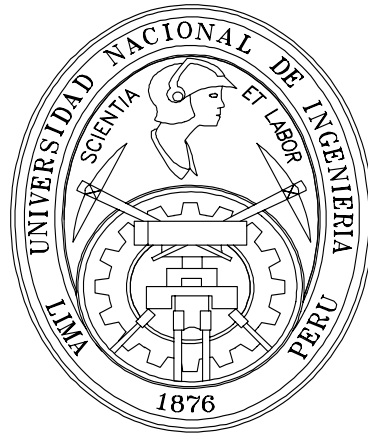


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**



**TESIS DE GRADO**  
**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**“ DISEÑO DE REDES DE PUESTA A TIERRA EN**  
**SUBESTACIONES DE CORRIENTE ALTERNA “**

**MIRKO MASHENKO YANQUE TOMASEVICH**

**PROMOCION 2002 – II**

**LIMA – PERU**

**2006**

## ÍNDICE

### PROLOGO

CAPITULO I: INTRODUCCION .....	3
CAPITULO II: ESTUDIO DE INGENIERIA DE REDES DE PUESTA A TIERRA .....	5
2.1 Etapas del Concurso de Ingeniería .....	5
2.2 Términos de Referencia .....	7
2.3 Bases del Concurso .....	8
2.4 Propuesta de un Estudio .....	10
2.5 Estándares existentes para la Ejecución del Diseño .....	11
CAPITULO III: DESEMPEÑO DE LAS REDES DE PUESTA A TIERRA .....	14
3.1 Descripción .....	14
3.2 Conformación .....	14
3.3 Desempeño como Referencia de Potencial .....	16
3.4 Desempeño respecto de la Seguridad .....	17
3.5 Funcionamiento bajo Fallas Externas .....	19
3.6 Funcionamiento bajo Fallas Internas .....	20
CAPITULO IV: MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO	
ASOCIADOS AL DISEÑO .....	22
4.1 Principio de Medidas .....	23
4.2 Principio de Caída de Potencial .....	25
4.3 Pautas para asegurar la Seguridad y la Confiabilidad de las Medidas.....	26

4.4	Medidas para determinar la Resistividad del Suelo .....	29
4.4.1	Criterio de Selección del Método de Medida .....	29
4.4.2	Descripción del Método de Medidas seleccionado.....	31
4.4.3	Ejecución Práctica de las Medidas .....	33
4.4.4	Criterio de Selección del Método de Procesamiento.....	35
4.4.5	Procesamiento e Interpretación de las Medidas.....	37
4.5	Medida de la Resistencia de Dispersión .....	43
4.5.1	Criterio de Selección del Método de Medida .....	43
4.5.2	Descripción del Método de Medida Seleccionado.....	46
4.5.3	Ejecución Práctica de las Medidas .....	49
4.5.4	Procesamiento, Interpretación y Reporte de Medidas.....	51
4.6	Medida de los Potenciales de Toque y Paso .....	53
4.6.1	Descripción del Método de Medidas.....	53
4.6.2	Ejecución Práctica de la Medida de Potenciales de Toque y Paso.....	54
4.6.3	Procesamiento, Interpretación y Reporte de la Medida.....	56
CAPITULO V: DISEÑO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA.....		59
5.1	Información de Base.....	59
5.1.1	Datos a ser Suministrados por el Cliente.....	59
5.1.2	Datos a ser Recolectados en el Campo .....	60
5.2	Selección y Descripción del Método de Diseño a Adoptarse.....	63
5.3	Descripción del Método de Diseño Seleccionado .....	64
5.3.1	Diagrama de Flujo del Diseño.....	66
5.3.2	Uso de Programas Computacionales de Cálculo .....	67
5.4	Procedimiento de Cálculo.....	68
5.4.1	Geometría del Reticulado .....	68
5.4.2	Tiempo de Aclaramiento de Falla .....	69
5.4.3	Corrientes Admisibles por el Cuerpo Humano .....	69
5.4.4	Espesor del Recubrimiento del Suelo de la Subestación .....	71

5.4.5	Potenciales Admisibles de Toque y Paso.....	72
5.4.6	Profundidad de Enterramiento.....	73
5.4.7	Resistencia de Dispersión preliminar.....	75
5.4.8	Corriente a ser Dispersada por la Red.....	75
5.4.9	Dimensionamiento del Conductor.....	82
5.4.10	Potencial Máximo de Dispersión.....	86
5.4.11	Número equivalente de hileras y separación.....	86
5.4.12	Potenciales de Toque y Paso propios de la Red.....	88
5.4.13	Instalación de Electrodo Verticales.....	91
5.4.14	Resistencia de Dispersión objetivo.....	92
5.4.15	Verificación de la confiabilidad del diseño.....	94
5.4.16	Revisión y Optimización del Diseño.....	96
5.5	Adecuación del Diseño a Suelos de Alta Resistividad.....	97
5.5.1	Naturaleza de la Resistencia de Dispersión.....	98
5.5.2	Métodos de Tratamiento del Suelo.....	99
5.6	Acabados de Instalaciones de la Red de Puesta a Tierra.....	101
5.7	Planos y Detalles de Instalación.....	103
CAPITULO VI: EXAMEN DE LA CORROSIVIDAD DEL SUELO.....		105
6.1	Definición de la Corrosión de los metales.....	105
6.2	Costos y Pérdidas ocasionadas por la Corrosión.....	105
6.3	Clasificación de los Procesos de Corrosión.....	107
6.3.1	Clasificación Global.....	107
6.3.2	Clasificación Morfológica.....	107
6.4	Origen y Potenciales de Corrosión.....	109
6.4.1	Potenciales de Electrodo de los Metales.....	109
6.4.2	Celda Electroquímica y Reacciones.....	113
6.4.3	Naturaleza de las Reacciones Anódicas y Catódicas.....	115
6.4.4	Diagramas de Pourbaix.....	116

6.4.5	Cinética de la Corrosión respecto de los Potenciales de Electrodo .....	119
6.5	Mecanismos más frecuentes de la Corrosión en Suelos .....	122
6.5.1	Formación de una Cupla Galvánica.....	122
6.5.2	Presencia de Fases distintas en una Aleación .....	123
6.5.3	Aireación Diferencial .....	124
6.5.4	Corrientes Vagabundas e Inducidas.....	125
6.5.5	Formación de Iones Complejos en el Medio.....	127
6.5.6	Existencia de Solicitaciones Mecánicas .....	127
6.5.7	Diferencia de Resistividades.....	128
6.5.8	Presencia de Bacterias en el Suelo .....	129
6.5.9	Concentración del ión hidrógeno .....	130
6.5.10	Bajas Resistividades del Suelo .....	131
6.6	Comparación de la Corrosión de diferentes metales enterrados.....	132
6.6.1	Desempeño del Cobre .....	132
6.6.2	Desempeño del Hierro .....	136
6.6.3	Desempeño del Acero Inoxidable .....	138
6.6.4	Desempeño del Acero con electrodepositado superficial de cobre electrolítico.....	139
6.7	Diseño para el control de la corrosividad del Suelo .....	139
6.7.1	Uso de metales altamente resistentes a la corrosión .....	139
6.7.2	Uso de Relleno compacto y neutro.....	140
6.7.3	Uso de conductor no hebrado.....	140
CAPITULO VII: APLICACION AL DISEÑO DE UNA RED DE PUESTA A TIERRA.....		141
7.1	Toma de Datos para el Diseño.....	141
7.2	Elaboración del Expediente Técnico .....	153
7.3	Planos del Estudio.....	165

CONCLUSIONES .....	177
RECOMENDACIONES .....	179
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	180

## ANEXOS

ANEXO A: Glosario de Términos Usuales

ANEXO B: Ficha de Campo Modelo para la Toma de Datos

ANEXO C: Modelo Matemático del Procesamiento de las  
Medidas Wenner para perfil de Suelo de Dos Estratos

ANEXO D: Fundamento Teórico del Método Clásico de Caída de Potencial

ANEXO E: Familia de Relación de Distancias de Medida (p/d) con Parámetro K

## PROLOGO

El presente tema se desarrolla de manera sintetizada abarcando seis capítulos con alcances respaldados en 46 referencias bibliográficas de avanzada técnica actualizada cuyas aplicaciones, no obstante, son poco difundidas en nuestro medio.

En el Primer Capítulo se describen de manera detallada los documentos que deben ser elaborados tanto por el Concesionario como por el Ingeniero Consultor durante un Concurso de Ingeniería para el diseño de una Red de Puesta a Tierra, así como el marco de pautas de aceptación Internacional conocidas como Estándares, Normas o Reglamentos.

En el Segundo Capítulo se explican tanto el desempeño como el funcionamiento de las Redes de Puesta a Tierra abarcándose la composición de las mismas, su funcionamiento según el tipo de Falla a Tierra dispersada y sus prestaciones respecto de la seguridad de las personas, equipos y de la Referencia de Potencial esencial para la confiabilidad de los equipos en la instalación.

El Tercer Capítulo describe la medida y procesamiento de la Resistividad del Suelo para el diseño de la Red de Puesta a Tierra, así como los procedimientos para la medida verifcatoria de la Resistencia de Dispersión y Potenciales de Toque y Paso una vez construida la Red; cada una de ellas se abordó consignando las recomendaciones técnicas y pautas que conducen a un mínimo error.

El Cuarto Capítulo abarca el desarrollo del diseño de una Red de Puesta a Tierra; en él se selecciona la mejor recomendación técnica existente en la actualidad para este fin y se

precisa la información de base necesaria para el diseño; complementariamente se incluyen los temas del acabado de las instalaciones y las aplicaciones.

El Quinto Capítulo se ha dedicado exclusivamente al tema de la Corrosión en Redes de Puesta a Tierra, relacionado íntimamente con la durabilidad y confiabilidad de su desempeño, factores que gravitan de manera decisiva en la operación eléctrica; en este caso se ha realizado el enfoque termodinámico de las condiciones del deterioro de los conductores enterrados, se ha examinado el comportamiento de los suelos y se han establecido los mecanismos de la cinética asociada y las pautas para el control de la agresividad de los suelos.

El Sexto Capítulo comprende la aplicación práctica del diseño de una Red de Puesta a Tierra realizado con todos los criterios y pautas establecidos en los capítulos anteriores.

Asimismo, se presentan las Conclusiones, Recomendaciones, Anexos y la Bibliografía utilizada para la elaboración de la presente Tesis, incluyéndose entre los Anexos un Glosario de Términos (Anexo A) para la compenetración con los criterios y los conceptos implícitos, por parte de los profesionales no especialistas en el tema.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento a mi padre por compartir sus conocimientos conmigo para la elaboración de la presente Tesis, a mi madre y a mi hermano por su apoyo incondicional y a la Empresa de Consultoría Cesel Ingenieros S.A. por haberme brindado la oportunidad de participar en Estudios relacionados con el tema.



## **CAPITULO I**

### **INTRODUCCION**

En todo Sistema Eléctrico, las Subestaciones de Transformación constituyen los puntos de detección y despeje de las Fallas a Tierra que se producen normalmente durante el transporte de energía eléctrica en Corriente Alterna a Frecuencia Industrial.

Su correcto funcionamiento depende de manera esencial y crucial de su Sistema de Puesta a Tierra, que en este tipo de instalaciones consiste en una configuración cerrada de electrodos horizontales en forma de Red, el cual permite el control de los gradientes de Potencial producidos en el Suelo durante la dispersión de corrientes de Falla a Tierra.

