias que componen el circuito de defecto de la corriente.

Entre ellas actuará la resistencia que ofrece la persona, que debe ser la mayor posible para limitar el valor de la corriente. La tensión de seguridad debe ser 24 voltios ya a partir de este valor deben actuar los sistemas de protección. El tiempo deberá ser inferior a 0,2 segundos, como se ha indicado.

Por tanto, entran en juego muchos factores. Es un complejo muy difícil de determinar y menos aún asegurar qué corriente, a priori y sin conocerla, sería o no peligrosa.

Cuando una corriente atraviesa el cuerpo humano puede causar consecuencias fatales. Los investigadores dicen que una intensidad de 25 mA, en función del recorrido efectuado, el tiempo de exposición, condiciones de las personas y otras circunstancias, pueden ser mortal.

El camino más peligroso en el paso de la corriente eléctrica en la persona es: de una mano a la otra mano, de la mano izquierda al pie derecho, de la mano izquierda a la cabeza, de la mano derecha al pie izquierdo. En suma, el camino que más se acerque al corazón.

Se discutirá enseguida, la influencia de la corriente de defecto en función del tiempo en el gráfico dividido por zonas de peligrosidad para las personas y determinar los posibles riesgos que comportan algunos puntos situados en dichas zonas.

Zona I : Punto 1, con 30 mA y 500 m.sec., no existe peligro, pues la intensidad es débil.

Punto 2, con 50 mA y 200 mseg., la intensidad no siendo peligrosa puedo causar cierto malestar y producir calambres pues el tiempo es todavía pequeño –0.2 segundos-.

Punto 3, con 200 mA y 30 m.sec., la intensidad ya representa un riesgo considerable, pero el tiempo es tan pequeño que no hay peligro. En esta zona nunca habrá riesgo de electrocución.

Zona II: Punto 1, con 100 mA y 500 m.sec., ambos valores pueden ser soportables y a su vez sospechosos con cierto riesgo; pueden presentar problemas serios.

Punto 2, con 200 mA y 200 m.sec., la intensidad ya es peligrosa, pero actúa en un tiempo corto, dentro de los límites de seguridad de 0.2 segundos no hay riesgo.

Punto 3, con 300 mA y 100 m.sec., esta corriente es peligrosa, pero el tiempo aún es menor que el anterior y tampoco exige riesgo. En esta zona el peligro de electrocución es remoto; pudiera haberlo bajo ciertas circunstancias personales, ambientales, etc.

Zona III: Punto 1, con 100 mA y 1000 m.sec, -un segundo-, ambos factores son peligrosos, por ser superiores a los límites de seguridad. Fácilmente puede haber electrocución, la exposición a estos valores es una situación muy arriesgada y grave.

Punto 2, con 200 mA y 1000m.sec, ambos valores son peligrosos; en estas condiciones es fácil la electrocución.

Punto 3, con 300 mA y 500 mseg., también hay mucho peligro de electrocución. En ésta zona, todos los puntos son susceptibles de provocar la muerte con cierta probabilidad, según las circunstancias.

Lo cierto que es muy penoso tener que hablar de las numerosas probabilidades de electrocución con la corriente eléctrica, tal como se ha visto; pero también es verdad que se cuentan con los dispositivos apropiados para neutralizar los riesgos y sus efectos perniciosos, gracias al uso de interruptores termomagnéticos o relés diferenciales, en particular de máxima sensibilidad; el de 30 mA, según los experimentos realizados por algunos investigadores americanos como el profesor Koeppen, las corrientes inferiores a 30 mA no son peligrosas.

Hay que hacer resaltar aquí, que el mejor procedimiento para hacer frente a los contactos, de forma efectiva y segura, es la instalación de llaves relés diferenciales acompañados de una buena toma de tierra.

Asimismo, hacemos recapacitar que desde el punto de vista eléctrico, el individuo está expuesto a múltiples accidentes sobre diversas partes de su cuerpo, los cuales deben proteger. Personalmente debe proteger la cabeza con casco aislante; la vista

contra proyecciones de chispas y cortocircuitos; las manos contra contactos, con guantes aislantes; el cuerpo, con mono o mandil ("mameluco ") ; los pies, con calzado aislante y antichispas al andar.

4.5.4 ESTRUCTURA DE LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES ELÉCTRICOS EN EL SER HUMANO.

Analizados y estructurados los daños de origen eléctrico, es conveniente evaluar y estudiar los procedimientos de prevención de los accidentes eléctricos. No cabe duda de que cualquier método de prevención debe fijar como objetivo final la eliminación total de las causas que originan los accidentes o, por lo menos, limitarlas a valores no peligrosos.

De esta forma, cuando la radiación electromagnética tenga una intensidad peligrosa, la absorción de esta radiación puede evitarse impidiendo a las personas que queden expuestas a las mismas. Mientras que, para evitar los acoplamientos inductivos y capacitivos será necesario la interposición de pantallas adecuadas entre la persona y el elemento eléctrico.

Mayor trascendencia tiene el impedir los acoplamientos de origen conductivo, ya que la totalidad de los accidentes eléctricos son debidos a este tipo de acoplamientos.

Para conseguir evitar que un contacto accidental entre persona y red conductora provoque un acoplamiento conductivo bastará que no exista ninguna conexión galvánica entre ambos. Dado que la tierra, suelo, paredes, etc., crean una conexión galvánica natural, el método de prevención se basa en interponer una barrera aislante que interrumpa en algún punto a la malla tierra-red eléctrica-persona.

Cuando ésta barrera se interpone entre la red y la tierra se obtienen las instalaciones aisladas; como las masas metálicas han de estar aisladas de los conductores activos mediante un aislamiento llamado funcional, si además se dispones entre ambos de otra barrera mas de aislamiento y en serie como la anterior, se obtiene el método llamado de "doble aislamiento", que resulta muy

indicado para la prevención de contactos indirectos. Cuando esta segunda barrera se coloca entre la persona y tierra (aislando suelo y paredes) se consigue evitar los contactos directos.

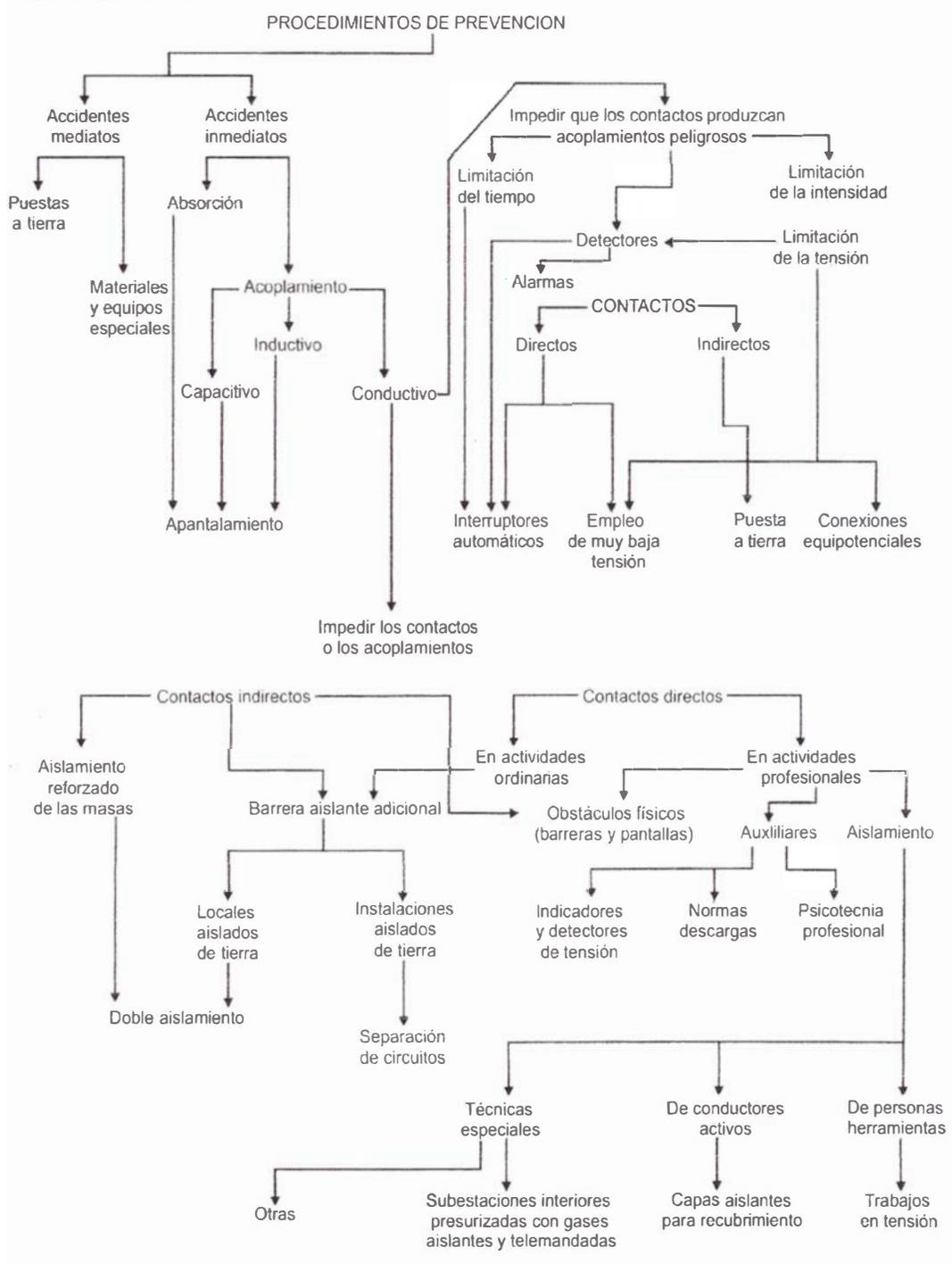


Fig. 4.40 Estructura de Prevención de Accidentes Eléctricos.

Un segundo criterio de prevención consiste en no impedir los contactos que provoquen acoplamientos, si no evitar que éstos resulten peligrosos. Lo anterior se consigue limitando el tiempo y la intensidad por debajo de sus valores umbrales de peligro.

Para limitar el tiempo de duración del acoplamiento son necesarios interruptores rápidos (del orden de los nanosegundos), puesto que el umbral de seguridad resulta ser un tiempo muy corto. Este procedimiento de prevención es eficaz tanto para contactos directos como indirectos.

Para reducir la intensidad del acoplamiento debajo del umbral de peligro es necesario limitar el valor de la tensión; un procedimiento consiste en el empleo de redes cuya tensión nominal sea muy baja e inferior al umbral de peligro (24 voltios por ejemplo), evitándose los contactos directos e indirectos.

Otros procedimientos se basan en mantener bajos los valores de las tensiones que, accidentalmente, pueden aparecer entre la tierra y las masas metálicas uniéndolas galvánicamente mediante conexiones de baja resistencia y que se les denomina Puestas a Tierra y Redes Equipotenciales, encaminados ambos a la prevención de los contactos indirectos. Respecto al Acoplamiento Capacitivo, puede decirse que la frecuencia de 50 Hz tiene poca importancia, si bien debe tenerse en cuenta en baja tensión. Si las redes son muy extensas ya que estas quedan acopladas con tierra a través de la capacidad distribuida.

Esta capacidad distribuida puede resultar perjudicial entre tierra y red por el fenómeno de acumulación de cargas electrostáticas, que pueden originar chispas y descargas que provoquen accidentes indirectos.

De gran importancia es la prevención de accidentes eléctricos, utilizando para ello detectores de defecto GFCI ó ICFT ó interruptor de circuitos por fallas a tierra; los cuales permiten controlar las limitaciones de tensión, así como ser sensibles a las corrientes de derivación a tierra. La actuación de estos detectores se basan bien en señalar mediante alarmas las situaciones de peligro o provocar el disparo de interruptores, debiendo exigirse unas condiciones de seguridad y selectividad que

permitan a las instalaciones eléctricas ser eficaces y estar protegidas de cualquier maniobra intempestiva (ver gráfico de los GFCI 4.42 y 4.43).

En la Fig.4.40 se recoge gráficamente la estructura y ordenación de los procedimientos de prevención tanto para accidentes Mediatos como Inmediatos de las instalaciones eléctricas.

4.5.4.1 OPERATIVIDAD DE LOS INTERRUPTORES DE CIRCUITOS POR FALLAS A TIERRA

Es necesario hasta aquí tener conceptos adicionales de ciertos accesorios o instrumentos que se deben considerar para una buena práctica a fin de acompañar a una puesta a tierra confiable los mecanismos adecuados para una oportuna protección y, ejercer un mejor control de la protección por instrumental, procedimientos técnicos de instalación y layout adecuados; siendo este tema, uno de los dos que se van a tratar.

El circuito común de 110 ó 220 voltios de una instalación en un Centro de Cómputo debe constar de 3 cables o alambres: de corriente, neutro y el de tierra. Algunas veces, al neutro se le llama conductor “aterrizado”, en cuyo caso la tierra se llama “conductor aterrizante“. La finalidad del cable de corriente (usualmente un alambre negro aislado o cubierto con una capa de PVC) es proveer el contacto entre la fuente de energía y el dispositivo (carga) que la utiliza. El neutro (por lo general un alambre blanco aislado o con cubierta de PVC) completa el circuito conectando la carga con tierra. Tanto el alambre de corriente como el neutro llevan la misma corriente, pero el de corriente tiene un voltaje efectivo de 220 Volts (110 en el caso de EEUU NA) con respecto a tierra , en tanto que el voltaje del neutro tiene es cerca de cero con respecto a tierra.

El tercer alambre es el de tierra y por lo regular es de color amarillo , verde o en algunos casos verde con amarillo intercalado en uno solo ó es un cable desnudo. Su propósito es de seguridad .Si algo sale mal , de forma que el alambre de corriente haga contacto con la carcasa del equipo o con alguna otra parte conductora del equipo , en su trayectoria hacia tierra la corriente puede pasar por

alto la carga (o sea no llega a la carga o equipo que debe aplicar para hacerlo trabajar) y hacer un circuito reducido , comúnmente llamado corto. Dado que la carga es en si ignorada , el corto es en si una trayectoria a tierra de muy baja resistencia y , según la ley de Ohm , consume una corriente muy elevada.

En los circuitos protegidos , esta corriente “ volará “ un fusible o “ activará “ un cortocircuitos casi de inmediato , dependiendo de la clase de protección y detendrá todo flujo de corriente.

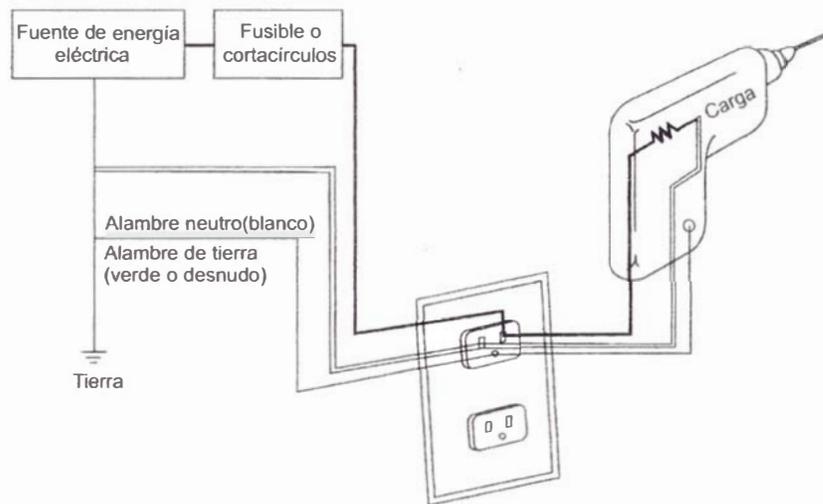


Fig.4.41 Circuito de 220 / 110 voltios correctamente alambrado.

Por supuesto, es posible tener un corto sin alambre de tierra . Por su emplazamiento o instalación, el equipo puede quedar aterrizado o bien el alambre de corriente hacer contacto con el neutro de alguna manera. algunas veces, el corto a tierra es sólo parcial , porque hay una resistencia considerable en la trayectoria a tierra, y no siempre se detecta, pues el flujo de corriente es de un amperaje insuficiente para hacer que la corriente total del circuito active la protección contra excesos de corriente . En este caso, la corriente continuará fluyendo y las cargas del equipo seguirán operando en presencia de estos cortos ,o “ fallas a tierra “.

Las fallas a tierra pueden ser peligrosas en las construcciones, en las instalaciones de Centros de Cómputo, en las industrias, en los Centros Hospitalarios, en los Laboratorios , clínicas , etc. Este riesgo es la base de los interruptores de circuitos por falla a tierra (ICFT ó GFCI) en las instalaciones.

Esta protección que la llamaremos GFCI se instala además de las protecciones contra excesos de corriente como cortocircuitos o fusibles.

Los interruptores de circuito por falla a tierra se desarrollaron en primera instancia para la protección contra choques eléctricos dentro y alrededor de las piscinas, pero hoy en día se instalan donde los usuarios de equipo eléctrico estén trabajando en zonas de trabajo bien aterrizadas (como en terreno húmedo o en cimbras de acero). Las Normas reguladoras modernas también piden la instalación GFCI en circuitos que suministren corrientes a los baños, cocinas y receptáculos exteriores de corriente de las instalaciones nuevas, en Estados Unidos.

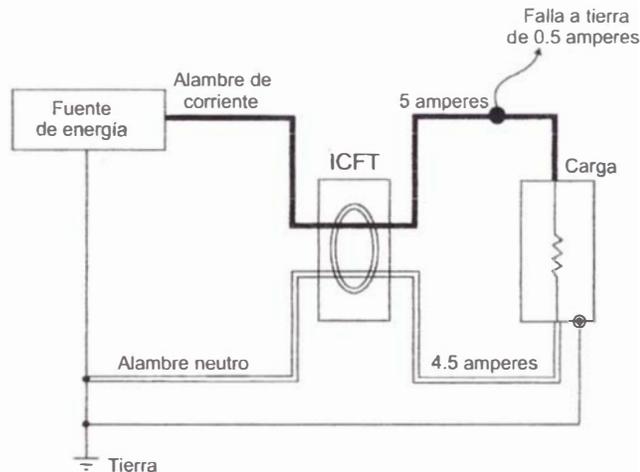


Fig. 4.42 Interruptor de circuitos por falla a tierra (ICFT). La falla a tierra de 0.5 amperes provoca un desequilibrio de flujo de corriente entre el alambre de corriente y el neutro. Este desequilibrio activa el ICFT para que corte el circuito.

Las corrientes de falla a tierra de tan solo 0.0001 por ciento (Un diezmilésimo %) de la carga de corriente pueden ser detectados por los interruptores descritos y estos son adecuados para equipos con dos y tres conductores. Sin embargo, no protegen contra el choque por contacto de conductor a conductor, ni se supone que reemplacen a los fusibles o a los interruptores termomagnéticos. Se usan solo para complementar otros dispositivos de seguridad como medida adicional de protección.

Un GFCI puede enchufarse en una toma de corriente de la pared o instalarse como parte de un circuito doméstico. Detecta cualquier problema en un aparato eléctrico enchufado en la toma de corriente o en el circuito, y desenergiza o desenergetiza el

aparato, a fin de proteger a las personas de un choque eléctrico o de alguna lesión. En las Figuras 4.43 y 4.44 se detallan las características de este dispositivo protector.

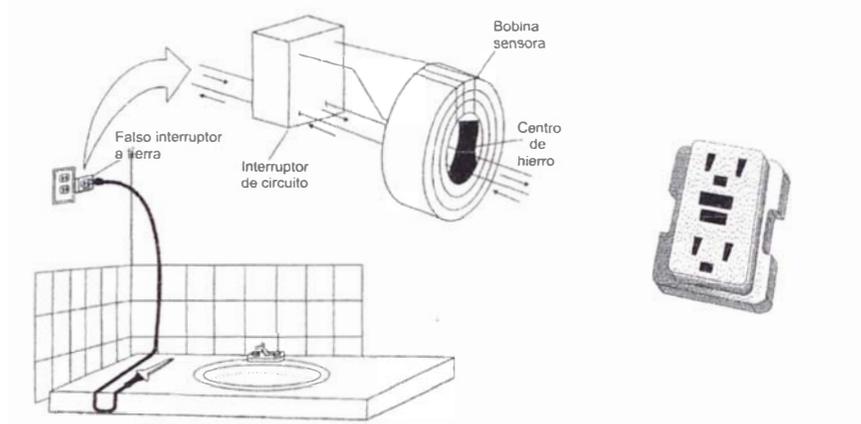


Fig.4.43 Falso interruptor a tierra de circuito. Es un dispositivo de seguridad que detecta rápidamente las corrientes a tierra y abre el circuito.

El dispositivo sensor del GFCI es un toroide magnético (bobina sensora) alrededor del cual están enrolladas varias vueltas de los conductores vivo y neutral (véase la Fig.4.44). Si las corrientes en los conductores vivo y neutral son iguales, cada uno producirá un campo magnético igual en el toroide.

Estos campos magnéticos se cancelarán entre sí y no existirá campo magnético neto alguno en el toroide. Si las corrientes en los conductores vivo y neutral no son iguales (están desbalanceadas), habrá un campo magnético neto en el toroide, este campo se detecta mediante un tercer devanado sensor, que también está enrollado en el toroide: La señal resultante del campo magnético detectado se amplifica y se emplea para activar relevadores que están conectados en el circuito de suministro de corriente al equipo.

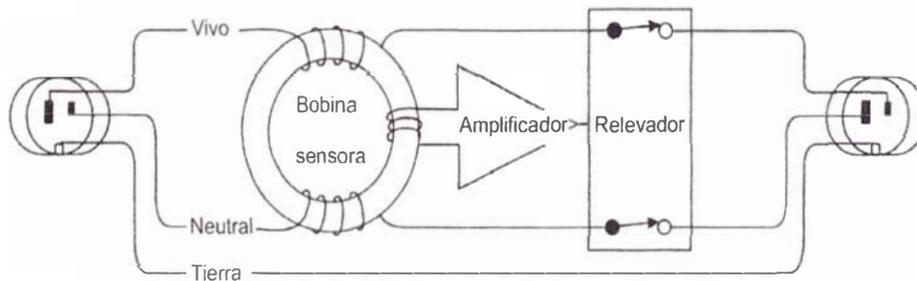


Fig.4.44 Interruptor de circuito por falla a tierra.

La activación del relevador hace que se interrumpe la corriente que se está suministrando al equipo o carga, ver la Fig.4.44.

Una dificultad de los GFCI es que es casi imposible evitar algunas fugas a tierra, en particular cuando las condiciones son húmedas o los cables de extensión demasiado largos. Esto hace que el dispositivo GFCI se active aunque no haya ningún riesgo, una situación que en la industria de la construcción se conoce como "activación molesta". Una alternativa es que la administración o dueño de la instalación pruebe, inspeccione y mantenga registros del estado de los conductores a tierra del equipo.

Un malentendido respecto a los cortos es la idea de que un buen fusible o cortacircuitos es suficiente para detener el flujo de un peligroso corto por el cuerpo de una persona. Un nuevo examen de la Fig.4.44 demuestra que la persona morirá casi con toda certeza por exposición a una corriente que no haría ni saltar siquiera los fusibles domésticos populares más pequeños (es decir, fusibles de 15 o 20 amperios).

Un fusible o cortacircuitos de 15 amperes recibirá hasta 15,000 miliamperios antes de volar, varias veces la cantidad de corriente mortal mostrada en la Fig.4.41. Por lo tanto, las bondades del tercer alambre o alambre de tierra, están en que genera un corto de muy baja resistencia y alta corriente hacia tierra, que activará el fusible o cortacircuitos de inmediato, antes de que otras trayectorias de cortocircuito a tierra (como las que pasan por el cuerpo de una persona) puedan hacer daño.

4.5.4.2 CIRCUITO INTERRUPTOR DE DETECCIÓN POR INMERSIÓN (IDCI)

Un dispositivo relativamente nuevo que puede evitar las electrocuciones en instalaciones que por alguna razón un artefacto o una pieza en funcionamiento con corriente eléctrica cae al agua o le cae agua, es uno más pequeño y menos caro que el GFCI, es el Circuito Interruptor de Detección por Inmersión (IDCI)

La causa principal de electrocuciones en los hogares se debe a que los aparatos electrodomésticos de preferencia, que caen al agua. Estos accidentes no son

originados, por lo tanto, por aparatos defectuosos. Por ejemplo, puede resultar un choque severo, el cual con frecuencia es fatal si un secador de cabello se deja caer en una tina de baño llena de agua, ocupado por una persona. Los mismos resultados se tienen si una cafetera conectada se sumerge en un fregadero. Mas de 100 muertes ocurren en Estados Unidos cada año como resultado de tales accidentes.

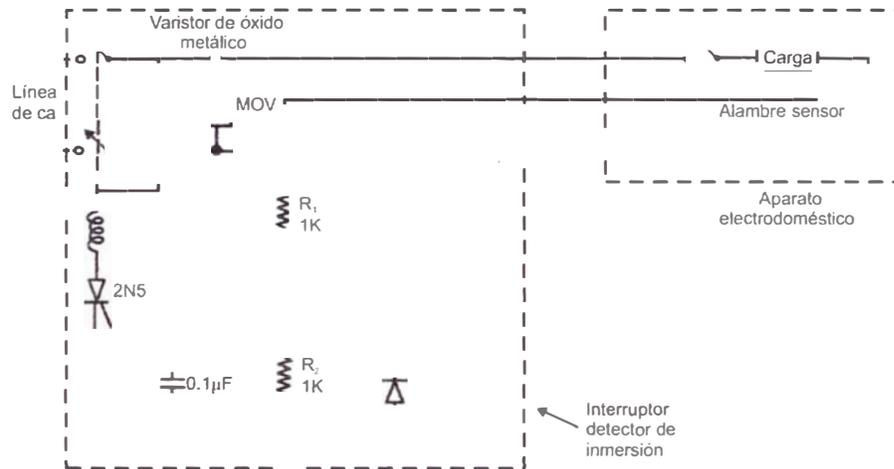


Fig. 4.45 Esquema del Circuito de un Interruptor de Detección por Inmersión.

El dispositivo IDCI se puede construir directamente de la clavija de enchufe (tomacorriente) de los aparatos electrodomésticos, herramientas manuales, etc. como secadoras de cabellos, desarmadores eléctricos, cafeteras, radios. En la figura 4.45 se muestra un esquema de este interruptor: Un cable de la herramienta motorizada o equipo eléctrico con un interruptor de inmersión contiene dos conductores de corriente y un tercer conductor sensor para detectar la inmersión.

La corriente que fluye a través del conductor sensor origina un voltaje positivo en la compuerta de un rectificador controlado de silicio (SCR), que energiza entonces a un solenoide. La armadura del solenoide acciona el interruptor con tensión de resorte, que se puede reestablecer en forma manual. En los electrodomésticos que se dañan en forma permanente al sumergirlos en agua, el interruptor no se puede reestablecer.

Estos dispositivos cumplen con los requisitos de sensibilidad de corriente versus tiempo de UL (Underwriters Laboratory) para los interruptores de falla a tierra (es

decir 5.6 segundos con 6 m A ó 26 ms con 264 m A pasando por el conductor sensor). En realidad, los dispositivos de interrupción por inmersión rebasan las normas UL cortando la corriente cuando pasa menos de 1 m A por el conductor sensor .

También los dispositivos no están polarizados (es decir, cortan la corriente sin importar cual es el conductor de corriente que este vivo (energizado) y cual esté a tierra). Además, tienen otra ventaja sobre los interruptores de falla a tierra, los cuales pueden no cortar la corriente de una tierra de baño aislada eléctricamente, debido a que el uso extensivo de plástico evita las corrientes a tierra que hacen que corte un interruptor de falla a tierra.

4.6 CONEXIONES A TIERRA.

En las instalaciones residenciales, todos los circuitos comparten una línea de retorno común llamada neutro, conectada físicamente a la tierra. Cuando usted toca una tubería de agua, o cualquier objeto metálico en contacto con la tierra, usted se está convirtiendo en parte de un circuito eléctrico, y satisfaciendo uno de los dos requisitos necesarios para recibir un choque eléctrico. El otro requisito es: cerrar el circuito tocando un alambre o dispositivo "vivo", es decir, con un voltaje aplicado. De este modo, usted obliga a la fuente a impulsar una corriente eléctrica a través de su cuerpo.

Con el fin de reducir el riesgo anterior, los gabinetes y estructuras metálicas (chasis) de instalaciones, aparatos, herramientas y máquinas eléctricas, deben siempre aterrarse, es decir, conectarse a tierra, utilizando conductores de conexión separados. De este modo, se evita el desarrollo de voltajes peligrosos entre estas partes metálicas y la tierra.

En algunos casos, el aterramiento se realiza conectado directamente los gabinetes, a tuberías de agua o barras metálicas enterradas, como se muestra en la figura 4.46.

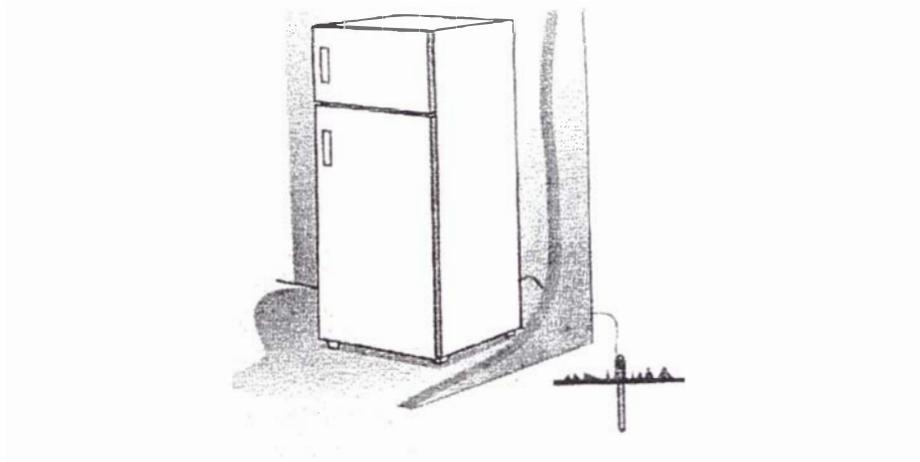


Fig.4.46 Conexión a tierra de un gabinete metálico.

Tratándose de aparatos y máquinas eléctricas, la protección a tierra se realiza generalmente utilizando enchufes polarizados de tres terminales, conectados a tomacorrientes con conexión a tierra.



Fig. 4.47 Enchufes y tomacorrientes con conexión a tierra.

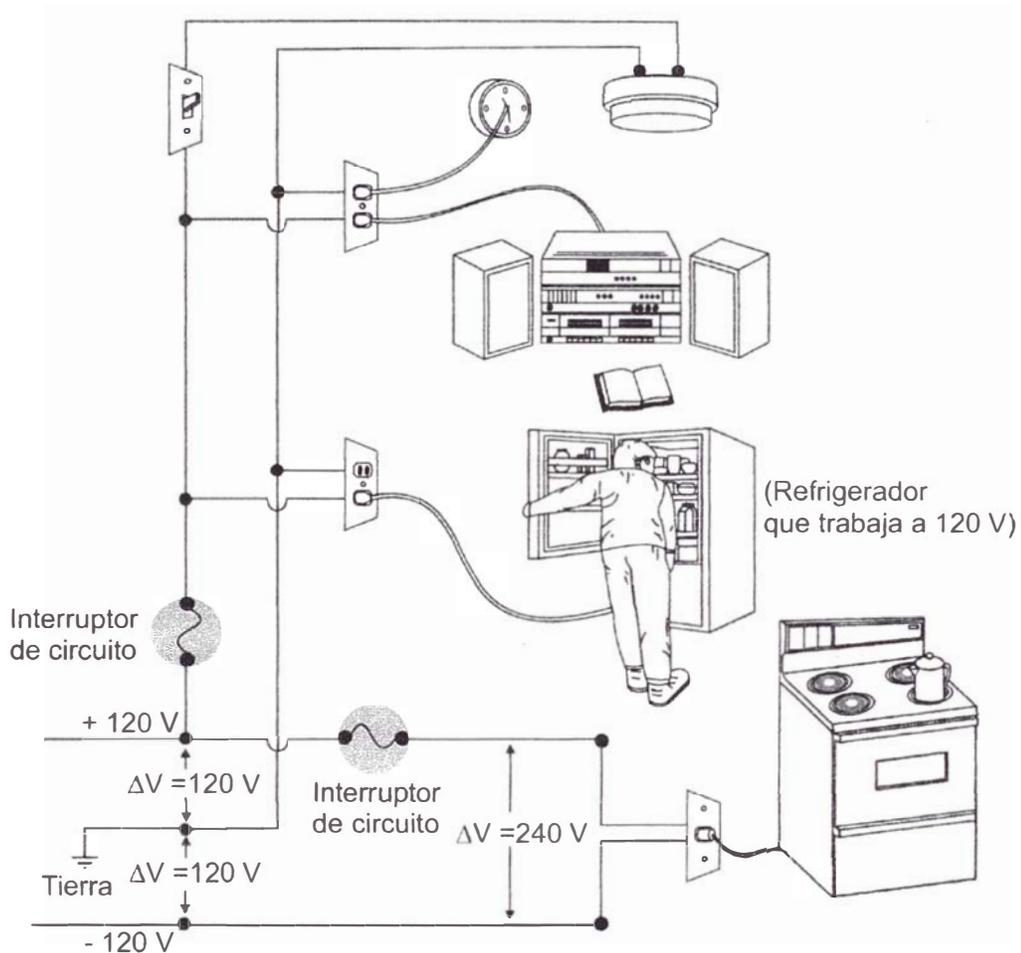


Fig.4.48 Cableado doméstico. Un circuito de 120 voltios (220) se obtiene por conexión entre la línea de +120V (o -120V) y la línea a tierra. Una diferencia de potencial de 240 voltios para aparatos grandes como los hornos eléctricos, los acondicionadores centrales de aire y los calentadores para agua caliente se obtienen por conexión entre la línea +120V y la línea -120V.

4.6.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS PUESTAS A TIERRA FORMALES.

El diseño no incluye control de potenciales de toque y de paso, como en SS.EE.

Están destinadas principalmente a:

- Seguridad de las personas en contacto con aparatos susceptibles de fallar.
- Correcto funcionamiento de dispositivos electrónicos (automatismo, control, transferencia de datos, procesamiento).
- Correcto funcionamiento de la protección por reles.

- Evacuación de las corrientes de fuga y de falla, y su dispersión en el suelo.

Interesa principalmente su resistencia de dispersión, que normalmente debería tener bajos valores, dependiendo de las instalaciones y equipos asociados, como sigue:

- Servicio doméstico – electrodomésticos 9 – 15 Ohms
- Servicio doméstico – electrónicos 6 - 9 Ohms
- Servicio de oficina – electrónicos + PC 3 - 6 Ohms
- Servicio de oficina – Red de procesamiento 2 - 3 Ohms
- Centrales de comunicaciones y datos menos de 2 Ohms

El conductor para la Tierra del sistema no se conecta al conducto o tableros de distribución secundarios, por los cuales se desplaza. Este termina solamente en los bloques de terminales “aislados”, o el cable aislado principal de tierra u otra “tierra aislada” o receptáculo, o la tierra aislada -lógica- del equipo, y en el punto único de unión de la fuente de potencia. Ver figura 4.49.

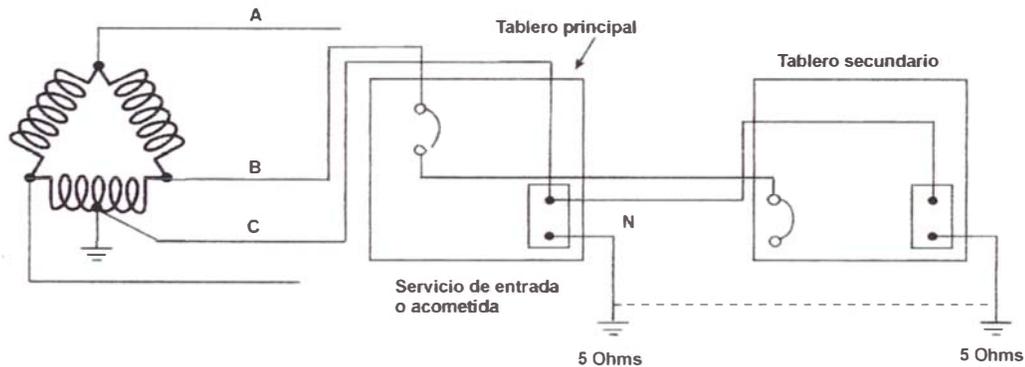


Fig. 4.49 Tierra aislada.

4.6.2 CONEXIÓN A TIERRA PARA LA OPERACION CONFIABLE DE COMPUTADORAS.

El concepto de único punto de conexión a tierra, se ha establecido como estándar para una conexión a tierra para equipo electrónico sensible. Es de suma importancia para la confiabilidad de un equipo, y una satisfactoria operación de los sistemas computarizados, y otros modernos sistemas electrónicos, es el de establecer un punto único de referencia de tierra.

La confiabilidad y operación de un sistema computarizado, serán mejoradas utilizando esta técnica, la cual se basa en mantener un plano equipotencial para todos los equipos y, así, evitar diferencia de voltajes peligrosos, o que puedan afectar el buen funcionamiento del equipo electrónico. Es un hecho que algunos sistemas no pueden operar sin esta técnica. El servicio de entrada del edificio debe ser la referencia inicial, para el sistema de un solo punto a tierra.

Aún más conveniente es el establecer un buen único punto de unión neutral-tierra para la computadora, o en el secundarios del transformador reductor. Ver figura 4.50

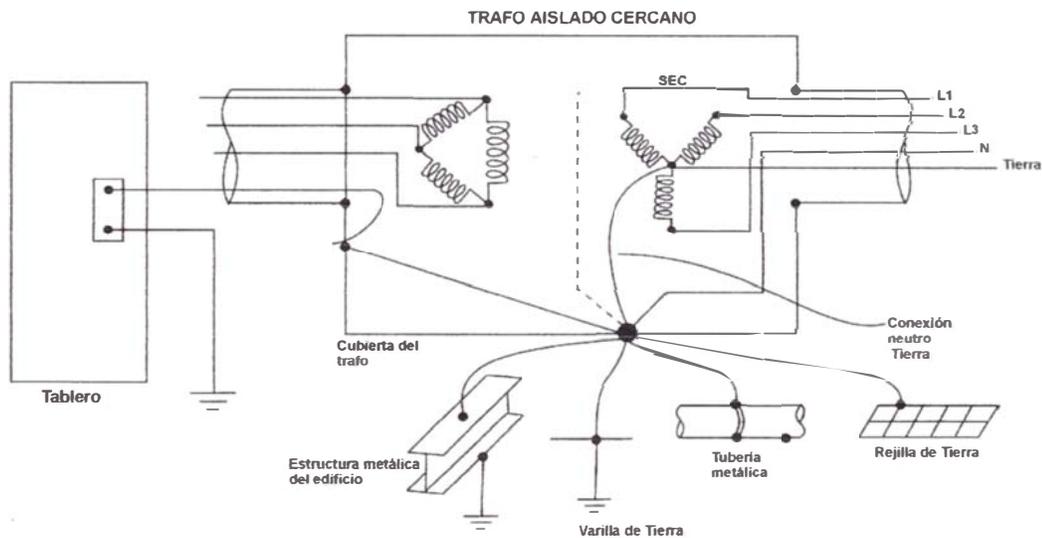


Fig. 4.50 Punto único de conexión a tierra para salas de computadoras.

Siempre es necesario, debido a la impedancia de conductores largos, que establecen diferencias de potencial a lo largo del conductor, y producen ruidos eléctricos e interferencias en los equipos electrónicos, que un transformador de aislamiento se instale tan cerca de la computadora, como sea posible.

Esta fuente derivada separadamente, aísla el sistema de los ruidos en el sistema del edificio. Se recomienda que el sistema de tierra del equipo electrónico de la sala de computadoras, instalada en los secundarios del transformador, sea interconectado con el sistema de tierra del edificio. Esto se hace para establecer un corto circuito entre los sistemas de tierra, y mantener todo el sistema al mismo potencial, en caso de descargas atmosféricas, u otros efectos causados por corrientes de tierra.

En esta figura, se muestra el secundario del transformador, ubicado tan cerca al equipo de procesamiento de datos como sea posible; el secundario, se conecta a tierra en un punto único, y los equipos se conectan a este punto, que puede estar ubicado en el transformador o un tablero secundario. La conexión a tierra se puede efectuar, ya sea en el mismo transformador, o en el tablero secundario.

4.6.3 ESPECIFICACIONES PARA LA UNIÓN DEL SISTEMA

En una instalación típica de computadoras, la confiabilidad del sistema de operación, pueda que parezca en estado de disparidad con los requisitos de conexión a tierra. La tierra de seguridad que conecta los armarios, forma bucles de tierra. Esto se combina con la necesidad de tierra, para prevenir daños causados por rayos.

La apertura de uniones reduce el flujo del ruido de corriente, pero esto es contrario a las necesidades previamente descritas. Se han usado inductores de separación, pero esta alternativa no ha sido mirada favorablemente por las varias agencias reguladoras, debido a las altas impedancias de tierra a altas frecuencias. Este dilema se puede resolver con el uso de un plano de tierra –con referencia a tierra– adecuadamente diseñado, el cual puede servir como piso de la computadora. Ver figura 4.51.

Una lámina bien delgada de metal tiene, como cosa asombrosa, una baja impedancia de superficie. Una lámina de 0.03 mm. de cobre, tiene una impedancia de superficie de 1 megaohmio por cuadrado aún a 10 megahertz. Desdichadamente, una lámina delgada de cobre es difícil de soportar, lo mismo que es difícil hacer conexiones sobre la misma.

Un compromiso práctico, es el uso de una rejilla de travesaños interconectados, como soporte de suelo y plano de tierra. La cerámica del piso, encaja dentro de los travesaños, permitiendo acceso debajo del piso.

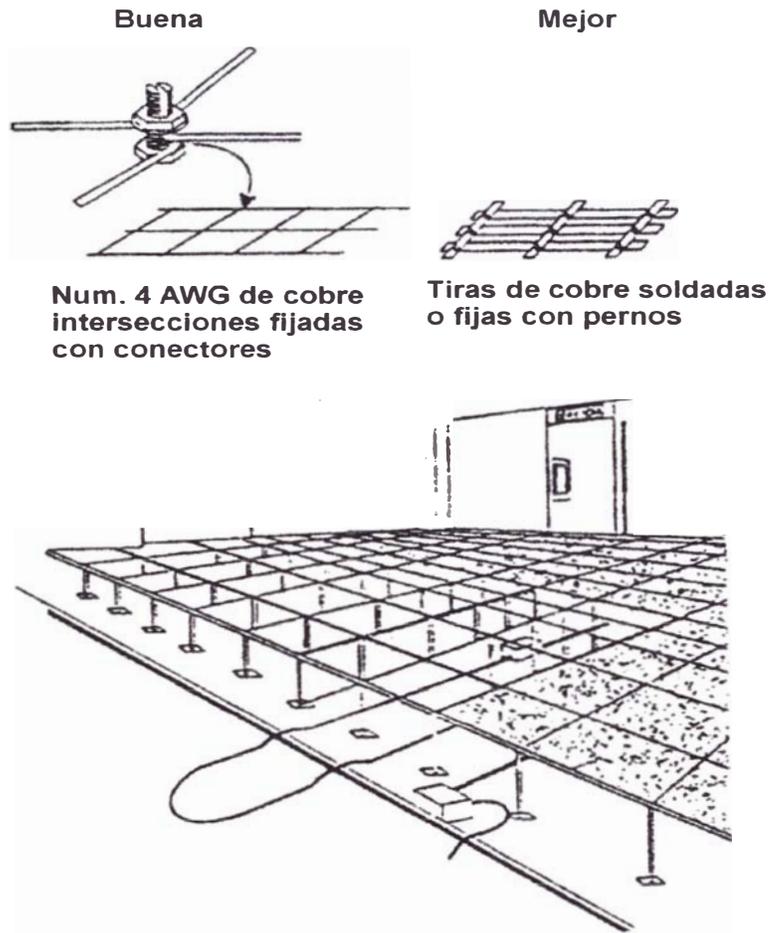


Fig. 4.51 Piso elevado, el cual forma un plano equipotencial.

Los travesaños constituyen la estructura, la cual puede soportar el peso del equipo pesado. Dos requisitos esenciales son: 1) travesaños atornillados -los soportes laterales de sujeción instalados entre los pedestales de soporte- y 2) miembros compatibles -estaño o zinc- de manera que puedan efectuarse conexiones de presión de baja resistencia.