Es necesario entonces realizar diseños óptimos que consideren tanto el aspecto del cálculo y dimensionamiento eléctrico de las Redes de Puesta a Tierra como el de la agresividad del Suelo respecto al conductor enterrado.

Recogiendo esta premisa, el objetivo de la presente Tesis es abordar de manera detallada el diseño de Redes de Puesta a Tierra en Subestaciones de Transformación de Corriente Alterna al aire libre en Distribución, Transmisión y Generación, que garantice el correcto funcionamiento de los equipos de la instalación y la seguridad de las personas tanto durante la dispersión de corrientes de Falla a Tierra como durante condiciones típicas de funcionamiento.

Asimismo, se consideró necesario presentar adecuadamente los conceptos que definen la identificación de la necesidad de los estudios, los requerimientos técnicos, la medición de parámetros eléctricos del suelo, el procesamiento, la interpretación, y la aplicación en los

cálculos de los datos obtenidos en el campo, así como la prospección, evaluación y ponderación de los parámetros asociados al Sistema Eléctrico que también imponen condiciones de funcionamiento y criterios de ingeniería para el diseño de Redes de Puesta a Tierra.

Para facilitar y agilizar la lectura del presente trabajo se ha considerado conveniente evitar la escritura repetitiva de denominaciones técnicas ampliamente conocidas en la especialidad, utilizando las abreviaturas que les corresponden, con letras mayúsculas:

AUX: Curvas Auxiliares

CSG: Característica de Sondeos Geoeléctricos

C.A.: Corriente Alterna

C.C.: Corriente Continua

PAT: Puesta a Tierra

S.E.: Subestación o Estación de Transformación

STD: Curvas Patrón Estándar

**CAPITULO II**  
**ESTUDIO DE INGENIERIA DE REDES DE PUESTA A TIERRA**

**2.1 Etapas del Concurso de Ingeniería**

Todo proyecto de Ingeniería se inicia con uno o más Estudios; si estos deben ser realizados por un Consultor, generalmente se convoca a un Concurso de Méritos para elegir la mejor Propuesta del medio. Dicho concurso privilegia entre otros el Currículum profesional y convoca la participación de un número mínimo de tres empresas o firmas en calidad de postores. Su desarrollo es el siguiente:

**a. Invitación a participar en el Concurso**

La entrega de la invitación a los Consultores es acompañada por dos documentos importantes, que son los Términos de Referencia y las Bases del Concurso, indicando asimismo el calendario con las fechas de su desarrollo (visita, consultas, presentación de propuesta, adjudicación).

**b. Visita Técnica Obligatoria de los postores**

Tiene la finalidad de compenetrar a los consultores participantes con las características del terreno, mostrándoles la ubicación del sitio y el contexto físico en el que se llevaran a cabo las instalaciones materia del Estudio del Concurso de Méritos.

**c. Presentación por escrito de las Consultas de los Consultores**

Estas abordan temas específicos de los Términos de Referencia, de las Bases del Concurso y del Desarrollo propio del Estudio; también pueden incluir temas

económicos y contractuales y todo lo que se considere que merezca una definición o aclaración.

**d. Entrega de la Absolución de Consultas**

Son emitidas en una sola ocasión para cada Consultor en un documento consolidado único que forma parte del Expediente del Concurso; sus términos y respuestas prevalecen sobre los de las Bases del Concurso y los Términos de Referencia.

**e. Presentación y Evaluación de Propuestas**

Cada Consultor entrega su Propuesta junto con cualquier documentación adicional solicitada en las Bases del Concurso. La empresa o firma organizadora del Concurso le asigna un puntaje a cada Propuesta en función de una Tabla de Evaluación de uso interno previamente establecida.

**f. Adjudicación de la Buena pro e Inicio oficial del Estudio**

El Consultor ganador recibe el documento oficial de adjudicación del Servicio así como la convocatoria para la suscripción del contrato o la entrega de la Orden de Servicio, fijándose el evento que dará inicio oficial al Estudio (Entrega de la Información o Inspección de Campo).

Los Concursos llevados a cabo por organismos estatales se desarrollan de manera muy similar a la expuesta, y están reglamentados por:

- Texto Único Ordenado de la Ley de Contrataciones y Adquisiciones del Estado, aprobado por el Decreto Supremo N° 012-2001-PCM.
- Reglamento de la Ley de Contrataciones y Adquisiciones del Estado, aprobado por Decreto Supremo N° 013-2001-PCM del 12.02.2001 y sus normas complementarias.

## **2.2 Términos de Referencia**

Es un documento breve en el que se establecen el marco de Condiciones Técnicas y Económicas así como las Características y Alcances del Estudio, junto con los atributos mínimos que debe cumplir el Consultor para la elaboración del Estudio; también incluye en forma referencial un Cronograma de Eventos, Plazos de Ejecución, Condiciones Administrativas y otros requerimientos, fijando las etapas de desarrollo del Estudio. Está conformado por los siguientes puntos:

### **a. Planteamiento del Problema**

Es la síntesis de las causales que crean la necesidad del Estudio con el que se contribuirá, viabilizará o resolverá una situación perentoria o cubrirá una necesidad técnica.

### **b. Objeto del Estudio**

Contiene la descripción del objeto concreto del Estudio y del grado de definición de su realización, en función de su clasificación (preliminar, factibilidad, definitivo, ejecutivo).

### **c. Ubicación del Estudio**

Se refiere a la localización precisa de la zona del Estudio, incluyendo datos de vías de acceso, medios de comunicación y transporte, clima y medio ambiente, y de ser necesario hasta un marco socio-económico de la zona.

### **d. Resumen del Estudio**

Breve descripción del Proyecto en el que se sitúa el Estudio con sus principales características, actividades, reseña de las iniciativas ya cumplidas, relación de elementos de información de estudios previos, exigencias operativas y de cuadros técnicos, actividades principales.

**e. Alcances del Estudio**

Expresa las metas finales y los resultados que deben de alcanzarse o cumplirse indicando el grado de elaboración del trabajo técnico; no menciona actividades ni medios

**f. Desarrollo del Estudio**

Indica sin detallar las principales actividades técnicas que se deben cumplir para la realización del Estudio; asimismo expone la naturaleza y calidad de los medios aplicables y disponibles de modo que el desarrollo del mismo pueda ser monitoreado hasta su presentación, tales como Estándares y Normas a aplicarse, documentos mínimos que deberá incluir el Estudio de Ingeniería, etc.

**g. Organización para el Estudio**

Señala los requisitos mínimos que deben cumplir los cuadros técnicos para el Estudio, tales como su organización, los informes a ser presentados, las definiciones de forma y calidad de los informes y la interfase de relación con la supervisión.

Todos esos datos deben ser examinados por el Consultor y asumidos en la forma que más convenga para la elaboración de su Propuesta.

**2.3 Bases del Concurso**

Constituyen el marco general de requerimientos mínimos que las Propuestas de los Consultores invitados deben cubrir para poder participar en el Concurso. Pueden tener hasta tres partes:

**a. Condiciones Generales**

Expone el reglamento general que deberá cumplirse durante el desarrollo del concurso. En esta sección se describen:

- Cronograma de Actividades o Calendario del Concurso.
- Documentos y formatos que el postor deberá entregar.
- Modo de presentación y de absolución de consultas.
- Modo de presentación de los documentos de la Propuesta Técnico - Económica
- Condiciones de pago, penalidades y causales de resolución del Contrato.

**b. Modelo del Contrato**

Es el documento que deberá suscribir el Consultor al que se le adjudique la Buena pro para formalizar la ejecución del Estudio; su cumplimiento es de naturaleza irrenunciable e ineludible y sus términos pueden ser alterados sólo por mutuo acuerdo entre las partes con otro documento subsidiario denominado Adenda.

## **2.4 Propuesta de un Estudio**

Es el documento que el Consultor presenta en el Concurso de Méritos. Se elabora en base a los datos consignados en los Términos de Referencia y a los requerimientos descritos en las Bases del Concurso. Según el caso puede tener hasta tres partes:

### **a. Propuesta Técnica**

Es la descripción detallada de los alcances de la labor técnica prevista para el Estudio. Sus puntos principales son:

- Antecedentes
- Objeto
- Enfoque del Estudio
- Datos Técnicos para el Estudio
- Alcances del Estudio
- Desarrollo del Estudio
- Personal Técnico Especializado
- Organización del Estudio
- Equipos de Medición
- Plazo de Ejecución con Cronograma de Actividades
- Plan de Trabajo de Campo
- Presentación del Informe del Estudio



**b. Propuesta Económica**

Contiene el presupuesto detallado de las actividades requeridas por el Consultor para elaborar el Estudio así como los honorarios correspondientes al servicio ofrecido.

**c. Documentación solicitada en las Bases del Concurso**

Consiste en toda aquella documentación requerida para garantizar la seriedad de la Propuesta y experiencia profesional del Consultor. Los principales documentos solicitados son:

- Estados financieros.
- Cartas de Crédito o Fianza.
- Currículum de Estudios similares.

**2.5 Estándares existentes para la Ejecución del Diseño**

Se considera necesario indicar que tratándose de la Normativa Técnica aplicable, legalmente solo las denominadas Normas reglamentarias, tales como el Código Nacional de Electricidad (CNE), u otras de origen oficial que emite el Ministerio de Energía y Minas (MEM), son de carácter obligatorio, mientras que los demás documentos denominados “Estándares”, tanto nacionales como internacionales, que circulan con el apelativo incorrecto de “Normas” (IEEE, IEC, ASTM, VDE y en el caso del Perú las Normas NTP), constituyen en si recomendaciones de la buena práctica profesional provenientes de investigaciones especializadas.

En el presente caso mencionamos los Estándares aceptados en el medio para el Diseño de Redes de Puesta a Tierra. Según su aplicación, para:

**a. La Medición de los Parámetros Eléctricos**

El Estándar IEEE 81-1983 es el más utilizado y aceptado internacionalmente para la medición de la Resistividad del Suelo, la Resistencia de Dispersión y los Potenciales de Toque y Paso.

El Estándar IEEE 80-2000 incluye una breve descripción de los principales métodos existentes para efectuar dichas mediciones.

Finalmente, el Estándar ASTM G57-95a describe la Medida de la Resistividad Aparente del suelo usando el Método de Wenner y otros Métodos de Laboratorio.

**b. El Cálculo y Diseño de la Red**

Los Estándares más importantes en el contexto Técnico Internacional para el Cálculo y Diseño de Redes de Puesta a Tierra son el IEEE 80-2000 y el IEC 479-1.

En el Cuarto Capítulo se hace una comparación detallada de ambos estándares con la consiguiente elección del más adecuado para la presente tesis.

**c. La prevención de la Corrosión del Conductor**

En la actualidad no existen Estándares que abarquen el tema de la Corrosión de las Puestas a Tierra.

Muchos Estándares de Mediciones y Diseño de Redes de Puesta a Tierra tratan el tema de la prevención de la corrosión de los electrodos enterrados de una manera muy superficial; esto se debe principalmente:

- Al uso predominante del cobre en Redes de Puesta a Tierra, que por ser un metal noble puede sufrir deterioro por corrosión solo bajo condiciones químicas especiales del suelo.
- Al uso de rellenos conductivos de pH neutro, destinados a perdurar en forma estable y sin cambios químicos en el tiempo.
- Al uso de accesorios de conexión en forma de uniones y empalmes termosoldados con aportes de aleaciones galvánicamente compatibles con el cobre, que eliminan los intersticios e interfases.