Los travesaños son usualmente montados entre sí, a distancias de 0.6m. (2 pies) de centro a centro. Esta clase de espaciamiento, en forma de reja, podría aparentar una limitación a la operación de alta frecuencia del plano de tierra; sin embargo, el piso es adecuado para niveles no superiores a 30 megahertz. Si el diseño para la computadora es correcto, las señales de ruidos por encima de estas frecuencias son ignorados o filtrados. Ver figura 4.52

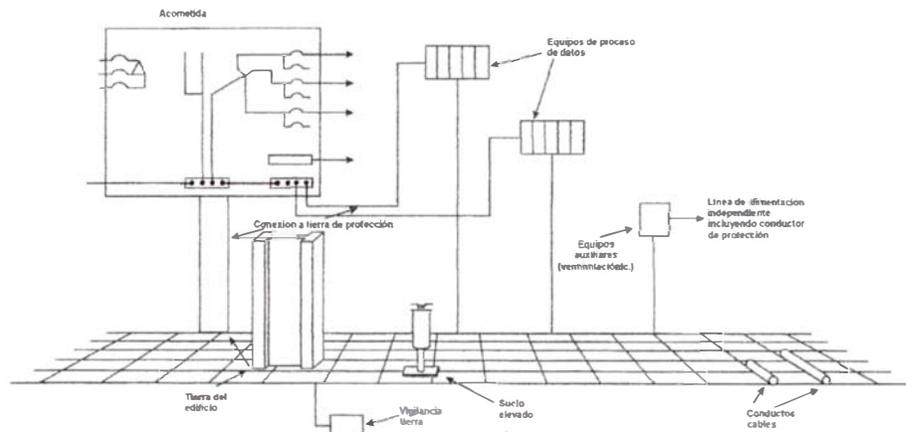


Fig. 4.52 Conexiones a tierra. Sala de Computadoras

Los travesaños en el piso de una computadora deben ser unidos con resistencias de valores inferiores a 1.0 millohmios. Esto es necesario para que la rejilla aparente una lámina delgada a bajas frecuencias. Estas conexiones de baja resistencia requieren atención detallada en su diseño e instalación.

Todas las conexiones deben usar superficies de metal limpias, mantenidas bajo presión cuando sean unidas. Cada conexión debe ser sellada, para prevenir oxidación. Las uniones deben resistir las variaciones de cargas y vibraciones del piso.

La protección contra rayos requiera una trayectoria directa a tierra, para cualquier conductor cerca al área del piso de la computadora. Una alternativa es proveer un anillo de tierra alrededor del edificio. Este anillo es conectado a tierra en forma múltiple, y es conectado al piso de la computadora y su periferia. Todos los elementos metálicos son unidos al anillo cuando cruzan el área del piso de la computadora. Esto incluye todos los conductos de cable, acero del edificio o demás conductos.

Cualquier corriente inducida por rayos, tomará una trayectoria hacia fuera del anillo y directamente a tierra. El piso de la computadora puede subir de potencial con elación al de tierra, pero el potencial de todos los conductores subirían juntos. Sin diferencia de potencial, no se generan daños.

El piso de la computadora debería ser fabricado de un material ligeramente conductivo, el cual se conecta al sistema de travesaños. Esta resistencia alta tiene dos propósitos. Provee un drenaje para la carga acumulada en la superficie del piso, y una fuente de impedancia para las descargas electrostáticas del personal, en el piso de la cámara de la computadora. Un valor típico puede ser 10^9 Ohms por cuadrado.

Todos los cables de señal que se desplazan por debajo del piso de la computadora, deberían desplazarse cerca de la superficie del plano de tierra. Esto reduce áreas de lazos cerrados y, al mismo tiempo, reduce los ruidos eléctricos inducidos. Los cables que salen de la protección del área del piso, deben seguir una extensión del plano de tierra, que esté correctamente unido a ese plano.

4.6.4 CONFIABILIDAD DE DISEÑO – NORMA UL 1449

Mientras que el precio puede ser una limitación importante, la confiabilidad debe ser la preocupación primaria. Los dispositivos de protección deben ser evaluados en su capacidad de sobrevivir múltiples transitorios, mientras protegen el equipo digital de comunicaciones en una oficina central.

Para la evaluación de supresores, es importante entender el estándar UL 1449. Este estándar fue implementado para certificar la seguridad de los supresores, cuando se instalan en un circuito, y las bases de comparación de voltajes de paso.

UL adoptó las pruebas de corriente recomendadas por el IEEE STD C62.41. La prueba consiste en aplica impulsos de 3000 amperios, $8 \times 20 \mu s$. Se determinó como mínima capacidad 330 V para un servicio de 120 V. El principio aceptado es que, mientras menor sea el voltaje, mejor es su capacidad. Una deficiencia de UL 1449, es que esto no refleja los voltajes de paso para dispositivos instalados. Por esto, se preparó el UL 1449 2da Edición.

A) NORMA UL 1449 2° EDICIÓN.

UL 1449 2° Edición trata sobre las deficiencias de las pruebas de UL 1449 para los

voltajes de paso, usando alambres para simular el dispositivo instalado en lugar del dispositivo inalámbrico. Las pruebas realizadas indicaron que los dispositivos con alambres, tienen un voltaje de paso mayor que los inalámbricos.

Un sumario de pruebas ha indicado lo siguiente:

- Como promedio, los voltajes de fijación más bajos, se obtienen con un módulo híbrido de MOV y SAD.
- Por UL 1449 (3,000 amperios, 8 x 20 μ - prueba con alambre), un módulo de MOVs desempeñó mejor que un módulo con SAD.
- Se encontró en las pruebas que la mayor diferencia de voltaje de fijación, entre un MOV y un SAD, es de sólo 83 volts.
- Se encontró en las pruebas que la diferencia entre el voltaje de paso más alto y más bajo, era consistente para ambos, el MOV y el SAD.

Hay que enfatizar que, además de las consideraciones de UL 1449, los supresores deben ser evaluados, de acuerdo a los parámetros del equipo a proteger. Los supresores nunca deben instalarse con más de dos pies de alambre de conexión, al centro de carga que suministra el equipo protegido.

Cuando sea posible, el supresor debe instalarse en la primera posición del interruptor, para maximizar todas las alimentaciones del interruptor. Protegiendo en la primera posición del interruptor, o usando un protector bidireccional asegura que, tanto los transitorios externos, como los internamente generados, son fijados en el centro de carga, y no pasan al equipo crítico, siendo protegido.

4. 7 REGLAS GENERALES DE SEGURIDAD.

La realización de trabajos eléctricos, incluso los más sencillos, puede ser un trabajo peligroso, sin no se adoptan las medidas de precaución adecuadas y/o se omiten reglas de seguridad elementales, con el fin de ganar tiempo. A continuación, se presentan algunas normas de seguridad básicas, que deben ser tomadas en cuenta al trabajar con instalaciones y aparatos eléctricos. Estas recomendaciones complementan las reglas generales de seguridad eléctrica enunciadas al comienzo de esta obra.

Nunca trabaje sobre circuitos o dispositivos energizados, ni asuma a priori, que están abiertos o desconectados. Compruébelo siempre con un instrumento en buen estado. El conocimiento de esta regla fundamental de seguridad puede salvar su vida y la de otras personas.

Utilice siempre dispositivos y equipos eléctricos que tengan los sellos de aprobación de organismos autorizados tales como UL, CSA o EIA. Estos sellos garantizan que el producto ha sido fabricado siguiendo estrictas normas de seguridad.

Fig. 4.53 Sellos de garantía que aseguran el cumplimiento de requisitos mínimos de seguridad de los equipos eléctricos.

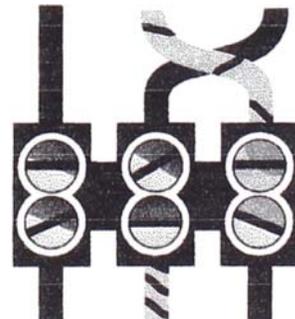


Asegúrese de comprender claramente cómo está alambrada su casa antes de realizar modificaciones o trabajos en el sistema eléctrico de la misma. Los procedimientos al respecto, descritos, asumen que la instalación eléctrica existente ha sido hecha correctamente.

No manipule indebidamente dispositivos de protección como fusibles, “breakers”, interruptores de fallas a tierra (GFCI’s), etc., ni los anule sin comprobar que todo funciona correctamente.

No utilice adaptadores que cortocircuiten o anulen las tomas de tierra, ni intercambie los conductores de fase y protección de los aparatos e instalaciones: podría ser fatal. Ver figura 4.54.

Fig. 4.54 El intercambio de los conductores de tierra y fase (vivo) anula el efecto de la protección a tierra.



Un error común es la inversión de polaridad, lo que simplemente significa que los alambres de corriente y del neutro están invertidos. Este es otro problema sutil, porque la mayor parte del equipo operará a la perfección con la polaridad invertida.

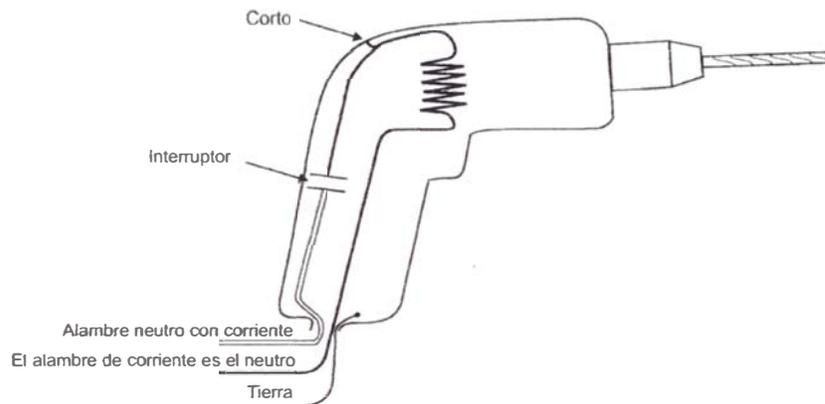


Fig. 4.55 Polaridad invertida. Un corto en la posición indicada en el circuito para este taladro hará que opere de continuo, independientemente del interruptor

Un riesgo es que como las terminales designadas (terminal negra, de corriente; blanca, neutro) están invertidas, la confusión podría provocarle un accidente a un usuario o técnico que no se lo espera. Otro riesgo es que un corto a tierra entre el interruptor y la carga podrían provocar que el equipo funcione indefinidamente, sea que el interruptor esté conectado o no (véase la figura 4.55)

Por último, si la polaridad está invertida, los receptáculos de los focos de luz pueden volverse peligrosos. En la figura 4.56 (a), un receptáculo bien alambrado muestra que la rosca es neutra. Pero en un receptáculo con polaridad invertida, como el de la figura 4.56 (b), los filetes expuestos de la rosca se vuelven vivos, y el botón, que está más protegido en el fondo del receptáculo, es el neutro.

Quizás el error de alambrado más común de todos es no conectarla terminal de tierra a un alambre de tierra, situación que se conoce como "tierra abierta" ó "tierra no continua". Este es otro error que fácilmente puede pasar inadvertido, por que el equipo que se conecte a estos circuitos funcionará normalmente. Pero si ocurre un corto accidental a la carcasa del equipo, el trabajador corre el riesgo de electrocutarse.



Fig.4.56 Riesgos de la polaridad invertida en el receptáculo de una lámpara : (a) Receptáculo alambrado correctamente; (b) Receptáculo con polaridad invertida.

Estos tres casos de mal alambrado no son los únicos errores que pueden cometerse, y ni siquiera son los más peligrosos. Pero dado que permiten que los circuitos eléctricos “ funcionen normalmente “ , pasan inadvertidos por usuarios mal informados del equipo conectado a dichos circuitos. Se cometen con frecuencia debido a que estos errores no impiden en lo inmediato el funcionamiento. Algunas verificaciones simples con probadores poco costosos pueden poner fácilmente de manifiesto estos problemas.

Nunca utilice tuberías de gas como tomas de tierra, debido a que pueden originar fácilmente explosiones e incendios. Si utiliza una tubería de agua como toma de tierra, asegúrese de que sea completamente metálica, y no tenga tramos plásticos que anulen su efecto.

Sea cuidadoso con el empleo de extensiones o cables de extensión. Su mal uso puede causar sacudidas, quemaduras e incendios. En particular, no pase extensiones a través de agujeros practicados en paredes, pisos, puertas o ventanas, ni debajo de alfombras. El tránsito continuo de la gente puede desgastar su aislamiento y originar un incendio.

Sólo un electricista calificado, autorizados por la compañía local de electricidad, puede realizar trabajos eléctricos en la acometida de una edificación, el contador, el sistema de distribución, y la caja de fusibles. Todas las instalaciones eléctricas - nuevas, adaptadas o ampliadas- deben cumplir con las normas de seguridad vigentes. Por tanto, es su obligación informarse al respecto. En los accidentes

eléctricos, se considera responsable a la última persona que ha trabajado en una instalación o reparado un equipo. Si tiene dudas, busque la asesoría de electricistas experimentados.

Utilice siempre la información de seguridad proporcionada por los fabricantes de equipos y artefactos eléctricos, para prevenir accidentes eléctricos derivados de su desconocimiento.

Cuando reemplace partes eléctricas o rearme un artefacto, siempre reinstale los cables de conexión de acuerdo al diagrama de alambrado. Asegúrese de que los mismos queden haciendo un contacto firme y no crucen sobre bordes afilados, ni pasen entre paneles, o por partes móviles que puedan causar un cortocircuito, u otro problema eléctrico. Reemplace siempre los alambres y cables desgastados, pellizcados o maltratados, antes de cualquier reparación.

Utilice siempre un circuito eléctrico separado, convenientemente aterrizado, para alimentar electrodomésticos grandes. Nunca los conecte a tomacorrientes asociados con circuitos de propósito general, o para artefactos pequeños. Tampoco los conecte mediante extensiones. No sustituya arbitrariamente interruptores, sensores y otros componentes eléctricos de aparatos e instalaciones por puentes de alambre o cable, ni los altere internamente.

En el trabajo de alambrado original, a menudo los electricistas cometen errores o usan prácticas antiguas que incrementan los riesgos. Una de las prácticas es “puentear” (conectar) el alambre tierra con el neutro.

En realidad, éste es un truco que funcionará y usualmente nadie lo discute, pero la práctica presenta riesgos. La figura 4.41 muestra el alambrado correcto de un circuito y revela que tanto el alambre neutro como el de tierra están conectados directamente a tierra.

Así, en la figura 4.57 en la que se muestra que la tierra ha sido puenteada con el neutro , el sistema de alambrado no utiliza el tercer cable.

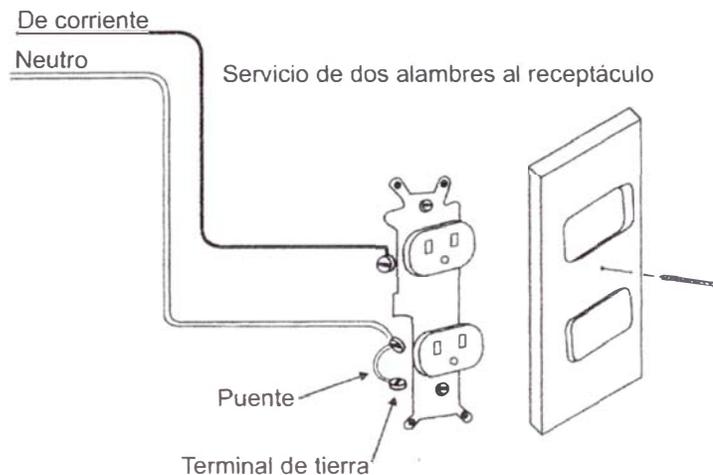


Fig. 4.57 Tierra puenteada con el neutro.

El riesgo principal de puentear la tierra con el neutro es que puede crear bajos voltajes en las partes expuestas del equipo. La caja o carcasa del equipo está conectada al alambre de tierra. Puesto que normalmente no fluye ninguna corriente por el alambre de tierra, es un método excelente para mantener el voltaje en la carcaza del equipo cerca de cero con respecto a tierra pero el neutro si lleva una corriente considerable. Con la ley de Ohm se puede calcular que esta corriente en el neutro puede hacer que la terminal del neutro tenga un bajo voltaje respecto a tierra, especialmente si el alambre del neutro debe recorrer una larga distancia de regreso a tierra hasta el medidor. Si el circuito lleva una corriente de 20 amperios y la resistencia del alambre neutro es de $\frac{1}{2}$ ohm, el voltaje en la carcasa del equipo se calcula será

$$V = I R = 20 \times \frac{1}{2} = 10 \text{ Voltios}$$

Este es un voltaje bajo, pero teóricamente es capaz de producir corriente mortal en el cuerpo, si las condiciones son exactamente las correctas (más bien, las equivocadas). Sin embargo el verdadero riesgo es que cuando una conexión suelta o corroída en alguna parte del circuito del neutro incrementa su resistencia quizás a cuatro y cinco ohms, hace que el voltaje aumente varias veces. Si tiene dudas, consulte a un electricista calificado. Utilice siempre partes de repuesto con las mismas especificaciones, tamaño y capacidad de las originales. No improvise al respecto.

En caso de presentarse un incendio de origen eléctrico, utilice únicamente

extintores de anhídrido carbónico o de Hallon, debidamente aprobados. El agua, por ser conductora de la electricidad, puede aumentar los riesgos y los daños. Evite su uso en estos casos.

Mantenga la calma en caso de recibir un shock leve, y sepárese lo más rápido posible del punto de contacto. Las reacciones instintivas de sobresalto y pánico originadas al recibir una descarga eléctrica, pueden originar que usted se caiga o golpee, sufriendo lesiones serias.

4.7.1 DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS PARA UN CENTRO DE COMPUTO.

Cable de tierra aislado, instalado y probado (máximo 3 Ohms)

Tablero de control y comando instalado en forma visible y accesible, probados sus componentes y con tensión en barras.

Rotulación adecuada de las llaves térmicas y demás elementos.

Regulador de tensión y su llave conmutadora instalados.

Es la línea de alimentación independiente y exclusiva para el sistema.

Verificación de la instalación, en forma visible y accesible de tomas previstas para cada unidad, incluidos los Modems.

Igual sección del neutro a sección de las fases.

Tomas monofásicas normalizadas.

Conexiones de las tomas monofásicas controladas.

Cables instalados en tubería metálica.

Instalación de alarmas para variación de tensión y/o frecuencia.

Instalación de receptáculos de material aislante, no metálicos.

4.7.2 DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD.

Interruptor de emergencia (aire acondicionado, energía eléctrica e iluminación), instalado cerca del acceso al local, y probado.

Dispositivos y equipos (alarmas, extintores, etc.) contra incendio, instalados y probados.

Verificación de instalaciones y/o equipos generadores de interferencias electromagnéticas (hornos eléctricos, de radio frecuencia, RX, etc.) cercanos.

Salidas de emergencia adecuadas e identificadas. Tienen barra antipánico.
Verificación de que no exista sobre la superficie del piso material metálico expuesto.
Protección contra peligro de incendio desde locales adyacentes o del exterior.
Luz de emergencia a baterías
Procedimiento de evacuación en caso de incendios. Adiestramiento y simulacros con el personal.
Instalación de respiradores (primeros auxilios) cerca de los accesos, para casos de inundación total por CO₂ o Hallon.
Instalación de máscaras de oxígeno junto a las salidas de emergencia.
Instalación de compuertas de cierre en los conductos de inyección.
Apertura de las puertas del Centro de Cómputo, todas hacia afuera.

4.7.3 TABLEROS DE DISTRIBUCION

El tablero de distribución eléctrica debe ser diseñado, para ser incorporado en sistemas donde se requiere un monitoreo, y control constante de la alimentación eléctrica, ya que ésta puede causar daños a los equipos que están siendo alimentados, debido a la sensibilidad de ellos, a fluctuaciones de tensión, interferencias eléctricas, etc.

El equipo debe brindar protección contra fluctuaciones de tensión en la red, distribuyendo energía dentro del rango establecido por el usuario, a cada uno de los circuitos que alimenta el tablero de distribución eléctrica.

El tablero de distribución eléctrica y control, debe estar provisto de dispositivos de control de voltaje, los cuales serán activados, bloqueando el paso de la energía en caso de fallas (sobre y sub-tensión). Asimismo, debe tener incorporados filtros de protección contra interferencias RFI, EMI y picos de tensión, además de contar con un conmutador de transferencia manual para interconexión del grupo electrógeno.

El tablero debe contar, como mínimo, con dos tarjetas de control del voltaje; éstos pueden trabajar alternadamente, en caso de falla de uno de ellos, y el cambio se realizará mediante un selector.

Para apagar todo el sistema en casos de emergencia y/o encendido del mismo, se debe contar con un interruptor del tipo "push button ON/OFF". A la salida de los circuitos, pueden conectarse estabilizadores de voltaje u otro equipo de respaldo, teniendo presente una potencia máxima total, según la máxima demanda calculada. Para la medición de la tensión de entrada y salida, el sistema debe poseer un voltímetro, con su respectivo conmutador.

4.7.3.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

a. Sistema de Control de Voltaje

El sistema de protección con circuitos de control, debe permitir bloquear automáticamente la carga, cuando esté fuera del rango permisible, haciendo activar un dispositivo, el cual controla el paso de la energía, y los focos de señal NORMAL y FALLA. Este sistema debe estar protegido contra cortocircuitos, mediante un fusible.

b. Distribución eléctrica

La distribución de la carga que se encuentra dentro del rango permisible, debe ser enviada a través de los interruptores térmicos correspondientes a cada circuito, activando éstas a sus respectivos focos de señal.

Esta distribución eléctrica está protegida de posibles cortocircuitos que se puedan producir por fallas externas o internas.

c. Dispositivos de Señalización

Los focos de señal NORMAL y FALLA indican el estado en que se encuentra el tablero de distribución eléctrica y control. Asimismo, los focos de señal de cada uno de los circuitos, indican la alimentación de cada uno de los circuitos respectivos.

Para efectuar las lecturas de los voltajes de entrada y salida, se deberá contar con un dispositivo analógico o digital.

d. Dispositivos auxiliares de monitoreo

El selector de tres posiciones: A-O-B deberá encontrarse conectado a través de la posición "A" con una tarjeta de control, y a través de la posición "B" con la otra tarjeta de control, dejando la posición "O" neutra. Esta selección de posición "A" o "B", permite cambiar una tarjeta inoperativa, por una operativa, en caso de ocurrir un cortocircuito u otra falla. Además, el equipo debe estar diseñado con otro dispositivo auxiliar, el cual será activado jalando un "switch" en caso de emergencia que, por su conexión, anulará completamente todo el sistema. Este será activado sólo en el caso que persista la falla, que ocurra algún cortocircuito, o algún caso de emergencia no prevista.

4.7.4 SISTEMA DE SEGURIDAD Y PREVENCIÓN DE INCENDIO

De acuerdo a la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (USA), es necesario implantar las siguientes medidas para la protección de la sala de computadoras:

Instalar aparatos de detección (ionización, detector de humo), y localizarlos en: el techo, el falso piso y el ducto de retorno de aire.

Todo el sistema de detección debe estar conectado al anunciador principal de alarma contra fuego.

Se debe instalar una alarma audible en el interior de la sala de computadoras.

Instalar una pre-alarma (alerta) para evacuación del personal del área.

El propósito de los detectores de humo e ionización, es detectar fuego en sus más incipientes etapas, usualmente mucho antes que la llama aparezca, o que la temperatura aumente en forma apreciable.

Estos detectores reaccionan ante los productos de combustión, visibles o invisibles. Cuando dichos productos entran en el detector, se perturba el balance entre las dos cámaras de ionización, y un circuito electrónico interpreta este cambio como una alarma, transmitiendo una señal a la unidad de control. Al mismo tiempo, se

enciende un indicador luminoso ubicado, ya sea sobre el detector, o en una ubicación remota.

4.7.5 PROTECTORES CONTRA DESCARGAS ELECTRICAS

Los equipos protectores son circuitos compuestos por uno o varios componentes diferentes, cuya misión consiste en absorber la energía inducida por una descarga eléctrica, en la línea de señal de instrumentos, o en la de alimentación, sin perjuicio eléctrico para el equipo que protegen. Entre las cualidades que deben reunir estos protectores, deben figurar:

- Máxima protección al equipo, con respuesta rapidísima.
- No interferencia del nivel de protección con la operación normal del instrumento, pero siendo inferior al máximo nivel soportado del mismo.
- No producción de pérdidas del nivel de señal, o consumo de alimentación.
- Autorestauración: pasada la causa del disparo, deben seguir en posición de vigilancia, sin necesidad de reanimarlos.
- Posibilidad de soportar descargas eléctricas directas.
- Posibilidad de seleccionar fácilmente el nivel de protección deseado.
- Bajo costo, pequeño tamaño y libres de mantenimiento.

El nivel de protección debe ser especificado, de manera que se eviten interferencias a la normal operación del instrumento. El nivel de disparo del elemento protector denominado V_p debe, por esta causa, ser mayor del 30 por 100 del más alto valor de operación normal del equipo. De la misma manera, este nivel V_p deberá ser inferior del máximo nivel soportado por el instrumento, denominado V_w (este valor de V_w es facilitado por el suministrador para entradas, salidas y alimentaciones, en tensión referida normalmente a una onda de la forma 10 x 20 useg).

El margen de protección del equipo es definido por:

$$\left(\frac{V_w}{V_p} - 1 \right) \times 100 = \%$$

y es recomendable que sea mayor del 20 por 100.

Existen en el mercado varios suministradores de protectores contra descargas

eléctricas. Hay que especificar con mucha atención y siempre, que se van a utilizar en una única línea a proteger, ya sea alimentación de corriente alterna, corriente continua, o señal de proceso. Estos equipos, de gran calidad de diseño, no suelen dar la funcionalidad exigida, de no tenerse en cuenta técnicas apropiadas de tierras y cableado.

Los protectores deben ser instalados en los dos extremos de la línea, para proteger el emisor y receptor de la inducción del impulso, que se propagaría en ambas direcciones desde el punto de intersección, siendo a veces estos protectores diferentes, como consecuencia de la diferencia en el valor V_w de la señal considerada como salida en el equipo emisor, a la de entrada en el receptor.

Las recomendaciones para disponer de un sistema que sea inmune a las descargas eléctricas deben consistir en:

- Protecciones convencionales contra descargas eléctricas, como terminales aéreos metálicos, terminales de tierra, etc.
- Sistema adecuado de cableado y tierra, con conductos o pantallas llevadas a tierra.
- Selección de protectores adecuados, después de un cuidadoso análisis del circuito del lazo de instrumentación, localización, tipo de tendido y señales normales y máximas de cada aparato.

Un breve estudio de los componentes básicos normales de estos protectores, nos ayudará a entender su forma de funcionamiento, y los requisitos que deben satisfacer sus instalaciones, para lograr su objetivo.

4.7.6 SISTEMAS DE PROTECCIÓN FRENTE A DESCARGAS ATMOSFERICAS

El problema de las sobre tensiones en las líneas de telecomunicaciones es muy grave, debido al hecho de que las líneas aéreas están expuestas directamente a las influencias de las descargas atmosféricas.

Se puede establecer una clasificación de niveles de protección contra los efectos de las descargas atmosféricas, tanto directos como indirectos: el nivel primario se

encuentra constituido por las varillas pararrayos, sistema de interconexión y conductores bajantes, lo mismo que la puesta a tierra; el nivel secundario es el de nivel de equipo o sistema, y el terciario es en el ámbito de tarjeta o circuito integrado.

Para la clasificación de sistemas más utilizados en el ámbito mundial, se encuentran tres sistemas de protección contra rayos, que son los más usados:

Sistema de conducción

Sistema de atracción

Sistema de disipación.

De los tres sistemas, el único sistema aprobado por los tres grupos mencionados, es el sistema de conducción, también llamado la Barra de Franklin, o el sistema llamado la Jaula de Faraday.

Los sistemas de conducción y atracción tratan de atraer la descarga del rayo. Para lograr esto, estos sistemas proveen una trayectoria de descarga de baja impedancia a tierra, manteniéndola lejos de la estructura que protegen.

El sistema de conducción usa varillas de pararrayos, y el sistema de atracción usa: o un isótopo radioactivo, o un iniciador iónico para atraer el rayo. El sistema de disipación usa una gran cantidad de pequeños puntos metálicos, para crear un campo pasivo ionizado para tratar de descargar continuamente el campo eléctrico creado por la tormenta. La idea es la de mantener este campo en el área del disipador, para que no alcance el punto de centelleo, y así prevenir una descarga a la estructura protegida.

De los tres sistemas, el sistema de conducción permanece, hasta el presente, como el único sistema aprobado.

A) DISEÑO E INSTALACIÓN

El método más antiguo y comúnmente usado como protección, es el sistema de

conducción. Antenas (pararrayos) en la estructura del techo (figura 4.58), el cual acepta descargas de rayos en su área inmediata. Estas son ubicadas en puntos altos, para formar un sistema interceptor completo.

A: 15 metros de espacio máximo entre las varillas pararrayos

B: Se permite 45 metros como la máxima longitud sin conexión alguna

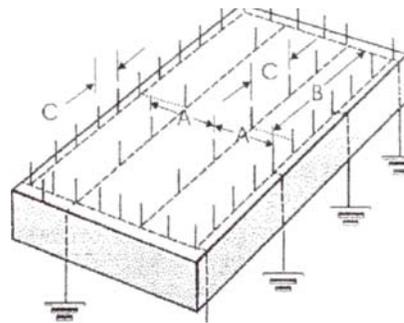
C: El espacio máximo permitido entre varillas pararrayos, en los bordes del edificio, es de 6 m ó 7.6m, de acuerdo a la altura de las varillas pararrayos.

Los terminales son de 26 cm a 1.5 m (10 a 60 pulgadas) o más de altura. Estos deben estar espaciados a distancias © no superiores a 6 m (20 pies) entre sí, si su altura es menor de 0.6 m (24 pulgadas).

Terminales de 0.6 m a 1.5 m (24 a 60 pulgadas) no pueden ser espaciadas más de 7.5 m (25 pies) entre sí.

Una antena de captación debe ser colocada a una distancia no superior a 0.6 m (24 pulgadas) de las esquinas y otros objetos de filo. Todas las chimeneas, ventiladores, astas de banderas, torres, tanques de agua y otras proyecciones, deben estar protegidas con uno o más terminales. Los terminales de chimeneas y torres de emisión deben estar revestidas de plomo, para resistir la corrosión.

Fig. 4.58 Varillas pararrayos en un techo plano.



Datos sobre estudio de rayos indican que los centelleos destructivos del rayo, tienen una distancia igual o superior a 45 m (150 pies). El contorno de la zona protegida por una de las antenas de captación estándares, se define como un área bajo un arco, que tiene un radio máximo de 45 m (150 pies), y es tangente a la tierra,

mientras que toca la punta a de una antena, como muestra el arco Número 1 en la figura 4.59.

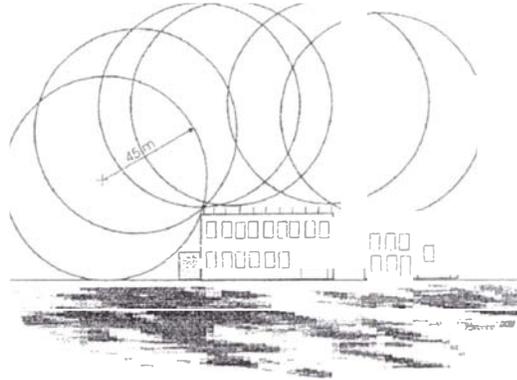


Fig. 4.59 Esfera rodante - Area de Protección

Esto es importante para estructuras que exceden 45 m (150 pies) de altura, ya que tienen que instalarse antenas adicionales, a niveles intermedios apropiados, lo mismo que a nivel del techado o azotea.

Como un ejemplo, para un edificio de 90 m (300 pies) de altura, la circunferencia del arco Número 2, en la figura 4.59, descansa sobre el terminal de nivel intermedio, y es tangente a la superficie vertical del terminal superior. El arco Número 3 descansa sobre dos o más terminales. El área debajo de los arcos está protegida por el sistema.

En el diseño de un sistema, una plantilla a escala de 45 m (150 pies) de radio, que represente las dimensiones de la vista lateral del dibujo, puede ser puesta sobre el contorno del edificio, para determinar áreas del techado, o zona de protección.

Los orillos del techo en contacto con la plantilla requieren un terminal de protección. Para conveniencia, un ángulo de líneas de proporción, dos-a-uno, puede ser usado para determinar los requerimientos de protección para los edificios de altura inferior a 7.5 m (25 pies). Un ángulo de líneas de proporción uno-a-uno, puede ser usado para edificios de 7.5 m a 15 m (25 a 50 pies) de altura.

El techado de edificios altos requiere terminales en la mitad del techo, espaciados

entre sí a distancias hasta de 15 m (50 pies). Todas las estructuras que se extienden sobre la protección de los terminales del techo, tales como la cabecera de ascensores, grandes unidades de ventilación y otras, deben estar equipadas con sus propias antenas de protección.

Las antenas deben conectarse a una rejilla de conductores interconectados, la cual se conecta a los bajantes o conductores de entrada, que se extienden hasta el suelo, y se conectan a los electrodos de tierra apropiados.

Los electrodos de tierra pueden ser varillas de tierra individuales, o un anillo conductivo enterrado alrededor del perímetro del edificio, o ambos. Todos los componentes de este sistema son de cobre, aluminio anodizado, o acero inoxidable. El sistema de tierra para rayos no debe ser el sistema electrodo de tierra del edificio, pero debe estar conectado a éste (código 250-140 y FNP Núm.2).

Todos los elementos metálicos, conectados a tierra o aislados, que se encuentran colocados en el techo, o en las paredes exteriores cerca de los conductores de entrada, deben estar unidos a los conductores de entrada, debido a la posibilidad de un centelleo.

Un centelleo es un arco causado por la diferencia de potencial entre el conductor de entrada, y un elemento metálico. Esta unión elimina la diferencia de potencial, y previene el daño causado a estos componentes por el flujo de alta corriente. Los conductores deben ser conectados con herrajes no corrosivos, para obtener una conexión eléctrica continua, sin la necesidad de soldadura. Deben utilizarse sujetadores no metálicos, para prevenir el efecto de obstrucción eléctrica o choque.

Los terminales aéreos o antenas de un edificio típico industrial, o comercial, requieren dos trayectorias a tierra. Los elementos primarios metálicos del techo, fuera de la zona de protección de las antenas del techo, deben ser unidos al sistema del techo, por medio de dos trayectorias de conductores a tierra.

Elementos secundarios metálicos -aquellos que no pueden recibir la descarga directamente- pueden ser unidos al sistema de conductores, con un conductor

secundario, de tamaño pequeño.

Los conductores de perímetro deben formar un lazo cerrado en el techo, con los conductores de entrada o bajantes, espaciados a distancias no superiores 30 m (100 pies) alrededor del perímetro. Ya que las esquinas del edificio son los puntos de mayor probabilidad para una descarga, se aconseja ubicar los conductores de entrada en estos puntos. Los conductores deben dirigir directamente a los terminales de tierra.

B) IMPEDANCIA DEL SUELO A RAYOS

El código eléctrico demanda como máxima impedancia a tierra un valor de 25 Ohms. Para la industria de computadoras, equipos computarizados y la industria de telecomunicaciones, se exige ir más allá de los requerimientos del código, y se recomienda, y algunos fabricantes de equipos exigen, un valor de 5 Ohms o menor. En el caso de áreas con alta incidencia de rayos, se recomienda una resistencia del sistema de tierra de 1 Ohm o menor.

Las protecciones estructurales modernas usan el sistema de blindaje conocido como Jaula de Faraday, el cual facilita la supresión de sobre voltajes. A menudo se instalan supresores de voltajes transitorios, independientemente de los sistemas de protección para las descargas directas de rayos, para la protección de equipos electrónicos sensitivos contra sobre tensiones. Tal protección debe ser considerada como parte integral del sistema de protección contra rayos.

A la entrada de servicio de la planta, y en los alimentadores de los edificios, debe proveerse protección contra sobre voltajes. Puede aplicarse protección adicional contra sobre voltajes a equipos específicos, tales como motores grandes, equipo de procesamiento de datos, computadoras de control de proceso, y la electrónica médica basada en microprocesadores.

C) RECOMENDACIONES PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES

Las normas internacionales dan ciertas recomendaciones para la selección del

material de los conductores de tierra de la sección, y de la puesta en operación, siendo en general las siguientes:

Los materiales deben ser metálicos, de suficiente conductividad, resistencia mecánica e idóneos, para el medio ambiente de la instalación, considerando principalmente el efecto corrosivo; pueden ser hilos, cables, placas o varillas.

En particular, para la conexión a tierra de los apartarrayos, no se deben usar como conductores de tierra, alambres o cables de acero, o cables con alma de acero, debido a que aumenta el efecto inductivo.

Se prohíbe usar como conductores de tierra elementos de transmisión de cualquier género (conductores, bayonetas, cadenas, etc.), así como partes metálicas que pueden ser usadas para trabajos eventuales.

Además de los dispersores, se puede usar como elemento de dispersión a tierra, un malla constituida por alambre o cable de cobre.

4.8 FALLAS A TIERRA EN LAS INSTALACIONES

En esta Sección, se tratará sobre las Fallas a Tierra, los tipos de falla y detectores de Fallas a Tierra. También se hará referencia a las sobre tensiones oscilatorias, que causan fallas intermitentes, y a la detección de sistemas incorrectos neutro-tierra. Además, se comparará las resistencias de la conexión entre el protector y el sistema de tierra, de las que dependerá que la instalación sea eficaz o ineficaz. Finalmente, se calculará la impedancia de fallas a gran distancia y a corta distancia, en comparación con la resistencia de conexión a tierra.

4.8.1 FALLAS A TIERRA

El término Falla se usa en la materia de tierra. Una conexión a tierra no previene una falla, pero una puesta a tierra correcta puede limitar el tiempo de la falla, limitando la duración del peligro. Una falla puede ocurrir en el lado de la línea, o en el dispositivo de protección frente a sobrecorriente en el servicio.

Como regla general, el lado de la línea del equipo de servicio es protegido solamente por el sistema de potencia de la compañía de luz y fuerza, y su sistema de protección, el cual no va a aclarar una falla a tierra en el lado de la línea del servicio sin causar daños. La única protección frente a sobrecorriente, se encuentra en el primario del transformador de la central eléctrica.

Por lo tanto, en el lado de la línea del equipo de servicio, se debe pensar en términos de una continuidad efectiva, de tal forma que, cuando una falla ocurra, se aclare tan pronto como sea posible. Aquí se tratará sobre lo que pasa en el lado de la carga, y no lo que pasa en el lado de la línea del dispositivo de seguridad.

4.8.2 TIPOS DE FALLA

Las fallas se encuentran divididas en dos tipos: directas o de fase, y fallas a tierra (Ver figura 4.60).

A) FALLA DIRECTA

Una falla directa puede ocurrir por una conexión de fase a fase, también referida como falla de "línea a línea". Una conexión de fase a neutro puede también ser considerada como una falla directa. Estas son conexiones accidentales.

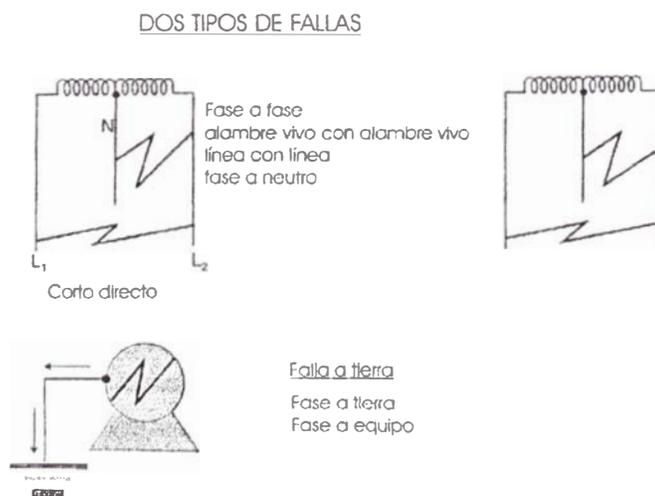


Fig. 4.60 Dos tipos de fallas: Corto circuito directo y Falla a tierra.

B) FALLA A TIERRA

Una falla a tierra ocurre cuando un conductor de fase es conectado a tierra. Puede ser una conexión accidental entre un conductor de fase, y cualquier superficie conectada a tierra, tal como una cubierta metálica. Una falla a tierra circulará aproximadamente un 75% de la corriente de una falla directa (fase a fase). Cuando una falla a tierra ocurre, el conductor de tierra del equipo proporciona una importante función: proporciona una trayectoria de baja impedancia para la corriente de falla, de tal forma que se complete el circuito y se active el dispositivo de protección (interruptor automático de seguridad), limitando el tiempo de la falla.

Si una sobrecarga continúa por un período de tiempo, pueden ocurrir daños, y también una falla. Básicamente, el término sobrecarga no incluye corrientes de falla. Sobrecorriente es una corriente excesiva, causada por un cortocircuito, o una falla a tierra. Las fallas eléctricas causan condiciones de sobrecorriente. Algunos dispositivos de sobrecorriente son diseñados para proteger sólo contra sobrecargas. El dispositivo de protección frente a sobrecorriente puede ser diseñado para protección contra sobrecargas y sobrecorriente.

El código reconoce la posibilidad de un corto directo, o de una falla a tierra, y requiere que ambos tipos de fallas sean considerados al seleccionar el dispositivo de protección frente a sobrecorriente, para la interrupción de corriente de falla.

Las corrientes de falla a niveles de miles de amperes son posibles y probables en un sistema eléctrico bien diseñado. Esto puede producir voltajes extremos en el punto de falla, si no se usa un conductor a tierra de suficiente calibre. Esta corriente de corto circuito debe ser interrumpida inmediatamente por un fusible de protección, o por interruptores automáticos, por razones de seguridad del personal.

Los mismos fusible e interruptores automáticos que protegen contra las fallas de línea-a-neutro, protegen también contra las fallas línea-a-tierra. Por consiguiente, la trayectoria de retorno a tierra debe tener una impedancia suficientemente baja. Esta impedancia no debe limitar la falla de corriente, a un valor que pueda prevenir el disparo inmediato del dispositivo de protección.

Para proteger vidas humanas, la corriente de falla debe tener un valor menor de 6 veces la del interruptor, o la corriente de capacidad del fusible.

Los conductos eléctricamente continuos, y los conductores de tierra del equipo, deben ser conectados directamente a la barra neutral de la fuente de potencia, en el punto de unión neutral-tierra. Este punto neutral-tierra puede estar en el secundario de un transformador, a la salida de un motor – generador, o en el equipo de servicio de entrada del edificio.

La conexión entre el punto de falla -conducto metálico o cubierta- y el punto de unión neutral-tierra, no debe permitir que la corriente de falla fluya a través de una trayectoria que incluya un sistema electrodo de tierra, u otra conexión de alta resistencia.

Una conexión de alta resistencia puede también ser provista a través de un herraje de conducto, cuando el conducto es usado como la trayectoria de seguridad a tierra. En caso que la trayectoria de corriente de falla sea a través de dos estacas o varillas de tierra, la resistencia de estas tierras no permitiría el disparo de los interruptores automáticos.

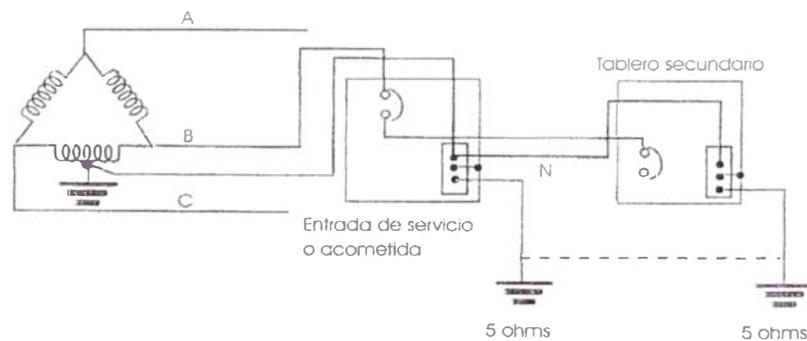


Fig. 4.61 Tierras separadas.

Una resistencia bastante baja que, para una barra enterrada a tierra, puede ser 5 Ohms (25 Ohms es aceptado por el Código Nacional Eléctrico). Dos de estas tierras conectadas en serie, de 5 Ohms cada una (figura 4.61), proveen una impedancia de trayectoria de retorno de 10 Ohms. Cuando esta tierra es alimentada por una fuente de voltaje de 120 volts, esta situación de falla de tierra, permitiría el

flujo de sólo 12 amperes de corriente. Esta corriente no es suficiente para accionar el disparo del interruptor de más bajo límite de capacidad de operación de uso común: un interruptor de 15 amperes

4.8.3 FALLAS DE SISTEMAS CONECTADOS A TIERRA

La figura 4.62 ilustra un servicio de 240 volts, monofásico. La compañía de luz y fuerza tiene el centro del devanado del transformador, conectado a tierra. No existe un conductor conectado a tierra en el tablero principal de servicio. Este servicio, supuestamente, está destinado a suministrar cargas que no requieren el neutro. Sin embargo, puede notarse que el conductor del electrodo de tierra y el puente de unión principal, son instalados para mantener todas las cubiertas a un potencial de tierra.

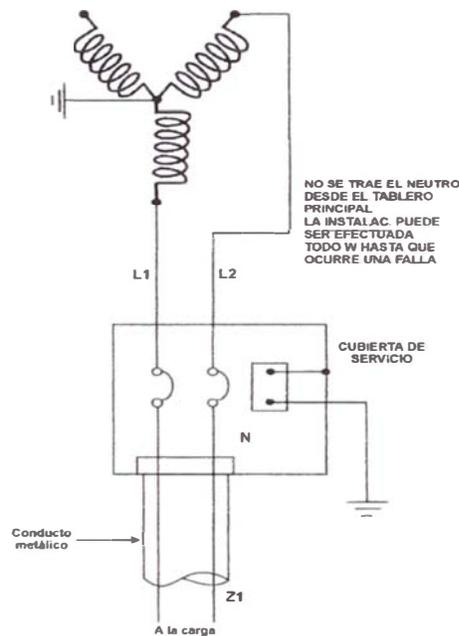


Fig. 4.62 Servicio sin el conductor conectado a tierra.

La instalación puede efectuarse cuando el conductor conectado a tierra, o conductor neutro, no se trae al equipo de servicio, y no habrá indicios de problemas: los motores funcionarán perfectamente y el servicio desempeñará sus funciones correctamente. Todo trabajará perfectamente hasta que ocurra una falla.

La figura 4.63 ilustra un corto directo, una falla de línea a línea. La corriente total tiene que circular a través del interruptor de circuito, lo que proporciona la

oportunidad al interruptor, de dispararse. En el caso de un corto directo, la corriente sólo tiene un trayectoria para viajar, y esto incluye circular a través de los interruptores de circuito. Existe una trayectoria de baja impedancia para el flujo de corriente. La baja oposición al flujo de corriente permitirá que el interruptor de circuito, tal como un interruptor de 15-20 amperes, se dispare, eliminando el peligro, sin la oportunidad de causar ningún daño.

Cuanto más sea la capacidad del interruptor, mayor será la corriente a ser interrumpida, y mayor la posibilidad de daños antes de que el interruptor se dispare. La falla existirá hasta que el dispositivo de protección opere. Sin embargo, los efectos posteriores de la falla pueden continuar. Por ejemplo, un incendio continuaría, una vez que se inicie.

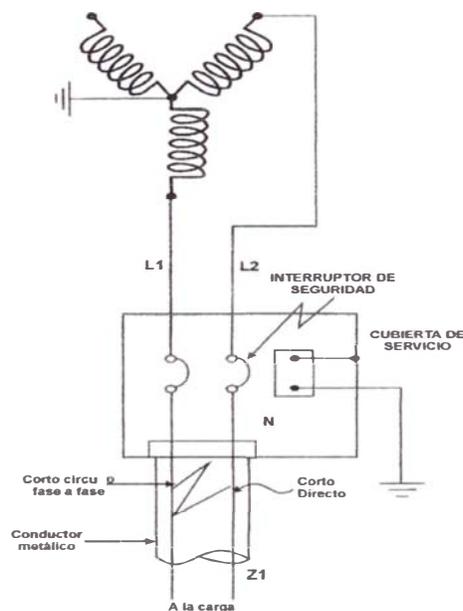


Fig. 4.63 Servicio de dos alambres sin neutro. Condición de falla o corto circuito fase a fase.

La figura 4.64 ilustra lo que sucede cuando existe una falla de fase a tierra. La situación es considerablemente diferente. Esta figura muestra una falla en el conduit; es para propósitos de ilustración únicamente.

En realidad, la falla puede ocurrir en cualquier equipo, o en cualquier lugar, en el lado de la carga del equipo de servicio. En esta situación, la trayectoria de baja impedancia al interruptor de sobre corriente, no existe.

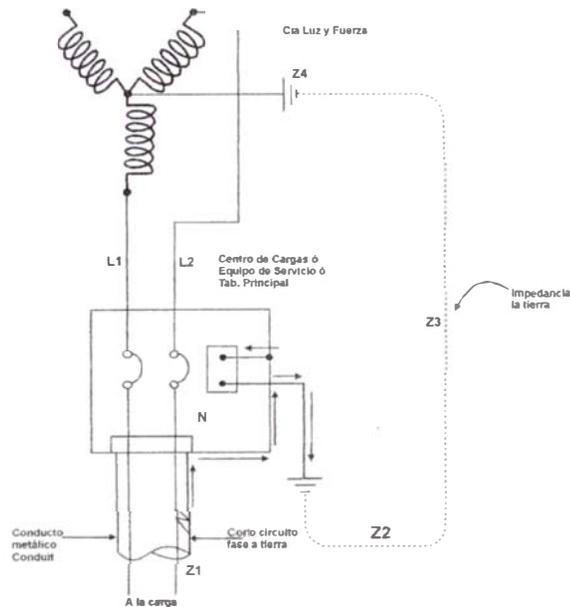


Fig. 4.64 Servicio de dos alambres sin neutro o conductor conectado a tierra, corto circuito o falla a tierra. Trayectoria de la corriente de falla.

Cuando este tipo de falla ocurre, existe un número de oposiciones (impedancias) al flujo de corriente, las cuales deben tomarse en consideración. Estas impedancias se ilustran en la figura 4.65

Z1 = Impedancia del conduit o canalización

Z2 = Impedancia de tierra o suelo

Z3 = Impedancia de la trayectoria del electrodo de tierra

Z4 = Impedancia de la trayectoria del electrodo de tierra de la compañía de luz y fuerza.

Puede notarse en la figura 4.65, como todas las impedancias se encuentran conectadas en serie. La impedancia total es la total oposición al flujo de corriente.

Cuanto más alta la impedancia, menor la corriente, y menor la probabilidad de que el interruptor aclare la falla, y el peligro dura más tiempo. Esta falla puede durar por algún tiempo, o hasta que se produzca suficiente daño, y tenga como resultado una falla de fase a fase.

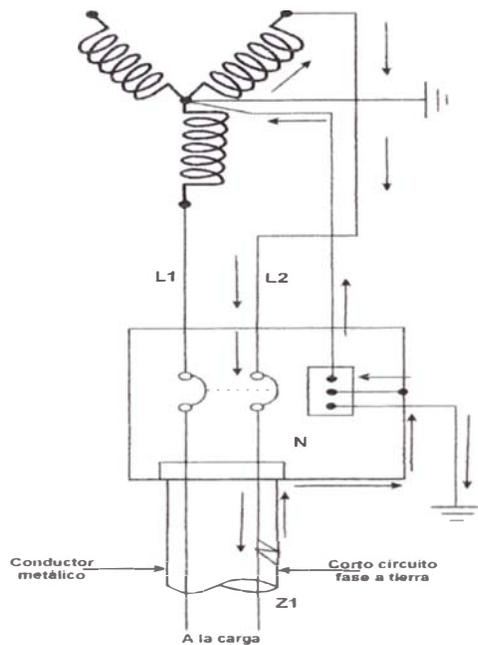


Fig.4.65 Servicio de dos alambres con neutro. Condición de falla a tierra.

En este caso, la corriente de falla circula desde el punto de la falla, a través del conduit metálico, por medio de la cubierta metálica del servicio, al puente de unión y, de este punto, a la barra de tierra. De allí circulará en el conductor del electrodo de tierra, al electrodo de tierra y, de allí, por medio de la tierra al electrodo de tierra de la compañía de luz y fuerza. De este punto, al conductor del electrodo de tierra de la central eléctrica, por medio del transformador a L2, a través del dispositivo de protección contra sobrecorriente, y de regreso a la falla.

En la figura 4.65 se trae el conductor conectado a tierra, desde el transformador de la central eléctrica, al equipo de servicio, aunque no sea necesario. Esto está de acuerdo con el código. Una vez más todo trabaja perfectamente, hasta que ocurre una falla. De ocurrir una falla de fase a fase, ocurriría lo mismo, como se mostró anteriormente en la figura 4.63.

La figura 4.66 ilustra una falla a tierra, con el conductor conectado a tierra traído al servicio de entrada, y conectado a la barra de tierra. Ahora existe otra trayectoria para el flujo de corriente, una trayectoria de baja impedancia. Es fácil ver en el diagrama que las dos impedancias $Z3$ y $Z4$ se eliminan. Estas eran las impedancias más altas en el circuito de tierra anterior (figura 4.65). La impedancia

se reduce un 90%.

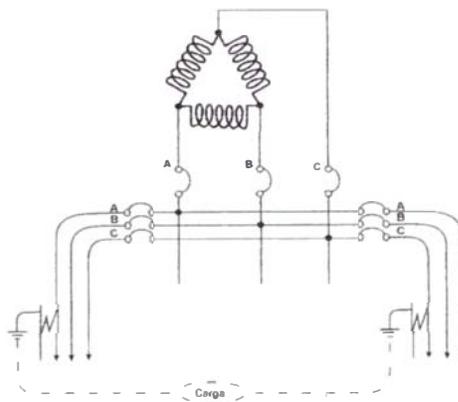


Fig. 4.66 Sistema no conectado a tierra. Falla de alta impedancia, interruptor no se activa.

Una de las preguntas hechas a menudo es: ¿Existirá un flujo de corriente a través del electrodo de tierra y la tierra, cuando el conductor conectado a tierra es traído al servicio de entrada? Esto se puede contestar con otra pregunta: ¿Es la trayectoria a tierra un trayectoria en paralelo? La respuesta es: sí. Existe siempre un flujo de corriente en todas las ramas de un circuito en paralelo, por lo tanto, existirá algún flujo de corriente a través de la tierra. Sin embargo, la cantidad de corriente que tomará la trayectoria de tierra es pequeña, debido a la gran impedancia.

También es importante notar que cuando ocurre el corto circuito, la corriente de falla retorna por el conductor conectado a tierra, por el transformador de la compañía de luz y fuerza, cerrando el circuito y activando los interruptores de circuito. Durante la falla, el conductor conectado a tierra, se convierte en conductor de tierra del equipo. La figura 4.66 ilustra un sistema trifásico, tres hilos con una falla a tierra en ambas fases, fase A y C. Existe una gran distancia en la trayectoria de tierra, desde la falla en la fase A, a la falla en la fase C y, bajo estas condiciones, existe gran probabilidad de que el interruptor no opere.

4.8.4 DETECTORES DE CORRIENTE DE FALLA

El código no hace recomendaciones, pero proporciona información que, a menudo, se toma como recomendaciones o sugerencias. Las notas recomiendan que se

usen detectores de tierra, con sistemas no puestos a tierra, para protección adicional.

La figura 4.67 ilustra el uso de luces, como detectores de fallas a tierra. Cada conductor de fase se conecta a una lámpara, y luego a tierra. Cuando una fase se conecta a tierra creando una falla a tierra, completa el circuito a tierra. Esto proporciona un circuito a través de la lámpara, la lámpara se enciende, y esto indica que existe una falla a tierra, y tiene que hacerse algo para aclararla

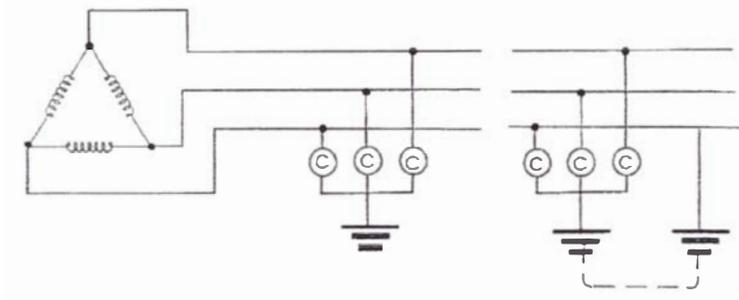


Fig. 4.67 Sistema no conectado a tierra. Detectores de falla.

Una puesta a tierra no prevé que las fallas ocurran. Una puesta a tierra correcta, sin embargo, ofrece una trayectoria de baja impedancia para el flujo de corriente, y limita el tiempo de peligro causado por la falla.

4.8.5 LIMITACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES OSCILATORIAS

Las sobretensiones oscilatorias ocurren generalmente en puntos de falla, a través de alta resistencia, que no derivan inmediatamente en falla franca:

En cables subterráneos deteriorados

En alimentadores aéreos, con aislamiento contaminado.

La condición para el inicio del fenómeno es la reducción puntual del aislamiento de una fase, y la existencia de un recorrido de alta resistencia hacia tierra.

Las corrientes de falla son inferiores a la corriente de carga, y no son detectadas por la protección.

La frecuencia de oscilación está dada por la capacitancia fase-tierra, y la inductancia de la fase.

Produce envejecimiento del aislamiento, interferencias en las comunicaciones, mal funcionamiento de aparatos electrónicos.

Cuando el sistema tiene el neutro conectado a tierra, la falla rápidamente se hace franca. En caso contrario, no.

4.8.6 FORMA DE DETECTAR UN SISTEMA INCORRECTO NEUTRO-TIERRA

La relación del voltaje entre los conductores neutrales y de tierra, puede ser una buena indicación de la calidad del sistema a tierra. En una instalación de alto grado, todas las conexiones del alambrado son de mínima resistencia, y su número, es mantenido en un mínimo. Tampoco existen corrientes que fluyen en el conductor de conexión a tierra.

Si el conductor neutral porta una corriente, habrá un voltaje generado entre el neutral, y los conductores de tierra. Este voltaje representa una caída de voltaje en el conductor neutral. Con una unión apropiada neutral-tierra, si no existe corriente en el conductor de conexión a tierra, una medida tomada entre el conductor neutral y el conductor a tierra -por ejemplo (en un receptáculo o en un sub-panel)- es una medida del voltaje desarrollado, desde ese punto, en el conductor neutral, al punto de unión neutral-tierra.

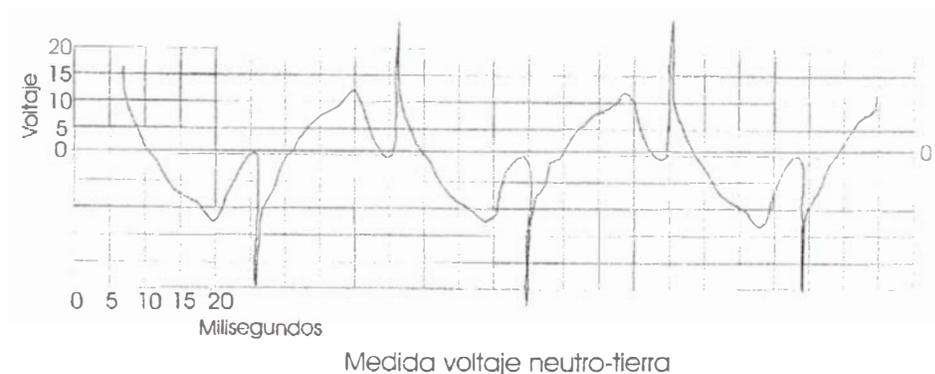


Fig. 4.68 Medida de voltaje neutro-tierra en un osciloscopio.

El voltaje es el producto de la cantidad de corriente (amperes), en el conductor neutral, multiplicada por la resistencia del conductor neutral, más cualquier otra conexión resistiva entre el punto de unión neutral-tierra, y el punto de medición. La figura 4.68 representa los resultados de unión incorrecta neutral-tierra. Pueden observarse, en el oscilógrafo, picos de energía que exceden 23 volts de pico a pico.

Ejemplo:

Se asume que un conductor neutral consiste de 30 m (100 pies) #12AWG de cobre, y acarrea una corriente de 5 amperes de corriente sinoidal. El voltaje de neutral a tierra será la impedancia de 30 m (100 pies) de #12 alambre de cobre (0.17 Ohms usando la columna "Z efectiva a 0.85 PF (ver Figura 4.69 , tabla 9 del código NEC -USA), multiplicada por la corriente (5 amperes).

$$V=I \times Z = 5 \times 0.17 = 0.85 \text{ VOLTS RMS}$$

Si se toma una medida actual en el punto 30 m (100 pies, usando una lectura actual RMS del voltímetro) y el resultado del valor del voltaje es demasiado alto (superior a 2 volts por ejemplo) puede existir: o una falla de conexión de alta resistencia, o una conexión floja en el conductor neutral. Si el resultado del valor de voltaje es muy bajo (menor de 85 milivolts, por ejemplo), el neutral y tierra pueden estar tocándose (en corto), en algún punto más cercano al neutral que al punto de unión neutral-tierra. Se llega a esta conclusión si se asume que la corriente ha sido también medida y es conocida, en nuestro caso, 5 amperes.

Un voltaje alto neutral-tierra puede causar interrupción de las operaciones, y errores de datos a la electrónica, cuando este ruido de voltaje se acopla en la fuente de potencia cc. La carga cc entregada por la fuente de suministro, puede tener condensadores de desacople, conectados entre la tierra de voltaje cc de referencia, y el conductor de conexión a tierra de voltaje de CA, para reducir el ruido de salida cc.

Ohms al neutro por 1000 pies																
Calibre AWG	XL (Reactancia) para todos los alambres		Resistencia de C.A. Para Alambres de Cobre sin revestimiento			Resistencia de C.A. Alambres de Aluminio			Zlectiva a 85% FP para Alambres de Cobre sin revestimiento			Zlectiva a 85% FP para Alambres de Aluminio			Calibre AWG	
	PVC	AL	ACERO	PVC	AL	ACERO	PVC	AL	ACERO	PVC	AL	ACERO	PVC	AL		ACERO
	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits	Conduits		Conduits
14	.058	.073	3.1	3.1	3.1	---	---	---	2.7	2.7	2.7	---	---	---	14	
12	.054	.058	2.0	2.0	2.0	2.2	2.0	3.2	1.7	1.7	1.7	2.6	2.6	2.6	12	
10	.050	.053	1.2	1.2	1.2	2.0	2.0	2.0	1.1	1.1	1.1	1.6	1.6	1.6	10	
8	.042	.055	3.78	0.78	0.79	1.3	1.3	1.2	0.65	0.65	0.70	1.1	1.1	1.1	8	
6	.051	.051	0.43	0.43	0.49	0.21	0.51	0.21	0.44	0.45	0.46	0.71	0.72	0.72	6	
4	.045	.050	0.31	0.31	0.31	0.41	0.41	0.41	0.25	0.25	0.30	0.48	0.46	0.46	4	
3	.047	.053	0.25	0.25	0.25	0.40	0.40	0.40	0.28	0.24	0.24	0.37	0.37	0.37	3	
2	.046	.057	0.19	0.20	0.20	0.32	0.32	0.25	0.19	0.19	0.20	0.30	0.30	0.30	2	
1	.046	.067	0.15	0.10	0.16	0.25	0.25	0.25	0.16	0.16	0.16	0.24	0.24	0.25	1	
1/0	.044	.055	0.12	0.13	0.12	0.20	0.21	0.20	0.13	0.13	0.15	0.19	0.20	0.20	1/0	
2/0	.043	.054	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.11	0.11	0.11	0.15	0.15	0.16	2/0	
3/0	.042	.052	0.077	0.082	0.075	0.13	0.13	0.13	0.085	0.082	0.094	0.13	0.13	0.14	3/0	
4/0	.041	.051	0.052	0.057	0.053	0.10	0.10	0.10	0.074	0.076	0.080	0.11	0.11	0.11	4/0	
250	.041	.052	0.052	0.067	0.054	0.035	0.050	0.035	0.050	0.070	0.073	0.094	0.098	0.10	250	
300	.041	.051	0.044	0.049	0.045	0.071	0.075	0.072	0.055	0.053	0.056	0.062	0.058	0.058	300	
350	.040	.050	0.038	0.043	0.039	0.051	0.055	0.053	0.053	0.064	0.060	0.078	0.077	0.080	350	
400	.040	.049	0.033	0.038	0.036	0.054	0.059	0.055	0.048	0.059	0.056	0.066	0.071	0.073	400	
500	.038	.048	0.027	0.032	0.029	0.046	0.048	0.043	0.048	0.048	0.050	0.057	0.051	0.054	500	
600	.039	.045	0.038	0.025	0.025	0.038	0.041	0.033	0.040	0.044	0.047	0.051	0.055	0.052	600	
750	.035	.043	0.018	0.024	0.021	0.025	0.034	0.034	0.036	0.040	0.043	0.045	0.045	0.052	750	
1000	.037	.043	0.016	0.013	0.018	0.023	0.027	0.025	0.032	0.035	0.040	0.035	0.042	0.045	1000	

Fig. 4.69 Tabla 9 del Código NEC - USA

Los fabricantes de equipos electrónicos especifican un máximo voltaje neutral-tierra para sus respectivos equipos. Pueden estar especificados en RMS volts, como por ejemplo 0.5 Vrms o, en términos de pico a pico, por ejemplo 2 Vpp. El diseño del sistema de distribución para cualquier equipo electrónico, debe tener en consideración, la última cifra mencionada, y el tamaño del cable neutral tendrá que escogerse, para asegurar una caída de voltaje de menos de 2 volts, de pico a pico, en el punto de instalación del equipo. 2 volts pico a pico es igual a 0.7 volts RMS.

$$V_{pp} = V_{rms} \times 2.828$$

$$V_{rms} = V_{pp} / 2.828$$

$$V_{rms} = 2 / 2.828 = 0.7 \text{ V}$$

Para el siguiente ejemplo, la medida de 0,85 Vrms se convierte en:

$$V_{pp} = 0.85 \times 2.828 = 2.4 \text{ V}$$

Si los 30 m (100 pies) de conductor Numero 12 AWG está acarreado su corriente límite, 20 amperes, el voltaje de pico a pico del equipo sería:

$$V_{pp} = 20 \times 0.17 \times 2.828 = 9.6 \text{ V}$$

En este caso, la impedancia debe ser reducida para que produzca un voltaje neutral-tierra aceptable. Para lograr un voltaje neutral-tierra no superior a 2 Vpp en nuestro ejemplo, la impedancia debe ser menor que:

$$Z = 2 / (20 \times 2.828) = 0.035 \text{ Ohms}$$

Existen tres posibilidades para reducir la impedancia a 0.035 Ohms:

1. Aumentar el tamaño del conductor neutral y, por lo tanto, reducir la impedancia. De la Tabla anterior, encontramos que necesitaríamos instalar un # 4 AWG neutral, el cual tiene una impedancia de 0.029 Ohms por cada 30 m (100 pies).
2. Disminuir la longitud de corrida del alambre. 6m (20 pies) de # 12 AWG tendría una impedancia total del 0.034 Ohms. Esto se puede hacer instalando una "fuente derivada separadamente" cerca al equipo. Las posibilidades serían, un transformador aislador, un transformador de reducción, una unidad de distribución de potencia (con un transformador adentro), etc.
3. Usando las combinaciones 1 y 2.

4.8.7 IMPEDANCIA DE FALLAS A GRAN DISTANCIA, EN COMPARACION CON LA RESISTENCIA DE CONEXION A TIERRA

Para una falla a tierra con resistividad de 10,000 Ohms-cm, entre puntos muy separados respecto a la penetración P de 850 m, calcúlese la impedancia de falla. El conductor es de 1.27 cm (1/2 pulgada) de radio, con una resistencia de 0.54 Ohms/km. Compárese esta resistencia con la resistencia de conexión a tierra recomendada.

Procedimiento de cálculo:

1. Calcúlese la impedancia

La impedancia $Z = r_c + 0.063 + j0.18 \log_{10}(P/GMR)$, donde Z es la impedancia compleja por kilómetro, r_c es la resistencia del conductor por kilómetro, 0.063 es la

resistencia por kilómetro del supuesto radio subterráneo equivalente de 30 cm de conductor equivalente (el cual, para precisión ingenieril, es independiente de la resistividad del terreno), P es la profundidad de penetración del supuesto conductor de terreno, y GMR es el radio geométrico medio del conductor de las mismas dimensiones que $P.GMR = \sqrt{R_1 R_2} = \sqrt{(0.127)(0.30)} = 0.062$ m. Sustituyendo en la expresión para la impedancia, se encuentra $Z = 0.6 + j0.74\Omega$.

2. Compárese la impedancia de línea larga con la resistencia de conexión a tierra

Si la resistencia de conexión a tierra se mantiene en el 1 Ohm recomendado para aplicaciones industriales pesadas, entonces la impedancia de línea será del mismo orden que la impedancia de conexión a tierra. Nótese la necesidad de mantener la resistencia de conexión a tierra, por abajo de 5 y 25 Ohms, para aplicaciones de trabajo más ligero.

4.8.8 IMPEDANCIA DE FALLAS A CORTA DISTANCIA, EN COMPARACION CON LA RESISTENCIA DE CONEXION A TIERRA

Úsese la fórmula estándar para reactancia de dos conductores paralelos, para examinar la reactancia inductiva X de un conductor, y un retorno de tierra metálico. El radio de cada conductor es 1.27 cm.

Procedimiento de cálculo:

1. Calcúlese X para diversos espaciamientos

Se usa la fórmula $X = 0.34 \log_{10} \sqrt{D_{12} / GMR} \Omega / km$, donde D_{12} es la distancia entre el eje de los dos conductores, y GMR es el radio geométrico medio de los dos conductores, en las mismas dimensiones que $D_{12}GMR = \sqrt{(1.27cm)(1.27cm)} = 0.0127m$. Obtenemos la siguiente Tabla:

2. Compárese la caída reactiva con la resistencia del terreno

Puesto que aún con espaciamento de 30 m entre el conductor normal y el retorno de tierra metálico, la resistencia por unidad de longitud, es solamente $0.51 \Omega/km$, resulta claro que la resistencia del terreno del elemento de conexión a tierra, domina la impedancia de falla, para fallas de líneas cortas en todas las resistencias prácticas de conexión a tierra.

Tabla B

D_{12} como múltiplo de $0.0127mGMR$	$D_{12}m$	Ω/km
10	0.13	0.17
100	1.3	0.34
1000	13	0.51

Tabla 4.10

CAPITULO V

CÁLCULO, DISEÑO DE LA ESTRATIFICACIÓN DE SUELOS Y COSTOS DE UNA PUESTA A TIERRA

5.1 INTRODUCCIÓN.

Considerando las características que normalmente presentan los suelos, en virtud a su propia formación geológica a lo largo de los años, el modelamiento en capas estratificadas, esto es en estratos horizontales, han producido excelentes resultados comprobados en la práctica; la figura 5.1 muestra un suelo con una estratificación en capas horizontales.

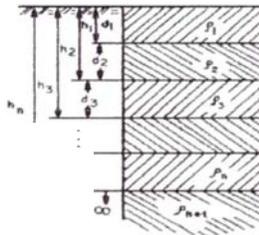


Fig. 5.1 Suelo estratificado en capas horizontales

Con base a una gráfica ρxa que se obtiene siguiendo el detalle del punto 5.4, se representarán métodos de Estratificación de Suelos entre los cuales tenemos:

- Método de estratificación de dos capas.
- Método de Pirson.
- Método Gráfico de Yokogawa , etc.

5.2 MEDICION POR EL METODO DE WENNER

El método utiliza un equipo llamado Telurómetro o MEGGER, instrumento de medida de Resistividades que a su vez posee 4 terminales, dos de corriente (1 y 4 ó

C1 y C2) y dos de voltaje o potencial (2 y 3 ó P1 y P2).

El aparato a través de su fuente interna hace circular una corriente eléctrica "I" entre las dos astas externas que están conectadas a los terminales de corriente C₁ y C₂. Ver figura 5.2.

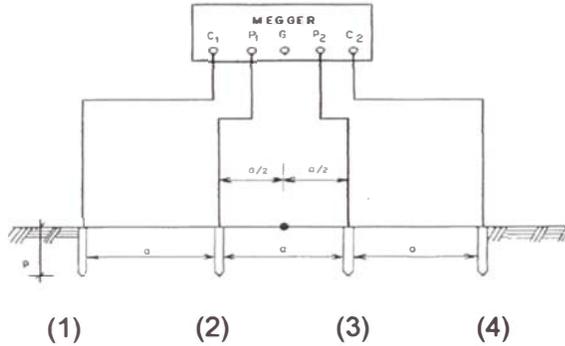


Fig. 5.2 Método de Wenner

R = Lectura de resistencia en Ω en el MEGGER, para una profundidad "a".

"a" = espaciamento de astas clavadas en el suelo.

p = profundidad de astas clavadas en el suelo.

Las dos astas internas o centrales están ligadas a los terminales P₁ y P₂ de potencial. Así el aparato procesa internamente e indica una lectura o valor de resistencia eléctrica de acuerdo con la expresión siguiente:

$$R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho}{\Delta\pi} \left[\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad \dots (5.1)$$

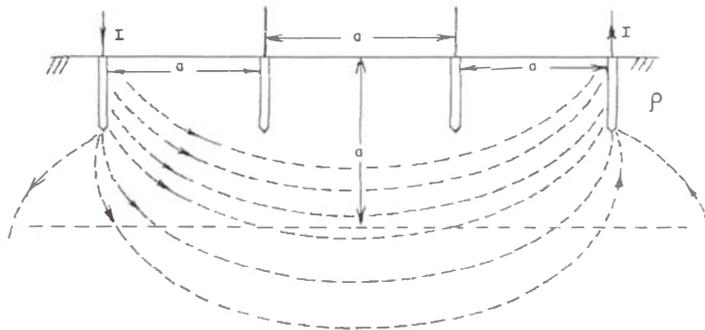


Fig. 5.3 Penetración de corriente a una profundidad "a"

El método considera que prácticamente el 58% de distribución de la corriente que pasa entre las astas externas ocurre a una profundidad igual al espaciamiento entre las astas. Ver figura 5.3.

La corriente atiende a una profundidad mayor con una correspondiente área grande de dispersión, teniendo en consecuencia, algún efecto que pueda no haber sido considerado. Por tanto, para efecto del Método de WENNER considérese que el valor de la resistencia eléctrica leída en el aparato es relativa a la profundidad "a" del suelo.

Las astas usadas en el método deben tener aproximadamente 50 cm de longitud, con diámetros entre 10 a 15 mm. El material deberá estar debidamente limpio y sin herrumbre.

5.3 CUIDADOS EN LA MEDICIÓN.

Durante la medición deberá observarse adecuadamente los puntos que se describirán a continuación:

- Las astas deberán estar siempre alineadas.
- Las astas deberán estar igualmente espaciadas.
- Las astas deberán estar clavadas en el suelo a una misma profundidad, recomendándose a 20 ó 30 cm de la superficie.
- El aparato de medición debe ser posicionado simétricamente entre las astas.
- Las astas deben estar bien limpias, principalmente exentas de óxidos y grasas para posibilitar un buen contacto con el suelo.
- La condición del suelo (seco, húmedo, etc.) durante la medición deberá ser anotada así como el período dentro del año (estación, etc.).
- No deben ser hechas las mediciones sobre condiciones atmosféricas adversas, teniéndose en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.
- No dejar que animales o personas extrañas se aproximen a la zona de trabajo.
- Se debe utilizar calzado y guantes de aislamiento para ejecutar las mediciones.

- Verificar el estado del aparato antes de empezar el trabajo, inclusive la carga de las pilas o baterías.

Para una determinada dirección deben ser usados los siguientes espaciamientos recomendados:

Espaciamiento "a" (m)	Lectura R(Ω)	Cálculo Resistividad $\rho(\Omega \times m)$
1		
2		
4		
6		
8		
16		
32		

Tabla 5.1 Espaciamientos recomendados por el método

Algunos métodos de Estratificación de Suelos necesitan más lecturas para pequeños espaciamientos con el efecto de posibilitar la determinación de la resistividad de la primera camada del suelo.

La dirección de las mediciones que deben tener en la superficie a desarrollar el Aterramiento (o aterramiento) dependerá entre otros factores de:

- La importancia del Equipamiento a proteger (SSEE, Redes del Centro de Cómputo, Equipamiento Médico e Industrial de última generación, etc.)
- La dimensión del Sistema de Aterramientos (o enterramientos).
- La variación acentuada en los valores medidos para los respectivos espaciamientos.

Para un único punto de Aterramiento, esto es, para cada posición del aparato; deben ser efectuadas medidas en tres direcciones con ángulos de 60° entre sí. Ver figura 5.4

Este es el caso de Sistemas de Aterramiento pequeños, con un único punto de ligazón a los Equipamientos como: Redes de Centros de Cómputo, Transformadores, Reguladores de Tensión, Seccionadores, etc.

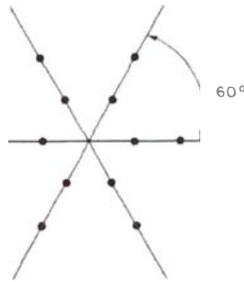


Fig. 5.4 Direcciones de los puntos de medición.

En el caso de SSEE, Patios de Llaves o Estaciones de mayor envergadura de Potencia Eléctrica; se deben efectuar medidas en varios puntos, cubriéndose todo el Área de Malla pretendida.

El ideal es efectuar varias medidas en puntos de direcciones diferentes, mas si por algún motivo se deben usar el mínimo de direcciones, entonces se debe por lo menos efectuar las mediciones en una dirección indicada como sigue:

- En la dirección de las Líneas de Alimentación.
- En la Dirección del Punto de Aterramiento de Fuentes de Alimentación.

5.4 CONFIABILIDAD DE LAS MEDICIONES.

Hechas las mediciones, un análisis de los resultados debe ser realizado para que los mismos pasen a ser evaluados en relación a ser aceptados o no. Esta evaluación es efectuada de la siguiente manera:

- 1°) Calcular la Media Aritmética de los valores de Resistividad Eléctrica para cada espaciamiento “ (a_j) ” adoptado, esto es

$$\rho_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i (a_j) \quad \dots (5.2)$$

$$\forall \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, q \\ i = 1, \dots, n \end{matrix}$$

donde:

$\rho_M (a_j)$ = Resistividad media para el respectivo espaciamiento “a_j”.

n = número de mediciones efectuadas para el respectivo espaciamento "a_j".

$\rho_i(a_j)$ = valor de la i-ésima medición de resistividad en un espaciamento "a_j".

q = número de espaciamientos empleados.

- 2°) Proceder al Cálculo de la Desviación de cada medida en relación al valor medido como sigue:

$$\delta = \rho_i(a_j) - \rho_M(a_j) \quad \dots (5.3)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$j = 1, \dots, q$$

OBSERVACIONES:

- a1°) Se deben despreciar todos los valores de resistividad que tengan un desvío mayor al 50% en relación a la media; esto es (Relación de Desvíos) :

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} * 100 \geq 50\% \quad \dots (5.3.1)$$

- a2°) Si el valor de la resistividad tiene un desvío menor al 50% ; ese valor será aceptado como representativo de una medición puntual.

- a3°) Si es observada la ocurrencia de un acentuado número de medidas con desvíos encima del 50%, se recomienda efectuar nuevas medidas con una nueva tabla, se efectúa el recálculo de las medias aritméticas de las resistividades remanentes.

- 3°) Con las resistividades medias para cada espaciamento, se tiene entonces los valores definitivos y representativos para trazar la curva "ρ" × "a" necesaria de procedimiento de las aplicaciones de los métodos de estratificación de suelos.

5.5 EVALUACIÓN DE MEDICIONES DE CAMPO.

Espaciamiento "a" (m) (a _j)	Medidas de Resistividad Eléctrica				
	1	2	3	4	5
a ₁ : 2	340	315	370	295	350
a ₂ : 4	520	480	900	550	490
a ₃ : 6	650	580	570	610	615
a ₄ : 8	850	914	878	905	1010
a ₅ : 16	690	500	550	480	602
a ₆ : 32	232	285	196	185	412

Tabla 5.2 Mediciones de campo de varias direcciones y espaciamientos (a_j)

Se desarrolla una tabla indicando los desvíos relativos a cada espaciamiento respecto de su Resistividad Media para ver la homogeneidad de la data (Tabla 5.2).

Se encuentran 2 casos cuyo desvío en porcentaje es mayor al 50% con relación a la Resistividad Media de cada espaciamiento (a_j), por lo que se recalcula la resistividad media en dichos espaciamientos, anulando la medida que sobrepasa dicho porcentaje obteniéndose a su vez una nueva resistividad para a₄ y a₆ tales como a'₄ y a'₆: (ver Tabla 5.2.1).

Espaciamiento "a" (m) (a _j)	Desvíos Relativos (%)					Resistividad Media ρ×m	Resistividad Media Recalculada
	1	2	3	4	5		
A ₁ : 2	1,7	5,6	10,77	11,67	4,79	334	334
a ₂ : 4	11,56	18,36	<u>53,06</u>	6,46	16,66	588	510 *
a ₃ : 6	7,43	4,13	5,78	0,82	1,65	605	605
a ₄ : 8	6,73	0,28	3,66	0,70	10,81	911,4	911,4
a ₅ : 16	22,25	11,41	2,55	14,95	6,66	564,4	564,4
a ₆ : 32	11,45	8,77	25,19	29,38	<u>57,25</u>	262	224,5 *

Tabla 5.2.1 Resistividades Medias Recalculadas (*)

$$a'_4 = (520 + 480 + 550 + 490) / 4 = 510 \quad (*)$$

$$a'_6 = (232 + 285 + 196 + 185) / 4 = 224,5 \quad (*)$$

las demás medidas serán mantenidas porque satisfacen la relación de homogenización (5.3.1).

∴ Los valores representativos del suelo medidos para este caso puntual y debidamente homogenizados de acuerdo a la relación de desvíos, son los indicados en la Tabla 5.3 .

RESISTIVIDAD DE SUELOS ($\Omega \times m$)Espaciamiento "a" (m)	Resistividad ($\Omega \times m$)
2	334
4	510
6	605
8	911,4
16	564,4
32	224,5

Tabla 5.3 Medidas de Resistividades Homogenizadas

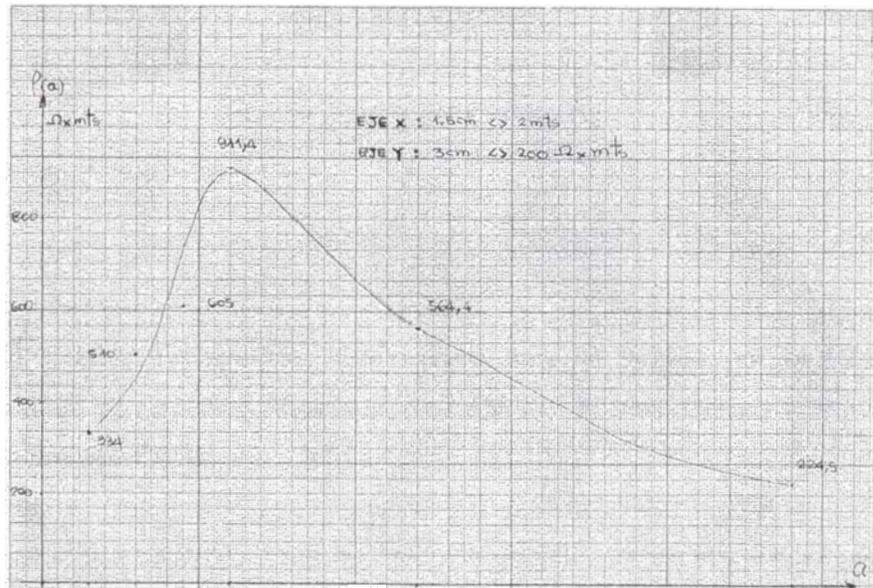


Fig. 5.5 Gráfico de resistividad vs distancias homogenizadas.

5.6 MODELAMIENTO DE LA ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO EN CAMADAS.

Para trabajar con las teorías de electromagnetismo de suelos empleando el método de Resistividad, se crea un campo eléctrico mediante dos tomas de tierra puntuales A y B.

A través de estas tomas de tierra (electrodos) denominadas de EMISIÓN (electrodos de corriente) , se introduce en el terreno una corriente eléctrica de intensidad " I " , de cualquier fuente de corriente continua ; por ejemplo de una batería de elementos secos, de un generador mecánico de corriente continua, etc. Entre dos puntos del terreno y con ayuda de dos tomas de tierra M y N de medición (electrodos de voltaje), situadas en estos puntos y mediante el correspondiente instrumento de medida, se miden las diferencias de potenciales que surgen.

La disposición relativa de las tomas de tierra A, B, M y N, que forman el dispositivo tetrapuntual (figs 5.6) se determina por el carácter del problema geológico que se quiere resolver , en este caso por el Método de WENNER (fig. 5.2 y disposición "a" de la fig 5.6) ; ya que existen otros métodos como el de Schlumberger, Lee, azimutal, etc.

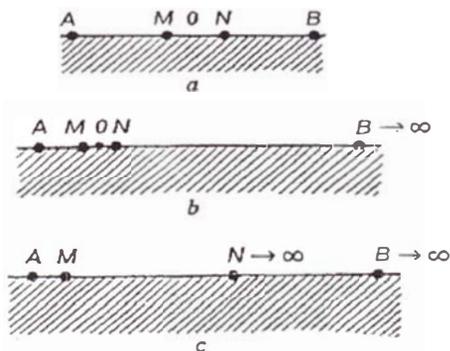


Fig. 5.6 Gráfico Tetrapuntual. Dispositivos para el trabajo por el Método de Resistividad. a) Simétrico tetraelectródico AMNB ; b) trielectródico AMN, $B \rightarrow \infty$; c) bioelectródico AM, $N \rightarrow \infty$, $B \rightarrow \infty$.

Lo que se busca es la diferencia de Potencial entre las tomas M y N colocadas en el Plano de superficie del terreno de un semiespacio homogéneo ocupado por un medio de resistividad " ρ " en este caso en un medio homogéneo es decir de

resistividad constante.

Sin embargo, en la realidad los terrenos donde se desea diseñar una protección para las Redes de Centro de Cómputo, redes para Equipo de Telecomunicaciones, equipamiento industrial de última generación y / o equipamiento eléctrico de fuerza; no tienen comportamiento homogéneo sino, que los terrenos son heterogéneos y en este caso sólo se obtiene una cierta magnitud arbitraria que tiene las dimensiones de una resistividad. A esta magnitud arbitraria se ha denominado “resistividad eléctrica aparente” y se designa por “ ρ_a ”.

Por consiguiente, en el caso general

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \dots (5.4)$$

En el caso particular de un medio homogéneo (las medidas de resistividades salen aproximadas) la resistividad aparente coincide con la resistividad verdadera (ver Fig. 5.7 (a))

$$\rho_a = \rho \quad \dots (5.5)$$

de la fórmula 5.4 se deduce que ρ_a no depende de la intensidad de la corriente “ I ” que se envía al terreno, ya que la variación de la citada intensidad de corriente “ I ” origina otra variación proporcional de la diferencia de potencial ΔV .

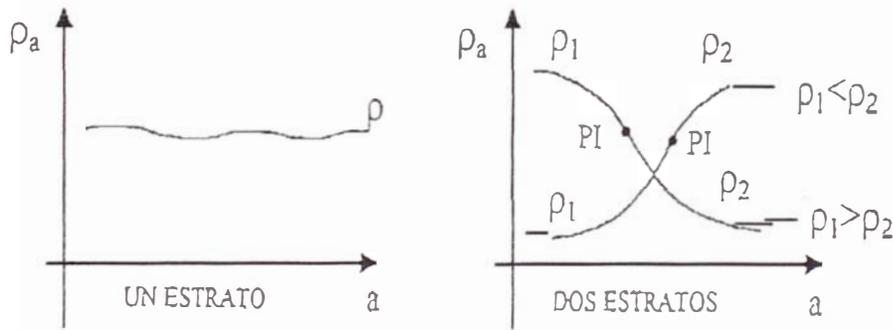


Fig 5.7 Donde se visualizan gráficamente terrenos de un estrato de resistividad homogénea a) y de dos estratos respectivamente de resistividad heterogénea b).

La magnitud de la Resistencia Aparente depende de la estructura del corte geoelectrico, de la distribución relativa de las tomas de tierra en el dispositivo y de la situación de éste en la superficie del terreno (ver figuras 5.7).

En la figura 5.8 está representado un dispositivo tetrapuntual AMNB situado en diferentes tipos de terrenos tomados como una aplicación práctica. El caso a) está montado sobre un medio homogéneo. El caso b) sobre un medio que incluye un cuerpo buen conductor y el c) sobre un medio que incluye un cuerpo mal conductor.

En el caso del medio homogéneo (a) la resistividad aparente será igual a la resistividad verdadera.