Frente a esta situación, utilizaremos principalmente artículos técnicos de actualidad, literatura especializada y recomendaciones dadas por diferentes Estándares para elaborar un Diseño que prevenga o controle los efectos de la Corrosión.

## **CAPITULO III**

### **DESEMPEÑO DE LAS REDES DE PUESTA A TIERRA**

#### **3.1 Descripción**

Las Redes de Puesta a Tierra son instalaciones subterráneas de uso eléctrico permanente constituidas por armados de conductores horizontales desnudos simples con eventuales componentes verticales conectados, ambos enterrados y en contacto directo con el suelo natural o a través de un Relleno de Tierra Fina, mezclada con agregados conductores y agua.

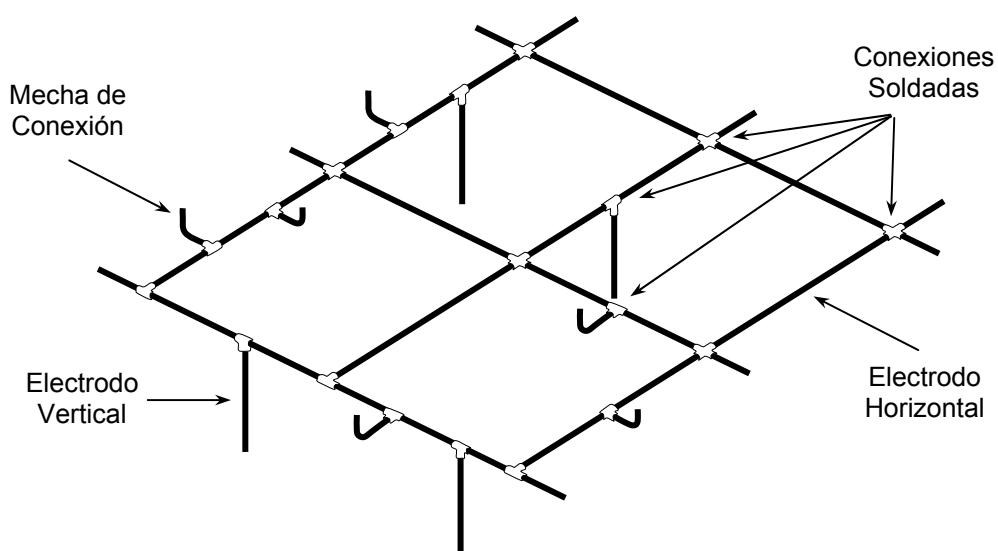
Su función es dispersar con una mínima Resistencia Eléctrica, corrientes permanentes de poca magnitud (Carga Estática, Fuga, Desbalance, Erráticas) así como ocasionalmente y por breves instantes otras de mayor magnitud (Inducidas, de Falla a Tierra o de Rayo) garantizando de esta manera la protección de las personas y los equipos.

#### **3.2 Conformación**

La conformación, características de instalación y conservación de una Red de Puesta a Tierra están relacionadas a cada uno de los siguientes aspectos:

- Capacidad: Depende de la máxima Corriente a dispersar y de los esfuerzos mecánicos de Sismo, Tránsito y Cortocircuito que debe soportar.
- Conexiones Aéreas: Mediante grapas o conectores desmontables que permiten inspección, mantenimiento y medidas periódicas
- Conexiones Subterráneas: Se realizan mediante conexiones de Soldadura Exotérmica.

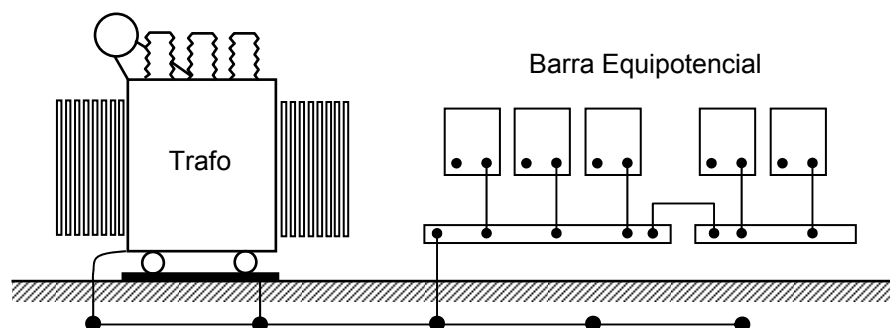
- Electrodo: Varillas rígidas verticales, conductores torzalazos horizontales o pletinas.
- Ejecución: Sus especificaciones propias de ejecución son dadas en función del diseño.
- Forma: Depende del Perfil de Resistividades del Suelo que se determina a partir del procesamiento de la Característica de Sondeo Geoelectrico (CSG).
- Inspección: Midiendo periódicamente la Resistencia de Dispersión y de ser necesario desenterrando segmentos de la Red para su inspección visual.
- Mantenimiento: Normalmente se administra periódicamente la inundación controlada con agua, en los casos que se prevea la pérdida de humedad.
- Profundidad: Se instalan a pequeñas profundidades, entre 0.5 a 1.0 m, para el tendido horizontal, y se excava entre 2.5 a 3.0 m para la colocación de varillas verticales.
- Tratamiento del Suelo: Con rellenos y tratamientos higroscópicos no contaminantes, que optimicen el desempeño de la Red en suelos de alta Resistividad asegurando la perduración del mínimo valor de la Resistencia de Dispersión a un menor costo.



**Figura 1.** Detalle constructivo de una Red de Puesta a Tierra

### 3.3 Desempeño como Referencia de Potencial

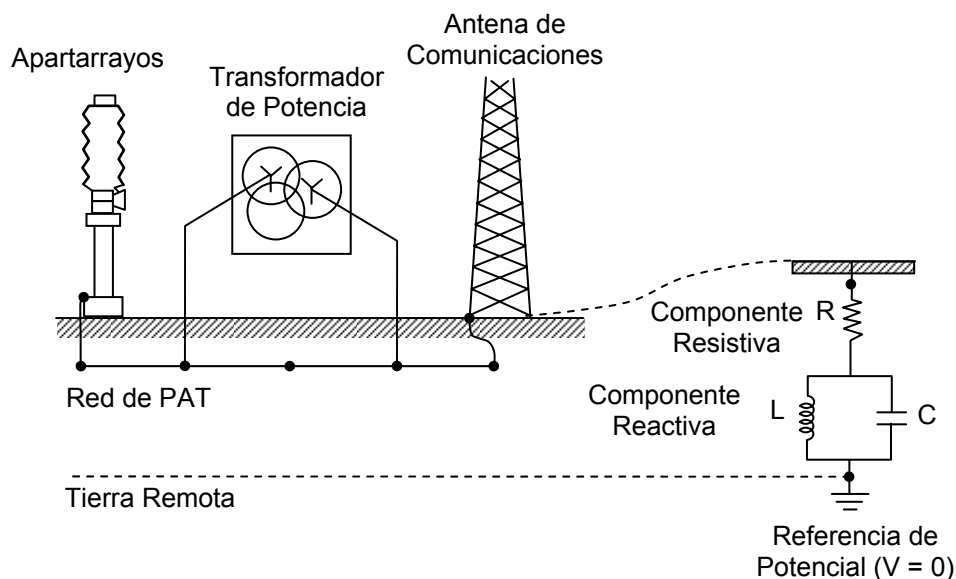
El Potencial de Referencia ( $V = 0$ ) en una Subestación (S.E.) de Corriente Alterna (C.A.) se logra conectando tanto el Neutro del Transformador solidamente a la Red de Puesta a Tierra, como las Barras Equipotenciales de los Tableros de Distribución, Sistemas de Mando, Señalización, Control, Transferencia de Datos, Comunicaciones, etc., así como los Servicios Auxiliares, Cables de Guarda, Neutros Corridos, Chaquetas metálicas de Cables Subterráneos y Masas metálicas estructurales.



**Figura 2.** Conexión a Tierra del Neutro, Masas y Salidas de Señal de Equipos

Dicha configuración del sistema asegurará durante la ocurrencia de una Falla a Tierra o Sobretensión por caída de rayo:

- La rápida, precisa y oportuna operación de los subsistemas periféricos de Control, Medidas y Protección de la Subestación tales como relés, automatismos, controladores, etc., con una mínima caída de tensión en función de una baja Resistencia de Dispersión.
- La protección de los equipos electrónicos de la Subestación, evitando elevadas Diferencias de Potencial y Descargas Inversas desde la masa a los Circuitos Internos.



**Figura 3.** Modelo eléctrico de una Red de Puesta a Tierra

### 3.4 Desempeño respecto de la Seguridad

Al dispersarse en el suelo una elevada corriente a través de la Red de Puesta a Tierra, se producen potenciales peligrosos en el Suelo de la Subestación, pudiendo una persona sufrir un choque eléctrico mortal debido a la Diferencia de Potencial que aparecen entre dos puntos con los cuales esté en contacto el cuerpo de una persona.

Su valor depende de la ubicación de la persona, ya sea dentro o fuera de la Subestación y se denominan:

#### a. **Voltaje, Potencial o Tensión de Toque ( $V_T$ )**

La Diferencia de Potencial se produce entre un punto que se encuentra al Potencial de la Red y otro punto que no esté al mismo Potencial, separado a 1 metro de distancia.

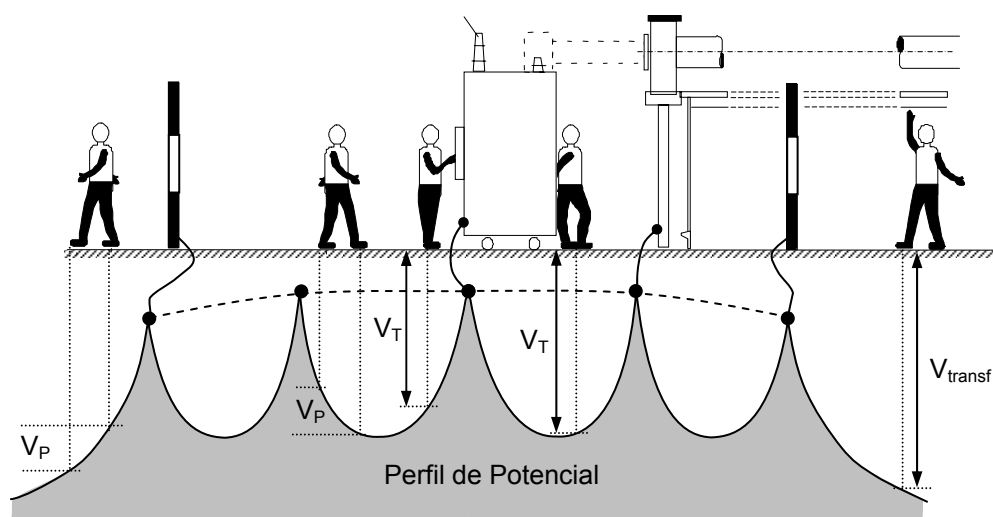
#### b. **Voltaje, Potencial o Tensión de Paso ( $V_P$ )**

La Diferencia de Potencial se produce entre dos puntos que no se encuentren al Potencial de la Red de Puesta a Tierra, separados a 1 metro de distancia.

### c. Voltaje, Potencial o Tensión Transferida ( $V_{Transf}$ )

La Diferencia de Potencial se produce entre un punto que se encuentra al Potencial de la Red de Puesta a Tierra y otro punto al exterior de la Subestación.