En el caso b), la corriente se concentra en el cuerpo conductor, por el cual la densidad de corriente en la parte del medio circundante en que está colocado las tomas de tierra de medición disminuye y a causa de esto disminuye la diferencia de potencial entre estas tomas de tierra. De la expresión 5.4 se deduce que la disminución de ΔV lleva a la disminución de ρ_a . Por consiguiente la presencia en el medio de un cuerpo buen conductor determina en este caso una disminución de ρ_a , en comparación con su valor en un medio homogéneo.

En el caso representado en la figura c), la corriente contornea el cuerpo de alta resistencia y se condensa en la zona de tomas de tierra de medición. esto lleva a un aumento de ΔV y por consiguiente a un aumento del ρ_a .

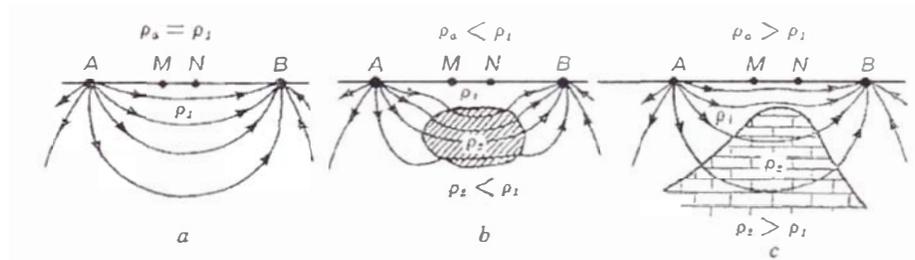


Fig. 5.8 Dependencia de ρ_a del carácter del corte geoelectrico en varios tipos de medios.

La constante K de la fórmula 5.4 determinada por la distancia entre los electrodos del dispositivo, se denomina Coeficiente del Dispositivo y tiene las dimensiones de una longitud para el caso del dispositivo tetraelectrónico simétrico de Wenner.

$$K = 2 \pi a \quad \dots (5.6)$$

Y al reemplazarlo en 5.4 se logra la expresión subsiguiente:

$$\rho_a = 2 \pi a \Delta V / I \quad \dots (5.6.1)$$

Como se habrá observado, los suelos en su gran mayoría no son homogéneos, es más; están formados por diversos estratos de resistividad y profundidad diferentes. (Ver fig. 5.1).

Estas capas debido a su formación geológica son en general horizontales y paralelas a la superficie del suelo.

Existen casos en que las capas o estratos se presentan inclinados y hasta verticales debido a alguna falla geológica constituyendo un suelo heterogéneo. (Ver fig. 5.9).

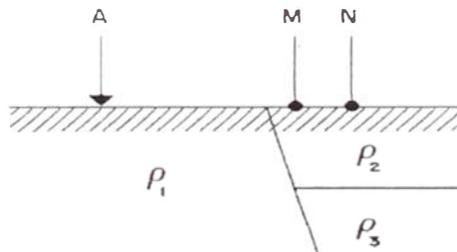


Fig.5.9 Ejemplo de subsuelo heterogéneo.

Para el caso de nuestros estudios se deberá considerar el perfil del suelo como aproximadamente horizontales u horizontales.

Como resultado de la variación de resistividades de las capas del suelo o estratos, se tienen gráficas de variación de dispersión de corrientes experimentales para suelos de 2 capas.

La figura 5.10 presenta el comportamiento de los flujos de dispersión de corrientes en suelos heterogéneos en torno a los aterramientos y para estos casos asumimos que se presentan suelos de 2 capas.

En la figura 5.10.1 se muestra un corte geológico de una cuenca de la región rusa de Podmoskov donde se pueden identificar determinados horizontes estratigráficos o litológicos.

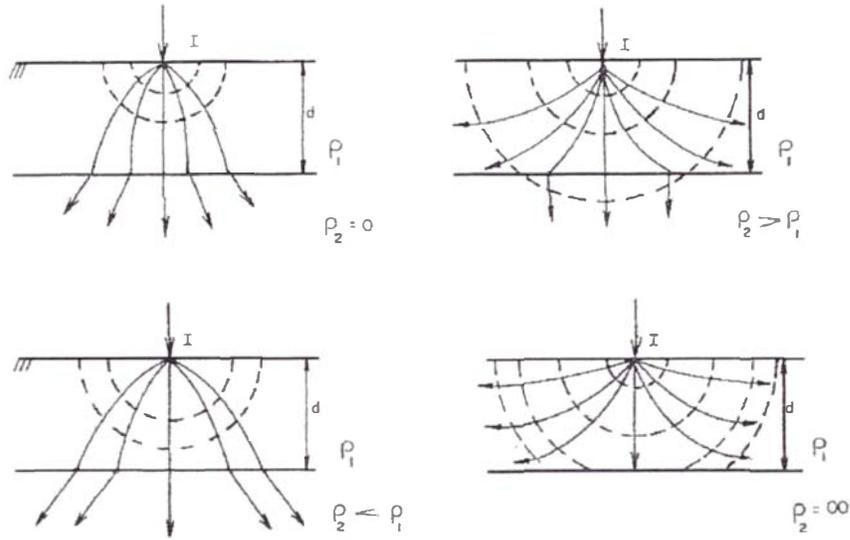


Fig. 5.10 Estratificación de suelos de 2 estratos.

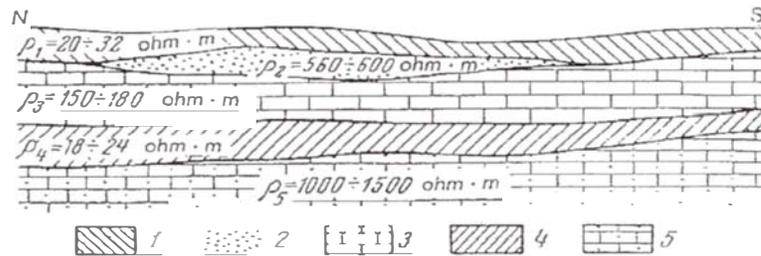


Fig 5.10.1 Corte geológico en una cuenca de la región de Podmoskov. 1) sedimentos cuaternarios; 2) arenas del piso Verjnevolzhskico; 3) calizas del tramo okskico; 4) sedimentos areno-arcillosos de los tramos túlskico y productivo; 5) calizas del tramo upínskico.

5.7 CÁLCULOS EN UN SUELO DE DOS ESTRATOS.

Usando las teorías de electromagnetismo en suelos de dos capas horizontales es posible desarrollar un modelo matemático que con el auxilio de las medidas efectuadas por el Método de Wenner, posibilita encontrar la resistividad del suelo de la primera y segunda camada así como sus respectivas profundidades.

Una corriente eléctrica I entrando por el punto A en un suelo de 2 capas horizontales tal como se grafica en la figura 5.11 genera potenciales en el primer

estrato que debe satisfacer la ecuación 5.7 conocida como la Ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 V = 0 \quad \dots (5.7)$$

Desarrollando la Ecuación de Laplace relativa al potencial V de cualquier punto P de la primera camada del suelo, ubicado a una distancia " r " de la fuente de corriente A , se llega a la siguiente expresión:

$$V_P = \frac{I \rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad \dots (5.8)$$

Donde:

V_P = Es el potencial de un punto P cualquiera de la primera camada en relación al infinito.

ρ_1 = Resistividad de la primera camada.

h = Profundidad de la primera camada.

r = Distancia del punto P a la fuente de corriente A .

K = Coeficiente de Reflexión, definido por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} \quad \dots (5.9)$$

ρ_2 = Resistividad de la segunda camada.

$$-1 \leq K \leq 1 \quad \dots (5.10)$$

Por la expresión 5.9 se verifica que la variación del coeficiente de reflexión está limitado entre los valores de: -1 y +1.

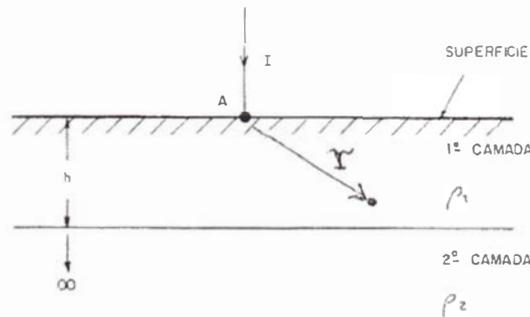


Fig 5.11 Suelo con dos estratos.

Aplicando la expresión 5.8 en una configuración tetrapuntual de WENNER sobre el suelo de dos capas estratificadas se logra: la figura 5.12 y se establece:

En esta configuración, la corriente eléctrica " I " entra en el suelo por el punto A y retorna al aparato por el punto D. Los puntos B y C son los electrodos de potencial o voltaje. El potencial en el punto B, será dado por la superposición de la contribución de la corriente eléctrica entrando en A y saliendo por D.

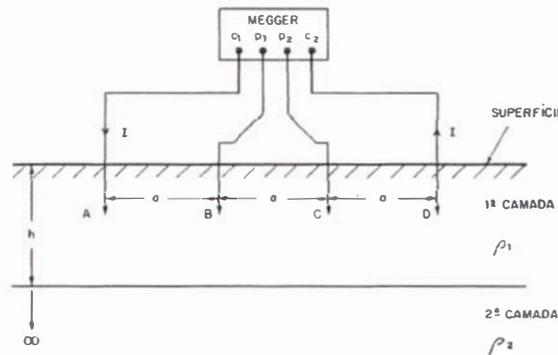


Fig.5.12 Configuración de Wenner en suelo de dos camadas.

Usando la expresión 5.8 y efectuando la superposición de Potenciales se tiene:

$$V_B = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad \dots (5.11)$$

haciendo la misma consideración para el potencial del punto C, se obtiene:

$$V_C = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad \dots (5.12)$$

Entonces, la diferencia de Potencial entre los puntos B y C está dado por:

$$V_{BC} = V_B - V_C \quad \dots (5.13)$$

Sustituyéndose las ecuaciones correspondientes 5.11 y 5.12 en 5.13 se obtiene:

$$V_{BC} = \frac{I\rho_1}{2\pi a} \left\{ 1 + 4\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n\frac{h}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad \dots (5.14)$$

Despejando el denominador del segundo término, se logra:

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

La relación (V_{BC} / I) representa el valor de la resistencia eléctrica (R) leída en el aparato Megger del esquema presentado, así entonces:

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

y de acuerdo a la relación 5.6.1 que se tiene la expresión $\rho = 2 \pi a R$, es decir la resistividad para un espaciamento "a"; reemplazándola en la relación anterior se logra:

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \quad \dots (5.15)$$

Esta expresión 5.15 es fundamental en la elaboración de la estratificación de suelos en dos capas o estratos.

Empleando estratégicamente la expresión 5.15 es posible obtener algunos métodos de Estratificación de Suelos para dos capas, entre ellos, los más usados son:

- Métodos de dos estratos usando curvas.
- Métodos simplificados para estratificación de suelos de dos capas.
- Métodos de dos capas usando técnicas de optimización.

5.8 MÉTODO DE DOS CAMADAS USANDO CURVAS.

Como ya se ha observado la faja de variación de coeficiente de Reflexión K es pequeña y está limitada a los valores entre -1 y $+1$; se puede entonces trazar una familia de curvas de la relación $\rho(a) / \rho_1$ en función de " h / a " (profundidad de la 1° capa o estrato versus la distancia entre los electrodos) para una serie de valores K negativos y positivos, cubriendo toda su faja de variación.

Las familias de curvas trazadas para K variando en la faja negativa, tal como en la figura 5.13 a) ; esto es curvas $\rho(a) \times a$ descendentes, están representadas en la figuras 5.13.c y 5.13.d ; y las curvas obtenidas de la expresión 5.15 para las curvas $\rho(a) \times a$ ascendentes, figura 5.13.b, esto es para K variando en la faja positiva son mostradas en las figuras 5.13.c de manera agrupada o Curvas de Tagg , ó en forma separada tal como 5.13.d y 5.13.e.

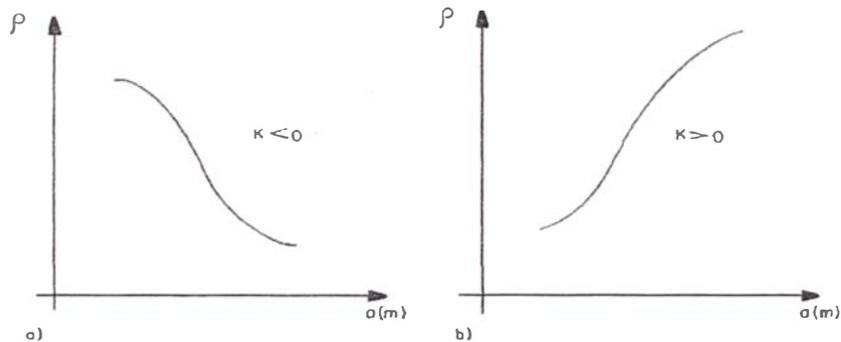


Fig 5.13 Curvas $\rho(a) \times a$ descendente y ascendente

a) Figura 5.13.a

K negativos

$\rho(a_1) / \rho_1$

b) Figura 5.13..b

K positivos

$\rho_1 / \rho(a_1)$

En base a una familia de curvas teóricas de las figuras 5.13.d y 5.13.e es posible establecer un método que hace la superposición o casamiento de la curva $\rho(a) \times a$, medida por Wenner como una determinada curva particular. Esta curva particular es caracterizada por los respectivos valores de " ρ_1 ", " K " y " h "; así estos valores son encontrados, quedando definida la resistividad " ρ_1 " del Primer Estrato.

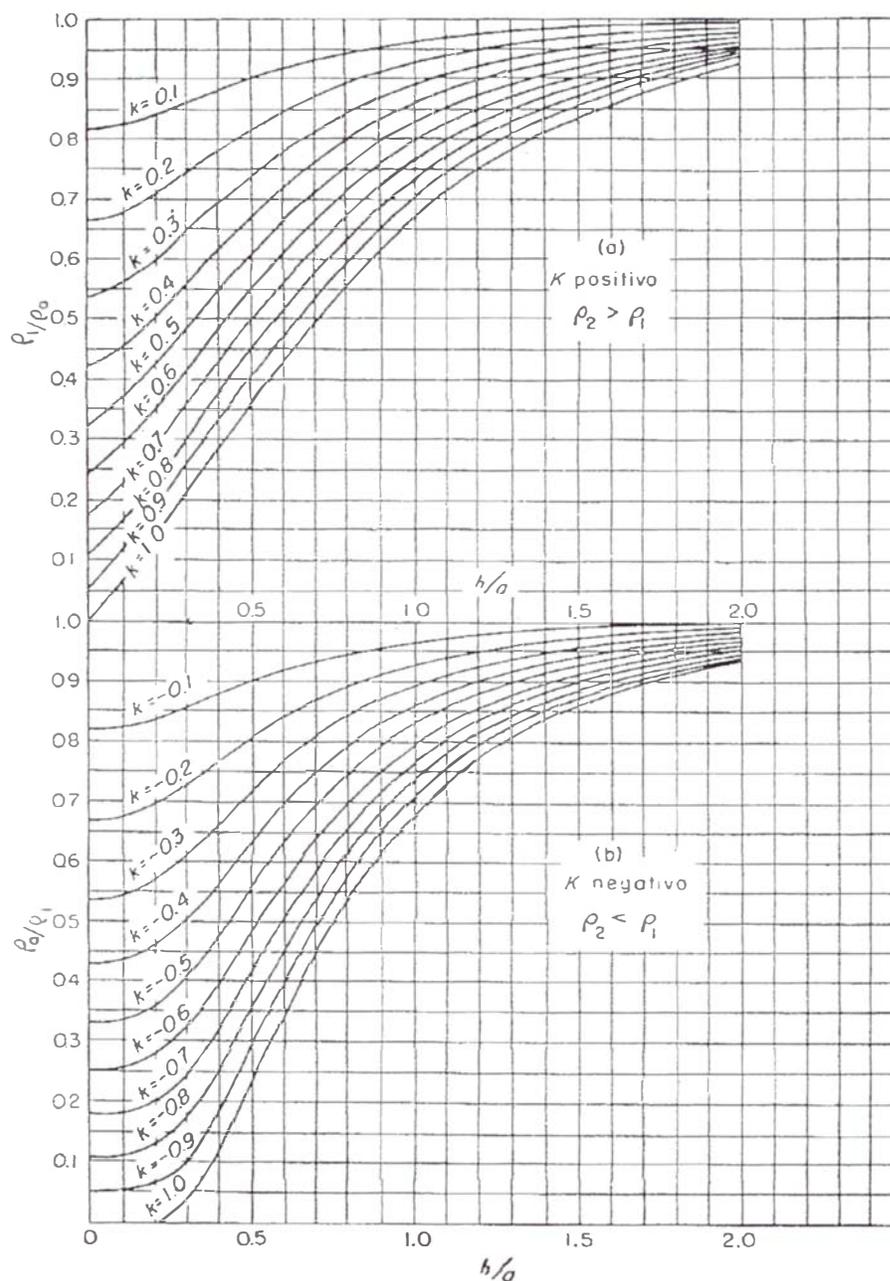


Fig. N° 5.13.c Curvas de Tagg para casos de dos capas en los que (a) la capa superior tiene menor resistividad que la capa inferior, y (b) la capa superior tiene mayor resistividad. K es $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$, en donde ρ_1 es la resistividad de la capa superior, y ρ_2 la de la capa inferior. La escala de abscisas es " h / a " (espesor de la capa / separación de electrodos). (Según Tagg, Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs., 1934)

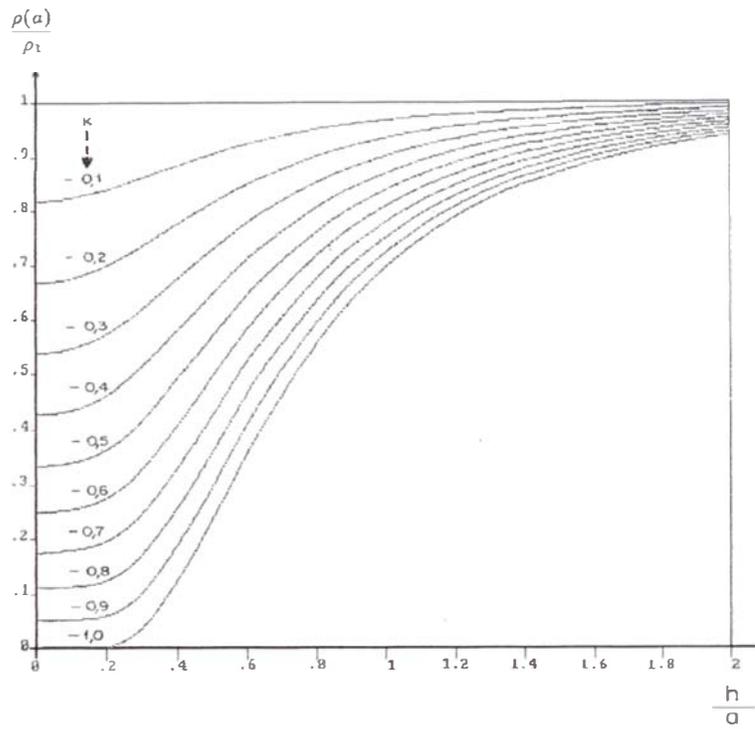


Fig.5.13 d Curvas para "K" Negativos

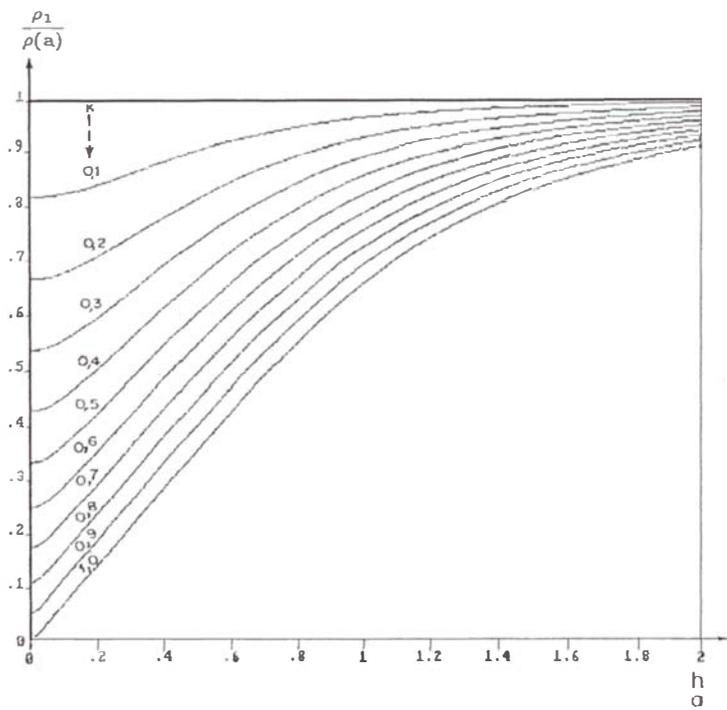


Figura 5.13 e Curvas para " K " Positivos.

5.8.1 DESARROLLO CONCEPTUAL DEL MÉTODO DE DOS ESTRATOS.

La metodología que se sigue es para encontrar los parámetros de la estratificación: ρ_1 , K , y h .

1^{er} Paso: Trazar en un gráfico la curva $\rho(a) \times a$ obtenida por el Método de Wenner.

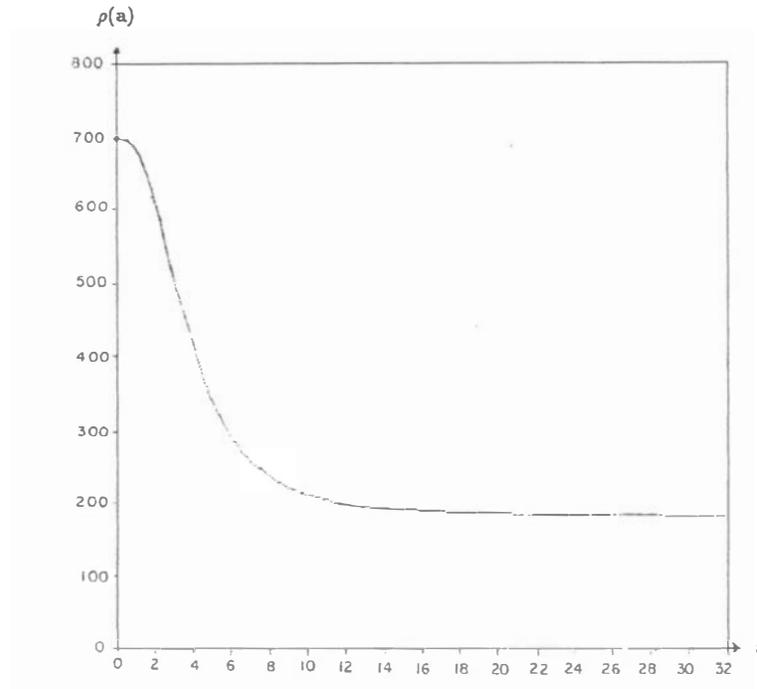


Fig. 5.14 Curva de resistividades $\rho(a) \times a$

2^{do} Paso: Prolongar la curva $\rho(a) \times a$ hasta cortar el eje de las ordenadas (Y). En este punto de cruce es leído directamente el valor ρ_1 . Esto es, la resistividad del primer estrato.

Para viabilizar este paso, se recomienda hacer varias lecturas por el Método Wenner para pequeños espaciamentos. Esto se justifica porque la penetración de la corriente se da predominantemente en la primera camada.

3^{er} Paso: Un valor de espaciamento en el eje de las abscisas " a_1 " es escogido arbitrariamente y elevando una vertical hasta cortar a la curva $\rho(a) \times a$, para luego obtener el correspondiente valor de $\rho(a_1)$ en el eje de las ordenadas, que es una

resistividad aparente.

4^{to} Paso: Por el comportamiento de la curva $\rho(a) \times "a"$ se determina el signo de K, esto es:

- a) Si la curva fuera descendente, el signo de " K " es negativo y efectúese el cálculo de $\rho(a_1) / \rho_1$. (ver Fig. 5.13 d)
- b) Si la curva fuese ascendente, el signo de " K " es positivo y efectúese el cálculo de $\rho_1 / \rho(a_1)$. (ver Fig. 5.13 e)

5^{to} Paso: Con el valor de $\rho(a_1) / \rho_1$ ó $\rho_1 / \rho(a_1)$ obtenido, entrar a las curvas teóricas correspondientes 5.13 d ó 5.13 e y se traza una paralela al eje de las abscisas (eje X). Esta recta corta curvas distintas de " K ".

Proceder a la lectura de todos los valores específicos de "K" y sus correspondientes " h / a " respectivos, del eje horizontal.

6^{to} Paso: Multiplíquese todos los valores de h / a encontrados en el 5^{to} Paso por el valor "a₁" del 3^{er} Paso, obteniéndose una tabla con los valores correspondientes de " K ", " h / a " y " h ".

7^{mo} Paso: Plotéese una curva "K × h" de los valores "h_i" obtenidos de la tabla generada en el 6^{to} Paso.

8^{vo} Paso: Un segundo valor de espaciamento o dato seleccionado en el eje de las abscisas $a_2 \neq a_1$ se toma para obtener una nueva tabulación repitiendo todo el proceso desde el Paso 5^{to} inclusive, resultando una nueva curva " K × h ".

9^{no} Paso: Plotéese una nueva curva " K × h " en el mismo gráfico del 7^{mo} Paso.

10^{mo} Paso: La intersección de las dos curvas " K × h " en un punto dado, resultarán en los valores reales de "K" y "h" y así la estratificación estará definida porque se obtienen los valores de "h" y "K" respectivamente.

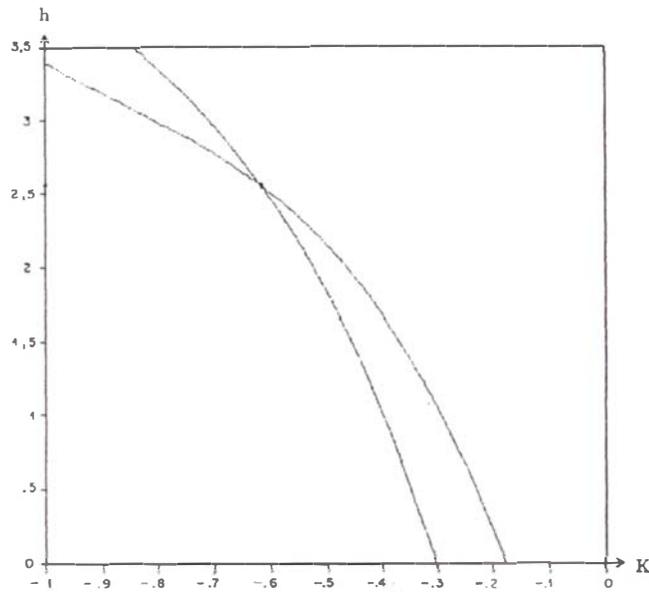


Fig.5.15 Gráficas “ K x h “ de los Pasos 7º y 9º del método

5.8.2 APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO GRÁFICO DE DOS ESTRATOS.

Se ejecutará la estratificación del suelo por el método presentado en el ítem 5.8 correspondiente a una serie de medidas hechas en el campo por el Método de Wenner, cuyos datos están en la siguiente tabla.

Espaciamiento “a” (m)	Resistividad ($\Omega \times m$)
1	684
2	611
4	415
6	294
8	237
16	189
32	182

Tabla 5.4 Variación de mediciones en el campo.

La resolución es hecha siguiendo los pasos recomendados anteriormente.

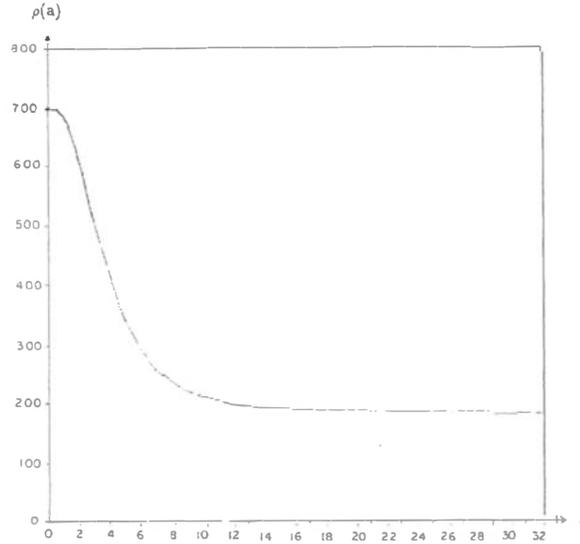


Fig.5.16 Gráfica de Resistividad vs. Distancias de la Tabla 5.4.

1^{er} Paso: La figura 5.16 está trazada en base a la tabla anterior lográndose la curva $\rho(a) \times a$, observándose una gráfica que insinúa un parámetro K menor que cero y descendente ($K < 0$).

2^{do} Paso: Prolónguese la curva y evalúese la intersección con el eje de las ordenadas (Y); obteniéndose un valor de resistividad $\rho_1 = 700 \Omega \times m$, que es la del primer estrato.

3^{er} Paso: Se escoge un valor arbitrario " a_1 " = 4 m en el eje de las abscisas de la gráfica $\rho(a) \times a$ y corta a dicha gráfica. Desde el punto de corte con la curva se proyecta al eje de las ordenadas para obtener en esta intersección un valor de Resistividad relacionado con dicha separación de electrodos a_1 , obteniéndose el $\rho(a)$ correspondiente: $\rho(a_1) = 415 \Omega \times m = \rho(4\text{mts})$.

4^{to} Paso: Como la curva $\rho(a) \times a$ es descendente y K es negativo, entonces calcúlese la relación:

$$\frac{\rho(a_1)}{\rho_1} = \frac{415}{700} = 0.593$$

5^{to} Paso: Siendo K negativo y con el valor $\rho(a_1) / \rho_1 = 0.593$ (del eje vertical) se trabaja en la familia de curvas de la figura 5.13 d trazando una horizontal en la

vertical "0.593" y que corta a la familia de " K " negativos, se procede a la lectura de los respectivos " h / a " proyectados en el eje Horizontal. Así se genera la tabla 5.5 propuesta en el 6^{to} Paso.

6^{to} Paso: Tabla 5.5 Valores del 5^{to} y 6^{to} paso que permiten el cálculo de " h_i "

a ₁ = 4 m ^ ρ(a ₁) / ρ ₁ = 0,593		
K	h / a	h _i (m)
- 0,1	-	-
- 0,2	-	-
- 0,3	0,263	1,052
- 0,4	0,423	1,692
- 0,5	0,547	2,188
- 0,6	0,625	2,500
- 0,7	0,691	2,764
- 0,8	0,752	3,008
- 0,9	0,800	3,200
- 1,0	0,846	3,384

$$h_i = a_1 * \left(\frac{h}{a} \right)$$

Tabla 5.5 Cálculo de " h_i "

7^{mo} Paso: Plotéese una curva "K × h" de los valores obtenidos de la tabla 5.5 generada en el 6^{to} Paso (ver Fig.5.17).

8^{vo} paso: Escójase otro espaciamiento arbitrario " a₂ " de longitud tal como "a" = 6 m , se ejecuta luego la proyección de este punto del eje de las abscisas en la curva ρ(a) × a y de esta intersección se proyecta al eje de las ordenadas o eje de las Resistividades obteniéndose un ρ(a₂) = 294 Ω × m, que es una segunda resistividad aparente.

$$\therefore \rho(a_2) / \rho_1 = \frac{294}{700} = 0,42$$

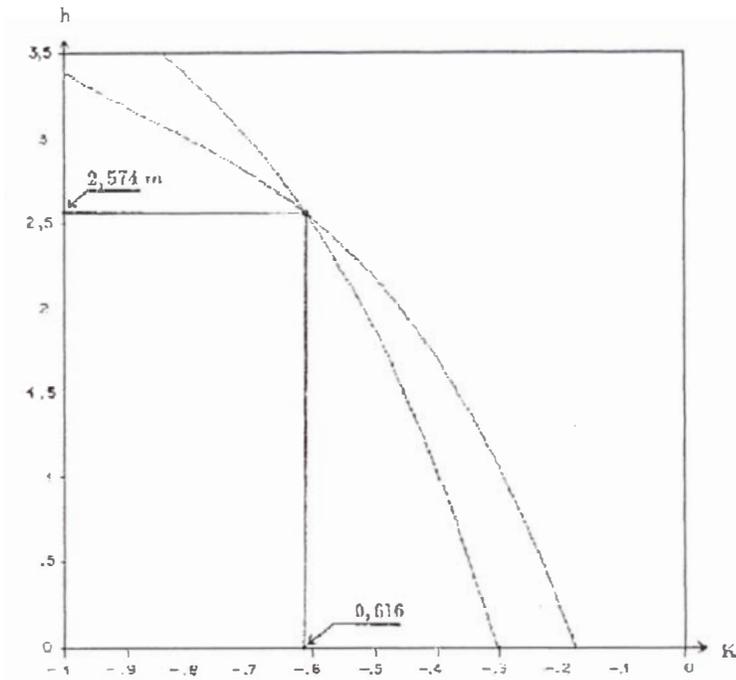


Fig.5.17 Curvas h x K

9^{no} Paso: La figura 5.17 representa el trazo de las curvas K x h obtenidas de las tablas 5.5 y 5.6

$a_2 = 6 \text{ m} \wedge \rho(a_3) / \rho_1 = 0,42$		
K	h / a	h_i (m)
-0,1	-	-
-0,2	-	-
-0,3	-	-
-0,4	-	-
-0,5	0,305	1,830
-0,6	0,421	2,526
-0,7	0,488	2,928
-0,8	0,558	3,348
-0,9	0,619	3,714
-1,0	0,663	3,978

$$h_1 = a_1 * \left(\frac{h}{a} \right)$$

Tabla 5.6 Valores del 5^{to} al 7^{mo}

10^{mo} paso. La intersección de las dos curvas $K \times h$ en un punto dado, definen los valores reales de la estratificación, que ha sido determinada por los valores de las tablas 5.5 y 5.6 de resistividades aparentes y que se reflejan en la Fig. 5.17.

$$h = 2,574 \text{ m}$$

$$\rho_1 = 700 \ \Omega \times \text{m}$$

$$\rho_2 = 166,36 \ \Omega \times \text{m}$$

Como podrá observarse el valor ρ_2 es mucho menor que ρ_1 y, es un valor bastante manejable para diseñar una protección mediante un Sistema de Puestas a Tierra

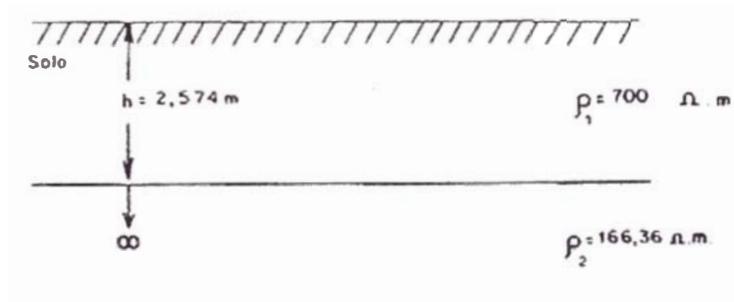


Fig. 5.18 Suelo Estratificado con dos Valores de Resistividad.

5.9 MÉTODO SIMPLIFICADO PARA UNA ESTRATIFICACIÓN DE SUELOS EN DOS CAMADAS.

Este método ofrece razonables resultados solamente cuando el suelo puede ser considerado estratificable en dos camadas y la curva $\rho(a) \times a$ tiene una de las formas típicas indicadas en la figura 5.19 abajo indicadas, con una considerable tendencia de Saturación Asintótica en los extremos y paralela al eje de las abscisas. La asíntota para pequeños espaciamientos es típica la contribución de la primera camada del suelo; ya para espaciamientos mayores se tiene la penetración de corriente en una segunda camada y su asíntota caracteriza nítidamente un suelo distinto.

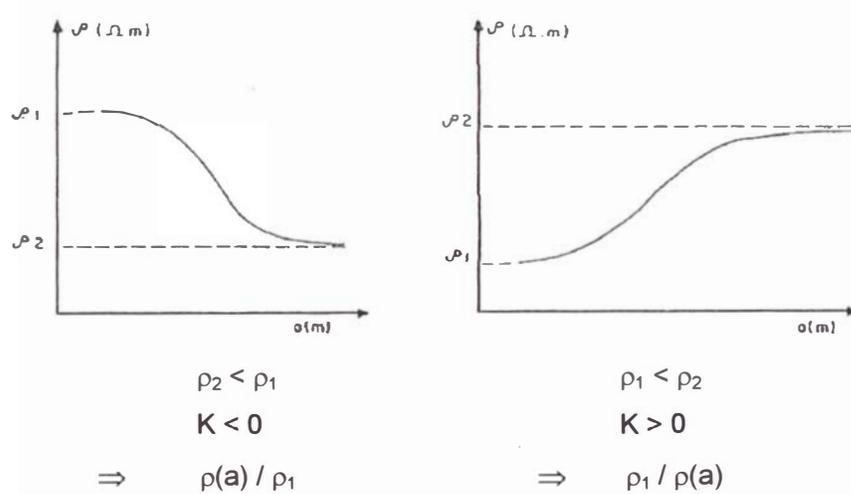


Fig. 5.19 Curvas $\rho(a) \times a$ para suelos de los camadas.

Para el análisis de las curvas $\rho(a) \times a$ de la figura 5.19 estas quedan caracterizadas por lo prolongado de las asíntotas los valores de ρ_1 y ρ_2 ; por tanto en este suelo específico, con los dos valores obtenidos, queda definido de acuerdo con la expresión 5.9, el valor del parámetro K. Así en la expresión 5.15 el valor desconocido es la profundidad de la primera camada, esto es "h".

La filosofía de este método se basa en colocar las astas del Método de Wenner de modo que la distancia entre las astas sea exactamente igual a "h", esto es igual a la profundidad de la primera camada. Ver figura 5.20.

Así como "a = h" ó "h/a=1", el término de la derecha de la expresión 5.15 se convierte en la expresión 5.16, que será denominada M(h=a).

$$\frac{\rho(a=h)}{\rho_1} = M(h=a) = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1+(2n)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2n)^2}} \right] \quad \dots (5.16)$$

La expresión 5.16 significa que el espaciamiento "a" de las astas en el Método de Wenner es exactamente igual a "h" (profundidad del 1º Estrato), entonces la lectura en el aparato "MEGGER" será:

$$\rho(a=h) = \rho_1 \cdot M(h=a) \quad \dots (5.17)$$

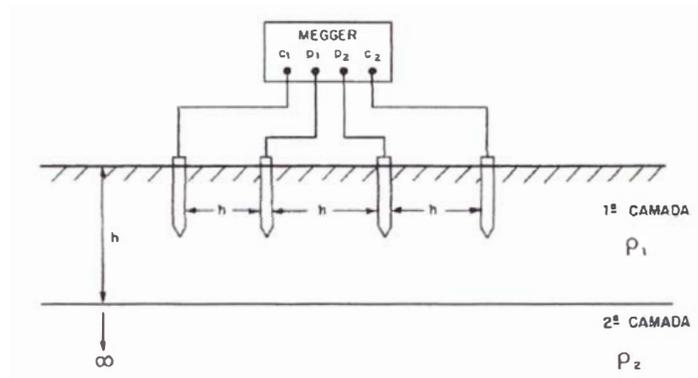


Fig.5.20 Espaciamiento a = h

Por lo tanto de este modo basta elevar el valor de $\rho(a=h)$ en la curva $\rho(a) \times a$ y obtener el valor de "a", esto es "h". Así es obtenida la profundidad de la primera camada.

Esta es la filosofía de este método; por lo tanto se debe obtener la curva $M(a=h)$ versus "K", a través de la expresión 5.16. Esta curva está en la figura 5.21

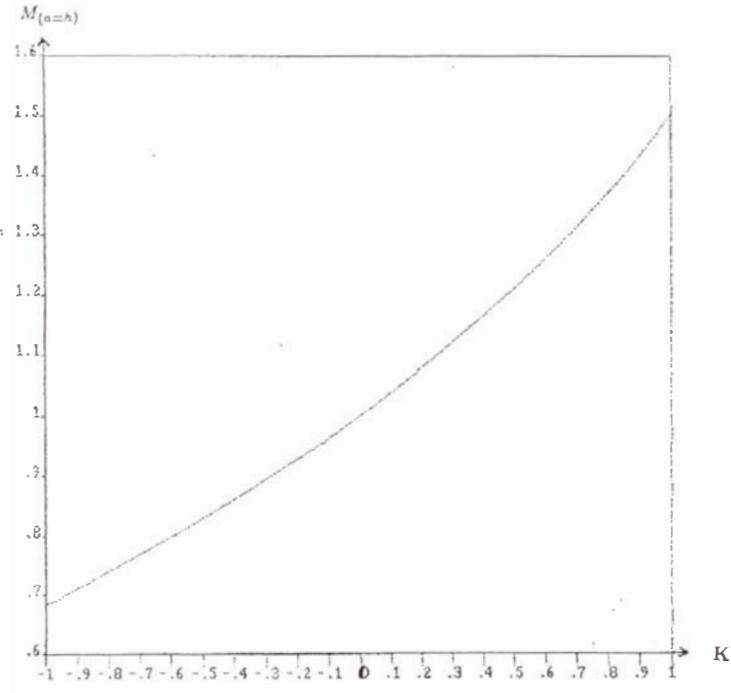


Fig.5.21 Curva $M(a=h)$ vs K.

Así obtenida la curva de Resistividad $\rho(a) \times a$ por el Método de Wenner, la

secuencia para la obtención de la estratificación de suelo es la siguiente:

1^{er} Paso: Trazar la curva $\rho(a) \times a$ obtenida por la medición en el campo usando el Método de Wenner.

2^{do} Paso: Prolongar la curva $\rho(a) \times a$ hasta interceptar al eje de las ordenadas y determinar el valor de ρ_1 , esto es, la resistividad de la primera camada del suelo.

3^{er} Paso: Trazar la asíntota en el final de la curva $\rho(a) \times a$ y prolongarla hasta el eje de las ordenadas, el que indicará el valor de la resistividad ρ_2 de la segunda camada del suelo.

4^{to} Paso: Calcular el coeficiente de Reflexión K, a través de la expresión 5.9, esto es:

$$K = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1}$$

5^{to} Paso: Con el valor de K obtenido en el cuarto paso, determinar el valor de $M(a=h)$ en la curva de la figura 5.21. El valor de $M(a=h)$ está relacionado con la ecuación 5.15, ya que son conocidos ρ_1 , ρ_2 y K, siendo la profundidad "h" desconocida.

6^{to} Paso: Calcular la resistividad para $a=h$: $\rho(a=h) = \rho_1 \cdot M(a=h)$

7^{mo} Paso: Con el valor de $\rho(a=h)$ encontrado, entrar en la curva de Resistividad $\rho(a) \times a$ y determinar la profundidad "h" de la primera camada del suelo, con lo cual se obtiene la estratificación de ese suelo de dos camadas.

5.9.1 APLICACIÓN PRÁCTICA DEL MÉTODO GRAFICO SIMPLIFICADO DE DOS ESTRATOS.

Con los valores medidos en el campo por el Método de Wenner de la Tabla 5.7, se va a efectuar la estratificación del suelo por el método simplificado de dos camadas.

Espaciamiento "a" (m)	Resistividad Medida ($\Omega \times m$)
1	996
2	974
4	858
6	696
8	549
12	361
16	276
22	230
32	210

Tabla 5.7 Datos de campo.

1^{er} Paso: Graficar la curva $\rho(a) \times a$ que está mostrada en la Figura 5.22.

2^{do} Paso: Por la prolongación del extremo superior de la curva y su intersección con el eje de las ordenadas se tiene:

$$\rho_1 = 1000 \Omega \times m \quad \dots \text{ (resistividad del primer estrato)}$$

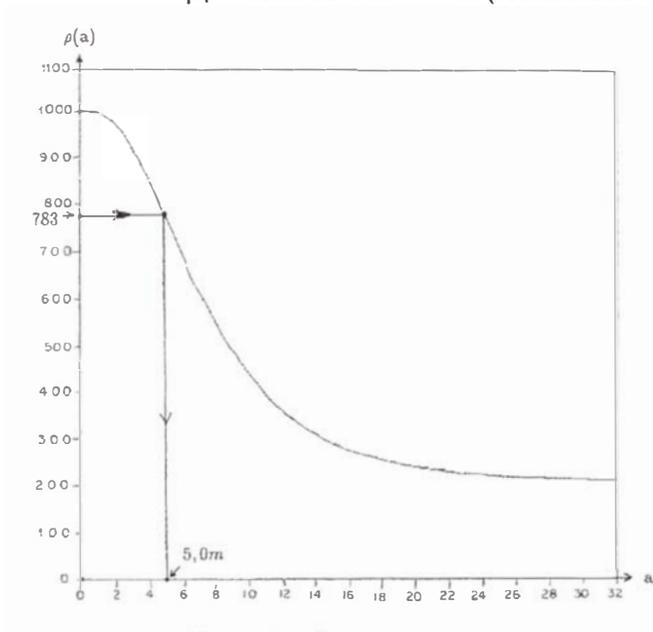


Fig. 5.22 Curva $\rho(a) \times a$.