Componentes metálicos que salen de la Subestación tales como Cables con apantallamiento metálico, Cables de Guarda, Neutros corridos, etc., se consideran y señalizan como electrizados debido al elevado valor de los Potenciales Transferidos [1]. En el caso de Rieles y Tuberías metálicas pueden utilizarse juntas aislantes para limitar dichos potenciales [2].



**Figura 4.** Potenciales Peligrosos en Estaciones de Transformación

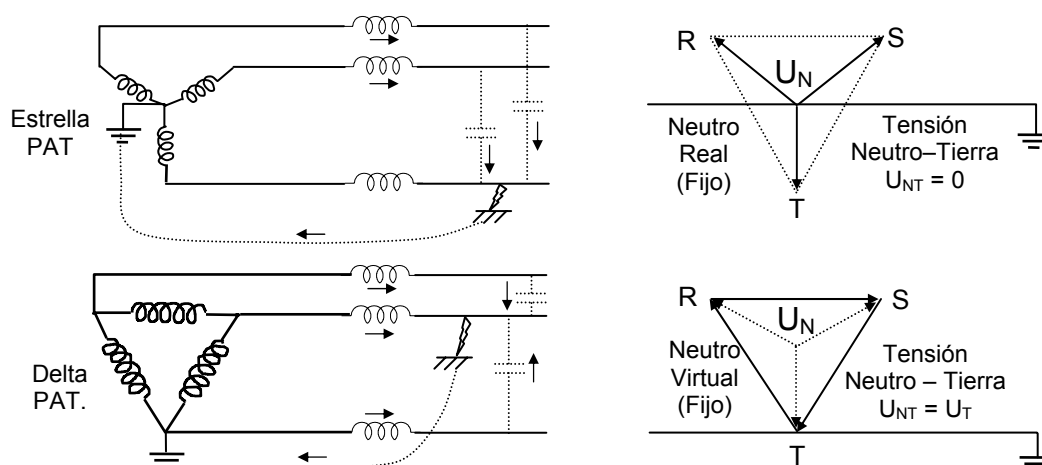
La Red de Puesta a Tierra se diseña principalmente para controlar y limitar los Potenciales de Toque ( $V_T$ ) y Paso ( $V_P$ ) durante Fallas a Tierra, a valores tolerables por el Cuerpo Humano; no obstante, también asegura durante el funcionamiento normal de la Subestación la protección de las personas canalizando permanente a Tierra carga electrostática acumulada, corrientes de fuga del aislamiento y corrientes inducidas al brindar el Potencial de Referencia ( $V = 0$ ).



Cabe resaltar que una baja Resistencia de Dispersión no constituye garantía alguna de seguridad contra Gradientes de Potencial peligrosos en el Suelo, pudiendo obtenerse un diseño seguro con una Resistencia de Dispersión relativamente elevada. [1], [3]

### 3.5 Funcionamiento bajo Fallas Externas

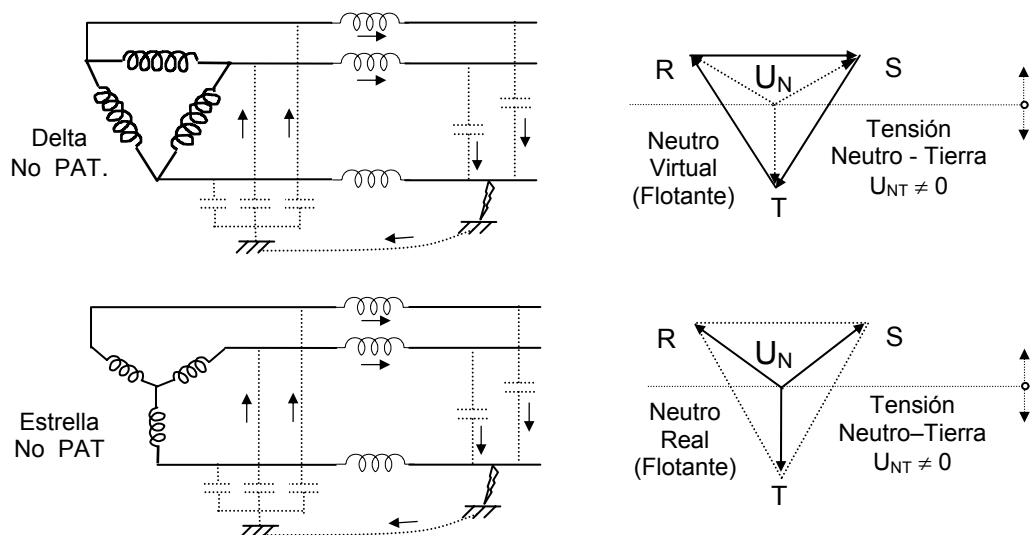
Al ocurrir una Falla a Tierra en una Línea Eléctrica de Transmisión o Distribución que sale de la Subestación, la Corriente cerrará su circuito retornando a través del Suelo al neutro respectivo del transformador, con la consiguiente elevación del Potencial Máximo de Dispersión (PMD) y produciéndose potenciales de Toque y Paso en el Suelo de la Subestación.



**Figura 5.** Desarrollo de una Falla Externa en Fases con Sistemas  $\Delta$  y Y puestos a Tierra [4]

En caso que el Nivel de Tensión de Transmisión o Distribución afectado del Transformador tengan Neutro Aislado o Flotante, la Corriente de Falla que deba circular por el suelo hasta la Subestación Alimentadora cerrará su circuito a través de las capacitancias parásitas en el aire hacia los conductores, habiendo entonces mínima intervención de la Red de Puesta a Tierra.

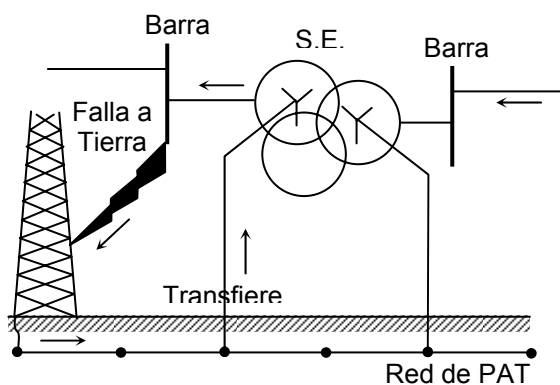
Dicha corriente tendrá una magnitud de unos pocos amperios, dependiendo su valor de la longitud de la línea hasta el punto de falla.



**Figura 6.** Desarrollo de una Falla Externa en Fases con Sistemas  $\Delta$  y Y no puestos a Tierra [4]

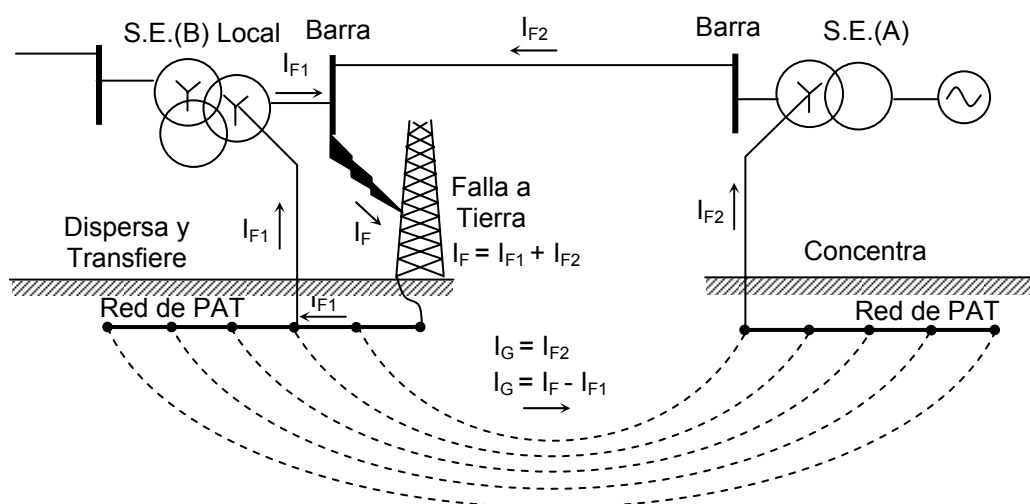
### 3.6 Funcionamiento bajo Fallas Internas

Al ocurrir una Falla a Tierra al interior de la Subestación en los Niveles de Tensión de Transmisión o Distribución, la Corriente cerrará su circuito retornando a través de los Conductores de la Red de Puesta a Tierra al neutro respectivo del transformador; en consecuencia no se elevará el Potencial Máximo de Dispersión (PMD) ni se producirán potenciales de Toque y Paso en el Suelo de la Subestación.



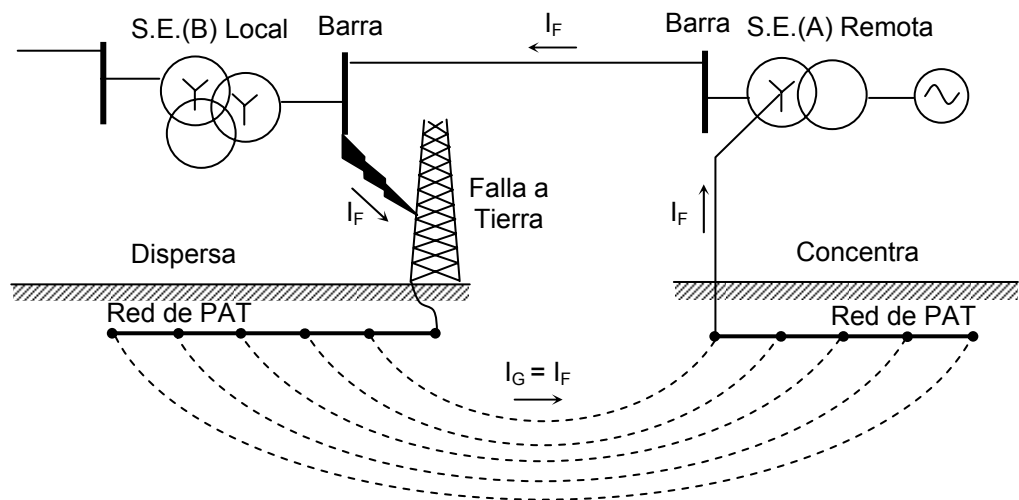
**Figura 7.** Funcionamiento de la Red de Puesta a Tierra de Subestaciones con Neutro a Tierra durante una Falla Interna

Si la Falla a Tierra se produce al interior de la Subestación en el Nivel de Tensión de Alimentación, la Corriente tendrá una contribución Local y otra Remota, cerrando su circuito retornando tanto a través de los Conductores de la Red de Puesta a Tierra al neutro respectivo del transformador como a través del Suelo hasta el Neutro del transformador ubicado en la Subestación Remota; en consecuencia la elevación del Potencial Máximo de Dispersión (PMD) y los Potenciales de Toque y Paso en el Suelo de la Subestación tendrán una menor magnitud.



**Figura 8.** Funcionamiento de las Redes de Puesta a Tierra de Subestaciones Local y Remota con Neutro a Tierra durante una Falla Interna [1]

En caso que el Nivel de Tensión de Transmisión o Distribución afectado del Transformador tengan Neutro Aislado o Flotante, la Corriente de Falla cerrará su circuito a través del Suelo hasta la Subestación Alimentadora, con la consiguiente elevación del Potencial Máximo de Dispersión (PMD) y produciéndose Potenciales de Toque y Paso en el Suelo de la Subestación.



**Figura 9.** Funcionamiento de Redes de Puesta a Tierra en Subestaciones Local y Remota con Neutro a Tierra en Subestación Remota durante Falla Interna [1]

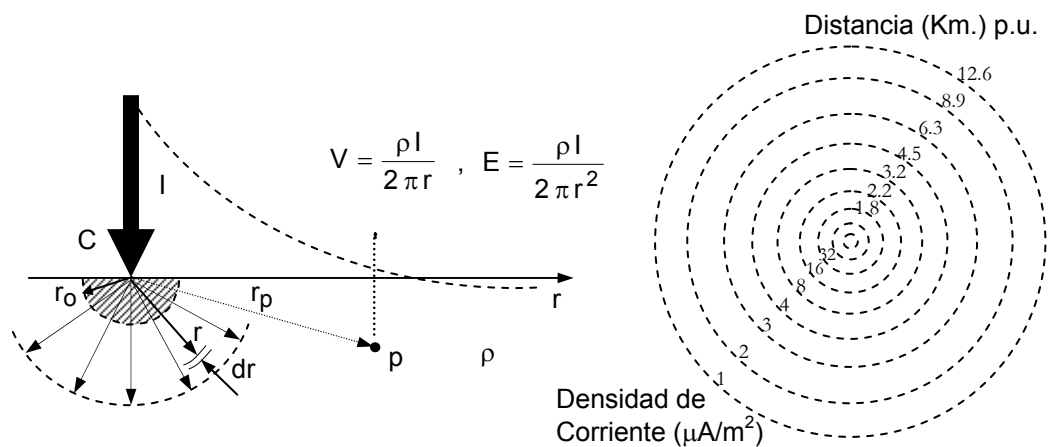
**CAPITULO IV**  
**MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO ASOCIADOS AL DISEÑO**

**4.1 Principio de Medidas**

La Medida de los diferentes parámetros del suelo se realiza de manera indirecta, a partir de las respuestas eléctricas que el suelo presenta ante estímulos de naturaleza eléctrica.

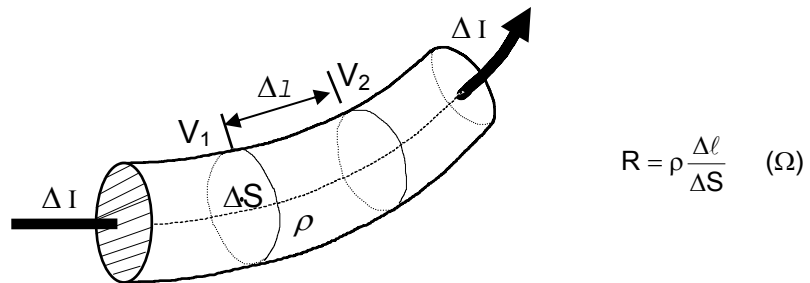
Para determinar el valor absoluto del Potencial y la Resistencia de Dispersión debe elaborarse un modelo analítico de la Dispersión de Corriente en el Suelo según las siguientes hipótesis:

- Se inyecta una Corriente (I) al suelo en el punto (C) mediante un electrodo puntual.
- El suelo es homogéneo y de Resistividad constante (  $\rho$  )
- La corriente (I) se dispersa en hemisferios equipotenciales de área  $S = 2 \pi r^2$



**Figura 10.** Potenciales inducidos en el suelo debido a la Dispersión de Corriente

Tomando un segmento volumétrico del suelo de sección ( $dS$ ) y Resistividad ( $\rho$ ), por el cual hacemos circular una corriente ( $\Delta I$ ) en una trayectoria conocida ( $\Delta l$ ):



**Figura 11.** Dispersión de corriente a través de un segmento volumétrico de Suelo

La Resistencia se puede expresar asimismo como:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (\Omega)$$

Igualando las expresiones (1) y (2) y reordenando los términos se tiene:

$$\frac{dV}{dr} = \rho \frac{dI}{dS} \quad (V/m) , \quad -E = \rho J \quad (V/m)$$

La Densidad de Corriente ( $J$ ) en una sección volumétrica de forma hemisférica es:

$$J = \frac{dI}{dS} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (A/m^2)$$

Reemplazando ( $J$ ) en la expresión del Campo Eléctrico ( $E$ ):

$$\frac{dV}{dr} = -\frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (V/m)$$

Integrando, se obtiene la Diferencia de Potencial de una Puesta a Tierra de radio equivalente ( $r_0$ ) respecto a un punto cualquiera del suelo ( $\rho$ ):

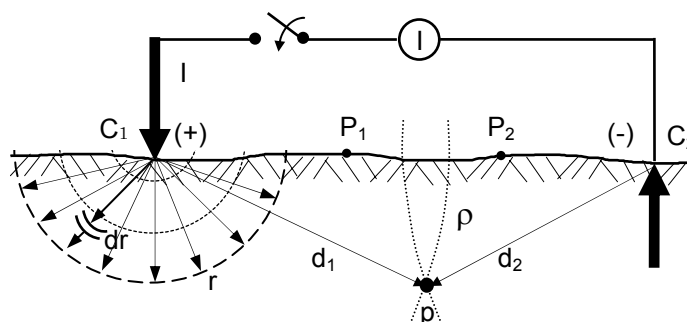
$$\Delta V = V_{r_0} - V_p = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_p} \right) \quad (V)$$

Considerando ( $p$ ) en el infinito ( $V_p = 0$ ), los valores absolutos del Potencial del Electrodo ( $V_0$ ) y la Resistencia de Dispersión ( $R_0 = V_0/I$ ) son susceptibles de ser hallados conociendo el valor de la Resistividad del Suelo ( $\rho$ ), de la Corriente ( $I$ ) y del radio equivalente ( $r_0$ ):

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi r_0} \quad (V) \quad \text{y} \quad R_0 = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (\Omega)$$

#### 4.2 Principio de Caída de Potencial

Para hallar los Parámetros Eléctricos del Suelo se aplica el Principio de Medidas a un circuito cerrado entre dos puntos ( $C_1$ ) y ( $C_2$ ) y una fuente intermedia enlazada por conductores externos



**Figura 12.** Potencial Total inducido en un punto ( $p$ ) del subsuelo

Los potenciales en un punto (p) inducidos desde (C<sub>1</sub>) y (C<sub>2</sub>) por (+I) y (-I) serán:

$$V_{p(1)} = \frac{\rho I}{2 \pi d_1} \quad (V) \quad \text{y} \quad V_{p(2)} = \frac{-\rho I}{2 \pi d_2} \quad (V)$$

El potencial total (V<sub>p</sub>) en dicho punto (p) estará dado por:  $V_p = V_{p(1)} + V_{p(2)}$

$$V_p = V_{p(1)} + V_{p(2)} = \frac{\rho I}{2 \pi} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \quad (V)$$

Procediendo idénticamente para dos puntos del suelo obtenidos desde (C<sub>1</sub>) y (C<sub>2</sub>) como (P<sub>1</sub>) con distancias (r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>) y (P<sub>2</sub>) con distancias (R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>), su Diferencia de Potencial (V<sub>S</sub>) será:

$$V_S = V_{P_1} - V_{P_2} = \frac{\rho I}{2 \pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{\rho I}{2 \pi} F_{(r_n)} \quad (V)$$

Según el conexionado, se puede calcular la Resistividad del Suelo (ρ), en función de la Resistencia (R) y del término geométrico F(r<sub>n</sub>) denominado "Factor de Forma"

$$R = \frac{\rho}{2 \pi} F_{(r_n)} \quad (\Omega) \quad \text{y} \quad \rho = 2 \pi R \frac{1}{F_{(r_n)}} \quad (\Omega.m)$$

#### 4.3 **Pautas para asegurar la Seguridad y la Confiabilidad de las Medidas**

Durante los diferentes operativos de toma de medidas tanto el ingeniero encargado como el personal asistente y el supervisor deberán seguir las siguientes recomendaciones: [4], [5]



**a. Para la seguridad del personal que mide y de los Equipos de Medida**

- Deberá usarse en todo momento ropa, casco, lentes y zapatos de seguridad.
- Verificar que se cuenta con un botiquín de primeros auxilios a la mano.
- Realizar una breve charla de seguridad antes de iniciar las mediciones.
- Deberán estar presentes al menos dos personas con capacidad de decisión técnica para detener la medida en caso de emergencia.
- Señalizar adecuadamente la zona o área ocupada con las medidas.
- Cuando se utiliza una fuente autónoma, los Circuitos de Medida deberán estar protegidos contra fallas utilizando interruptores diferenciales, termomagnéticos o fusibles.
- Se verificará la continuidad eléctrica y la correcta implementación de los circuitos antes de iniciar las medidas.

**b. En caso de medir cerca a Instalaciones energizadas de Alta Tensión**

- No medir bajo turbulencia atmosférica, lluvia o neblina densa.
- No medir cerca de Líneas de Transmisión cuando hay tormentas aguas arriba o aguas abajo.
- No medir cerca de Líneas de Transmisión o Subestaciones energizadas si la Humedad Relativa sobrepasa 85%.
- No medir en instalaciones donde hay personal trabajando.

**c. Para establecer condiciones óptimas de Medida en Suelos difíciles**

- Medir preferentemente en suelos naturales antes de su acondicionamiento.
- Determinar el horario más adecuado del día para las mediciones.
- Medir en ausencia o bajo mínimas corrientes erráticas o geomagnéticas.

**d. Para asegurar la representatividad de las Medidas de Campo**

- Anticipadamente verificar la idoneidad de los equipos y sus accesorios:
  - Contratación previa del Instrumento con Resistencia patrón según rango.
  - Prueba de aislamiento con Megómetro de Conductores inmersos en agua.
  - Prueba de conducción en los empalmes de los Terminales de Conexión.
  - Prueba de ajuste o de presión de los terminales de Conexión.
- Considerar la Estación climática del sitio para aplicación de las medidas.
  - Verano (Costa), Estiaje (Sierra, Selva); aplicar directamente los valores.
  - Invierno (Costa), Lluvias (Sierra, Selva); aplicar valores corregidos.
- Evitar medir en suelos recién humedecidos por riego o lluvia.
- Evitar medir en suelos recién removidos.

**e. Para Asegurar la Precisión de las Medidas**

- Evitar la superposición de los Circuitos de Medida de Corriente (I) y Potencial ( $V_s$ )
- Asegurar un buen contacto eléctrico entre los Electrodo clavados y el Suelo.
- Evitar el paralelismo con Líneas Eléctricas Aéreas y Subterráneas cercanas.
- Evitar medir cerca de objetos conductores de superficie y subterráneos.

#### **4.4 Medidas para determinar la Resistividad del Suelo**

Se realizan mediante Sondeos Geoeléctricos Verticales (SGV) antes de iniciar cualquier diseño o rediseño de una Red de Puesta a Tierra, dado que tanto la Resistencia de Dispersión como el Gradiente de Potencial dependen de la Resistividad a la profundidad de instalación.

A continuación, se procede a comparar diferentes Métodos de Medidas.

##### **4.4.1 Criterio de Selección del Método de Medida**

Los Métodos de Medida más confiables y conocidos son variaciones del método de cuatro electrodos, basado en la teoría propuesta en forma casi simultánea por Frank Wenner (1915) y por Conrad Schlumberger (1912), que parten del Principio de Caída de Potencial.