3^{er} Paso: Trazando la asíntota en la parte más baja de la curva (en la parte final y derecha) se obtiene:

$$\rho_2 = 200 \Omega \times m \quad \dots \text{ (resistividad del segundo estrato)}$$

4^{to} Paso: Calcular el Índice de Reflexión K.

$$K = \frac{\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1}{\frac{\rho_2}{\rho_1} + 1} = \frac{\frac{200}{1000} - 1}{\frac{200}{1000} + 1} = -0,666$$

$$\therefore K < 0$$

5^{to} Paso: De la curva $M(a=h) \times K$ (Fig. 5.21) de la tabla 5.7 entrando con el valor de K se obtiene

$$M(a=h) = 0,783$$

6^{to} Paso: Cálculo de $\rho(a=h)$

$$\rho(a=h) = \rho_1 \times M(a=h) = 1000 \times 0,783 = 783$$

7^{mo} Paso: Con el valor de $\rho(a=h)$, llevado al eje de las ordenadas $\rho(a) \times a$ Figura 5.22 se tiene en el eje de las abscisas la distancia requerida que define la estratificación. Se obtiene : $a = h = 5$ m. Así el suelo estratificado en dos camadas es presentado en la Figura 5.23 siguiente.

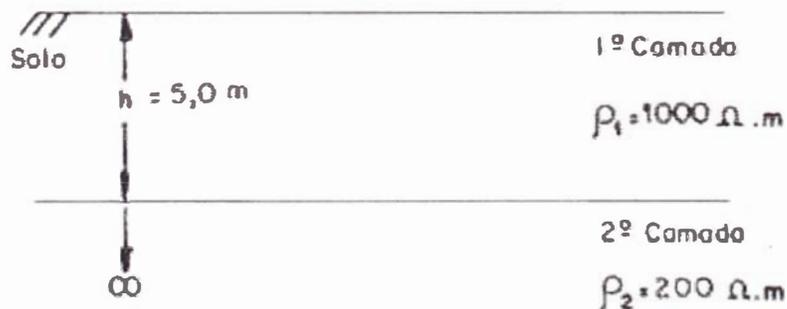


Fig N° 5.23 Estratificación del Suelo en dos Camadas

5.9.2 MÉTODO DE TAGG: ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO EN DOS CAMADAS

Tagg construyó una serie de curvas basadas en la ecuación 5.15 que representa una suma infinita y cuyo término enésimo tiene la forma:

$$4 \rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \dots (5.18)$$

Como K es menor que la unidad, se ve que los términos se aproximan a cero a medida que n aumenta y, por lo tanto, existe un límite para el número de términos necesarios para alcanzar la precisión que se desee.

Tagg construyó una serie de curvas que facilitan el cálculo de las resistividades y el espesor de las capas para el caso de dos estratos. Estas curvas reproducidas en la

Fig. 5.13 c; una serie para $\frac{\rho_2}{\rho_1} > 1$ y la otra para $\frac{\rho_2}{\rho_1} < 1$. Cada línea horizontal

correspondiente a un valor medido de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ (resistividad aparente / resistividad del primer estrato) cruzará de una a diez de las líneas que representan décimas de los valores de K.

Al aplicar estas curvas a los valores de $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ observados en el campo, se supone que

el valor de ρ_a para valores de a que se aproximan a cero es ρ_1 y dividen todas las lecturas ρ_a por ρ_1 . La relación $\frac{\rho_a}{\rho_1}$ para cada valor de a es dibujada entonces como

una línea horizontal que corte la serie aproximada de curvas patrón. En cada intersección con una curva que corresponda a un K diferente, el valor $\frac{h}{a}$ es

convertido en h multiplicándolo sencillamente por a . Después, los valores de K son comparados con los de h en otra gráfica (K vs h), y todos los puntos correspondientes a una separación de electrodos dada son unidos formando unas líneas. Si se aplica el supuesto e dos capas en lo que se refiere a la variación de resistividad con la profundidad, las líneas para las diversas separaciones de electrodos deben cortarse en un punto; es decir, el valor h en el punto de

intersección es la profundidad de la superficie de contacto y el valor de K da ρ_2 ; que es la resistividad de la capa mas profunda, puesto que se supone conocido ρ_1

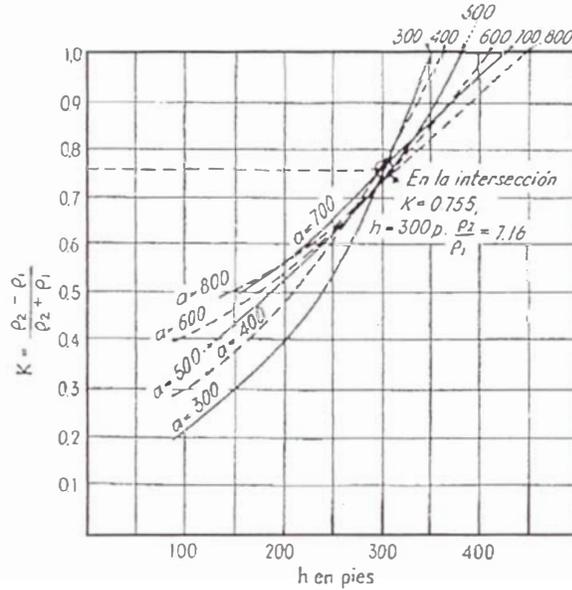


Fig. 5.24 Ejemplo de diagrama mostrando cómo se usan las curvas de Tagg para determinar la profundidad de la discontinuidad h y el contraste de resistividad K (Adaptado de Tagg, Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs., 1934)

a , en metros	ρ_a , en Ohm/cm	ρ_1 / ρ_a
90	8960	0.750
120	10740	0.623
150	12320	0.545
180	13860	0.483
210	15220	0.440
240	16480	0.407

Tabla 5.8 Relación entre la resistividad aparente y el espaciamiento entre los electrodos.

Vamos a aclarar el empleo de las curvas de Tagg con un ejemplo. Supongamos que la resistividad aparente varíe con el espaciamiento de los electrodos con arreglo a la tabla 5.8.

Como los ρ_1 / ρ_a son menores que la unidad, se hace uso de la familia superior de curvas reproducida en la figura 5.13 c. Considerando primero el valor ρ_1 / ρ_a de 0.750 para un espaciamiento de electrodo de 90 m., vemos que la línea 0.750 corta la curva $K = 0.2$ en el valor 0.315 de h/a , la curva $K = 0.3$ en el 0.560, etc. Los primeros de estos valores corresponden a valores de h de 29 y 45.75 m. Respectivamente. Los valores de K son comparados con los de h , como se ve en la figura 5.24, trazando una línea separada para enlazar todos los puntos con el mismo espaciamiento de electrodos.

Se ve que las curvas respectivas se cortan cerca del punto $h = 300$ y $K = 0.755$. Siempre que las líneas se corten de esta manera, es razonable suponer que se trata sencillamente de un suelo con una configuración de resistividad de dos capas, siendo la profundidad de la superficie de contacto (h) y el contraste de resistividad (K) las coordenadas respectivas de la intersección de las líneas.

5.10 MÉTODOS DE ESTRATIFICACIÓN DEL SUELO EN VARIAS CAMADAS.

Dentro de las generalidades de este tema es necesario tener en cuenta el concepto de sondeo eléctrico vertical (SEV).

Se llama Sondeo Eléctrico a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción. Cuando el dispositivo empleado es simétrico y durante la medición permanecen fijos el centro del segmento MN, suele denominarse Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

Lo que se logra al mantener fija la situación del centro del dispositivo es incrementar la profundidad de penetración de la corriente en el terreno y como consecuencia de ello, empiezan a ejercer influencia en el valor de " ρ_a " las rocas que se encuentran a mayor profundidad. Por consiguiente, la medición de " ρ_a " con un dispositivo en el que se varía la distancia entre las tomas de tierra de emisión, para una posición invariable de su centro nos permite estudiar la variación del corte geológico con la profundidad ideal.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan por medio de una curva, en función de las distancias entre electrodos. Para que ello sea posible es necesario que estas distancias puedan expresarse por una sola variable, pues de lo contrario habría que recurrir a una superficie y no a una curva.

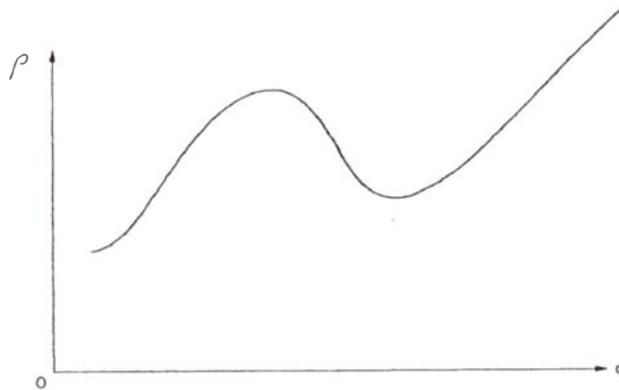


Fig. 5.25 Curvas de resistividades de múltiples estratos.

Esta condición puede cumplirse de dos maneras: bien por el empleo de un dispositivo en el que la configuración de electrodos permanezca siempre geoméricamente semejante a si misma, que es el caso del dispositivo Wenner, bien por la utilización de dispositivos en los que solo influya una distancia. Esto último es lo que ocurre con el dispositivo Schlumberger, en el que la distancia MN se considera nula frente a la distancia AB.

Cuando se utiliza este dispositivo, las resistividades aparentes " ρ_a " se grafican en las ordenadas, y en las abscisas las distancias $OA = AB / 2$. Para el dispositivo Wenner se llevan en abscisas los valores sucesivos de la distancia "a". Las escalas sobre ambos ejes han de ser logarítmicas y la curva así obtenida se denomina Curva de SEV, Curva de Campo o Curva de Resistividad Aparente.

La finalidad del SEV es averiguar la distribución Vertical de resistividades bajo el punto sondeado, la mayor eficacia del método corresponde al caso en que los SEV se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitada por planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratificado). La experiencia demuestra que los resultados teóricos

obtenidos para medios de esta clase, son tolerablemente válidos para estratos inclinados hasta unos 30°.

5.11 MEDIOS ESTRATIFICADOS Y NOMENCLATURA

Consideremos un medio estratificado general compuesto por dos semiespacios. El primero de ellos, de conductividad nula, representa la atmósfera; el segundo, que representa el terreno, es un medio heterogéneo compuesto de medios parciales homogéneos e isotropos, de extensión lateral indefinida y cuyas superficies de separación son paralelos entre sí y al plano aire-tierra. (Figura 5.26).

Para caracterizar cada medio estratificado, bastará dar el espesor E_i y la resistividad ρ_i de cada medio parcial isotropo de índice "i", numerando éstos de arriba hacia abajo, esto es, comenzando con el medio contiguo al semiespacio que representa la atmósfera, cada uno de estos medios parciales se denomina capa geoelectrica.

Las distancias de la superficie limitada aire-tierra a cada una de las demás, o sea las profundidades de los "contactos" respectivos se representan como : $h_1, h_2, h_3,$ etc. ó $z_1, z_2, z_3,$ etc. ó $m_1, m_2, m_3,$ etc. ó $E_1, E_2, E_3,$ etc.

Las especificaciones de espesores y resistividades de cada medio estratificado del tipo descrito recibe el nombre de corte geoelectrico.

Un corte geoelectrico compuesto por n capas requiere para su especificación el conocimiento de " n " resistividades y " n-1 " espesores o " n-1 " profundidades (puesto que la última capa, denominada sustrato, tiene siempre espesor infinito) o sea en total " 2n-1 " (espesores) o parámetros.

Los cortes geoelectricos pueden clasificarse atendiendo el número de capas que lo componen. Los cortes del mismo número de capas pueden subdividirse según el orden en que aparezcan, en los sucesivos contactos, resistividades mayores o menores que en la capa suprayacente.

Para el uso más cómodo de esta clasificación, es muy conveniente, establecer algún sistema de Notación. Emplearemos la seguida por autores soviéticos y que ha sido introducida hace pocos años en occidente en los trabajos de : Orellana, 1965; Orellana y Mooney, 1966; Keller y Frischknecht, 1966; Patra y Bhattacharya, 1968; y otros.

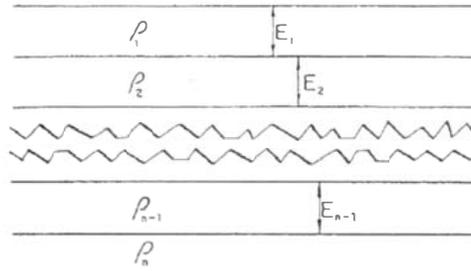


Fig.5.26 Corte geoelectrico estratificado y su notación.

Los símbolos de la notación son los siguientes :

a1) Los cortes de dos capas, de los cuales existen dos tipos:

$$\rho_1 > \rho_2 \quad \text{ó}$$

$$\rho_1 < \rho_2$$

no llevan símbolo especial, y se caracteriza por los siguientes parámetros: espesor " h_1 " de la capa superior; su resistividad " ρ_1 " y la resistividad del medio de espesor ilimitado " ρ_2 " .

a2) El corte de 3 capas, presenta ya cinco parámetros: " h_1 , h_2 , ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 " .

Las curvas de 3 capas pueden ser de 4 tipos: H, K,A,Q.

1° tipo H: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ y corresponde a los cortes en los cuales la 2° capa tiene una resistencia menor a sus capas adyacentes.

2° tipo K: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ y corresponde a los cortes en los cuales la 2° capa tiene una resistencia mayor que las capas supra e infrayacentes.

3° tipo A: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ las curvas de este tipo corresponden a los cortes en los que la resistividad de las capas aumentan con la profundidad y llevan el símbolo A.

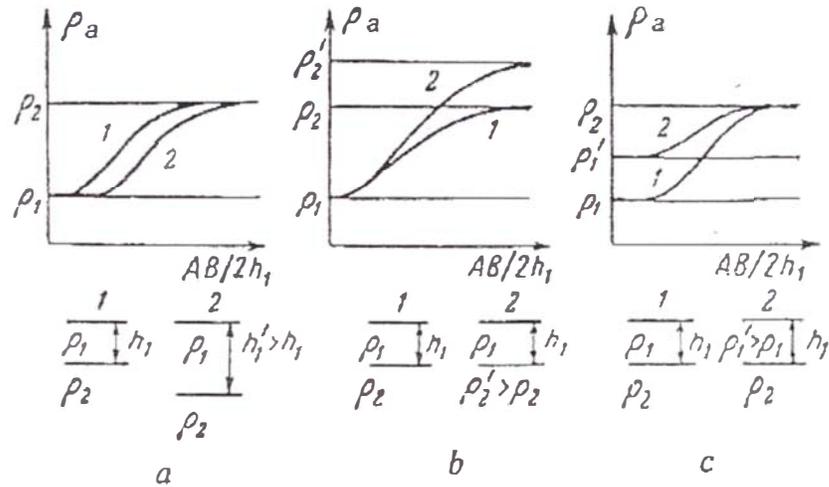


Fig.5.27 Influencia de las diferencias de los parámetros del corte en la forma de las curvas de SEV (Dos capas).

4° tipo Q: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ corresponden a curvas con cortes en los cuales la resistencia de las capas baja con la profundidad.

En este momento es interesante resaltar ciertas influencias de los variación de los parámetros de corte en la forma de las curvas de SEV.

En la figura 5.27 vemos la conducta de las curvas SEV en función de la variación de los parámetros h_1 , ρ_1 y ρ_2 del corte de dos capas.

En la figuras 5.27 a, b, c se tienen las curvas de dos capas obtenidas sobre cortes en los que $\rho_2 > \rho_1$. La figura 5.27 a) corresponde al caso en que el corte de dos puntos de sondeo se diferencia sólo el espesor de la capa superior. En el punto en que el espesor de la capa superior es mayor, la subida de la curva empieza para valores de la separación de los electrodos de emisión mayores que los de la subida de la curva 1, porque al aumentar la profundidad "a" que se encuentra en la capa inferior, su influencia en el valor de ρ_a se reflejará para separaciones mayores. Puesto que en ambos cortes las resistividades de las capas correspondientes son las mismas, las asíntotas izquierdas y derechas de ambas curvas son comunes.

En la figura 5.27 b) las curvas 1 y 2 corresponden a cortes con diferentes resistividades de la capa infrayacente. Puesto que los parámetros de la capa superior son los mismos, la subida en ambas curvas empieza para la misma separación; pero puesto que $\rho_2' > \rho_2$, la asíntota derecha de la curva 2 está más alta que la de la curva 1.

La diferencia de los cortes en la resistividad de la capa superior produce, como se indica en la figura 5.27 c), solamente el desplazamiento en la vertical de la asíntota izquierda.

Razonamientos análogos permiten tener una idea sobre la influencia de los parámetros de los cortes multicapa en la forma de las curvas de SEV correspondientes. Veamos el caso del corte tipo K y supongamos que el corte de 3 capas se diferencia solamente en el espesor h_2 de la segunda (intermedia) capa. Entonces este horizonte se reflejará, como es lógico, por un máximo de " ρ_a " en la curva de SEV, tanto más claro cuanto mayor sea su espesor. Por consiguiente la disminución de " ρ_a " a causa de la influencia de la 3° capa, empezará a distancias de las tomas de tierra de emisión cada vez mayores (ver figura 5.28).

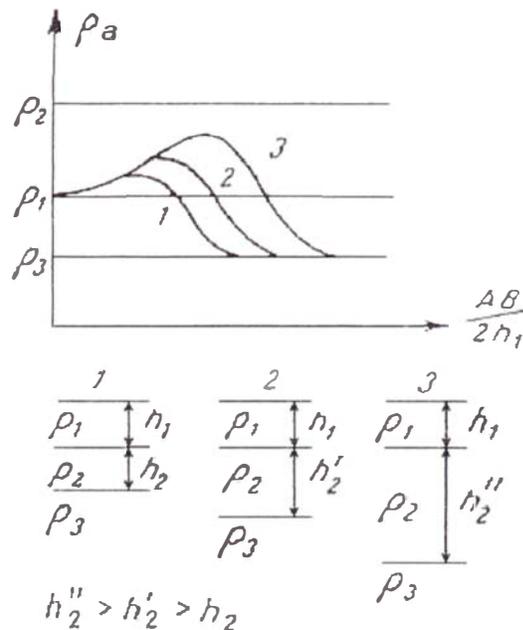


Fig.5.28 Influencia de la variación del espesor de la capa intermedia en la forma de las curvas de tipo K.

a3) Las curvas de cuatro capas se subdividen en 8 tipos que se designan con un símbolo de 2 letras como combinación de la clasificación anterior; para ello se consideran las tres primeras (ρ_1 , ρ_2 y ρ_3) capas para la asignación de la 1ª letra y la segunda es el símbolo del corte de las tres capas representado por las capas ρ_2 , ρ_3 y ρ_4 . Se distinguen los tipos de curvas de cuatro capas: (ver figura 5.29)

HK , HA , KH , KQ

QQ , QH , AK , AA

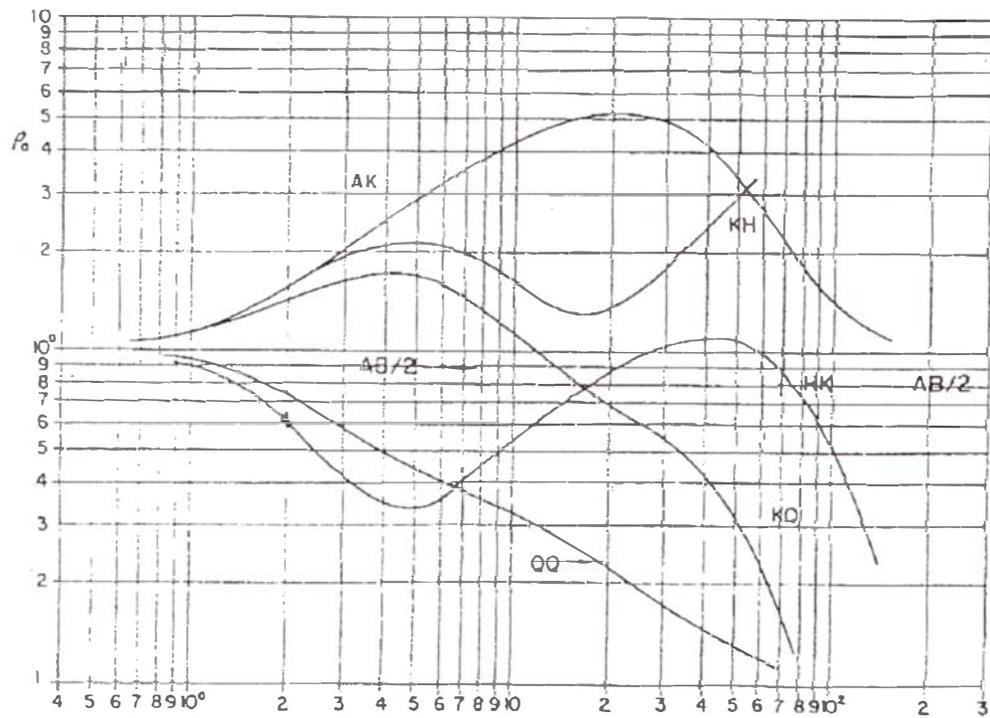


Fig.5.29 Varios ejemplos de curvas teóricas de 4 capas, tomadas de la colección de Orellana-Mooney.

Los tipos KK , HH , HQ , etc carecen de sentido, pues implican condiciones contradictorias.

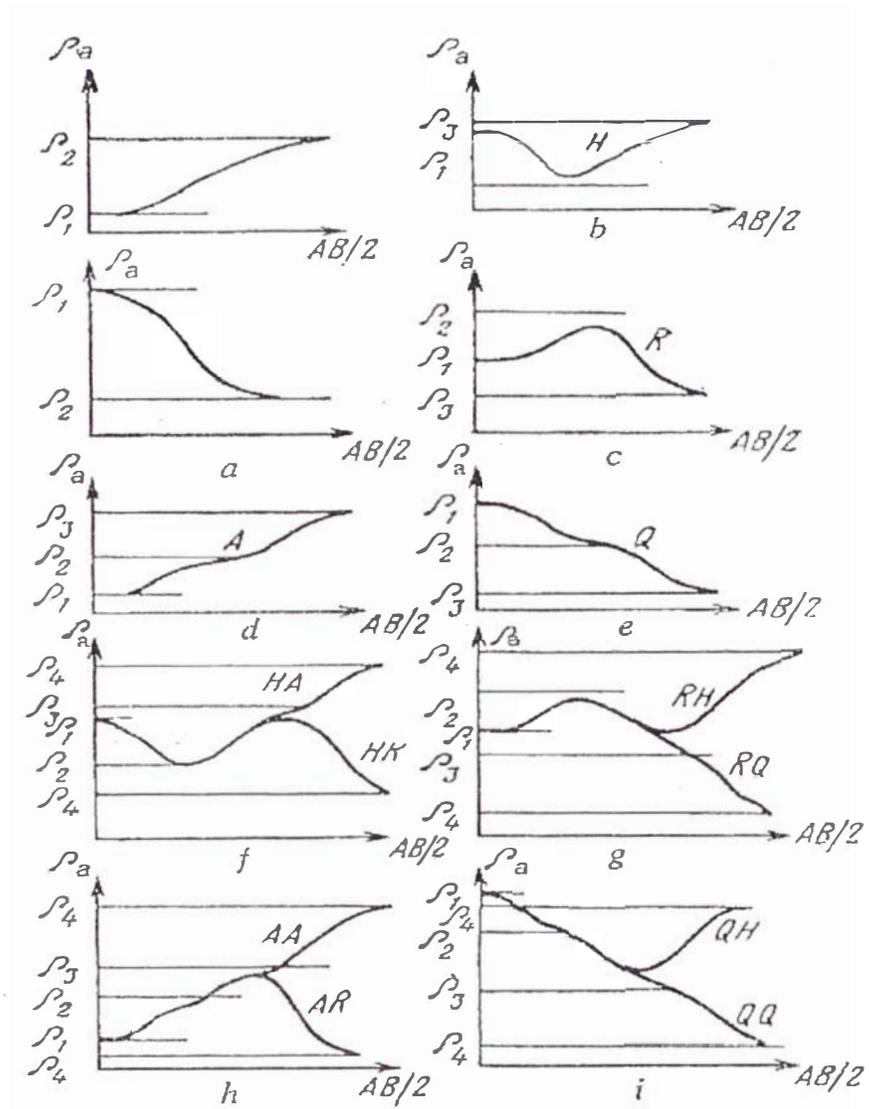


Fig.5.30 Curvas de SEV.a) de 2 capas; b) de 3 capas de tipo H; c) de 3 capas de tipo K; d) de 3 capas de tipo A; e) de 3 capas de tipo Q; f-i) de 4 capas.

a4) Los cortes de 5 o más capas se simbolizan siguiendo el mismo método. Se consideran en primer lugar las tres primeras capas y se les asigna la letra correspondiente indicada en el párrafo a2), luego se hace lo mismo con las capas 2ª, 3ª y 4ª, después con las tercera, cuarta y quinta, etc.

Dado un tipo de corte geoelectrico de $n-1$ capas pueden deducirse el de dos tipos diferentes de cortes de n capas, según que la que se añada (por debajo de la

última, dando a esta previamente espesor infinito) sea más conductora o más resistiva que la anterior. Para el caso de 2 capas, existen 2 tipos: luego, en general, existirán 2^{n-1} tipos de n capas.

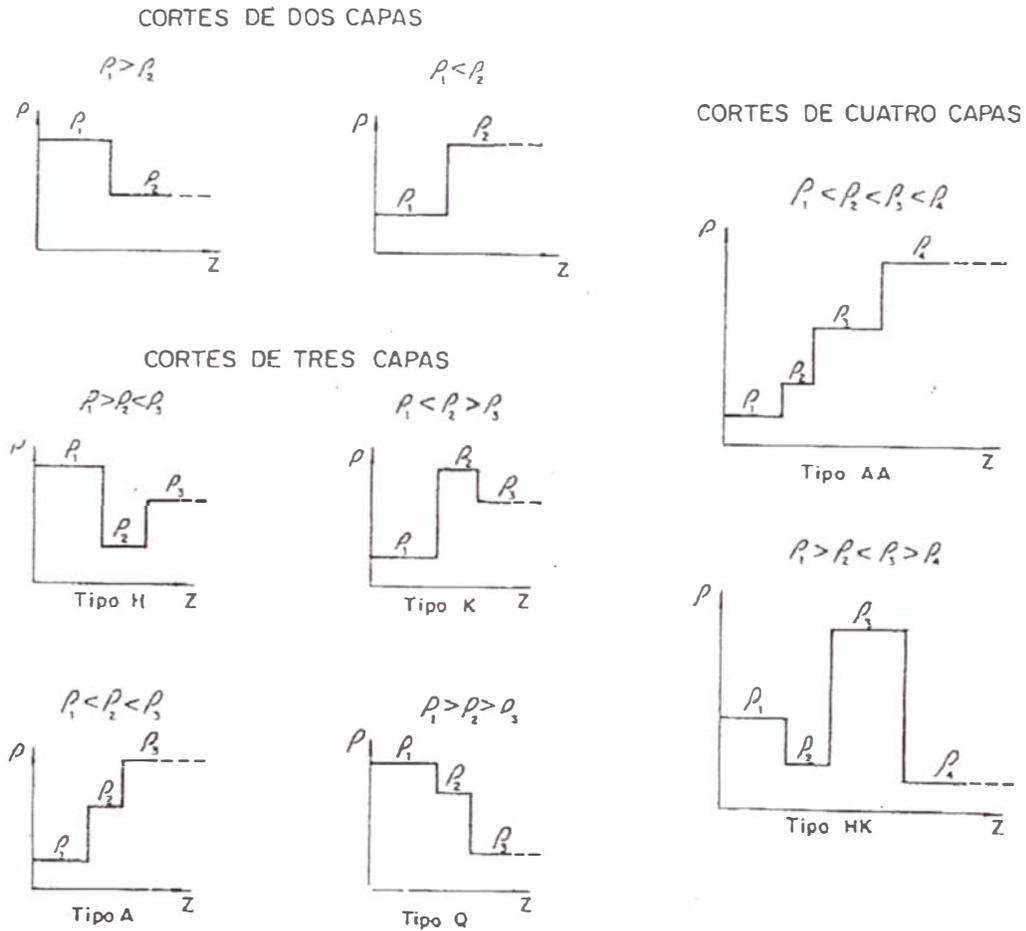


Fig. 5.31 Curvas de Resistividades Verdaderas para diversos cortes geoelectricos y nomenclatura de los tipos de cortes.

Si al representar gráficamente la distribución de resistividades en un corte geoelectrico empleamos escalas logarítmicas en ambos ejes, se obtendrá una gráfica escalonada del mismo tipo que las representadas en la fig. 5.31 aunque quedará modificado el tamaño de los escalones, llamaremos a estos gráficos logarítmicos: Curvas de Resistividades Verdaderas (CRV).

En las figuras subsiguientes: 5.32 y 5.33 se dan ejemplos de distribuciones de Resistividad con indicación del tipo de cortes a que pertenecen, según la notación

expuesta. Las profundidades se representan en abscisas (Eje X) y las resistividades en ordenadas (Eje Y).

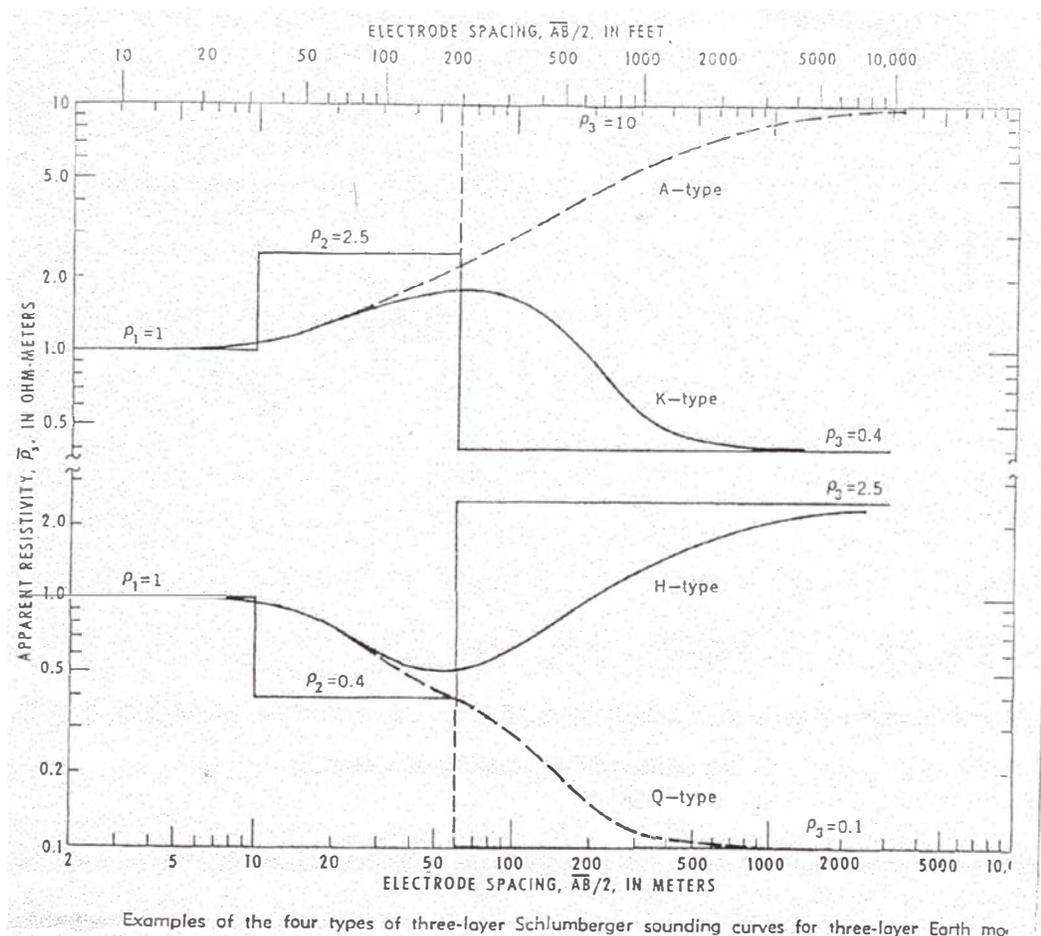


Fig.5.32 Ejemplos de cuatro tipos de gráficas de tres estratos por el método Schlumberger.

NOTAS:

En el caso de curvas a3) de corte de 3 capas se caracterizan porque un porcentaje elevado de ellas tienen un máximo, o un mínimo, o 3 puntos de inflexión, no siempre apreciables, que se corresponden con los cuatro cambios de concavidad-convexidad de la curva. En el caso de que no presenten estas particularidades, la experiencia del interpretador es la única regla para encajarlas con acierto dentro de este grupo de tres capas.

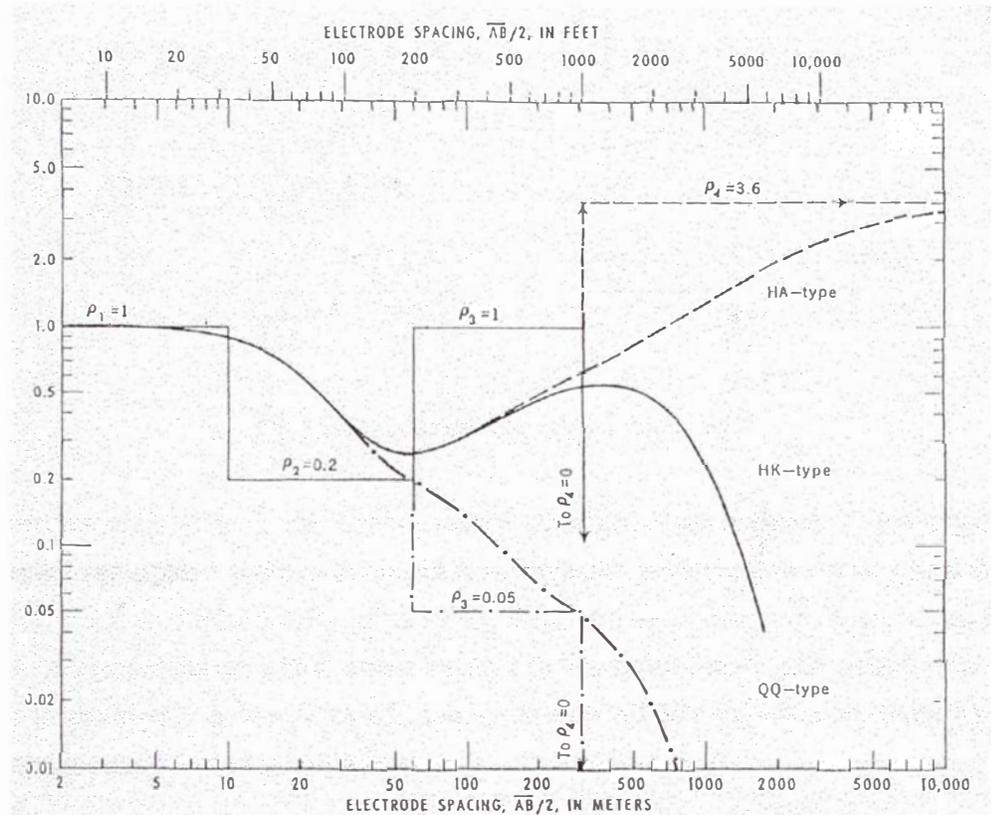


Fig. 5.33 Ejemplo de tres de los ocho tipos de gráficos de cuatro estratos de las curvas del método de Schlumberger.

Los tipos H y K presentan siempre un mínimo y un máximo respectivamente. Fig. 5.34.

La curva empieza igual que para dos capas tangente a la resistividad " ρ_1 " de la primera capa, y acaba asintóticamente a la resistividad ρ_3 de la tercera, pasando generalmente por un mínimo o un máximo, que refleja la tendencia de la curva hacia la resistividad de la segunda capa.

Hay que considerar que el valor del máximo o del mínimo no da la resistividad de la capa intermedia, puesto que solamente una fracción de corriente pasa por esta capa, pero si nos da una referencia al indicarnos que ρ_2 es menor que la resistividad del mínimo o que ρ_2 es mayor que la resistividad del máximo.

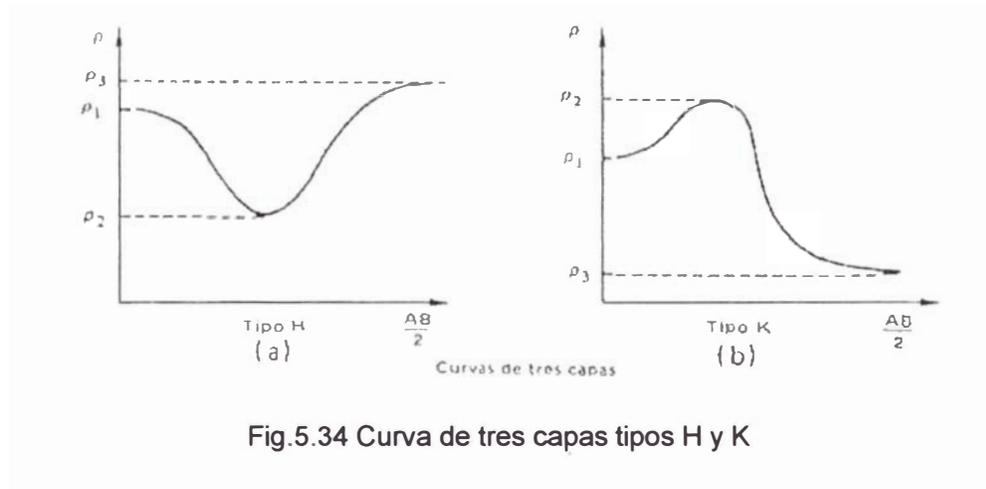


Fig.5.34 Curva de tres capas tipos H y K

Para los tipos A y Q las curvas tienen una forma ascendente y descendente respectivamente. Hacemos la misma consideración para el tramo inicial y final de la curva y, en cuanto al central, a veces se observan en él cambios de curvatura que son consecuencia de que la curva tienda a la resistividad de la capa intermedia. De ahí lo dicho que la curva pueda presentar tres puntos de inflexión, pues ha de cambiar cuatro veces la curvatura.

Nótese que la variación central de la curva no siempre existe, lo que dificulta su clasificación, y consecuentemente su interpretación, que puede dar lugar a interpretarla como una curva de dos capas. Ver fig.5.35.

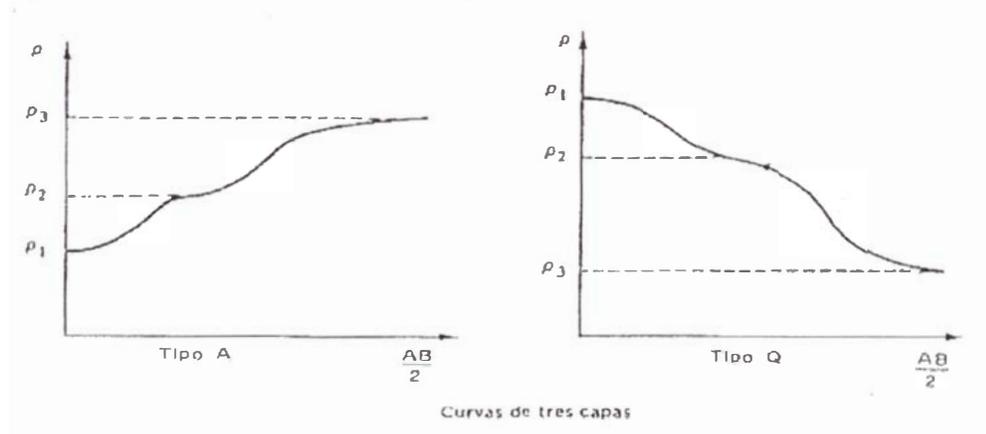


Fig.5.35 Curvas de 3 capas, tipos A y Q.

NOTA: En el caso de curvas de cuatro capas AA, HK, HA; donde las de tipo:

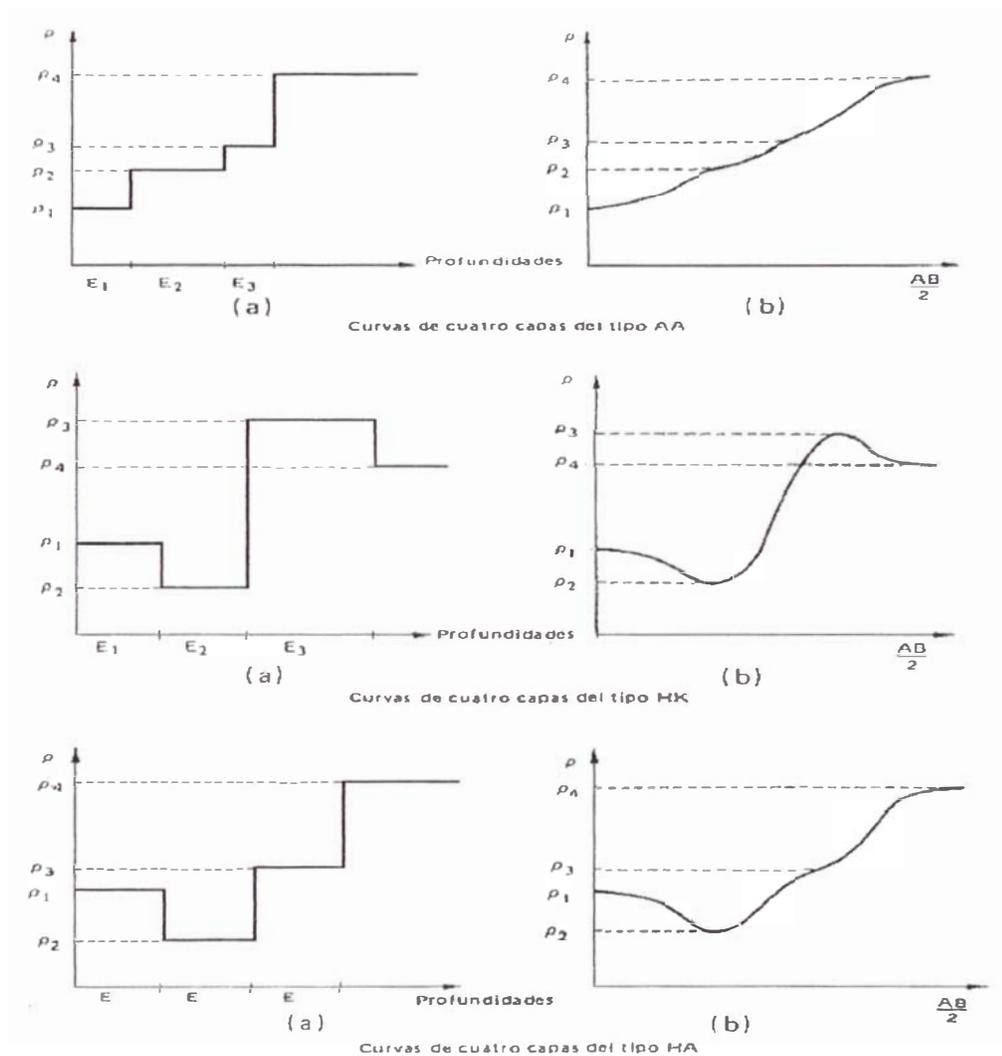


Fig.5.36 Curvas de cuatro capas tipos AA, HK y HA.

AA pertenecen a las que cumplen $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$. Ver fig. 5.36

A los de tipo HK; aquellas en que $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$. Ver fig. 5.36

En las de tipo KH se verifica que $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$, (ver fig. 5.37) y en las de tipo HA se cumple que $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$.

Ambos tipos están dibujados en las figuras correspondientes, así como en la fig. 5.29 donde se grafica a las curvas teóricas de 4 capas en un gráfico bilogarítmico.