Asimismo, se puede medir en laboratorio la Resistividad de muestras de suelo tomadas en el campo [6]; no obstante, dada la dificultad de duplicar la compactación y evitar la evaporación de la humedad de la muestra de suelo, generalmente se obtienen resultados solo aproximados y poco confiables. [7]

De otro lado, en la literatura especializada existen asimismo valores tabulados de Resistividades típicas del suelo según su composición geológica (**Tabla 1**); dichos valores deben ser usados solo como una aproximación teórica inicial, requiriéndose siempre de Medidas de Campo, que en la práctica pueden dar resultados muy diferentes a los valores de Resistividades Referenciales.

Para elegir el Método de Medidas más adecuado, presentamos un cuadro comparativo con los principales Métodos de Medida mencionados por los Estándares IEEE 80-2000, IEEE 81-1983 y ASTM G57-95a [1], [6], [7], así como sus características (**Tabla 2**).

**Tabla 1.** Resistividades Referenciales de Suelos Naturales Genéricos [8]

<b>Tipo de Suelo</b>	<b><math>\rho</math> (Ohm-m)</b>
Limos, Arcillas, Suelo Vegetal y de Cultivo	10 – 100
Tierra Fina, Turbas, Fangos, Suelos Finos y Concretos Húmedos	100 – 300
Tierra Aluvial, Arenas firmes, Suelos secos y Cimientos de concreto	300 – 800
Arena Eólica, Lecho de Río, Cascajo, Areniscas secas	800 – 3000
Rocas Estratificadas, Fracturadas, Volcánicas	3 000 – 10 000
Suelos de Feldespatos, micas, cuarzos, Roca Monolítica	5 000 – 30 000
Concreto Ciclópeo Estructural Aéreo (Seco)	10 000 a más

**Tabla 2.** Comparación de diferentes Métodos de Medida

<b>Concepto</b>	<b>Método de Wenner</b>	<b>Método de Schlumberger</b>
Aplicación Principal	Sondeos poco profundos ( $a < 25$ m) para el Diseño de Puestas a Tierra de Corriente Alterna	Sondeos profundos ( $a > 100$ m) para el Diseño de Puestas a Tierra de Corriente Continua
Requerimientos Básicos	Buen contacto de los electrodos de medida con el suelo	Alta sensibilidad del instrumento
Instrumento de Medidas requerido	Robusto Precisión normal $< 3\%$	Robusto Alta Precisión $< 0.5\%$
Sensibilidad a variaciones laterales de la Resistividad	Pequeña	Compensada
Procedimiento	Clavado de cuatro electrodos equidistantes ( $a$ ), se hace circular y mide una corriente ( $I$ ) entre los dos laterales y los centrales miden ( $V_s$ )	Clavado de cuatro electrodos no equidistantes, se hace circular y mide una corriente ( $I$ ) entre los dos laterales móviles ( $na$ ) y los centrales fijos ( $a$ ) miden ( $V_s$ )
Ejecución	Rápida y Económica	Laboriosa

Analizando dicho cuadro, llegamos a las siguientes conclusiones:

- El Método de Wenner da resultados más confiables que el Método de Schlumberger para distancias de medida pequeñas ( $a < 25m$ ).
- Los instrumentos de Medidas que utilicen el Método de Wenner pueden tener menor sensibilidad que los que empleen el Método de Schlumberger, ya que a medida que se alejan los electrodos de Corriente, también lo hacen los de Potencial.
- Las medidas de Resistividad del Suelo más confiables, económicas y menos laboriosas se hacen empleando el Método de Wenner. [4]

Al ponderar las ventajas comparativas del Método de Medidas Wenner, recomendado por el Estándar ASTM G57-95a [6] y las referencias [4], [9]-[11] se lo elige definitivamente para la medida de las Resistividades Aparentes necesarias para elaborar la Característica de Sondeos Geoeléctricos (CSG)

#### **4.4.2 Descripción del Método de Medidas seleccionado**

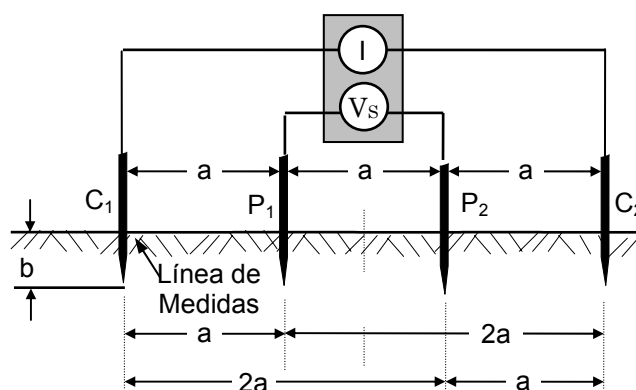
El Método de Wenner aplica el Principio de Caída de Potencial simplificando el Factor de Forma  $F(r_n)$  de la siguiente manera:

$$\rho = 2 \pi R \frac{1}{F(r_n)} \quad \text{donde:} \quad R = \frac{V_S}{I}$$

$$F(r_n) = \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \frac{1}{a} \quad (1/m)$$

La disposición del Circuito de Medidas se realizará de la siguiente forma:

- Se utilizan cuatro Electrodo de Sondeo ( $C_1$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $C_2$ ) clavados en línea recta
- Los electrodos de medida se ubican equidistantes entre ellos con una separación ( $a$ )
- La profundidad de clavado de electrodos en el suelo será ( $b \leq a/20$ ), para mínimo error.
- Se debe lograr la mejor interfase conductiva entre los electrodos ( $C_1$ ) y ( $C_2$ ).
- Se inyecta y mide la Corriente de Medida ( $I$ ) en el circuito entre los electrodos ( $C_1$ ) y ( $C_2$ )
- Se mide el Voltaje ( $V_s$ ) entre los Electrodo de Potencial intermedios ( $P_1$ ) y ( $P_2$ )
- Se obtiene la Resistencia ( $R$ ) midiendo ( $I$ ) y ( $V_s$ ) con una fuente autónoma, o bien directamente ( $R = V_s/I$ ) utilizando un Telurómetro
- Con el valor de la Resistencia ( $R$ ) obtenido se calcula la Resistividad ( $\rho$ )



**Figura 13.** Disposición de electrodos para el Método de Medidas Wenner

Para cada distancia de medidas ( $a$ ) habrá entonces una Resistividad Aparente ( $\rho_a$ ) en función de la Resistencia ( $R_a$ ) medida, dada por  $\rho_a = 2 \pi a R_a$  en ohms.metro.

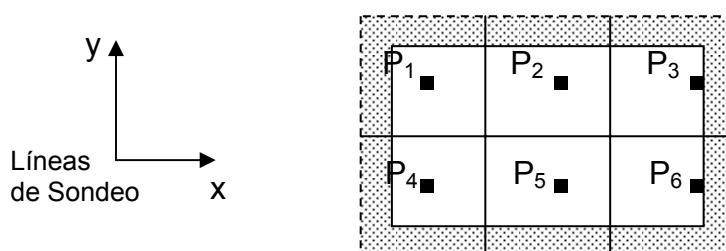
Esta expresión permite calcular la Resistividad a una profundidad media ( $a$ ), que equivale a la Resistividad teórica promedio de un Volumen hemisférico de suelo de radio ( $r = a$ ) [6].

#### 4.4.3 Ejecución Práctica de las Medidas

Para realizar Medidas representativas de las Resistividades Aparentes ( $\rho_a$ ) del Suelo en el sitio de la futura instalación, se recomienda seguir el siguiente procedimiento [4]:

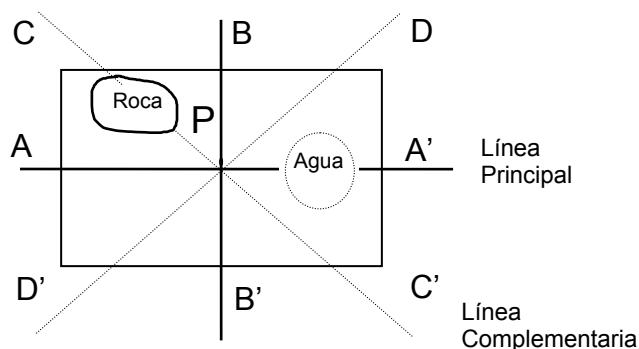
##### a. Previamente a la Ejecución de la Medida

- Se subdivide el área total en lotes cuadrados de 20 m a 25 m de lado, para lo cual se puede incluir franjas transversales exteriores de 10 a 15 m de ancho.
- El centro de cada lote definirá un punto de medida  $P_1, P_2, \dots$  etc.



**Figura 14.** Lotización del área y Determinación de Puntos de Medida

- Se trazan dos Líneas de Medidas  $AA'$  y  $BB'$  mutuamente ortogonales que se crucen en  $P_1, P_2,$  etc



**Figura 15.** Trazado de líneas de Medida en el punto seleccionado

**b. Durante la Ejecución de la Medida**

- Para cada sub-área lotizada se mide la Resistencia ( $R_a$ ) en cada Líneas de Medidas para distancias (a) de 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 6 m, 8 m y 12 m, pudiendo obviarse la última medida de 12 m de encontrarse limitaciones de acceso en el terreno.
- Con las Resistencias ( $R_a$ ) medidas se calculan las Resistividades Aparentes ( $\rho_a$ ) para cada distancia (a); si éstas resultasen muy altas, pueden tomarse medidas a 16 m, 20 m, y hasta 30 m.
- Todo cambio brusco en la tendencia creciente o decreciente de los valores de Resistividad Aparente ( $\rho_a$ ) representan la presencia de medios u objetos de distinta Resistividad que se hallan en el subsuelo, como vetas de mineral, napas freáticas, rocas emergentes, cenizas, etc.
- En caso de haber una discordancia significativa entre los valores de las dos líneas de medida para las mismas distancias de sondeo (a), pueden tomarse medidas adicionales en una o hasta dos Líneas de Medida diagonales CC' y DD'.

**c. Finalizada la Ejecución de la Medida**

- Se toma nota de los datos locales del sitio y sus características en fichas de campo previamente preparadas (Anexo B), para facilitar el procesamiento.
- Se recomienda realizar muestreos del suelo con calicatas en el sitio, para obtener datos Físico-Químicos del Suelo natural y compatibilizar durante el procesamiento las Resistividades obtenidas en el Campo



Algunos Telurómetros digitales requieren que el operador introduzca en cada medida de Resistencia ( $R_a$ ) la nueva distancia ( $a$ ), con lo cual calculan y dan como resultado la Resistividad Aparente ( $\rho_a$ ).

Normalmente, los valores de las Medidas de Resistividad tienen una precisión de alrededor del 3%; raramente alcanzan el 1% de precisión incluso con el uso de equipo sofisticado, debido a las corrientes parásitas en el suelo y al error natural de sensibilidad del equipo de medidas.

#### **4.4.4 Criterio de Selección del Método de Procesamiento**

Las Medidas de Campo constituyen valores de Resistividad Aparente ( $\rho_a$ ) que requieren ser procesados para obtener un modelo de Resistividades de Suelo homogéneo ( $\rho$ ), de dos estratos ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h_1$ ) o Multiestrato.

Muchos de los Métodos de Procesamiento para medidas hechas con el Método de Wenner parten del Modelo Matemático de Tagg (Anexo C).

Para elegir el más adecuado, presentamos un cuadro comparativo con los principales Métodos de Procesamiento existentes (**Tabla 3**).