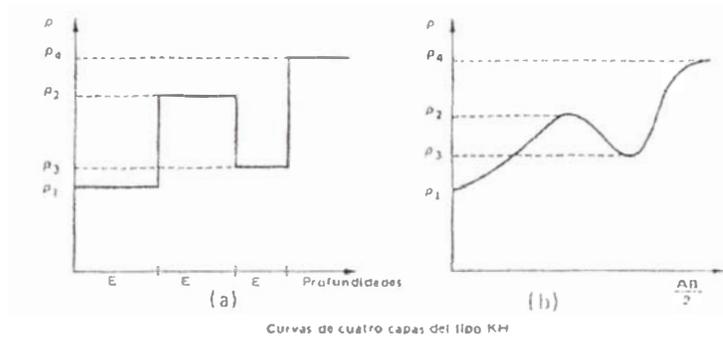


Fig.5.37 Curvas de cuatro capas del tipo KH.

5.12 INTERPRETACIÓN DE LAS CURVAS DE CAMPO

Es necesario hacer notar que para afrontar el problema de la interpretación es necesario una gran experiencia, mucha habilidad, y un conocimiento bastante profundo de la geología de la zona de estudio. Esto último ayuda a elegir o a buscar el mejor resultado en las interpretaciones. Otras veces se fuerza el resultado para seguir la continuidad de un perfil.

Las curvas de Sondeo Eléctrico Vertical se representan en coordenadas rectangulares con malla logarítmica doble (escalas bilogarítmicas). En los ejes coordenados se llevan no los números sino sus logaritmos decimales. Para hallar el segmento que corresponde en escala logarítmica a un número dado, hay que hallar el logaritmo del número y multiplicarlo por un determinado coeficiente constante M denominado "Módulo de la Escala Logarítmica".

$$I_x = M \log x$$

I_x = longitud del segmento incógnito

Si $x = 10$, entonces

$$I_{10} = M \log 10 = M$$

Es decir, el módulo M es la magnitud del segmento que corresponde al log 10 (decimal). Para representar las Curvas de Sondeo se toman entre otros valores un módulo M igual a 6,25 cm.

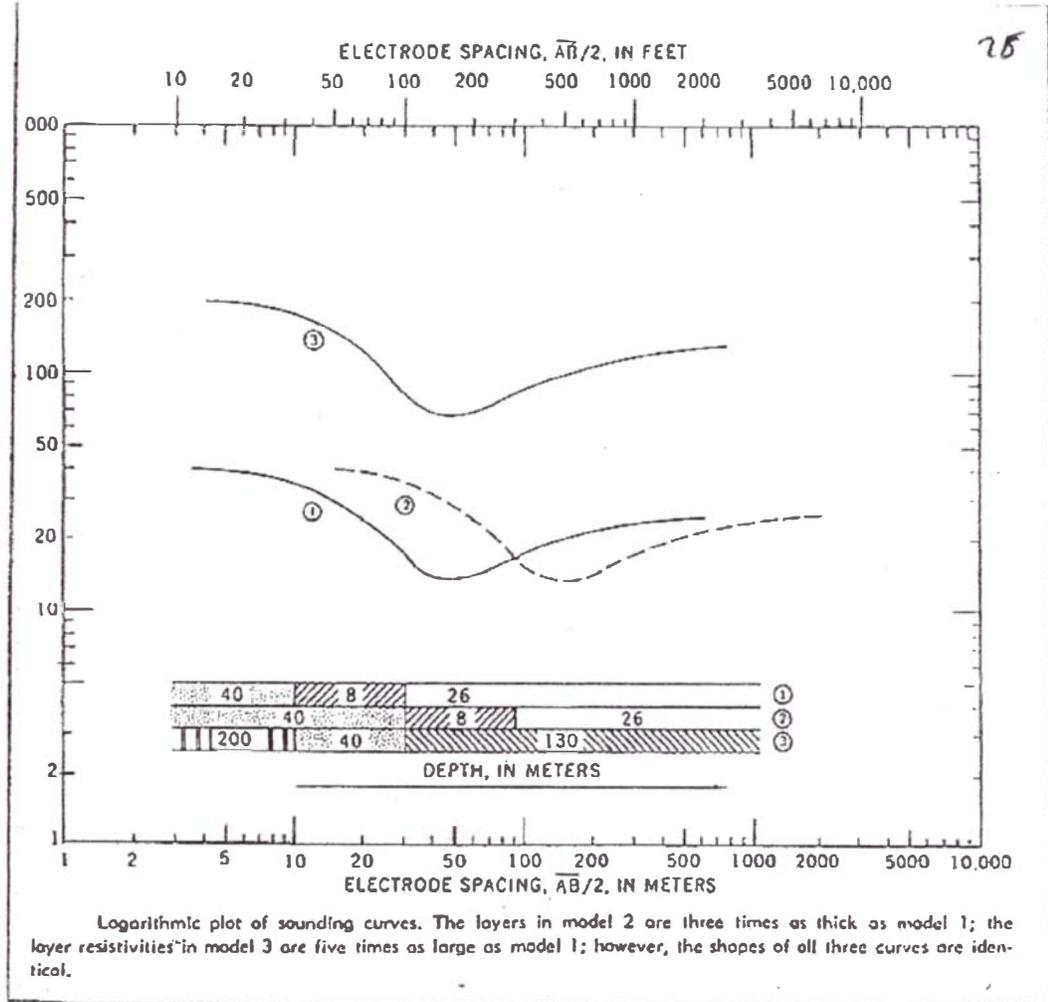


Fig.5.38 Curvas de Sondeo Eléctrico Vertical Bilogarítmicas

La escala bilogarítmica es conveniente porque simplifica mucho la interpretación de las curvas de SEV, debido a que la interpretación se lleva a cabo por la configuración de las curvas SEV obtenidas en el campo, con otras curvas teóricas calculadas por la fórmula 5.15 para las curvas de 2 capas y las correspondientes a las curvas de 3 a más capas.

Para la confección de las curvas SEV se trazan, normalmente, en el eje de las abscisas la separación entre las tomas de tierra de emisión (Método de Wenner) o la semiseparación entre las tierras de emisión $AB/2$ (caso Método de Schlumberger) y; en el eje de ordenadas el valor de la resistividad aparente " ρ_a ".

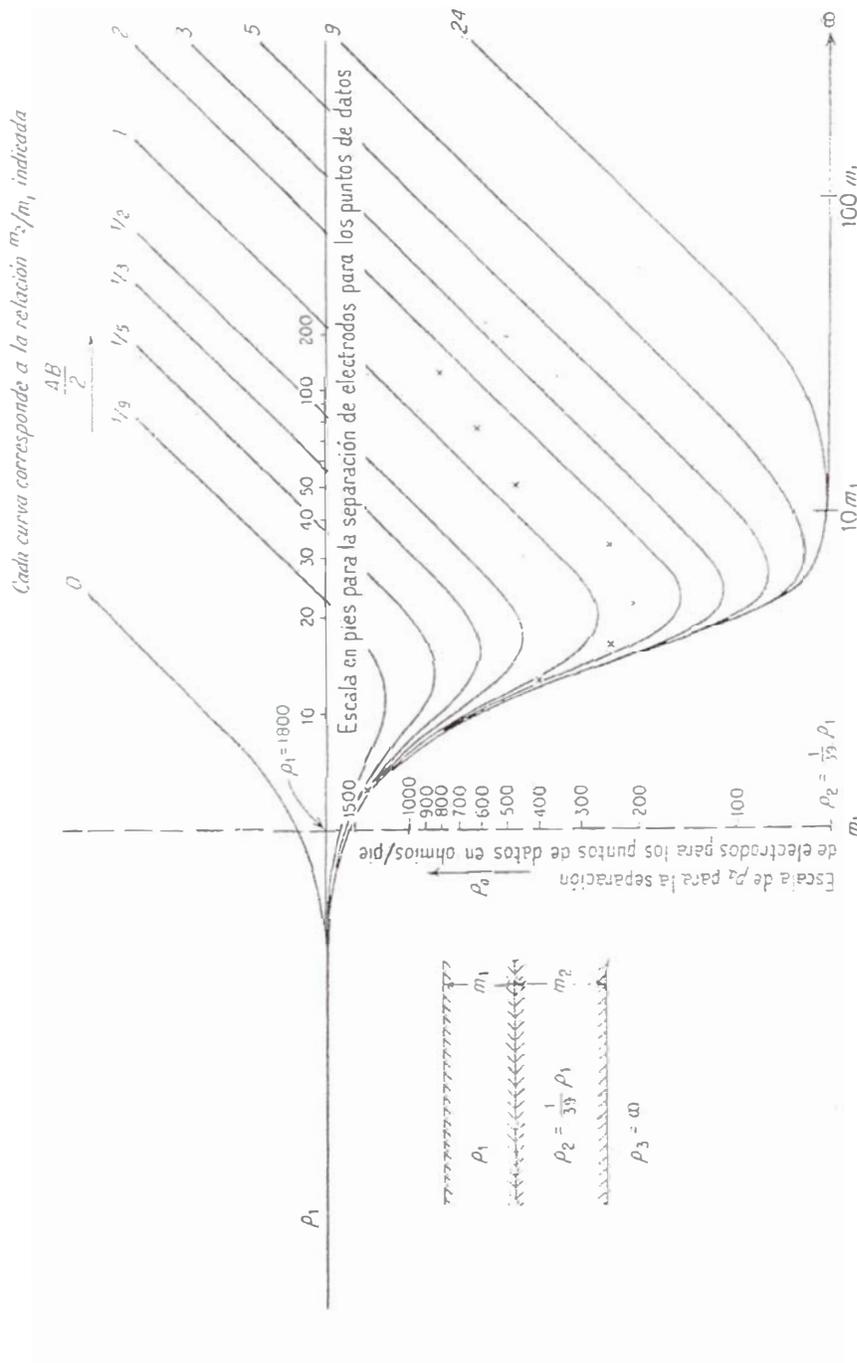


Fig. Serie típica de curvas logarítmicas para tres capas calculada por la Compagnie Générale de Géophysique. La capa superior (ρ_1), de alta resistividad, recubre la capa intermedia ($1/38 \rho_1$), de resistividad muy baja, teniendo la capa inferior una resistividad infinita. Los puntos hipotéticos de datos indican que $m_2 = 1\frac{1}{2} m_1$. (Geophysical Prospecting, 1955.)

Fig 5.39 Series de curvas logarítmicas para tres capas.

Hay que advertir que a veces es conveniente situar hacia abajo el eje de semidistancias y el eje “ ρ_a ” horizontal; pero tomemos como representativo el método anterior de orientación de los ejes coordenados.

Si se representan a escala normal dos curvas de SEV con los mismos valores de $u_1 = \rho_2 / \rho_1$, pero diferente valor de ρ_1 , las curvas se diferencian bastante entre sí. (Fig. 5.40 a).

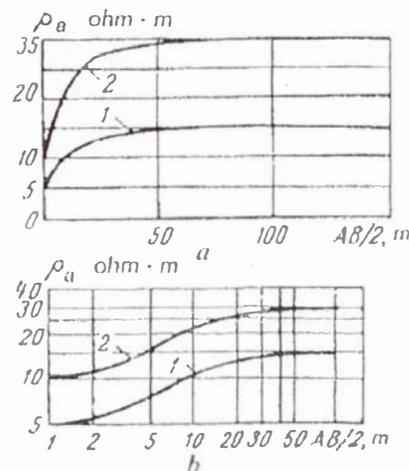


FIG. 45. Curvas de SEV en distintas escalas. Curvas de dos capas: a) en la escala lineal normal; b) en escala bilogarítmica; 1) curva del corte: $\rho_1 = 5$, $\rho_2 = 15$; $\mu_1 = 3$; 2) curva del corte: $\rho_1 = 10$, $\rho_2 = 30$, $\mu_1 = 3$.

Fig. 5.40 a Curvas de SEV en distintas escalas.

Tomando logaritmos a la expresión

$$\rho_a / \rho_1 = f(\rho_2 / \rho_1, \rho_3 / \rho_1, h_2 / h_1, AB / 2h_1)$$

que es la expresión genérica de las curvas SEV de las tres capas que relacionan los espesores y las resistividades aparentes de los horizontes que forman el corte geoelectrico de un suelo típico se obtiene:

$$\log \rho_a = \log \rho_1 + \log f(u_1, u_2, v_1, AB / 2h_1)$$

$$\begin{cases} u_1 = \rho_2 / \rho_1 \\ u_2 = \rho_3 / \rho_1 \\ u_3 = h_2 / h_1 \end{cases} \dots (5,19)$$

Las curvas de SEV ya no dependen de la magnitud ρ_1 ; en efecto, ahora las curvas con los mismos valores de los módulos, pero distinto valor de ρ_1 , serán semejantes

y tan solo desplazados a lo largo del eje de ordenadas, una de otra en un segmento igual a $\log \rho_1$ (Fig.5.40 b).

Por consiguiente; la aplicación de la escala logarítmica permite disminuir el número de curvas teóricas necesarias, ya que su forma no dependerá de los valores absolutos de ρ_1 .

Si hallamos el logaritmo del Argumento de la Función F en la ecuación:

$$\rho_a = \rho_1 F (AB / 2h_1) \quad \dots (5.20)$$

que es una reducción de la ecuación 5.19 anterior producto de dar valores numéricos a los espesores y resistencias de los horizontes del corte geoelectrico del suelo típico de tres estratos; entonces la ecuación, ya tomada logaritmos, resulta:

$$\log \rho_a = \log \rho_1 - \log \varphi [\log (AB / 2) - \log h_1] \quad \dots (5.21)$$

De esta expresión se deduce que la forma de la curva de sondeo construida con doble malla logarítmica, ya no dependerá tampoco del espesor h_1 de la capa superior; al variar h_1 la curva tan solo se desplazará a la derecha o a la izquierda a lo largo del eje de las abscisas.

Hay que considerar estas circunstancias:

Puesto que en el eje de abscisas del impreso bilogarítmico se trazan magnitudes lineales y en el eje de ordenadas, resistividades, entonces las coordenadas x_p y y_p de cualquier punto P del gráfico tienen como dimensiones respectivas metros (m) y ohm-metro (ohm-m), es decir, corresponden a los parámetros de cualquier capa. De aquí se deduce también la conclusión inversa, a cualquier capa con parámetros h_p y ρ_p corresponde un punto P del gráfico de coordenadas $x_p = h_p$ e $y_p = \rho_p$.

Como aspecto práctico adicional, es necesario indicar que existen familias de curvas de más de 1000 de ellos de dos, tres y cuatro capas.

Para comodidad de manejo de las curvas “teóricas” se han reunido en ábacos que son grupos de curvas, con un cierto parámetro común y que se presentan en un mismo croquis

En la Unión Soviética se emplean dos conjuntos de ábacos:

1ª) La colección de ábacos compuesta por el VSEGEI bajo la dirección de A.M. Pylaev y

2ª) la colección confeccionada por la empresa Schlumberger y aumentada por las organizaciones de investigación científica de la Industria Petrolera (Colección GP de ábacos para capas horizontales). Las colecciones se diferencian por el sistema de agrupamiento de curvas en los ábacos y procedimientos de utilización para la interpretación.

En la última edición, la Colección G, consta de dos tomos. En el primero se reúnen las curvas de SEV de dos y tres capas y en el segundo tomo las curvas de 4 capas. Desarrollaremos detalles de la colección de ábacos del VSEGEI (A.M. Pylaev).

Las curvas de dos capas de la colección están reunidas en un ábaco que se denomina "Abaco ρ_2 ". Las curvas situadas encima del eje de las abscisas corresponden a los valores de $u_1 < 1$. (En la Colección GP estas curvas se representan en 2 ábacos diferentes para $u_1 > 1$ y para $u_1 < 1$).

Los valores del módulo v_1 ($v_1 = h_2/h_1$) de cada curva están escritos en un pequeño círculo. El punto de intersección del eje de abscisas con el eje de ordenadas se denomina "Cruz del Abaco".

En el ábaco se ve que las curvas de módulo $u_1 < 1$, aún para valores no muy grandes de $AB/2$ descienden fuertemente y para $AB/2 \approx 10 h_1$ los valores de ρ_a alcanzan la magnitud ρ_2 .

Las curvas de módulo $u_1 > 1$ suben más despacio. Aún para $AB/2 = 100 h_1$, los valores de ρ_a son tan solo el 90% de la magnitud, $\rho_2 = 19 \rho_1$, el 72% de la magnitud, $\rho_2 = 39 \rho_1$ y el 50% de la magnitud $\rho_2 = 99 \rho_1$. Por consiguiente, los niveles conductores se reflejan en las curvas de sondeo más intensamente que los niveles de resistividad elevada.

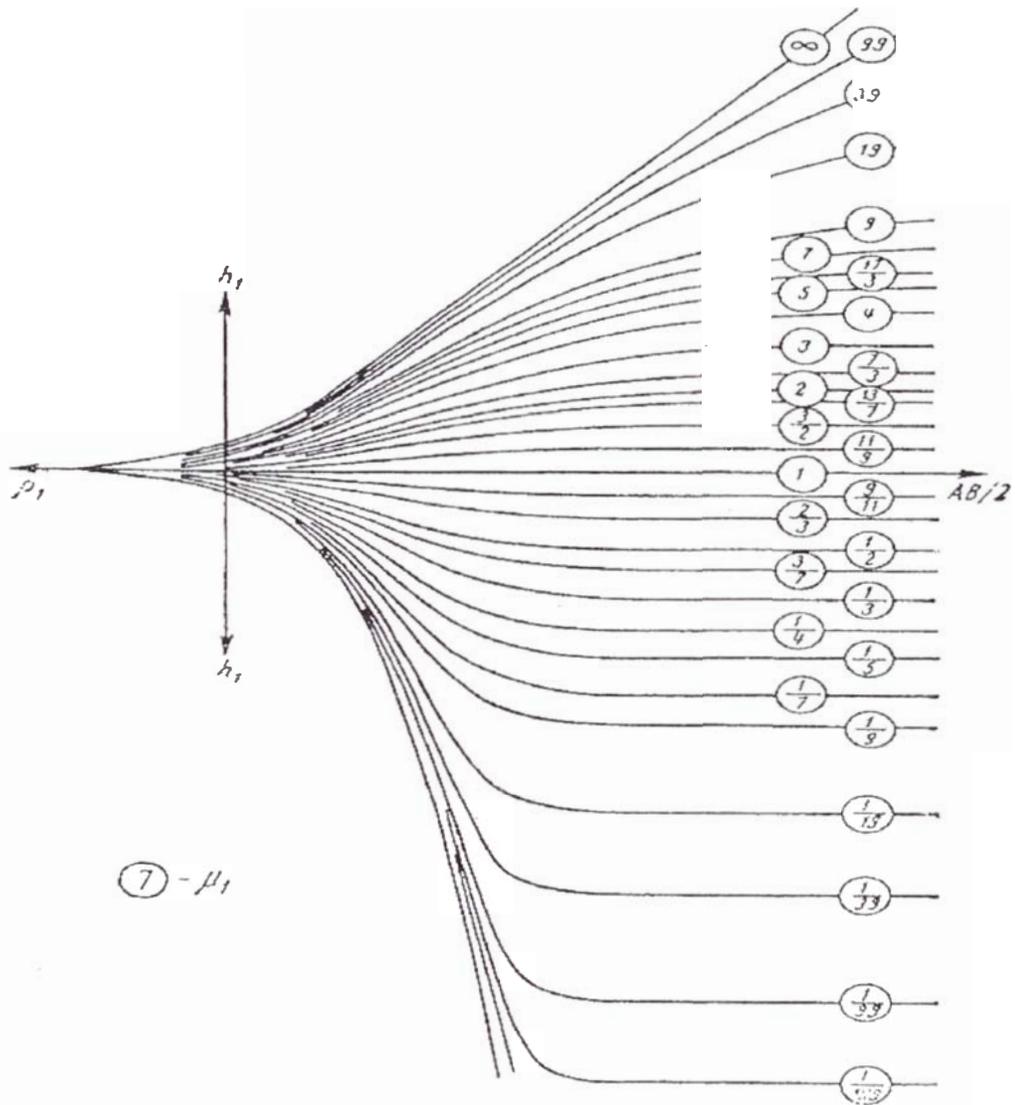


Fig.5.41 Abaco ρ_2 de dos capas

Hay que llamar la atención sobre el hecho de que la curva, para $u_1 = 0$, es decir para un horizonte subyacente conductor ideal; tiende de modo casi vertical al infinito negativo ($\log \rho_2 = \log 0 = -\infty$).

Al tiempo que la curva para el caso contrario, de horizonte subyacente aislante ($u_1 = \infty$), comenzando aproximadamente en $AB/2 = 2 h_1$, tiende asintóticamente a una línea recta que forma un ángulo de 45° con el eje de abscisas.

Si se tiene en cuenta que el corte de 2 capas, caracterizado por el módulo $u_1 = \infty$, la corriente eléctrica se propaga solamente a través del horizonte conductor superior, se hace evidente que, para una gran separación de las tomas de tierra de emisión, la corriente circula paralelamente a la estratificación.

5.13 EJEMPLO TEÓRICO DE INTERPRETACIÓN DE CURVAS DE CAMPO

Veamos la Tabla 5.9 de datos para un SEV.

Estación	<i>AB</i>	<i>MN</i>	<i>I</i>	ΔV	<i>V</i>	Perfil 3 SEV 23	
						<i>k</i>	ρ_a
	2	2	<i>m.A.</i>	<i>mV</i>	<i>I</i>		
1	1.5	0.4	6.5	4842	745	8.2	6100
2	2	0.4	7.0	2620	384	15.1	5800
3	3	0.4	8.4	1210	144	34.7	5000
4	4	0.4	9.3	625	67.2	62.5	4200
5	5	0.4	9.0	332	36.9	97.5	3600
6	6	0.4	9.5	200	22.1	140.6	3100
7	8	0.4	9.5	98.5	10.35	251	2600
8	10	0.4	9.2	54	5.87	392	2300
9	13	0.4	9.4	29.8	3.17	663	2100
8	10	2	12.8	390	30.5	75.4	2300
9	13	2	13.4	200	15.15	130	2100
10	16	2	11.6	120	10.35	198	2050
11	20	2	14.0	90	6.44	311	2000
12	25	2	14.5	59.5	4.10	488	2000
13	32	2	14.2	34.4	2.44	801	1950
14	40	2	14.0	21.4	1.53	1.253	1900
15	50	2	13.5	13.1	0.97	1960	1900
14	40	8	13.5	85	6.30	302	1900
15	50	8	13.8	55	3.98	478	1900
16	65	8	13.3	33	2.33	817	1900
17	80	8	14.0	21.4	1.53	1.244	1900
18	100	8	13.4	13	0.97	1951	1900
19	130	8	14.9	8.5	0.57	3305	1900
20	160	8	15.0	5.7	0.38	5014	1900

Tabla 5.9 Mediciones del SEV 23 Perfil 3 de datos de campo.

La curva correspondiente a dicha tabla se grafica en el papel bilogarítmico transparente, fig. 5.42, se superpone sobre el ábaco hasta que, manteniendo los

ejes paralelos, la curva de campo coincide con alguna patrón, o, se pueda interpolar entre dos curvas.

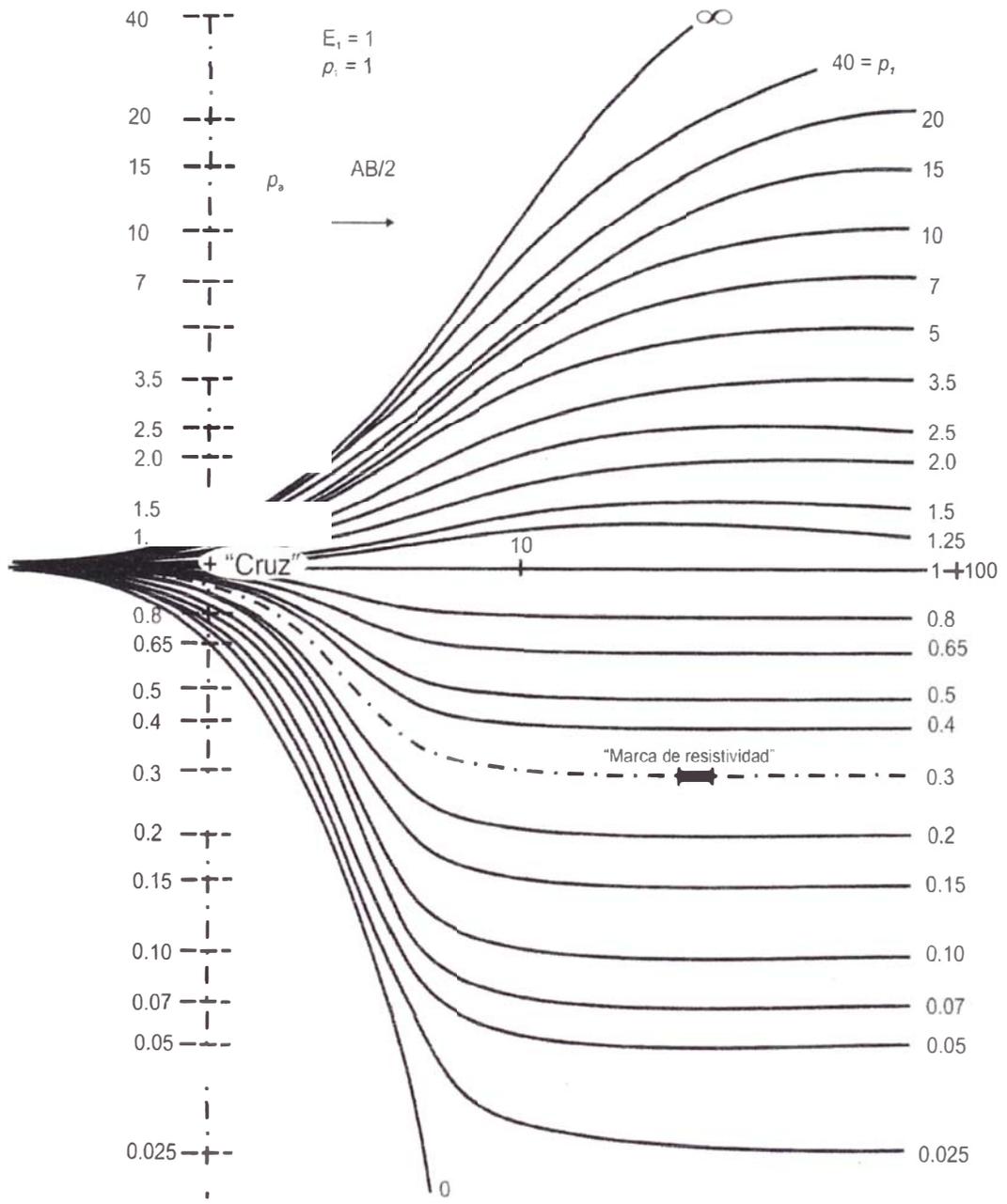


Fig. 5.42 Coincidencia de los valores de la Tabla 5.9 en los ábacos de Orellana-Mooney, de Curva Patrón de dos capas tipo descendente ($\rho_2 < \rho_1$)

TRATADO DE GEOFISICA APLICADA

Prospección en _____ Fecha _____

Interpretación Capas	Espesor(m)	Resistividad (Ω m)
1	2	6.500
2		2.000

Datis :
 Azimut de A B _____
 Cota de sup Z = _____
 Coordenadas X _____
 Lambert Y _____

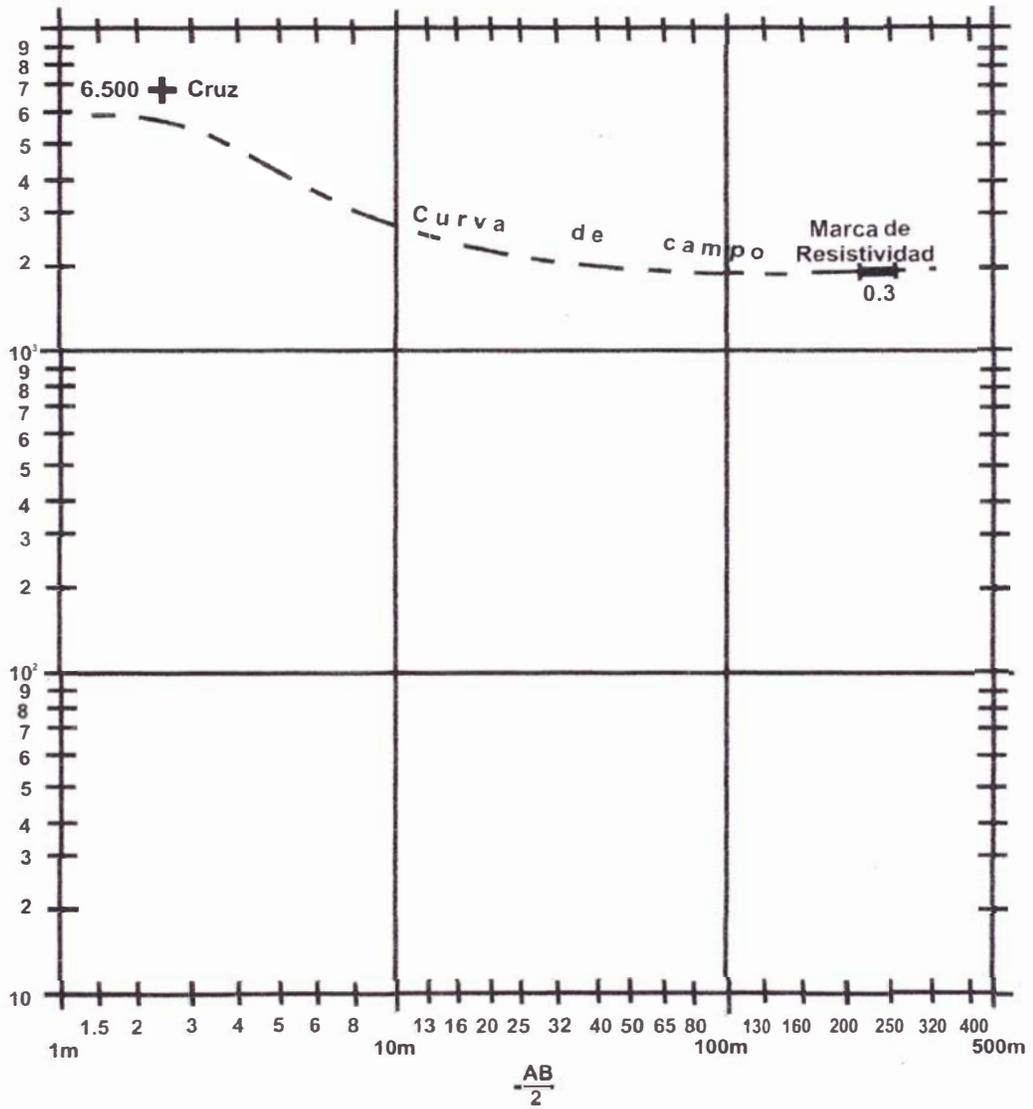


Fig.5.43 Curva $\rho_a \times a$ de dos capas tipo descendente.

Una vez conseguida la curva teórica que calce con la curva experimental, se calca sobre el papel de la curva de campo, la “cruz” (origen de coordenadas del ábaco) y la “marca de resistividad” en este caso 0,3; se refiere a: $\rho_2 = K \rho_1$ que aparece en ordenadas sobre cada curva del haz.

El espesor y resistividad de la primera capa lo dan la abscisa y ordenada de la cruz sobre los ejes de la curva de campo.

La segunda y última capa se considera de espesor infinito y su resistividad viene dada en función de la resistividad de la primera capa, por la marca de resistividad.

En nuestro ejemplo, el ajuste de la curva sobre el ábaco aparece en la fig. 5.42 a la vista se deduce: $\rho_1 = 6500$ y $E_1 = 2m$.

La marca de resistividad, interpolando, es aproximadamente $\rho_2 = 0,3 \rho_1$. Luego $\rho_2 = 0,3 * 6500 = 1950 \Omega \times m$.

Vamos a ver a continuación como se interpreta una CURVA DE TRES CAPAS, valiéndonos del Método del Punto Auxiliar. Usaremos el llamado Método de Ebert, de interpretación de curvas de tres capas, mediante las curvas patrón de dos.

Se hace el artificio de sustituir las dos primeras capas por una sola capa ficticia, cuya resistividad y espesor ρ_e y E_e o h_e los da la abscisa y ordenada de la segunda cruz.

Vemos que es una curva de tipo Q de tres capas; se superpone la parte izquierda de la curva de campo con la teórica que mejor se ajuste del ábaco correspondiente a las curvas patrón de dos capas del tipo descendente ($\rho_2 < \rho_1$). Ver Fig. 5.45 y se calca la primera cruz (origen de coordenadas del ábaco patrón y la marca de resistividad).

Para el caso de tres capas tenemos la Tabla 5.10

Estación	Perfil 3 SEV 23						
	<i>AB</i>	<i>MN</i>	<i>I</i>	ΔV	ΔV	<i>k</i>	ρ_a
	2	2	<i>m.A.</i>	<i>mV</i>	<i>I</i>		
1	1.5	0.4	8	4.1	550	8.2	4500
2	2	0.4	99	2440	271	15.1	4100
3	3	0.4	9.3	870	93.6	34.7	3250
4	4	0.4	9.6	400	41.6	62.5	2600
5	5	0.4	9.2	200	21.75	97.5	2100
6	6	0.4	9.1	106	11.55	140.6	1620
7	8	0.4	11.3	45	3.99	251	1000
8	10	0.4	11.7	19.4	1.66	392	650
9	13	0.4	11.7	6.9	0.59	663	390
8	10	2	12.4	107	8.62	75.4	650
9	13	2	12	36	3	130	390
10	16	2	12	14.4	1.2	198	240
11	20	2	12.5	6	0.48	311	150
12	25	2	11.9	2.5	0.21	488	104
13	32	2	11.7	1.1	0.094	801	75
14	40	2	11.2	0.6	0.535	1.253	67
15	50	2	12	0.4	0.0333	1960	65
14	40	8	12.1	2.7	0.223	302	67
15	50	8	12.5	1.7	0.136	478	65
16	65	8	12.1	0.95	0.785	817	64
17	80	8	13.6	0.7	0.515	1.244	64
17	80	32	12.8	3.5	0.274	263.4	72
18	100	32	12.4	2	0.161	439.8	72
19	160	32	13.4	0.8	0.0596	1206	72
20	200	32	10.5	0.4	0.38	1913	72

Tabla 5.10 Mediciones del SEV 23 Perfil 3 de datos de campo para curva de tres capas.

La ordenada de la primera cruz de $\rho_1 = 5000 \Omega \times m$ y la abscisa $E_1 = 1,5 m$. La marca de resistividad es $\rho_2 = 0,3 \rho_1 = 0,3 * 500 = 1500 \Omega \times m$.

Véase este primer paso en la Fig.5.45

TRATADO DE GEOFISICA APLICADA

Prospección en _____ Fecha _____

Interpretación Capas	Espesor	Resistividad (Ω m)	Datis :
1	1.5	5.000	Azimut de A B _____
2	3.9	1.500	Cota de sup _____
3		76	Coordenadas _____
			Lambert _____

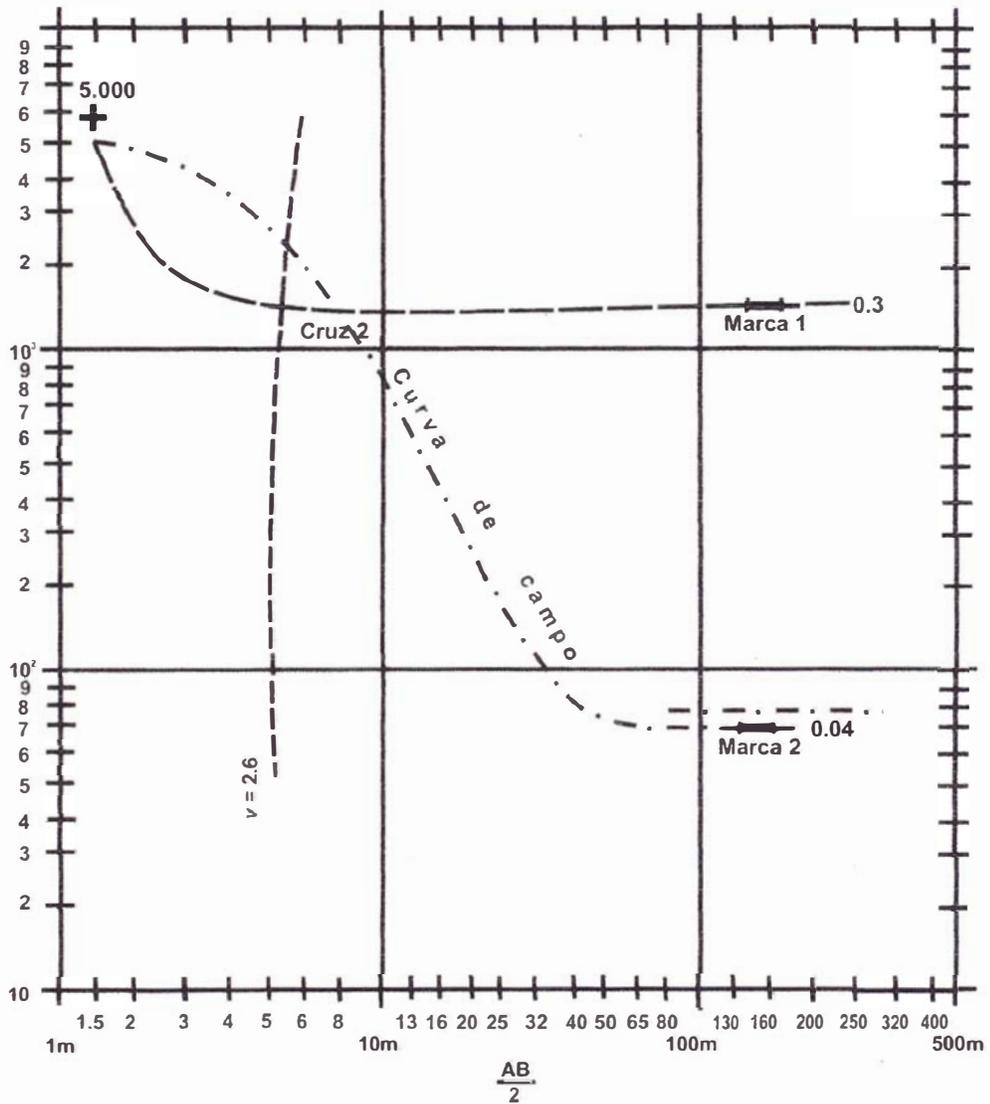


Fig. 5.44 Curva $\rho_{ax} a$ de tres capas tipo Q.

Posteriormente se coloca la primera cruz marcada en la hoja de campo, sobre el origen de coordenadas del Diagrama del Punto Auxiliar, para las curvas de tipo Q,

que aparecen en la Fig.5.46 teniendo la precaución de mantener siempre los ejes paralelos. Se calca sobre la curva de campo, la curva que parte de la primera cruz y corresponde a la marca de resistividad hallada antes; esto es, $\rho_2 = 0,3 \rho_1$.

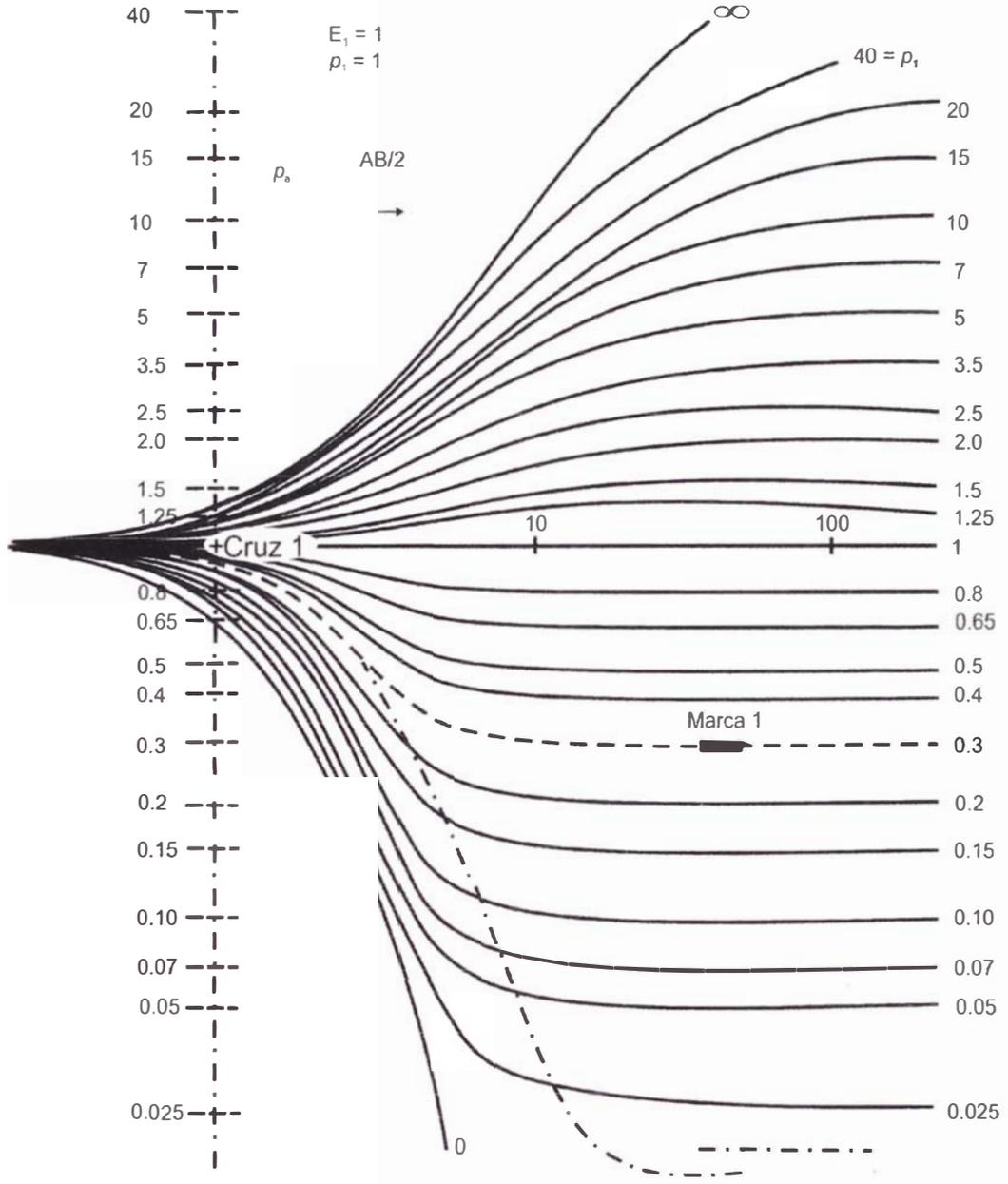


Fig. 5.45 Coincidencia de los valores de la Tabla 5.10 en los ábacos de Orellana-Mooney, de Curva Patrón de tipo Q

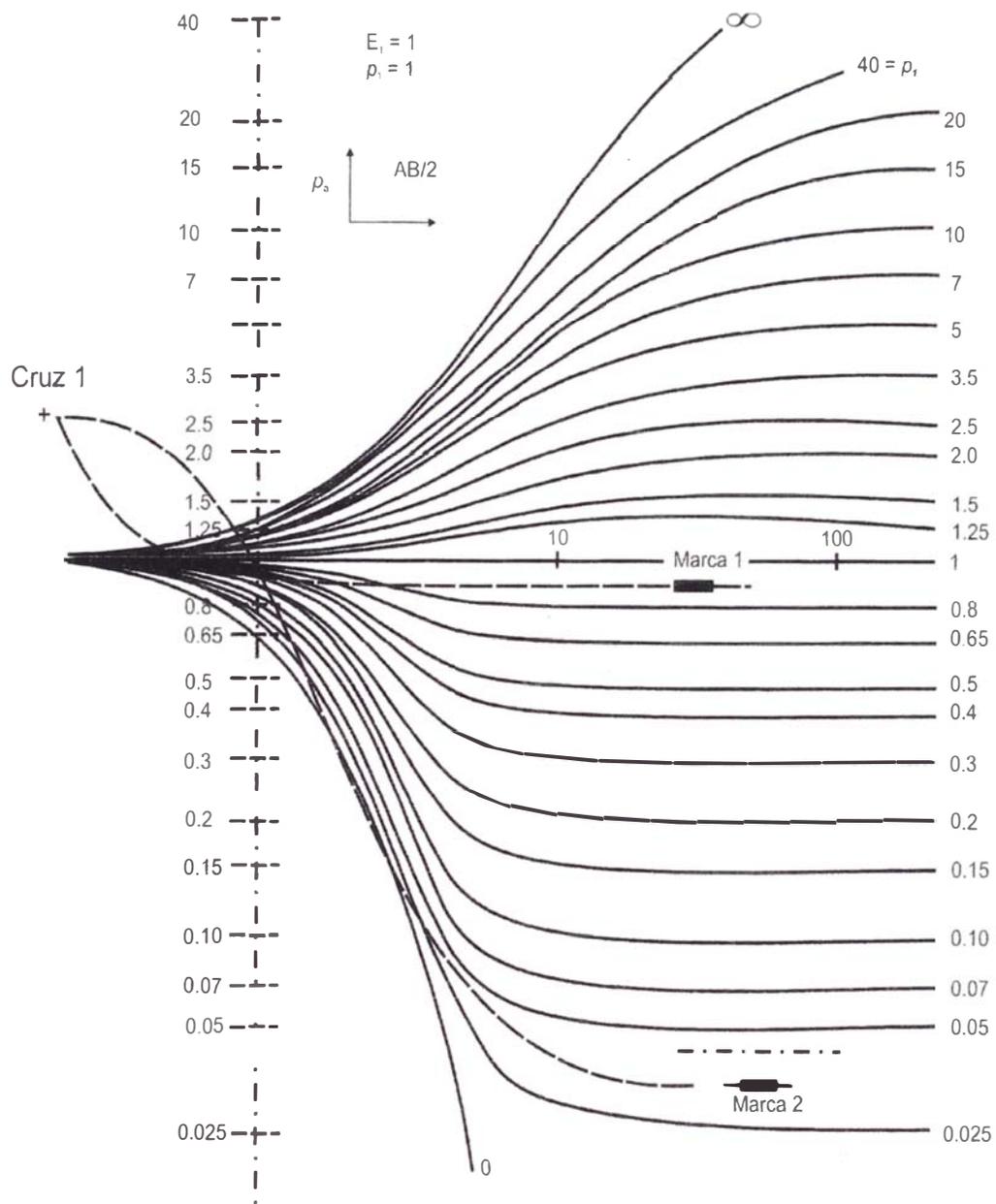


Fig. 5.46 Curva de diagrama del Punto Auxiliar para gráficos tipo Q.

El papel transparente con la curva de campo se superpone otra vez a la lámina patrón de dos capas, teniéndose cuidado de mantener los ejes paralelos, se desplaza ésta sobre aquella, llevando siempre el origen de coordenadas de la lámina patrón sobre la curva de campo. La ordenada y abscisa de la segunda cruz dan la resistividad y espesor de la capa ficticia.

Curvas Tipo Q

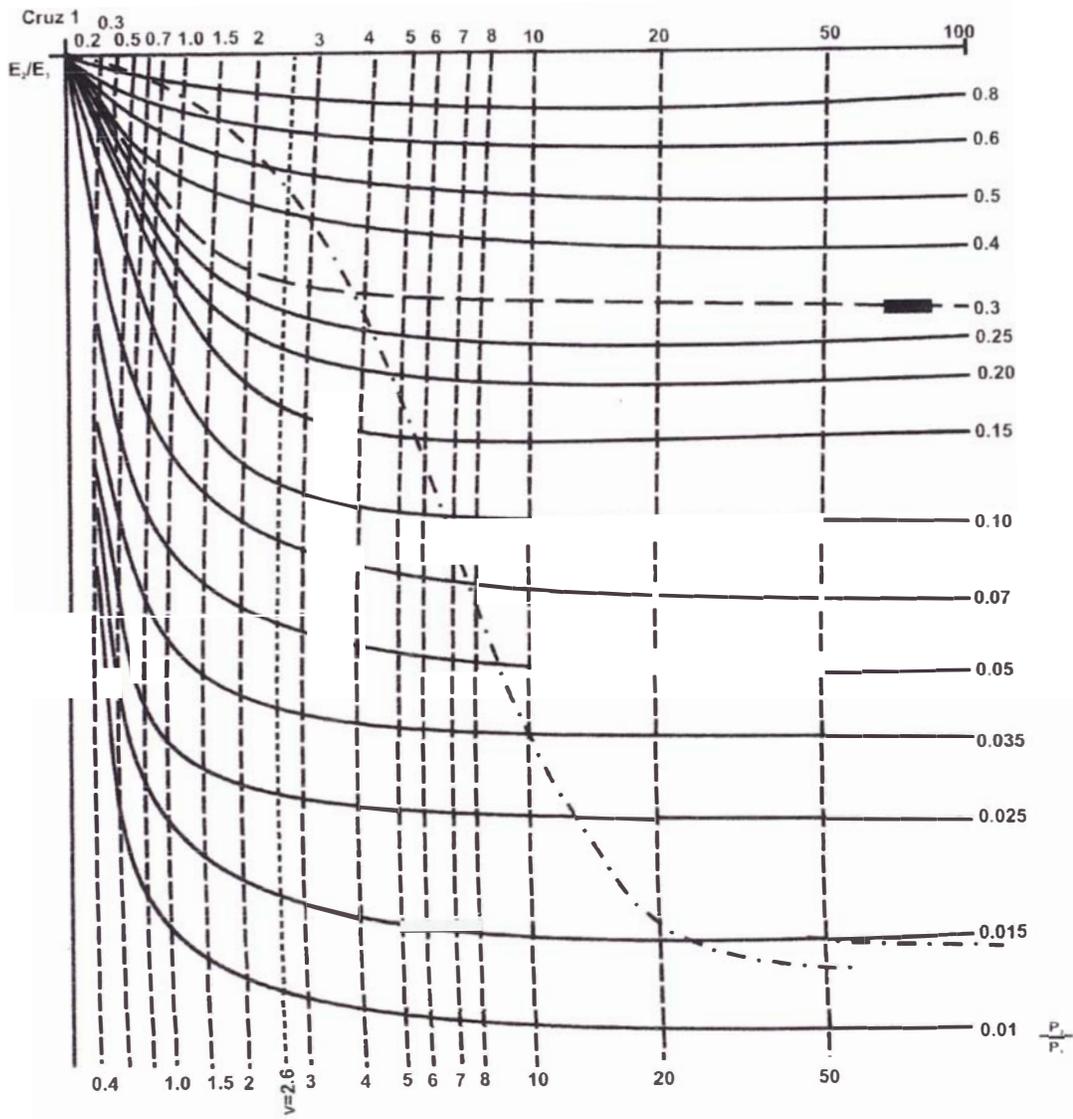


Fig. 5.47 Gráficas para el cálculo del Punto Auxiliar tipo Q.

Anotamos $\rho_e = 1900 \Omega \times m$, y la marca de resistividad $\rho_3 = 0,04 \rho_e$

De la que se obtiene: $\rho_3 = 0,04 * 1900 = 76 \Omega \times m$.

Se puede ver este paso en la Fig. 5.48.

Se superpone nuevamente la cruz de campo sobre el gráfico auxiliar, colocando la primera cruz sobre el origen. Sobre la segunda cruz se calca la curva de línea continua que pasa sobre ella, interpolándola, y se anota el número que le

corresponde $v = E_2 / E_{\rho_1}$. Fig.5.46.

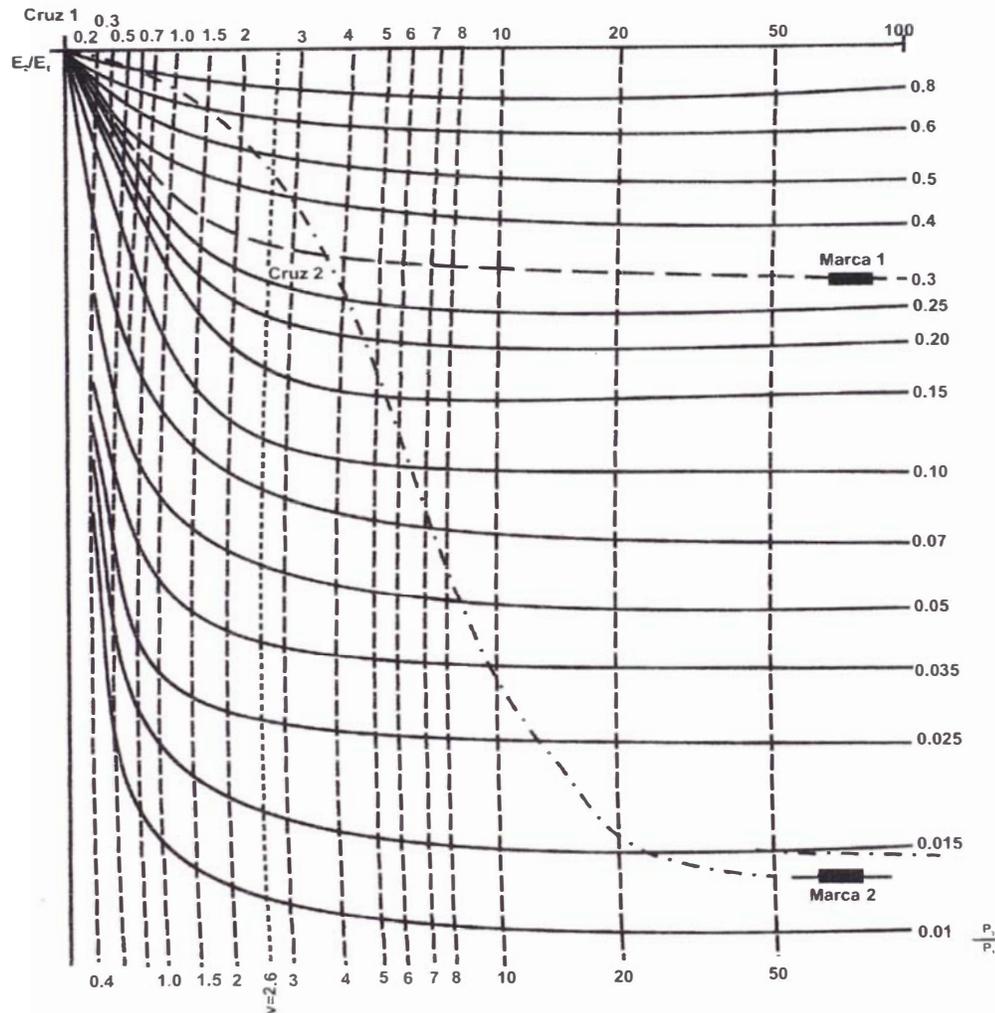


Fig.5.48 Gráficas para el cálculo del Punto Auxiliar tipo Q.

Anotamos $E_2 / E_{\rho_1} = 2,6$,luego

$$E_2 = 2,6 * 1,5 = 3,9 \text{ m.}$$

Este sondeo queda interpretado de la siguiente manera:

$$\rho_1 = 500 \Omega \times \text{m} \quad E_1 = 1,5 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 1500 \Omega \times \text{m} \quad E_2 = 3,9 \text{ m}$$

$$\rho_3 = 76 \Omega \times \text{m}$$

Estas curvas de tres capas, se pueden también interpretar con las curvas patrón para tres capas, de una forma similar como se hizo para dos capas, pero ello requiere el manejar un gran número de curvas patrón, resultando más engorroso, por lo que preferimos la utilización de método que acabamos de exponer del punto auxiliar.

5.14 MÉTODO GRÁFICO DE YOKOGAWA

Este es un método gráfico en el manual del aparato Yokogawa de medición de Resistencia de tierra. Con este método se puede efectuar la estratificación del suelo en varias camadas horizontales con razonable aceptación.

El origen del método basado en la logaritmicación de la expresión 5.15 obtenida del modelo de suelo de dos camadas. Así, usando el logaritmo de ambos lados de la expresión 5.15 se tiene:

$$\log \left[\frac{\rho(a)}{\rho_1} \right] = \log \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad \dots (5.22)$$

Empleándose la misma filosofía usada en el modelo desarrollado en el ítem 5.8 se puede construir una familia de curvas teóricas de $\log [\rho_{(a)} / \rho_1]$ en función de "h/a" para una serie de valores de K dentro de toda su faja de variación.

Haciendo el trazado de las familias de las curvas teóricas, en un grafico con escala logarítmica, esto es log – log (doble logarítmica) , se tiene obtenida la CURVA PATRON, mostrada en la figura 5.50.

La curva patrón obtenida en la escala logarítmica es similar a las curvas de los gráficos de las figuras 5.13 d y 5.13 e, trazadas juntas. Los valores de $\rho_{(a)} / \rho_1$ están en la ordenada del grafico 5.50, en las abscisa están los valores de h/a de las curvas respectivas K están indicadas por su correspondiente ρ_2 / ρ_1

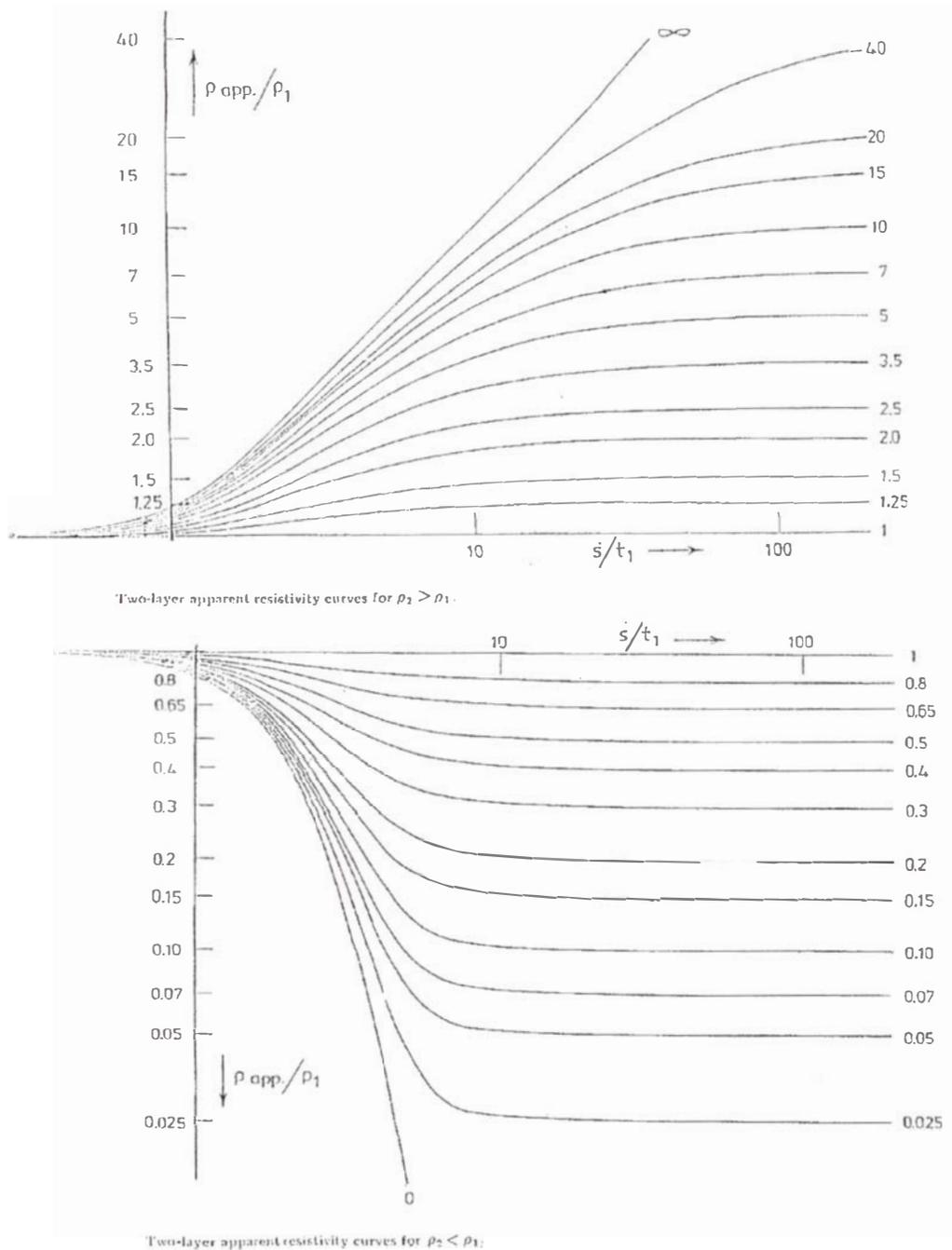


Fig.5.49 Curvas Patrón para dos estratos.

Estas curvas son relativas a las curvas teóricas obtenidas específicamente del modelo de suelo de dos camadas.

Un suelo típico de dos capas es caracterizado por los tres parámetros: ρ_1 , ρ_2 y h . Haciendo las mediciones en este suelo, por el método de WENNER y trazando la curva $\rho(a) \times a$ en la escala logarítmica o sea en el formato típico de la CURVA PATRON.

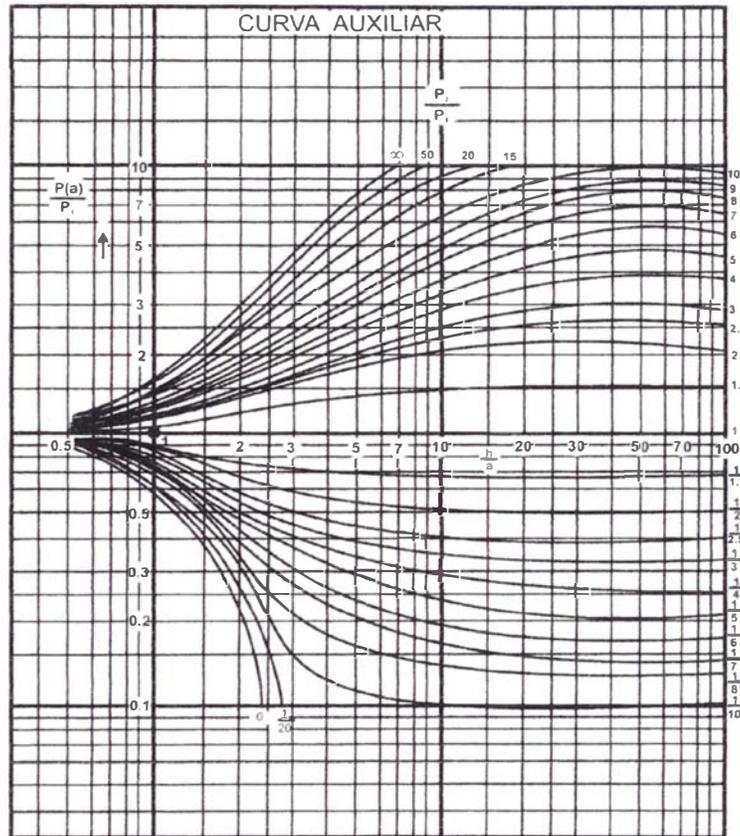


Fig. 5.50 Curva Patrón para el método gráfico de Yokogawa.

Haciendo manualmente el perfecto casamiento de la curva $\rho(a) \times a$ (o coincidencia) en la escala logarítmica con una determinada curva patrón, se tiene entonces la identidad establecida. Esto equivale a tener en el método de WENNER el espaciamiento igual a la profundidad de la primera camada, esto es, $a = h$, en el suelo de dos capas. Ver figura 5.52.

Por lo tanto, en el punto de la curva $\rho(a) \times a$ que coincide con la ordenada $\rho(a) / \rho_1 = 1$ en una curva patrón, se lee directamente el valor específico de $\rho(a)$, que es igual a la resistividad ρ_1 de la primera camada. Este punto se denomina el polo O_1 de la primera camada que representa en una curva $\rho(a) \times a$ el punto de

medición por el método de WENNER que tenga el mismo valor de resistividad de la primera camada, juntamente con su respectivo espaciamiento "a" que es idéntico a la profundidad de la primera camada.

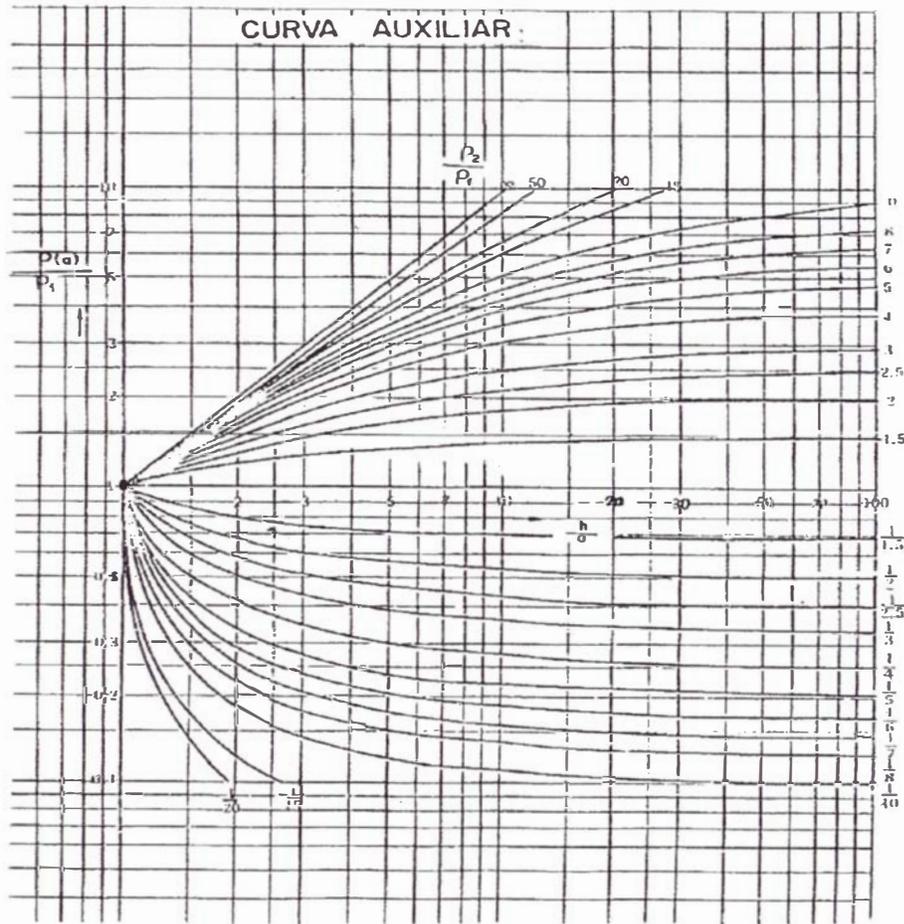


Fig. 5.51 Curva Auxiliar del método gráfico de Yokogawa.

En este punto el polo O_1 , léase también la profundidad de la primera camada, esto es "h".

El trazado de la curva patrón es efectuado de tal forma que con el casamiento (o coincidencia) de la curva $\rho(a) \times a$, el punto $\rho(a) / \rho_1 = 1$ y $h/a = 1$, esto es el polo O_1 , este ya en una posición sobre la curva $\rho(a) \times a$ de tal forma que la medición del valor de este punto por el método de WENNER cubriría totalmente la primera camada, esto es, ya se produce la solución de la estratificación buscada.

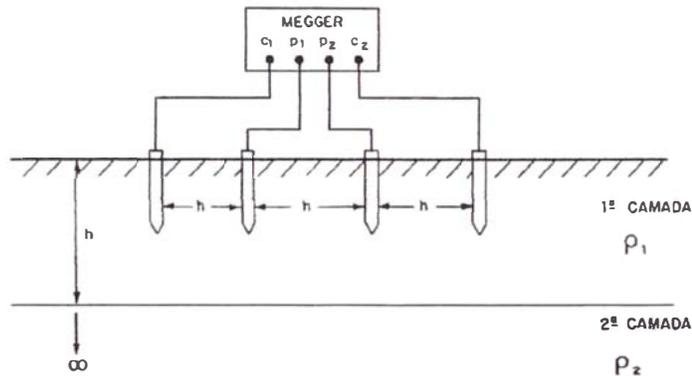


Fig. 5.52 Espaciamiento $a = h$ (distancia entre electrodos = profundidad del primer estrato).

En el punto establecido de el polo O_1 , basta efectuar la lectura de $\rho(a)$ y “a” donde:

$$\rho_1 = \rho(a) \quad \Rightarrow \quad \text{valor leído en el polo } O_1 \text{ en la curva } \rho(a) \times a.$$

$$a = h \quad \Rightarrow \quad \text{valor leído en el polo } O_1 \text{ en la curva } \rho(a) \times a.$$

Se puede extender este proceso para suelos con varias capas, siguiendo la misma filosofía del método de PIRSON. De este modo, se divide la curva $\rho(a) \times a$ en trechos ascendentes y descendentes.

A partir del 2^{do} trecho, se debe utilizar un estimativo (estimación) de la capa equivalente vista para la tercera capa, esto es efectuado empleando una “curva auxiliar” de la figura 5.51.

Colóquese sobre el gráfico $\rho(a) \times a$, en la curva ρ_2 / ρ_1 de la curva auxiliar que tenga la misma relación ρ_2 / ρ_1 obtenida por el casamiento obtenida de la curva $\rho(a) \times a$ como en la curva patrón.

Con el polo de origen $[\rho(a) / \rho_1 \text{ y } h / a = 1]$ de la curva PATRÓN mantenido sobre la CURVA AUXILIAR ρ_2 / ρ_1 , procúrese ajustar el mejor casamiento entre el SEGUNDO TRECHO de la curva $\rho(a) \times a$ con el de la CURVA PATRÓN. Este efecto demarcase en el gráfico $\rho(a) \times a$ o polo O_2 .

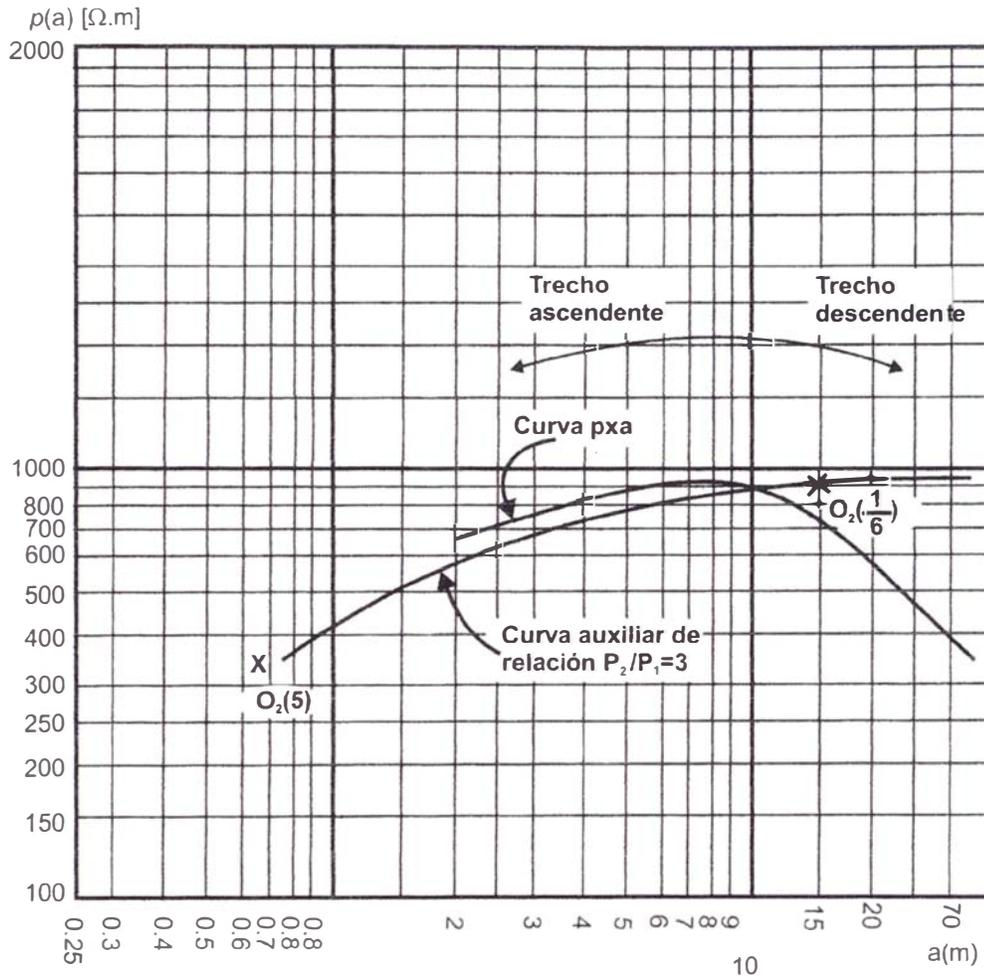


Fig. 5.53 Casamiento de la Curva $\rho(a) \times a$ vs. Curva Auxiliar.

En este polo O_2 , se lee:

$\rho(a) = \rho'_2 \Rightarrow$ Resistividad equivalente de la primera y segunda camada, esto es, vista por la tercera camada.

$a = h_2 \Rightarrow$ Profundidad de conjunto de la primera y segunda camada.

Con la relación ρ_3 / ρ'_2 obtenida del casamiento (de la gráfica) se obtiene ρ_3 y así sucesivamente

$$\rho_3 / \rho'_2 = \# (\text{valor numérico}) \Rightarrow \rho_3 = \rho_2 \cdot \# (\text{v. numérico})$$

Hasta el momento se procura apenas justificar la filosofía basada en este método.

La resolución de la estratificación es puramente gráfica, usando traslado de curvas, por tanto es difícil traducir con plenitud una ejemplificación del método.

Colocándose en orden de rutina, se pasa a describir el método.

1^{er} Paso: Trazar en papel transparente la curva $\rho(a) \times a$ en escala logarítmica (doble logarítmica).

2^{do} Paso: Dividir la curva $\rho(a) \times a$ en trechos ascendentes y descendentes.

3^{er} Paso: Desplaza el primer tramo de la curva $\rho(a) \times a$ sobre la CURVA PATRÓN, hasta obtener el mejor casamiento posible, esto se da en la relación ρ_2 / ρ_1

4^{to} Paso: Demárquese en el gráfico de la curva $\rho(a) \times a$, el punto de origen [$\rho(a) / \rho_1 = 1$ y $h/a = 1$] de la CURVA PATRÓN, obteniéndose así el polo O_1 .

5^{to} Paso: Léase en el punto del polo O_1 , los valores ρ_1 y h_1 .

6^{to} Paso: Calcúlese ρ_2 por la relación obtenida en el 3^{er} Paso ρ_2 / ρ_1 .

Hasta este paso, fueron ya obtenidos ρ_1 , h_1 y ρ_2 . Para continuar el proceso del otro tramo o tramo sucesivo de la curva $\rho(a) \times a$, vaya al séptimo paso.

7^{mo} Paso: Desplace el punto O_1 del gráfico de la curva $\rho(a) \times a$ hasta coincidir con el punto de origen de la CURVA AUXILIAR y transfírase, esto es, trace con otro color la Curva Auxiliar con relación ρ_2 / ρ_1 obtenida en el 3^{er} Paso sobre el gráfico de la curva $\rho(a) \times a$.

8^{vo} Paso: Trasladándose al gráfico $\rho(a) \times a$, de modo que la curva Auxiliar ρ_2 / ρ_1 , trazada en el 7^{mo} Paso, percorra siempre sobre el punto de origen de la CURVA PATRÓN. Esto es hecho hasta conseguir el mejor casamiento posible del segundo tramo de la curva $\rho(a) \times a$ con el de la CURVA PATRÓN, esto se da en una nueva relación ρ_2 / ρ_1 , denominada ahora de ρ_3 / ρ_2

9^{no} Paso: Remárquese el polo O_2 en el gráfico $\rho(a) \times a$ coincidente con el punto de origen de la CURVA PATRÓN.

10^{mo} Paso: Léase en el punto del polo O_2 los valores ρ_2' y h_2 .

11^{vo} Paso: Calcúlese la resistividad de la tercera camada ρ_3 de la relación establecida en el octavo paso.

Hasta este paso se han obtenido: ρ_1 , h_1 , h_2 , ρ_2 y ρ_3

Haciendo mas trechos de la curva $\rho(a) \times a$, se deben repetir el proceso a partir del sétimo paso.

Caso Práctico :

Efectuar la estratificación del suelo por el método gráfico de Yokogawa del respectivo conjunto de mediciones en campo de Tabla 5.11. obtenidos por el método de WENNER.

Espaciamiento	Resistencia Medida
a (m)	$\Omega \times m$
2	680
4	840
8	930
16	690
32	330

Tabla 5.11 Datos de Campo.

Toda la resolución se basa en la figura 5.53. En el polo O_1 , se tiene:

$$\rho_1 = 350 \Omega \times m$$

$$h_1 = 0,67 m$$

$$\rho_2 / \rho_1 = 3 \Rightarrow \rho_2 = 1050 \Omega \times m$$

En el polo O_2 , se tiene:

$$\rho'_2 = 900 \Omega \times m$$

$$h_2 = 15 m$$

$$\rho_3 / \rho'_2 = 1 / 6 \Rightarrow \rho_3 = 150 \Omega \times m$$

El suelo estratificado en tres camadas está definido en la figura 5.54.

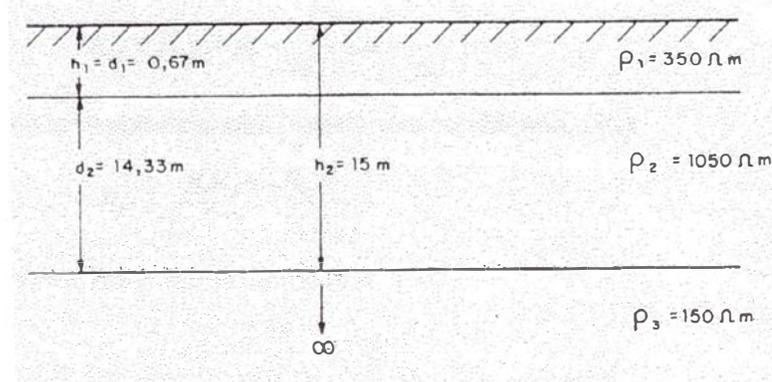


Fig.5.54 Suelo en tres camadas

5.15 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE RESISTIVIDADES EN DIVERSOS TIPOS DE TERRENOS.

5.15.1 GENERALIDADES

Se considera un tipo de malla a la unión en paralelo de varias jabalinas de cobre, cuyas intersecciones se aseguran e interconectan mediante un cable de cobre desnudo de una sección importante (1/0 AWG = 50 mm²), constituyendo así, lo que llamaremos reticulado.

A continuación se detallan los cálculos de resistencias de un terreno a partir de resistividades supuestas, mediante un diseño de mallas; permitiendo además correlacionar Resistividades vs. Número de jabalinas.

Las fórmulas a emplearse, usando el método de Schwartz, son las siguientes:

a) Resistencia del reticulado (R_1)

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L} \left(L n \left(\frac{2L}{\sqrt{hd}} + \frac{K_1 L}{\sqrt{S}} - K_2 \right) \right) \quad \dots (5.23)$$

b) Para la resistencia de las jabalinas o barras (R_2)

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi N l} \left\{ L n \left(\frac{4l}{a} \right) - 1 + \frac{2K_1 l}{\sqrt{S}} \left(\sqrt{N} - 1 \right)^2 \right\} \quad \dots (5.24)$$

c) Cálculo de la resistencia mutua ($R_{12} = R_{21}$)

$$R_{12} = R_{21} = R_1 - \frac{\rho}{\pi L} \left\{ \ln \left(\frac{l}{\sqrt{hd}} \right) - 1 \right\} \quad \dots (5.25)$$

d) Cálculo de la resistencia total (resistencia combinada) (R_T)

$$R_T = \frac{R_1 R_2 - (R_{12})^2}{R_1 + R_2 - 2(R_{12})} \quad \dots (5.26)$$

e) Cálculo de los parámetros de malla K_1 y K_2 .

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3h}{\sqrt{S}} - 0.044 \frac{A}{B} \quad \dots (5.27)$$

$$K_2 = 5.50 - \frac{8h}{\sqrt{S}} + \left(0.15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \right) \frac{A}{B} \quad \dots (5.28)$$

donde:

ρ = Resistividad aparente en ohm-m

L = Longitud del reticulado en metros

A = Largo del reticulado (1 mt)

B = Ancho del reticulado (1 mt)

h = Profundidad del enterramiento de la malla en metros (0.60 mt)

S = Superficie cubierta por malla en m^2 ($S = Ax B$)

N = Número de barras o jabalinas

l = Longitud de cada barra en metros (2.40 mt)

a = Radio de las barras en metros (0.00794 mt de $5/8"$ ϕ)

d = Diámetro del contrapeso de interconexión de barras (0.00945 mt del cable 1/0 AWG)

Cálculo de los parámetros de malla K_1 y K_2 a partir de los valores

A , B , h y S dados.

Cálculo de K_1 :

Aplicando la fórmula (5.27) obtenemos:

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3(0.60)}{\sqrt{1}} - 0.044 \times \frac{1}{1}$$

$$K_1 = 0.0060$$

Cálculo de K_2 :

Aplicando la fórmula (5.28) obtenemos:

$$K_2 = 5.50 - \frac{8(0.60)}{\sqrt{1}} + \left(0.15 - \frac{0.60}{\sqrt{1}}\right) \frac{1}{1}$$

$$K_2 = 0.25$$

5.15.2 CALCULO DE LAS RESISTIVIDADES

En este punto se tendrá en cuenta los cálculos para terrenos que tendrán como resistividades los valores de:

$$\rho_1 = 100 \text{ ohmios x m.}$$

$$\rho_2 = 200 \text{ ohmios x m.}$$

$$\rho_3 = 300 \text{ ohmios x m. y}$$

$$\rho_4 = 400 \text{ ohmios x m.}$$

además se considerará que el número de barras (varillas o jabalinas) de cobre serán de 1, 2, 3 y 4 varillas respectivamente.

Caso No.1 : $\rho_1 = 100$ ohmios x m., $N = 1$ barra, $L = 1$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{100}{\pi \times 1} \left(\text{Ln} \frac{2 \times 1}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 1}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 96.6205 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{100}{2\pi \times 1 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{1} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 40.4359 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 96.6205 - \frac{100}{\pi x 1} \left(\operatorname{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 x 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 18.2607 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{96.6205 x 40.4359 - 18.2607^2}{96.6205 + 40.4359 - 2(18.2607)}$$

$$R_T = 35.5447 \text{ Ohmios}$$

Caso No.2 : $\rho_2 = 200$ ohmios x m., $N = 1$ barra, $L = 1$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{200}{\pi x 1} \left(\operatorname{Ln} \frac{2x1}{\sqrt{0.60x0.00945}} + \frac{0.006x1}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 193.2410 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{200}{2\pi x 1 x 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4x2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2x0.0060x2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{1} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 80.8718 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 193.2410 - \frac{200}{\pi x 1} \left(\operatorname{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60x0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 36.5214 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{193.2410 x 80.8718 - 36.5214^2}{193.2410 + 80.8718 - 2(36.5214)}$$

$$R_T = 71.0893 \text{ Ohmios}$$

Caso No.3 : $\rho_3 = 300$ ohmios x m., $N = 1$ barra, $L = 1$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{300}{\pi x 1} \left(\operatorname{Ln} \frac{2x1}{\sqrt{0.60x0.00945}} + \frac{0.006x1}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 289.8616 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{300}{2\pi x 1 x 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4x2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2x0.0060x2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{1} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 121.3077 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = R_1 - \frac{300}{\pi x 1} \left(\operatorname{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60x0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 54.7822 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{289.8616x121.3077 - 54.7822^2}{289.8616 + 121.3077 - 2(54.7822)}$$

$$R_T = 106.6341 \text{ Ohmios}$$

Caso No.4 : $\rho_4 = 400$ ohmios x m., $N = 1$ barra, $L = 1$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{400}{\pi x 1} \left(\operatorname{Ln} \frac{2x1}{\sqrt{0.60x0.00945}} + \frac{0.006x1}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 386.4821 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{400}{2\pi \times 1 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{1} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 161.7436 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = R_1 - \frac{400}{\pi \times 1} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 73.0429 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{386.4821 \times 161.7436 - 73.0429^2}{386.4821 + 161.7436 - 2(73.0429)}$$

$$R_T = 142.1787 \text{ Ohmios}$$

Caso No.5: $\rho_1 = 100$ ohmios x m., $N = 2$ barras, $L = 5$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{100}{5 \times \pi} \left(\text{Ln} \frac{2 \times 5}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 5}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 29.7229 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{100}{2\pi \times 2 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{2} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 20.2343 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 29.7229 - \frac{100}{\pi \times 5} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 14.0509 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{29.7229 \times 20.2343 - 14.0509^2}{29.7229 + 20.2343 - 2(14.0509)}$$

$$R_T = 18.4849 \text{ Ohmios}$$

Caso No.6 : $\rho_2 = 200$ ohmios x m., $N = 2$ barras, $L = 5$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{200}{\pi \times 5} \left(\text{Ln} \frac{2 \times 5}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 5}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 59.4457 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{200}{2\pi \times 2 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{2} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 40.4687 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 59.4457 - \frac{200}{\pi \times 5} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 28.1018 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{59.4457 \times 40.4687 - 28.1018^2}{59.4457 + 40.4687 - 2(28.1018)}$$

$$R_T = 36.9698 \text{ Ohmios}$$

Caso No.7 : $\rho_3 = 300$ ohmios x m., $N = 2$ barras, $L = 5$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{300}{\pi \times 5} \left(\operatorname{Ln} \frac{2 \times 5}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 5}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 89.1686 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{300}{2\pi \times 2 \times 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{2} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 60.7030 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 89.1686 - \frac{300}{\pi \times 5} \left(\operatorname{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 42.1527 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{89.1686 \times 60.7030 - 42.1527^2}{89.1686 + 60.7030 - 2(42.1527)}$$

$$R_T = 55.4547 \text{ Ohmios}$$

Caso No.8 : $\rho_4 = 400$ ohmios x m., $N = 2$ barras, $L = 5$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{400}{\pi \times 5} \left(\operatorname{Ln} \frac{2 \times 5}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 5}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 118.8915 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{400}{2\pi \times 2 \times 2.40} \left\{ \ln \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{2} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 80.9373 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 118.8915 - \frac{400}{\pi \times 5} \left(\ln \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 56.2037 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{118.8915 \times 80.9373 - 56.2037^2}{118.8915 + 80.9373 - 2(56.2037)}$$

$$R_T = 73.9396 \text{ Ohmios}$$

Caso No.9 : $\rho_1 = 100$ ohmios x m., $N = 3$ barras, $L = 10$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{100}{10 \times \pi} \left(\ln \frac{2 \times 10}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 10}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 17.1633 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{100}{2\pi \times 3 \times 2.40} \left\{ \ln \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{3} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 13.5128 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 17.1633 - \frac{100}{\pi \times 10} \left(\ln \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 9.3273 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{17.1633 \times 13.5128 - 9.3273^2}{17.1633 + 13.5128 - 2(9.3273)}$$

$$R_T = 12.0555 \text{ Ohmios}$$

Caso No.10 : $\rho_2 = 200$ ohmios x m., $N = 3$ barras, $L = 10$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{200}{\pi \times 10} \left(\text{Ln} \frac{2 \times 10}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 10}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 34.3266 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{200}{2\pi \times 3 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{3} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 27.0255 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 34.3266 - \frac{200}{\pi \times 10} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 18.6546 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{34.3266 \times 27.0255 - 18.6546^2}{34.3266 + 27.0255 - 2(18.6546)}$$

$$R_T = 24.1110 \text{ Ohmios}$$

Caso No.11 : $\rho_3 = 300$ ohmios x m., $N = 3$ barras, $L = 10$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{300}{\pi \times 10} \left(\operatorname{Ln} \frac{2 \times 10}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 10}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 51.4898 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{300}{2\pi \times 3 \times 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{3} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 40.5383 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 51.4898 - \frac{300}{\pi \times 10} \left(\operatorname{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 27.9819 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{51.4898 \times 40.5383 - 27.9819^2}{51.4898 + 40.5383 - 2(27.9819)}$$

$$R_T = 36.1666 \text{ Ohmios}$$

Caso No.12: $\rho_4 = 400$ ohmios x m., $N = 3$ barras, $L = 10$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{400}{\pi \times 10} \left(\operatorname{Ln} \frac{2 \times 10}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 10}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 68.6531 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{400}{2\pi \times 3 \times 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{3} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 54.0510 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 68.6531 - \frac{400}{\pi \times 10} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 37.3092 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{68.6531 \times 54.0510 - 37.3092^2}{68.6531 + 54.0510 - 2(37.3092)}$$

$$R_T = 48.2221 \text{ Ohmios}$$

Caso No.13 : $\rho_1 = 100 \text{ ohmios x m.}$, $N = 4 \text{ barras}$, $L = 15 \text{ m}$

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{100}{15 \times \pi} \left(\text{Ln} \frac{2 \times 15}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 15}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 12.3663 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{100}{2\pi \times 4 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 10.1567 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 12.3663 - \frac{100}{\pi \times 15} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 7.1423 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{12.3663 \times 10.1567 - 7.1423^2}{12.3663 + 10.1567 - 2(7.1423)}$$

$$R_T = 9.0537 \text{ Ohmios}$$

Caso No.14 : $\rho_2 = 200$ ohmios x m., $N = 4$ barras, $L = 15$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{200}{\pi \times 15} \left(\text{Ln} \frac{2 \times 15}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 15}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 24.7325 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{200}{2\pi \times 4 \times 2.40} \left\{ \text{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 20.3134 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 24.7325 - \frac{200}{\pi \times 15} \left(\text{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 14.2845 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{24.7325 \times 20.3134 - 14.2845^2}{24.7325 + 20.3134 - 2(14.2845)}$$

$$R_T = 18.1074 \text{ Ohmios}$$

Caso No.15 : $\rho_3 = 300$ ohmios x m., $N = 4$ barras, $L = 15$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{300}{\pi \times 15} \left(\operatorname{Ln} \frac{2 \times 15}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 15}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 37.0988 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{300}{2\pi \times 4 \times 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 30.4702 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 37.0988 - \frac{300}{\pi \times 15} \left(\operatorname{Ln} \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 21.4268 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{37.0988 \times 30.4702 - 21.4268^2}{37.0988 + 30.4702 - 2(21.4268)}$$

$$R_T = 27.1612 \text{ Ohmios}$$

Caso No.16: $\rho_4 = 400$ ohmios x m., $N = 4$ barras, $L = 15$ m

a) Cálculo de la resistencia del reticulado (R_1)

Aplicando la fórmula (5.23) se obtiene:

$$R_1 = \frac{400}{\pi \times 15} \left(\operatorname{Ln} \frac{2 \times 15}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} + \frac{0.006 \times 15}{\sqrt{1}} - 0.25 \right)$$

$$R_1 = 49.4651 \text{ Ohmios}$$

b) Cálculo de la resistencia de las barras (R_2)

Aplicando la fórmula (5.24) se obtiene:

$$R_2 = \frac{400}{2\pi \times 4 \times 2.40} \left\{ \operatorname{Ln} \left(\frac{4 \times 2.40}{0.00794} \right) - 1 + \frac{2 \times 0.0060 \times 2.40}{\sqrt{1}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right\}$$

$$R_2 = 40.6269 \text{ Ohmios}$$

c) Cálculo de la resistencia mutua (R_{12})

Aplicando la fórmula (5.25) se obtiene:

$$R_{12} = 49.4651 - \frac{400}{\pi \times 15} \left(\ln \left(\frac{2.40}{\sqrt{0.60 \times 0.00945}} \right) - 1 \right)$$

$$R_{12} = 28.5692 \text{ Ohmios}$$

d) Cálculo de la resistencia total (R_T)

Aplicando la fórmula (5.26) se obtiene:

$$R_T = \frac{49.4651 \times 40.6269 - 28.5692^2}{49.4651 + 40.6269 - 2(28.5692)}$$

$$R_T = 36.2150 \text{ Ohmios}$$

5.15.3 CUADRO RESUMEN DE EVALUACIÓN DE RESISTIVIDADES.

# electrodos Resistividad	1	2	3	4
100	35.55	18.49	12.06	9.05
200	71.09	36.97	24.11	18.11
300	106.64	55.46	36.17	27.16
400	142.18	73.94	48.22	36.22

Tabla 5.12 Resistencia de Terrenos en ohmios por número de electrodos

** Estos valores no incluyen el efecto de la aplicación de geles químicos para reducir su valor de campo. Se observa que para un determinado número de electrodos existe un crecimiento lineal de la resistencia del terreno al incrementarse la resistividad del mismo.