**Tabla 3.** Comparación de diferentes Métodos de Procesamiento de Medidas Wenner

<b>Concepto</b>	<b>Método de Pirson</b>	<b>Método gráfico de la Universidad de Kiusu</b>	<b>Método numérico o Método analítico</b>
Característica de Sondeo Geoelectrico (CSG)	Se grafica en papel milimetrado	Se grafica en papel milimetrado traslúcido doblemente logarítmico	Se utilizan directamente los Datos de Campo ( $a, \rho_a$ )
Curvas de Procesamiento	Una curva ( $\rho_1/\rho_a$ vs $h/a$ ) para K+ Una curva ( $\rho_a/\rho_1$ vs $h/a$ ) para K-	Una Familia de Curvas Patrón Estándar (STD) Una Familia de Curvas Auxiliares (AUX)	Ninguna
Procesamiento para obtener perfil del Suelo en modelo de dos estratos ( $\rho_1, \rho_2, h_1$ ) <b>Característica (CSG) con un punto de inflexión (P.I.)</b>	Se prolonga la (CSG) hasta el eje de ordenadas para hallar ( $\rho_1$ ) y se selecciona la curva K+ o K- según la tendencia de la (CSG). Con dos puntos ( $\rho_a, a$ ), ( $\rho_1$ ) y la curva K escogida, se elaboran dos curvas ( $h$ vs $K$ ), cuya intersección nos darán ( $h$ ) y ( $K$ ), para despejar ( $\rho_2$ ).	Se compara la (CSG) con la familia de curvas (STD). La curva de la familia (STD) que más se aproxime a la (CSG) nos da los valores de ( $\rho_1$ ), ( $h_1$ ) y ( $K_0$ ). Con el ( $K_0$ ) hallado se despeja ( $\rho_2$ ).	Se obtienen los valores de $\rho_1, \rho_2$ y $h_1$ a través de una regresión matemática por método de mínimos cuadrados e iteraciones sucesivas a partir de los valores ( $a, \rho_a$ ) suministrados.
Procesamiento complementario para obtener perfil del Suelo en modelo de tres estratos ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2$ ) <b>Característica (CSG) con dos puntos de inflexión (P.I.)</b>	La proyección del punto de inflexión (P.I.) de la (CSG) en el eje de abcisas da el valor de ( $h_1 + h_2$ ). Se despeja ( $h_2$ ) y se halla ( $\rho_3$ ) con el criterio matemático de Hummel.	Usando ( $K_0$ ) se selecciona una curva de la familia Auxiliar (AUX). Con ella se ubica la curva de la familia (STD) que más se aproxime al segundo tramo de la (CSG) Se halla ( $\rho'_2$ ), ( $\rho_3$ ) y ( $h_1 + h_2$ ) y se despejan ( $h_2$ ) y ( $\rho_2$ ) con el criterio matemático de Hummel.	Con este método no se puede obtener perfiles de Suelo de tres estratos
Ventajas	Método programable mediante algoritmos computacionales	Permite visualizar y corregir puntos aberrantes de la (CSG)	Rapidez en el procesamiento
Desventajas	Método complejo; su precisión requiere de Medidas de Campo hechas con ( $a < 1$ m)	Su uso requiere experiencia	Requiere el ingreso de Datos de Medidas de Campo precisas o previamente corregidas

Este cuadro nos conduce a las siguientes conclusiones:

- A diferencia del Método de la universidad de Kiushu, el Método de Pirson requiere para la precisión de su procesamiento valores de Resistividad Aparente con distancias de medida ( $a < 1$  m), que en la práctica son poco confiables y deben interpretarse o descartarse.
- El método de Pirson basa su procesamiento en la intersección de dos curvas obtenidas a partir de dos de los datos de entrada, los cuales no necesariamente pueden ser representativos o exactos.
- El método de la universidad de Kiushu permite obtener el perfil de Resistividades del Suelo de manera simplificada y precisa mediante comparación gráfica, pudiendo corregirse o descartarse valores de medida aberrantes o no representativos.

Siendo un modelo de Suelo de dos estratos generalmente suficiente para el diseño de Redes de Puesta a Tierra en Subestaciones de Corriente Alterna [12] y ponderando las ventajas comparativas del Método Gráfico de la Universidad de Kiushu, se lo elige para el procesamiento de las Medidas de Campo.

#### **4.4.5 Procesamiento e Interpretación de las Medidas**

El método gráfico de la Universidad de Kiushu en Japón fue ideado en la década del setenta ante el uso limitado de computadoras portátiles requeridas para el procesamiento de las Medidas de Campo mediante el Modelo Matemático de Tagg [13], siendo posteriormente adoptado por el fabricante de Instrumentos Yokogawa y difundido en el mundo entero.

Fue así como se obtuvo una Familia de Curvas Patrón Estándar (STD) como base de comparación para identificar la curva que más se aproxime a la Característica de Sondeos Geoelectricos (CSG) obtenida con las Medidas de Campo hechas con el Método de Wenner.

Para elaborar la Característica de Sondeos Geoelectricos (CSG) se procede de la siguiente forma:

- Con las Medidas de Campo, se grafican en papel translúcido doble logarítmico de 4 x 3 décadas y 63 mm/década las características ( $\rho_a$  vs  $a$ ) para cada línea de medida.
- Se promedian los valores de los puntos de las características más representativas.

La caracterización de los Suelos en modelo de dos estratos ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h_1$ ) se realiza comparando por superposición la Característica (CSG) con la Familia de Curvas (STD):

- La Característica (CSG) debe tener como mínimo cuatro puntos para visualizar su tendencia en ambas extremidades. Mientras hayan más puntos intermedios será mejor.
- La Familia de Curvas (STD) relaciona en Abscisas  $\text{Log}(a/h_1)$ , y en ordenadas  $\text{Log}(\rho_a/\rho_1)$  para valores (+) y (-) de  $(K)$  siendo  $K_0 = \rho_2/\rho_1$  el parámetro de cada curva.

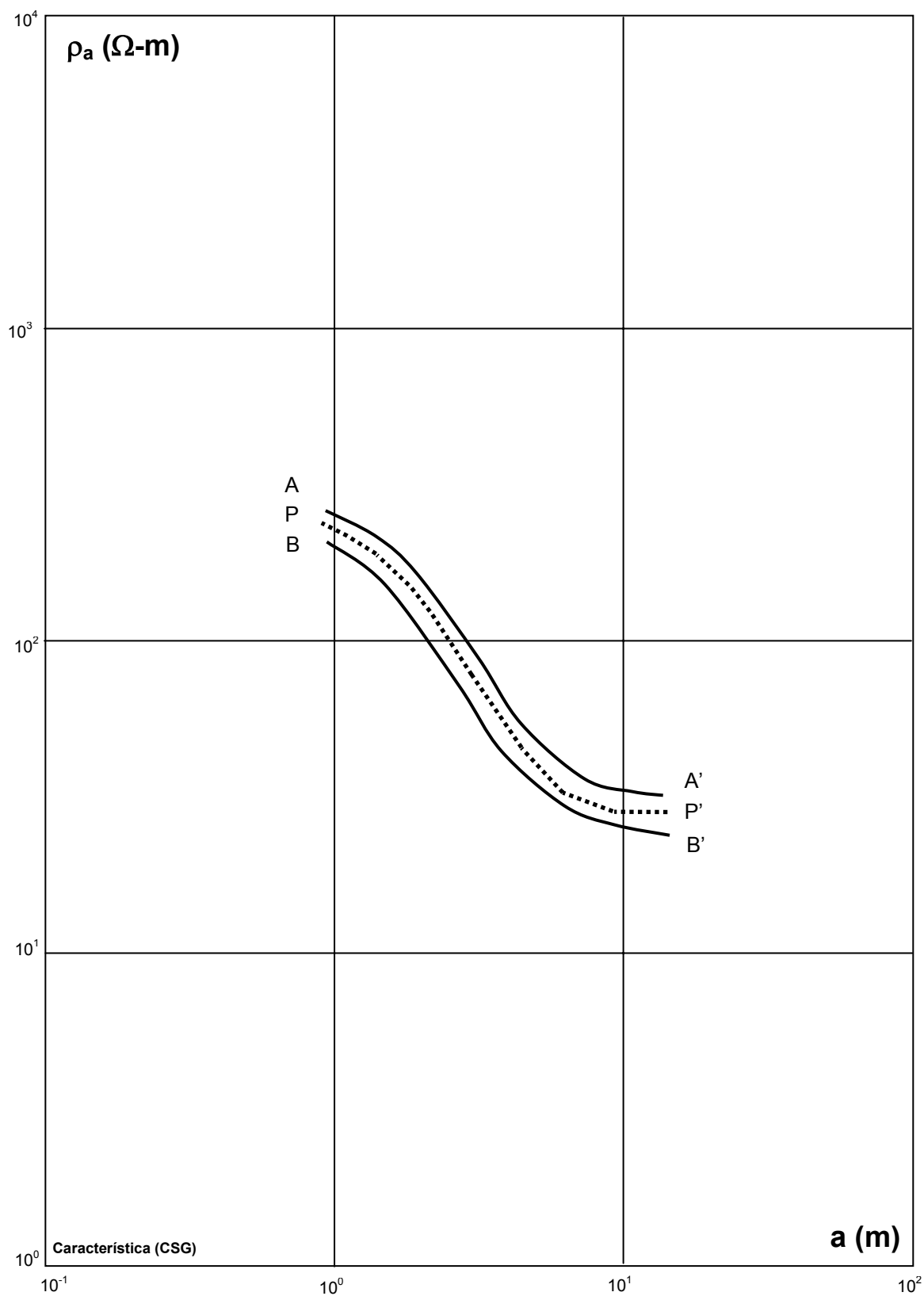


Figura 16. Trazado de Característica de Sondeos Geoelectricos (CSG)