5.15.4 REDUCCIÓN DE RESISTENCIAS POR TRATAMIENTO QUÍMICO DE TERRENO CON DOSIS DE PRODUCTO THOR-GEL.

	# Dosis de Thor-Gel	1	2	3
	Resistividad			
Un Pozo	100	6.84952	5.13714	3.42476
	200	13.69855	10.27391	6.84927
	300	20.54855	15.41141	10.27427
	400	27.39710	20.54782	13.69855
2 Pozos	100	3.63677	2.72758	1.81838
	200	7.27333	6.45500	3.63667
	300	10.91031	8.18273	5.45515
	400	14.54666	10.91000	7.27333
3 Pozos	100	2.37772	1.78329	1.18886
	200	4.75532	3.56649	2.37766
	300	7.13316	5.34987	3.56658
	400	9.51065	7.13299	4.75532
4 Pozos	100	1.78803	1.34102	0.89402
	200	3.57598	2.68198	1.78799
	300	5.36409	4.02307	2.68205
	400	7.15196	5.36397	3.57598

Tabla 5.13 Reducción de Resistencias con empleo de Thor-Gel.

5.16 ESQUEMA DE CALCULO PARA UNA RED DE 200 COMPUTADORAS.

- Potencia de cada computadora.

Debido a que hoy en día la mayoría de computadoras están equipadas con multimedia, lo que corresponde a parlantes, micrófono, audífonos y otros accesorios, tales como modem, para la conexión a Internet; por todas estas razones es que vamos a considerar una potencia promedio de consumo por cada computadora de 350W. Tomamos esto como referencia, ya que los cases de las computadoras comerciales de hoy en día, usan esa potencia para su correcto funcionamiento.

$P_c = 350$ watts (Consumo promedio de una computadora comercial)

- Cálculo de la Potencia Total consumida por las 200 computadoras.

$$P_{200\text{ pc.}} = 200 * 350\text{w} = 70,000 \text{ Watts} = 70 \text{ KW}$$

- Cálculo de la Intensidad Total consumida por las 200 computadoras

$$P = \sqrt{3}VI\rho$$

donde:

P = potencia consumida

V = voltaje

I = intensidad de corriente

ρ = factor de potencia

$$I_{Total200\text{ pc}} = 70,000 / \sqrt{3} \times 200 \times 0.8$$

$$I_{Total200\text{ pc}} = 229.9 \text{ Amp.}$$

$$I_{TotaldeDiseño} = I_{Total200\text{ pc}} \times 1.25$$

$$I_{TotaldeDiseño} = 229.9 \times 1.25$$

$$I_{TotaldeDiseño} = 287 \text{ Amp.}$$

- Cálculo del alimentador principal al Tablero de Cómputo.

Los conductores alimentadores deberán tener una capacidad de corriente no menor que la requerida para alimentar la carga calculada de 70 KW .

Los conductores alimentadores deberán ser dimensionados para que la Caída de Tensión no sea mayor del 2.5 %, para las cargas de fuerza, calefacción y alumbrado, o combinación de tales cargas, y donde la caída de tensión total máxima en alimentadores y circuitos derivados, hasta el punto de utilización más alejado, no exceda del 4 %.

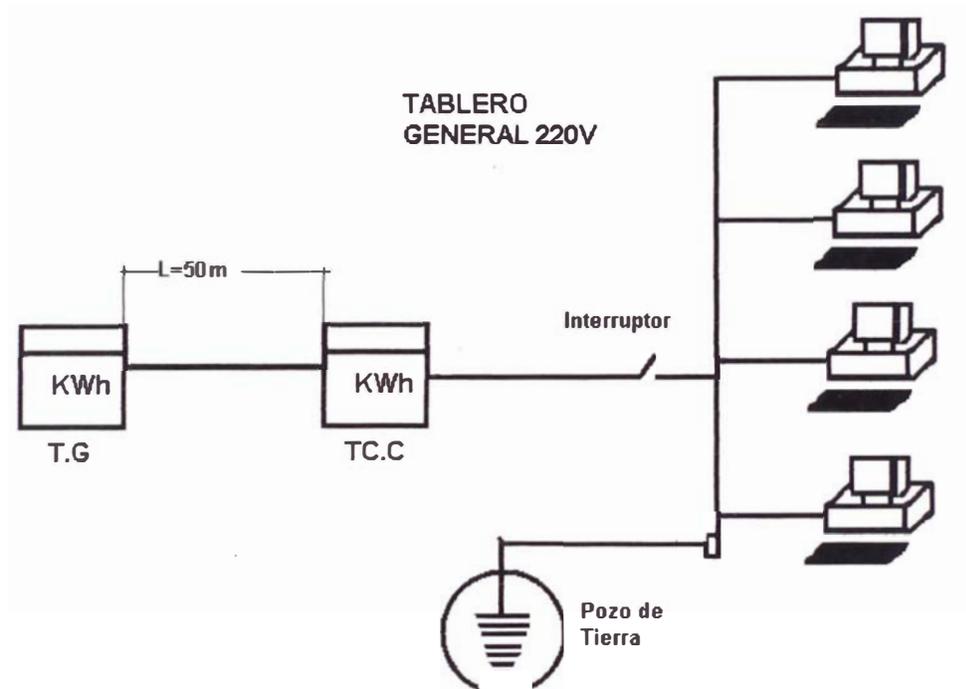


Fig. 5.55 Esquema para una red de 200 computadoras

De la tabla 4-V del tomo V del Código Nacional de Electricidad, seleccionamos como alimentadores, a Conductores (cables) del tipo THW de 150 mm² de sección, que a una temperatura ambiente de 30° C, y temperatura máxima de operación de 75° C, tiene una capacidad de corriente de 285 Amperios, casi similar a los 287 Amperios calculados, que requiere nuestra carga.

Sin embargo, debemos constatar que la sección del conductor seleccionado, no tenga pérdidas o Caída de Tensión, mayor al 2.5% de 220 Voltios (5.5 Voltios por ley), que es la Tensión nominal de trabajo.

Fórmula simplificada para el Cálculo de Caída de Tensión en Circuitos Trifásicos:

$$\Delta V = 0.03 \times L \times \frac{I}{S_c} < 2.5\% \times 220V = 5.5\text{Voltios}$$

donde:

$L = 50$ Metros desde Tablero General a Tablero de Cómputo proyectado

$S =$ Sección del Conductor = 150 mm^2

$I =$ Corriente total de diseño = 287 Amperios

$$\Delta V = 0.03 \times 50 \times \frac{287}{150}$$

$$\Delta V = 2.87\text{voltio} < 5.5\text{Voltios}$$

Se observa que la Caída de Tensión calculada es menor al 2.5% (5.5 Voltios), por lo tanto el conductor THW 3 x 1 x 150 mm² seleccionado, cumple con las condiciones de capacidad de corriente y caída de tensión exigidas por el Código Nacional de Electricidad.

- Diseño del Tablero de distribución eléctrica para cómputo.

El interruptor general del tablero eléctrico de distribución de cómputo, deberá tener una capacidad de corriente similar a la Corriente Total requerida por la carga, es decir, a 287 Amperios, pero en el mercado el estándar más próximo es de 300 Amp., entonces, el interruptor general será de 300 Amperios. Es importante precisar que la capacidad del Interruptor general nunca deberá ser mayor a la capacidad del Alimentador Principal.

El número de Circuitos de Distribución que deberá tener nuestro Tablero de Cómputo, dependerá de la ubicación y ordenamiento de los usuarios. Sin embargo, por razones de seguridad, operatividad y mantenimiento, la experiencia práctica recomienda un máximo de 10 (diez) computadoras por circuito.

Cálculo de los Interruptores de Distribución:

Consumo por Computador : 350 Watts

Demanda por Circuito (10 Computadoras) : $350 \times 10 = 3,500$ Watts

Cálculo de Corriente por Circuito = $P / 220 \text{ V} = 3,500 \text{ Watts} / 220 \text{ V}$
= 15.90 Amperios

$$\text{Corriente de Diseño} = 1.25 \times 15.90 \text{ A} = 19.88 \text{ Amperios}$$

Los Interruptores Termomagnéticos de Protección, por cada circuito, se seleccionan para 20 Amperios y, según la Tabla 4-V del Código Nacional de Electricidad, los conductores de distribución por circuito, pueden ser del tipo THW-2 x 4.00 mm².

- Sección del conductor de Puesta a Tierra en sistemas de corriente alterna.

Con el valor calculado para la intensidad de corriente, vamos a las Tablas, para ver cuál es el diámetro del alambre que vamos a usar en la conexión del centro de cómputo, y el pozo a tierra.

Acápite 3.6.10.9 del C.N.E. : Sección del conductor de puesta a tierra en sistemas de corriente alterna.

La sección del conductor de puesta a tierra en sistemas de corriente alterna, no deberá ser menor que el indicado en la Tabla 3-X.

Deberán considerarse las siguiente excepciones:

- i) En sistemas de puestas a tierra, cuando la parte del conductor de puesta a tierra, que es la única conexión entre el electrodo y el conductor neutro del sistema, esté conectada a electrodos artificiales, como se indica en 3.6.9 del C.N.E., no necesitará ser de sección mayor de 10 mm² de cobre, o su equivalente en capacidad de corriente.
- ii) En sistemas no puestos a tierra, cuando la parte del conductor de puesta a tierra, que es la única conexión entre el electrodo y el equipo de conexión, esté conectada a electrodos artificiales, como se indica en 3.6.9 del C.N.E, no necesitará ser de sección mayor de 16 mm² de cobre, o su equivalente en capacidad de corriente.

5.17 METODOLOGIA DE DESARROLLO PARA UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UN CENTRO DE CÓMPUTO.

A continuación de detallan los pasos a seguir para determinar cuál será el diseño

del o de los pozos de tierra que se instalarán.

- Cálculo de la carga total de los equipos del centro de cómputo.

Se deberá revisar cuál es la potencia de cada equipo que se incluirá en el sistema. En el acápite 15.16 se muestra un caso para calcular la potencia consumida por 200 computadoras.

- Cálculo de la capacidad de corriente que soportarán los cables alimentadores.

De acuerdo a las especificaciones del Código Eléctrico Nacional la caída de tensión de los cables alimentadores no deberá ser mayor al 2.5% de 220 voltios (5.5 voltios), para las cargas de fuerza, calefacción y alumbrado o combinación de ellas. Si se hubiera encontrado que la caída de tensión soportada no cumple con los requisitos especificados, se deberá proponer el cambio de la sección del conductor al grado inmediato superior del cableado.

$$\Delta V \leq 5.5 \text{ voltio}$$

- Determinación del área adecuada para la instalación del sistema de puesta a tierra.

Se escogerá un lugar adecuado, que podría ser un jardín, un parque o sótano; en algunas ocasiones no es posible conseguir un área como las mencionadas y se podría optar por una Jaula de Faraday que se ubicaría en un falso piso o un falso techo, opción que no es materia de ésta tesis, por lo que no se dará más detalles al respecto.

- Evaluación del terreno elegido mediante mediciones.

Se procede a efectuar pequeñas perforaciones en el terreno elegido, para colocar las picas de los instrumentos de medición llamados Megómetros o Telurímetros y se procederá a efectuar las mediciones de resistencias (ver acápite 5.2, 5.3, 5.4 ,5.5). Con los datos obtenidos se calculan las

resistividades y se elabora la gráfica "Resistividad vs Distancia" para determinar los estratos del terreno, su resistividades y sus profundidades (ver acápite 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.12).

- Determinación del número de pozos.

De acuerdo a la resistencia requerida por el equipo a proteger (condiciones de diseño especificada por el equipo), se procede a determinar el número de pozos a ejecutar. La tabla 5.12 nos muestra valores de resistencias a conseguir empleando uno o mas pozos; sin embargo se observa que las resistencias son muy altas aún, por lo que será necesario aplicar tratamientos químicos con sales (ver acápite 3.9 y tabla 5.13).

5.18 COSTOS Y METRADO

5.18.1 LISTA DE REQUERIMIENTOS

Según las características de la puesta a tierra a ser instalada, se preverá la adquisición de materiales e insumos, mano de obra y servicios conexos, a partir de las siguientes partidas con costos referenciales, en US\$ dólares.

Componentes eléctricos y empalmes	Costo (cada / unidad)
- Electrodo vertical, jabalina de cobre: 2.5 m, 0.013 m	4.50 (c/kg)
- Electrodo horizontal, pletina Cobre 3 m. x 0.04 m x 0.003 m	4.50 (c/kg)
- Electrodo auxiliar, conductor de cobre desnudo N° 2 AWG	1.25 (c/kg)
- Conductor conexión, conductor aislado de cobre TW N° (*) AWG	0.50 (c/kg)
- Borne simple de presión, bronce, rango: 0.013 a 0.025 m	2.30 (c/kg)
- Perno y tuerca de bronce 0.04 m (1) x 0.01 m (d)	1.80 (c/u)
- Manguito abierto de cobre estañado: 0.025 m (d)	2.25 (c/u)
- Terminal de oreja de cobre para conductor n° (*) AWG	0.85 (c/u)
- Tubería de PVC – Pesado y PVC flexible con accesorios (**)	1.00 (c/m)

	Costo (cada / unidad)
• Componentes del relleno, accesorios, sobrantes	
- Tierra fina común suelta, según Déficit	7.26 (c/m)
- Bentonita sódica u otra bolsa de 50 Kg	6.60 (c/b)
- Sal industrial a granel, bolsa de 50 Kg	4.1 (c/b)
- Caja de registro con tapa, prefabricada	13.00 (c/u)
- Construcción caja registro, 1 bolsa de cemento, 16 ladrillos, Fe 0.006 m	10.00 (c/u)
- Tapa de fierro para caja de registro	6.00 (c/u)
	Costo (cada / unidad)
• Mano de Obra, Transporte, Herramientas, Equipos	
- Jornal diario de cada peón para excavación	10.90 (c/u)
- Soldado a gas de manguitos, con estaño y pasta	2.60 (c/u)
- Suministro de agua a granel, de cualquier fuente	6.02 (c/m)
- Retiro de sobrantes, desmonte, piedras	5.45 (c/ m)
- Viajes con materiales, ida y vuelta – compras	3.50 (c/u)
- Uso de herramientas para excavación	3.00 (total)
- Uso de equipos, telurómetros, taladros, otros	5.00 (total)
- Gastos menores	5.00 (total)

Los costos consignados por metro cúbico (c/ m³) corresponden al viaje de un camión de 6 m³ de capacidad; tratándose de la ejecución de una sola puesta a tierra, se deberá prever el manejo de los menores volúmenes con movilidad propia o alquilada, asimismo, se observará el lugar de la obra para incluir el costo de eventuales roturas y resanes de losas o veredas.

(*) Según el Código Nacional de Electricidad de la sección mínima deberá ser de 10 mm² (N°8 de AWG)

(**) Según dimensiones del recorrido y del conductor de conexión.

5.18.2 PRESUPUESTO APROXIMADO

Las variaciones de conformación de las puestas a tierra ya definidas, se relacionan a las características del acabado exterior, con o sin caja de registro; aparte de ello,

sólo en el caso de los electrodos verticales se prevé una variación con el adosado de electrodos auxiliares; de ese modo, los costos sin incluir dirección técnica, seguros, utilidades ni impuestos, resultan de la siguiente forma:

- Puesta a tierra con electrodo vertical u horizontal

Cantidad o Unidad	Descripción de los componentes	Costo US\$	
		Pozo	Zanja
1 u	- Varilla de cobre duro: 2.5 m (L) 0.013 m (d)	15.45	-
1 u	- Pletina de cobre: 3.0 m (L) 0.04 x 0.003 (s)	-	16.30
9 m	- Conductor de cobre aislado N°(*) AWG –	4.50	4.50
1 u	- Borne simple, Pres. bronce: 0.013 a 0.025 m (d)	2.30	-
1 u	- Terminal de oreja – Cobre N° (*) AWG	0.85	0.85
1 u	- Perno con tuerca, Bronce: 0.04 m (l) x 0.01 m (d)		1.80
5 m	- Tuberías de PVC Pesada + Flexible (**)	5.00	5.00
1 m	- Tierra fina común – suelta (ajustar precio)	7.25	7.25
2 b	- Bolsas de Bentonita sódica u otra	13.20	6.60
2 b	- Bolsas de sal industrial a granel	8.30	8.30
1 m ³	- Retiro de sobrantes (ajustar precio)	5.45	5.45
2 p	- Jornales de peones por dos días	43.60	43.60
3 v	- Viajes con materiales (Taxi – carga)	10.50	10.50
0.8 m	- Agua a granel (ajustar precio)	4.8	4.80
9 m	- Conductor de cobre desnudo N°2 AWG, 9.0 ml (l)	11.25	11.25
2 u	- Manguito abierto de cobre: 0.025 m (d)	4.50	4.50
2 p	- Soldado – calafateado (Gas, estaño duro, pasta)	5.20	5.20
1 u	- Construcción caja de registro	10.00	10.00
1 u	- Tapa de hierro fundido	6.00	6.00
1 u	- Caja de registro prefabricado con tapa	13.00	13.00
Fijo	- Uso de equipos, herramientas, otros	13.00	13.00

Nota: En lugar de la pletina de cobre especificada, también puede utilizarse un conductor de cobre de 100 mm² de sección, de idéntica longitud.

- Costo neto de la puesta a tierra según características del electrodo vertical u horizontal y acabado.

- Electrodo vertical / horizontal ciego con ejecución doméstica	121.20	114.95
- Electrodo vertical / horizontal ciego con ejecución técnica	134.20	127.95
- Electrodo vertical /horizontal + caja de registro prefabricada	147.20	140.95
- Electrodo vertical / horizontal + caja de registro construida	150.20	143.95

(*) Según el código nacional de electricidad la sección mínima deberá ser de 10 mm² (N°8 AWG)

(**) Según dimensiones del recorrido y del conductor de conexión.

5.18.3 PARTICIPACIÓN ECONÓMICA DE LAS SALES QUÍMICAS EN EL COSTO

Es conveniente costear para una instalación de Puestas a Tierra la interrelación entre el Número de Pozos y la Cantidad de Dosis de Producto Químico a aplicar. Las soluciones acuosas de estos productos van acompañados de catalizadores en la proporción adecuada, las cuales reaccionan entre si formando precipitados en forma de “geles” estables, con una elevada conductividad eléctrica (resistividad de aproximadamente 1 Ohm – metro) resistente al ambiente ácido de terrenos, con buenas cualidades higroscópicas e insolubles en el agua. Esta última cualidad le confiere al tratamiento con estos materiales sintéticos su permanencia en el tiempo.

Con los geles se consiguen reducciones en la resistencia de puesta a tierra (RPAT) de electrodos que van del 25% al 80 % del valor original sin el tratamiento químico de sales electrolíticas y geles ; lo cual es un elemento importante a considerar para

bajar a resistencias adecuadas para los equipos a “aterrar” o proteger en un terreno de características severas.

A setiembre del 2003, las dosis de producto químico en el mercado tiene un costo estimado de US\$ 12.46 / u, por lo que es necesario evaluar su influencia económica en la cantidad de pozos y dosis a aplicar para un Sistema de Puestas a Tierra genérico; y cuando el caso lo amerite de más de un pozo de tierra, es necesario considerar también por lo menos una (01) dosis adicional de sal química para interconectar 2 ó más pozos en paralelo en la Zanja de Interconexión entre electrodos (mediante una zanja de 0.30 a 0.40 mts de profundidad se interconectan 2 electrodos en paralelo); veamos la siguiente tabla de Costos de Inversión de productos químicos para los aterramientos en US\$ tomando como base en el acápite anterior en que se establece que el “Valor Base” para un Pozo es de US\$ 150.20 / u debidamente protegido con su caja de registro de concreto.

Tabla 5.14 Inversión en US\$ de productos químicos para aterramientos

# Pozo	1 POZO	2 POZOS (*)	3 POZOS (*)	4 POZOS (*)	5 POZOS (*)
Dosis					
1	162.66	399.78	512.90	688.02	863.14
2	175.12	422.70	550.28	737.86	925.44
3	187.58	447.62	587.66	787.70	987.74
4	200.04	472.54	625.04	837.72	1050.04

(*) : Incluye los US\$ 60 de interconexión

Es necesario hacer hincapié que existen otros costos adicionales que se incurren al incrementar un pozo para mejorar la resistencia del sistema que se ejecuta (disminuir la resistencia del conjunto) y que se ve influenciada además por los siguientes ítem (se incrementan a otros US\$ 150.20 del nuevo pozo), ver Tabla 5.15.

Como podrá observarse, existe una gran incidencia en el costo de las puestas a tierra mediante la influencia de las sales químicas para lograr disminuciones en los valores de resistividad que se encuentran en las aplicaciones para proteger equipamientos sofisticados de redes de data y de redes para equipamiento de última tecnología en maquinaria industrial y médica, a los niveles que solicite un

usuario específico, lo cual es necesario considerar o prever. A estos valores no se ha considerado el porcentaje de Gastos Generales y Utilidad (del 12% al 20%) así como el IGV (19%).

Item	Cantidad	Unidad	Descripción	Monto US\$
01	2	Pza.	Manguito de cobre 0.025 m (d)	4.50
02	2	P	Soldado – calafateado (gas, estaño, pasta, lijas, etc.)	5.20
03	2	M3	Tierra común cernida	14.50
04	1	Glb.	Retiro de maleza y sobrantes	10.90
05	1.6	M3	Agua a granel	9.60
06	6	Mts.	Cable de cobre de 50 mm ² para interconexión	12.00
07	1	Glb.	Otros	3.30
Total				60.00

Tabla 5.15 Materiales Adicionales

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.

- Existe la tendencia equivocada de considerar que el tema de las Puestas a Tierra es netamente eléctrico o electrónico; sin embargo, esta investigación nos ha proporcionado elementos de juicio para establecer que este tema es de naturaleza físico-química, o sea que la conducción eléctrica se debe a la disociación iónica o electrolítica de las sales de los pozos diseñados para tal fin, como medio para neutralizar el desvío de corrientes eléctricas hacia la tierra.
- El tema de las Puestas a Tierra es un tema de poca difusión, pero en los últimos tiempos el avance de la tecnología (hardware) en la fabricación de componentes cada vez más pequeños y potentes, que consumen voltajes del orden de los 5 voltios hacia las décimas de voltios; sugiere una atención más cuidadosa en el diseño e instalación de los Sistemas de Seguridad. Consignamos a continuación lo que nos sabe decir el Ingeniero Colombiano Fabio Casas Ospina en su libro "Tierra: Soporte de la Seguridad Eléctrica"....." ¡ Qué tema tan inmenso y noble el de las Puestas a Tierra ! ... Presenta características muy particulares entre las que citaremos: es un rompecabezas que saca canas verdes a muchos, siempre está rodeada de mitos y misterios; permite la ubicación de sus adeptos, desde el extremo puramente teórico hasta la más simple artesanía práctica; facilita tapar con tierra los desaciertos, le permite especular a muchos, delirar a unos pocos y pasar de sabelotodo al que tenga una audiencia de bajo nivel técnico y, en muchas ocasiones, es visto como un simple requisito, por la oportunidad de evitar las normas; alcanza hasta para hacer trueques de los parámetros

eléctricos..... ¿ No será que por no estar al alcance de los ojos, algunos también las alejan de la mente ?.... En este panorama, el tema es tomado la mayoría de las veces con una simpleza tal que raya en la irresponsabilidad; quizás, por su definición general tan simple. Por todo ello en la práctica cotidiana se ven las ochocientas formas de construir y conectar mal un Sistema de Puesta a Tierra. Pero, la naturaleza que es sabia, ha encontrado en los daños su mejor forma de protestar por tanto olvido”....

- La tierra es un conductor bastante bueno de la electricidad; además, tiene tanta masa que una fuente de electricidad hecha por el hombre no la afecta en forma alguna. Así hagamos lo que hagamos sobre la superficie de la tierra, esta mantiene un potencial o carga relativamente estable. Esto significa que si clavamos dos varillas en la tierra (electrodos) aun a grandes distancias una de la otra, podemos considerar que la resistencia entre ellas es nula; el flujo de corriente puede no ser directo de una varilla a la otra, porque en todo momento hay millones de contactos eléctricos a tierra. Algunos de estos contactos son positivos y otros negativos, pero el resultado total es cero, es decir; al potencial de tierra, así se trate de cualquier conductor eléctrico que se introduzca a tierra, asumirá de inmediato este potencial cero de referencia. Esta es una característica muy conveniente porque nos permite aprovechar la tierra como una gran conductor de vuelta a la fuente de energía, el uso de la tierra en los circuitos eléctricos, es tan ventajoso que se considera indispensable. Sin embargo, la misma conveniencia y proximidad del suelo presenta un riesgo, tal que si una persona hace contacto con un conductor energizado, y al mismo tiempo está en contacto con la tierra o algún otro objeto que tiene una trayectoria conductora hacia tierra, cierra el lazo del circuito eléctrico haciendo pasar la corriente eléctrica por su cuerpo.
- El suelo peruano presenta altas resistividades, generalmente mayores a 3000 Ohmios x m., tanto en zonas urbanas, por su filiación Aluvial o Deluvial, como en las extensas zonas rurales y no habitadas; tratándose de la Costa, casi exenta de precipitaciones pluviales, predominan los arenales y suelos secos con base pedregosa; en cambio en la Sierra, dotada de lluvias estacionales, la cobertura es mínima y el subsuelo rocoso; y , en la Selva, los

estratos superficiales variables han perdido sus sales naturales sobre el basamento profundo (ver figura 1.5, Capítulo 1).

- De acuerdo con las apreciaciones anteriores, es posible establecer que fuera de las áreas geográficas de cultivo (jardines, chacras, pampas, explanadas, etc.); las resistividades equivalentes de estos terrenos están en un promedio de 300 Ohmios x m., parámetro que puede ser asumido directamente; teniendo en consideración que existe una probabilidad del 25 % de que pueda ser mayor. Es importante destacar también la dificultad para el clavado de electrodos de Puesta a Tierra, que obliga a hacer excavaciones para su instalación, además de efectuar importaciones de terreno de áreas de cultivo en los agujeros o zanjas que se realicen para el Sistema de Puesta a Tierra.
- El diseño formal y la ejecución de Puestas a Tierra de Baja Dispersión se dificultan sobremanera por el tipo de suelo o roca donde se procesará la protección; dando lugar por un lado a la proliferación del uso de compuestos químicos, algunos de ellos tóxicos; y por otro lado, el uso indiscriminado y depredatorio de la tierra de cultivo procedente de las zonas de chacra o campestres; para la preparación de los rellenos en los pozos. Un pozo de Puesta a Tierra, de 1 m x 1 m x 1 m elimina aproximadamente de 5 a 6 metros cúbicos de área cultivable que, en promedio ha demorado de 20 a 30 años para ir las desarrollando y, en su conformación, sus profundidades de crecimiento van hasta un máximo de 50 cm. a 60 cm. por lo que el daño a la agricultura es considerable debido a la disminución de estas zonas agrícolas, al comprometer el medio tierra y aplicarse en los pozos de la protección eléctrica.
- Los sistemas de puestas a Tierra conducen permanentemente y en forma inofensiva; a través de su resistencia de dispersión (de 5 ohm a 25 ohm), pequeñas corrientes de falla de distinto origen durante cortos períodos, y mayores corrientes, generalmente asociadas a fallas de aislamiento u otras, por inducción o descarga atmosférica; previos al funcionamiento de la protección eléctrica de los tableros. En forma permanente dispersan pequeñas corrientes de carga estática, fugas de aislamiento, desbalances de cargas o

aquellas de recorrido errático; como las corrientes geomagnéticas o inducidas, impidiendo la acumulación de carga y electrización de las masas de los aparatos eléctricos y de los objetos metálicos próximos, lo cual no exige bajas resistencias de puesta a tierra (de 20 ohm a 25 ohm). De manera ocasional, existe la necesidad de evacuar grandes corrientes a tierra que provienen de las fallas de aislamiento de los aparatos o de los circuitos eléctricos, que pueden ser “francos” o “amortiguados”; asimismo, las originadas por los “impactos directos o indirectos” de las descargas atmosféricas; en todos estos casos hay mayor peligro para las personas, entonces, la resistencia de puesta a tierra deberá ser lo más baja posible (< de 2 ohm). Para asegurar la protección a tierra, la resistencia de dispersión será menor a 25 ohm. Cuando el neutro de la red de suministro está aislado de tierra y menor a 2 ohm o cuando el neutro está conectado a tierra; en ambos casos, las normas estipulan un límite menor o igual a 25 ohm, mientras que para descargas atmosféricas deberá ser menor o igual a 2 ohm.

- El comportamiento de la tierra, como un sumidero infinito de carga, hace que su potencial eléctrico sea cero ($V = 0$); luego, todo aparato cuya masa sea conectada a la tierra estará provisto de dicho potencial de referencia cero, que propiciará tanto su óptimo funcionamiento como el de los dispositivos asociados a él, proporcionado por una conexión a tierra, que es el diseño y la ejecución de una Puesta a Tierra.
- La protección de las personas, tanto de los gradientes peligrosos, como de los toques eléctricos, así como la provisión del potencial de referencia, se hace mediante la conexión de todas las masas de los aparatos eléctricos y de la infraestructura metálica, próxima al electrodo de puesta a tierra; esta pauta se debe cumplir cualesquiera que sea el sistema de suministro eléctrico que alimente el circuito interior.
- Todas las medidas recomendadas por las Normas, para la protección de las personas contra contactos eléctricos, incluyen una conexión a tierra.
- Un sistema de Puesta a Tierra constituye el primer eslabón de una serie de

eslabones, dentro de la cadena de protección a que se debe someter los equipos, las instalaciones y las personas de las redes de Data de los Centros de Cómputo. Otro elemento importante es la independización de circuitos del subtablero eléctrico del CC, los UPS, los estabilizadores de voltaje, los supresores de picos, los protectores contra descargas atmosféricas en la parte externa y en la parte interna de la instalación, los pararrayos, las llaves termomagnéticas de los tableros, etc.

6.2 RECOMENDACIONES.

- Si bien Osinerg (Organismo Autónomo creado por Ley N° 26734 y Reglamento Decreto Supremo N° 005-97-EM, La Ley Marco de los Organismos Reguladores- Ley N° 27332 y el Reglamento General de OSINERG, D.S. 054-2001-EM), se encarga de fiscalizar, a nivel nacional, el cumplimiento de las disposiciones legales y técnicas relacionadas con las actividades de los subsectores de electricidad e hidrocarburos, así como el cumplimiento de las normas legales y técnicas referidas a la conservación y protección del medio ambiente en el desarrollo de dichas actividades; existen vacíos mediante los cuales los contratistas y constructores no cumplen con lo dispuesto en el nuevo Código Eléctrico del Perú respecto de los procesos de fabricación de los Sistemas de Puesta a Tierra inherentes a cada tipo de edificación.
- Recomendamos que las instituciones como: las Municipalidades, el Cuerpo General de Bomberos, Defensa Civil, Universidades, Defensoría del Pueblo, Ministerio Público, ONGs, organizaciones civiles como Procobre, Sencico, Senati, AEP, Tecsup, etc.; deben velar por la correcta ejecución de las disposiciones emanadas por Osinerg, a fin de evitar hechos luctuosos que lamentar, por la aplicación incorrecta del Código Eléctrico sobre Puestas a Tierra.
- No se debe permitir la instalación de un equipo o sistema eléctrico sin la debida conexión a tierra.
- La sociedad actual es dependiente del comportamiento de sus dispositivos motorizados e informatizados. Cuando suceden anomalías en el suministro de la energía eléctrica, el comportamiento de estos sistemas se ve afectado, los beneficios económicos y de bienestar que proporciona la tecnología se eliminan y se desprenden numerosos problemas, tanto para la empresa suministradora como para sus usuarios. El suministrador, usualmente atribuye los problemas a anomalías en la instalación del usuario, mientras que el usuario, normalmente asocia los problemas a deficiencias en las redes de suministro. En la mayoría de las veces, ambos olvidan las limitaciones que tienen los equipos electrónicos

sensibles para operar en el ambiente de las redes eléctricas tradicionales de ambos.

Históricamente, la calidad de la energía no ha sido un problema mayor, hasta hace poco tiempo, en forma genérica, se consideraba que excepto por la continuidad, el suministro para la mayoría de los usuarios de la energía eléctrica era completamente satisfactorio. Sin embargo, el incremento masivo que se ha tenido en la utilización de equipo basado en la electrónica de potencia, ha creado un doble problema para el suministrador:

En primer lugar, este equipo en común con cualquier dispositivo que incorpore electrónica de potencia, es sensible a las variaciones rápidas del voltaje, como son los abatimientos de voltaje (deficiencias del voltaje suministrado)

En segundo lugar, este tipo de equipo genera distorsión armónica y, bajo ciertas circunstancias, puede deteriorar la magnitud y forma de onda del voltaje suministrado, a tal grado que sea inadecuado para la mayoría de los usuarios que comparten esa misma fuente de suministro.

Por lo anterior, el conocimiento de las características de la calidad de la energía de los sistemas eléctricos del suministrador y del usuario, es esencial para establecer acciones económicas, tanto por parte del suministrador como del usuario, que permitan el control de los efectos no deseables; recomendándose efectuar evaluaciones semestrales de los parámetros eléctricos (entre ellos la puesta a tierra) de las instalaciones de los usuarios a fin de determinar si están dentro de los rangos permisibles y en caso de daños internos en el equipamiento electrónico, efectuar los deslindes y reclamos económicos pertinentes.

- La proliferación de las cargas y fuentes no lineales se ha dado en ausencia de normas completas que limiten las señales armónicas, que el sistema de potencia debe ser capaz de soportar y que las empresas eléctricas pueden absorber. Esta situación conduce a problemas de calidad de energía, tanto para las empresas eléctricas como para sus clientes: la caracterización de las fuentes de

“energía sucias” y los requisitos de “energía limpia” para cargas sensibles . Lo anterior, demanda el establecimiento de guías y normas que seguramente requerirán de evaluaciones técnicas y económicas exhaustivas.

Los problemas de calidad de energía se han agravado , debido a la combinación de las siguientes tendencias, entre otros aspectos :

- a) Una mayor utilización de equipo para procesamiento de datos y comunicaciones; la microelectrónica ha producido una creciente categoría de cargas a nivel residencial, comercial e industrial, que son muy sensibles a las variaciones de la calidad de la energía; los esquemas de diseño de integración a gran escala y a muy gran escala de los microprocesadores modernos, han resultado en dispositivos más rápidos, más complejos y con mayor capacidad de memoria para una misma superficie. La lógica para estos circuitos requiere de niveles de tensión y de energía menores (nanotecnología), reduciendo el consumo de potencia y, por lo tanto, los requerimientos de ventilación.
- b) Los equipos eléctricos modernos se han vuelto mas sensibles al voltaje: los diseños y componentes están en sus límites, se acabaron los diseños sobrados. La electrónica de potencia ha producido una nueva generación de dispositivos de alta capacidad y bajo costo, lo que ha extendido su utilización. Sin embargo, estos mismos dispositivos, producen perturbaciones en la calidad de la energía, y la microelectrónica es sensible a ellos. Se estima que la porción de la energía eléctrica total generada para aquellas cargas procesadas por electrónica de potencia, se incrementará de un nivel actual de 10 - 20 % al 50 – 60 %.
- c) El número de disturbios eléctricos se ha incrementado, pues la demanda ha crecido más rápido que la generación. Mientras que estos cambios dramáticos se están dando en las cargas, las empresas eléctricas y los clientes industriales continúan aplicando capacitores para la corrección del factor de potencia , para controlar el voltaje y reducir el flujo de reactivos. Estos capacitores influyen en los muchos tipos de problemas de calidad de energía, ya que son como una “coladera” para corrientes de alta frecuencia y

pueden mejorar la situación o agravarla significativamente, al incrementar los niveles de armónicas , dependiendo de los parámetros del sistema.

- En la literatura técnica aparecen, cada vez con mayor frecuencia, estadísticas que se han llevado a cabo en industrias u otro tipo de cargas, con el objeto de caracterizar los problemas de calidad de energía. Por ejemplo, el porcentaje de los disturbios que se presentan como depresiones de voltaje (“ sags”), sobretensiones, impulsos, distorsiones de la onda sinoidal, etc. También es preocupación actual cuantificar las magnitudes y duraciones de estos disturbios, que afectan a los diferentes tipos de cargas, principalmente aquellas que hacen uso intensivo de la electrónica de Potencia; por lo tanto es indispensable establecer lineamientos de Política de Seguridad a fin de evitar la polución de la energía en nuestras instalaciones así como deslindar con las de otros usuarios cercanos a nuestras dependencias y las del Concesionario de la Distribución Eléctrica para que, en caso de daños, efectuar las acciones a que hubiera lugar y que están contempladas en la Ley de Concesiones Eléctricas y en las normas de Calidad de la Corriente Eléctrica.

BIBLIOGRAFIA

- Principios de Geofísica Aplicada
D. S. Parasnis
Paraninfo – 1970, Madrid.
- Introducción a la Prospección Geofísica.
Milton Dobrín
Ediciones Omega S.A. – 1974, Barcelona.
- Química de los Suelos
Juan Manuel Cepeda Dovala
Editorial Trillas – 1991, México.
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Química del Suelo
Hinrich Bohn , Brian Mc Neal
Limusa Noriega Editores – 1993, 1º Edición ,
México.
- Applied Geophysics
W. M. Telford , L. P. Geldart , R. E. Sherif , D. A. Keys
Cambridge University Press , London , Reprinted – 1978
- Métodos Geofísicos con Aplicaciones a la Ingeniería Civil
Alberto Sarriá Molina
Ediciones Uniandes , 1º Edición – 1996, Bogota
Universidad de los Andes , Colombia

- Apuntes del Curso Diseño de Aterramientos Eléctricos
Ing°. Justo Yanque Montufar
Colegio de Ingenieros del Perú, Lima – 1997

- Aterramento Eletrico
Geraldo Kindermann y José María Campagnolo
Sagra –Luzzato Editores , 3º Edición ; Porto Alegre – 1995

- Exploración Eléctrica
I .U. Lakubovskii , LI Liajov
1º Versión Española a la 3º Edición Rusa , 1980
Editorial Reverté, España.

- Fundamentos de Geología Física
Leet y Judson
Editorial Limusa , S A de C. V.,
Décima Primera Reimpresión, México 1992

- Geology of Petroleum
Applied Geophysics
Gerhard Dohr
Pitman Publishing Ltd. , London 1975

- Ingeniería de Puestas a Tierra
Ing°. Miguel de la Vega Ortega
Editorial Limusa, S A de C.V., México 1998

- Información Técnica de Procobre Perú
Electroredes N° 97 # 01
Electroredes N° 98 # 01
Electroredes N° 98 # 02
Electroredes N° 99 # 01

Electroredes N° 99 # 02
Electroredes N° 2001 # 01
Electroredes N° 2001 # 02

- Curso Corto: “La Ciencia de la Puesta a Tierra de Sistemas de Energía”
Expositor: Dr. Dinkar Mukhedkar
Asociación Electrotécnica Peruana / A. E. P. – 1987
- Instalaciones Eléctricas en Edificaciones
Alberto Guerrero Fernández y Jorge Carlos Toledano Gasca
Mc Graw Hill – Interamérica de España, 1º Edición, 1992
- Normas VDE 0100 De Protección Eléctrica
Horning / Schneider
Marcombo Boixareo Editores, Barcelona, 1981
- Prevención de Accidentes Eléctricos
Pablo Marco Sancho
Editorial Paraninfo, España, 1993
- Petróleo y Gas en las Rocas
Métodos Geofísicos para determinar sus Propiedades Colectoras y de Saturación
V. N. Dajnov
Editorial Nedra, Moscú
Traducción Editorial Reverté S.A. - España, 1982
- Principles of Applied Geophysics
D. S. Parasnis
Chapman and Hall, London 1972
- Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua
Ernesto Orellana; Editorial Paraninfo, 2º Edición
España - 1968

- Puesta a Tierra en Edificios y en Instalaciones Eléctricas
Juan José Martínez Requena
José Carlos Toledano Gasca
Editorial Paraninfo , España , 2º Edición , 1998

- Tratado de Geofísica Aplicada
Dr. José Cantos Figuerola
Litropint - España, 1º Edición, 1974
Sección de Publicaciones del Instituto Geofísico y Minero de España.

- El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica.
Gilberto Enriquez Harper
Editorial Limusa Noriega Editores – Edición 2002.

- Seminario “Optimización de la Instalaciones Eléctricas”
TECSUP, 05 Julio 2001.

- Seguridad e Higiene en el Trabajo
José Manuel De-Vos Pascual
Mc Graw Hill – España, 1996

- Manual de Seguridad Industrial
William Handley; 1era. Edición en español
México – 1981

- Seguridad Industrial y Salud
C. Ray Asfahl; Prentice Hall, 4ta. Edición
México – 2000

- Seguridad e Higiene Profesional
José Maº de la Pozá
Editorial Paraninfo , 2º Edición, 1996
Madrid

- Manual de Seguridad y Primeros Auxilios
Hackett y Robbins; Alfaomega
México – 1992

- La Seguridad Industrial – su administración
Grimaldi y Simonds; Alfaomega
México – 1989

- Fundamentos de Instalaciones Eléctricas de Mediana y Alta Tensión
Gilberto Enriquez Harper
Limusa Noriega Editores, 2º Edición
México – 2000

- Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de
Distribución
Pablo Díaz ; Mc Graw Hill
México – 2001

- Fundamentos de Electroquímica Teórica
B. B. Damaskin , O. A. Petr
Editorial Mir, Moscú, 1º Edición
Urss – 1981