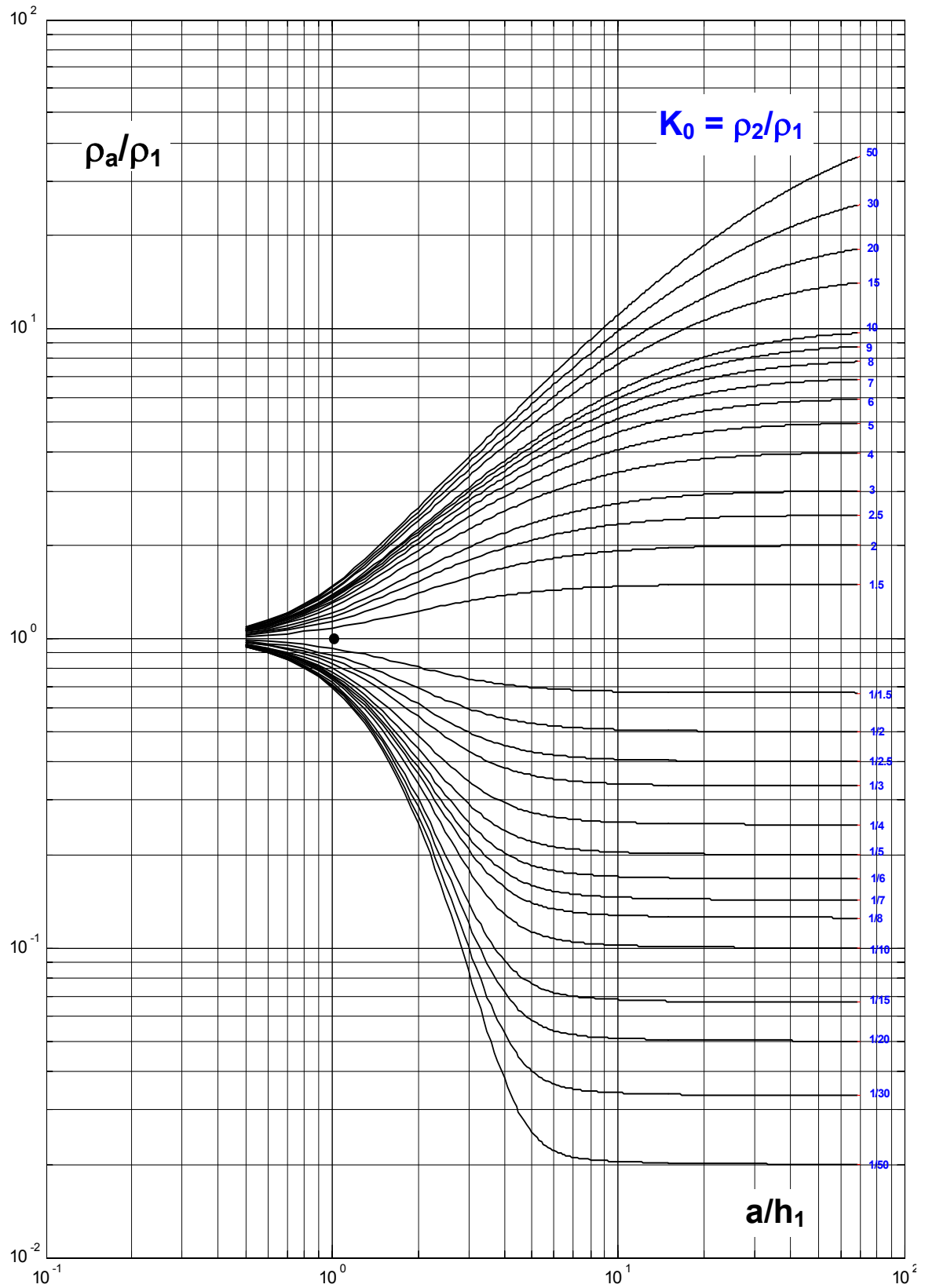


Figura 17. Familia de Curvas Patrón Estándar (STD) [4]

- La Familia de Curvas (STD) y la Característica (CSG) deben estar a la misma escala, y la comparación por superposición debe mantener el paralelismo de los ejes.
- Comparamos la Característica (CSG) con la Familia de Curvas (STD), para determinar los parámetros ( $\rho_1$ ), ( $\rho_2$ ) y ( $h_1$ ).

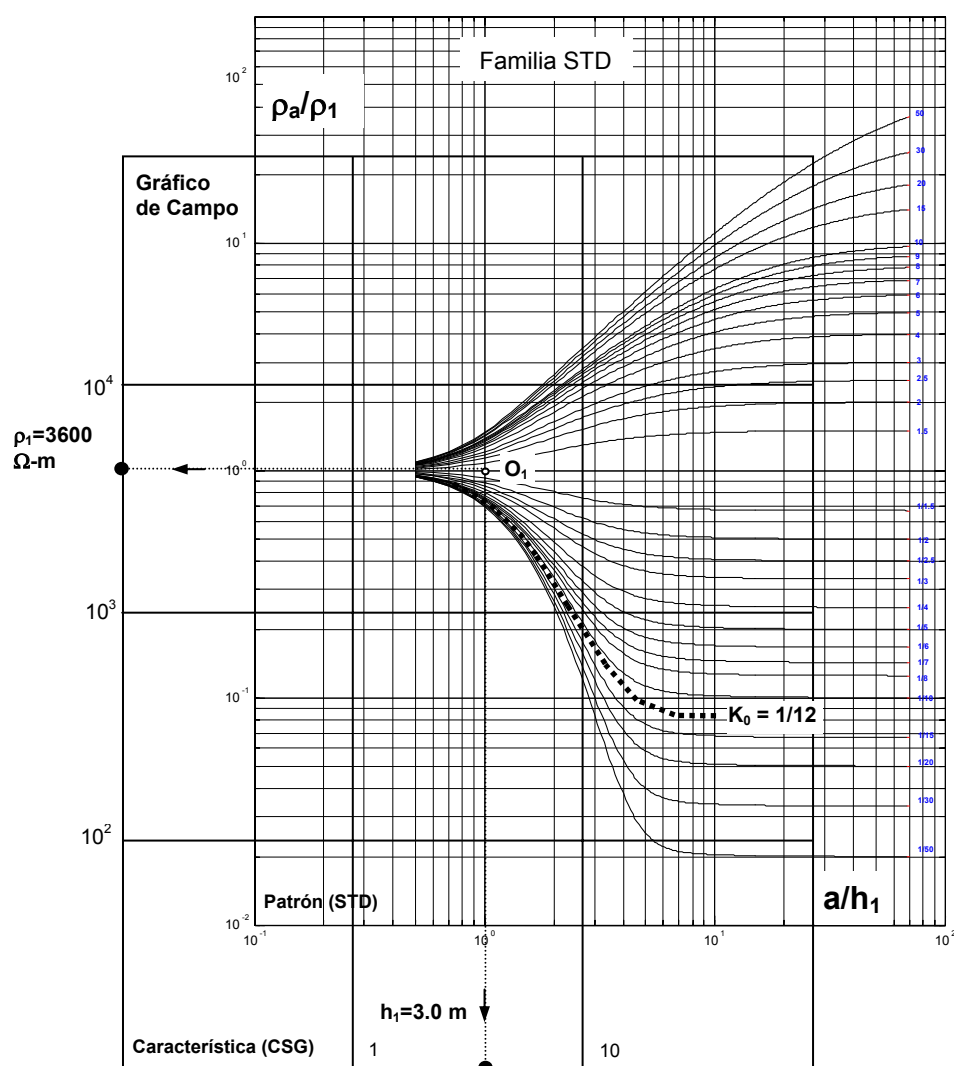


Figura 18. Ejemplo de Procesamiento Gráfico y Lectura de Resultados

- La coincidencia total o parcial de la Característica (CSG) con una de las Curvas de la Familia (STD) muestra en el tramo coincidente un suelo de dos estratos; luego sobre la Característica (CSG) se procede como sigue:
  - Se marca el origen virtual (O) de la Familia de Curvas (STD), punto ( $O_1$ ).
  - Se calca toda la Curva de la Familia (STD) coincidente, anotando su parámetro ( $K_0$ ).
  - Desde ( $O_1$ ) se hallan ( $\rho_1$ ) en el eje de Ordenadas y ( $h_1$ ) en el eje de Abscisas.
  - Para hallar ( $\rho_2$ ) se toma el valor de ( $K_0$ ), de la Curva de la Familia (STD) coincidente.
  
- La no coincidencia de puntos (inicial, intermedio, final) de la Característica (CSG) con una Curva de la Familia (STD), se solucionará corrigiendo los puntos aberrantes o desviados de la Característica (CSG) en función de los datos Físico Químicos del Suelo natural o de los condicionantes presentes durante las medidas.



#### **4.5 Medida de la Resistencia de Dispersión**

La Medida de la Resistencia de Dispersión de la Red de Puesta a Tierra se realiza al finalizar la instalación de la Red de Puesta a Tierra, antes de proceder a la conexión de las bajadas desde los equipos y masas de la Subestación para verificar si el valor de la Resistencia de Dispersión objetivo ha sido alcanzado.

Sin embargo, medidas similares efectuadas al finalizar la obra y hechas cumpliendo los siguientes criterios necesarios para la precisión, tanto estando la instalación energizada como desenergizada, serán también representativas.

A continuación, se procede a recomendar un Método de Medidas tras una comparación previa.

##### **4.5.1 Criterio de Selección del Método de Medida**

Muchos Métodos de Medida de la Resistencia de Dispersión se basan en la aplicación del Principio de Caída de Potencial o en la comparación con Resistencias Auxiliares. [7, 14]

Para elegir el más adecuado, presentamos un cuadro comparativo con los principales Métodos de Medida aplicados en la práctica profesional (**Tabla 4**).

Este cuadro nos conduce a las siguientes conclusiones:

- El Método Clásico de Caída de Potencial no presenta ninguna restricción, a diferencia del Método de Tres Puntos, que solo puede ser hecho de manera confiable en Puestas a Tierra puntuales en Suelos de baja Resistividad, los cuales son poco comunes en nuestro país.

- Las medidas de Resistencia de Dispersión más rápidas y confiables para una generalidad de situaciones prácticas son hechas con el Método Clásico de Caída de Potencial. [12], [15]

Al ponderar las ventajas comparativas del Método Clásico de Caída de Potencial, extensamente descrito en los Estándares IEEE 80–2000 e IEEE 81-1983 [1], [7] se lo elige definitivamente para la medida de la Resistencia de Dispersión.

**Tabla 4.** Comparación de diferentes Métodos de Medida de la Resistencia de Dispersión

Concepto	Método Clásico de Caída de Potencial	Método Indirecto o de Tres Puntos
Aplicación Principal	Puestas a Tierra puntuales y de gran cobertura	Puestas a Tierra puntuales en Suelos de Baja Resistividad
Requerimientos Básicos	Distancias medianas del Circuito de Medida ( $d > 20 r_e$ )	Distancias grandes de cada Circuito de Medida ( $d > 50 r_e$ )
Principio de Medida Utilizado	Principio de Caída de Potencial	Comparación con Resistencias Auxiliares
Procedimiento	Clavado de dos electrodos. Se hace circular y se mide una corriente (I) entre la Red de Puesta a Tierra y un electrodo lejano; el mas cercano simula la Tierra remota y sirve para medir ( $V_s$ )	Clavado de dos electrodos ( $R_2, R_3$ ) formando un triángulo con la Red de Puesta a Tierra ( $R_1$ ). Se hace circular una corriente y se miden ( $R_{12}, R_{13}, R_{23}$ ) entre cada par de electrodos y la Red de Puesta a Tierra respectivamente.
Restricciones del Método	Ninguna	Resistencia de los electrodos debe ser menor que la de la Red de Puesta a Tierra
Ejecución	Rápida; puede hacerse con una medida exacta	Laboriosa; requiere tres medidas con gran distancia de separación
Procesamiento	$R = \frac{V_s}{I}$	$R_1 = \frac{R_{12} - R_{13} + R_{23}}{2}$

#### 4.5.2 Descripción del Método de Medida Seleccionado

El Método Clásico de Caída de Potencial (Anexo D) exige un esquema de cableado fijo para el circuito de Corriente ( $C_1C_2 = d$ ) con mínima resistencia en ( $C_2$ ) y un circuito de Potencial ( $P_1P_2 = p$ ) con un electrodo radial móvil ( $P_2$ ) con una interfase de contacto óptima con el suelo.

Se excluye el uso de instrumentos portátiles diseñados únicamente para la medida de Puestas a Tierra puntuales o de pequeña cobertura dado que su corto alcance ( $d < 75$  m) e insuficiente corriente de medidas ( $I < 50$  mA) conducen a medidas erróneas generalmente favorables.

La disposición del Circuito de Medidas se realizará de la siguiente manera:

- Se conecta en serie un Amperímetro en el Circuito de Corriente ( $C_1C_2$ ) con una fuente autónoma, para medir la magnitud de la corriente de medidas simulando a escala las corrientes peligrosas debido a Fallas a Tierra.
- Se conecta un Voltímetro en el Circuito de Potencial ( $P_1P_2$ ), para medir la Diferencia de Potencial desde la Red de Puesta a Tierra hasta el punto ( $P_2$ ) que simula la Tierra Remota.

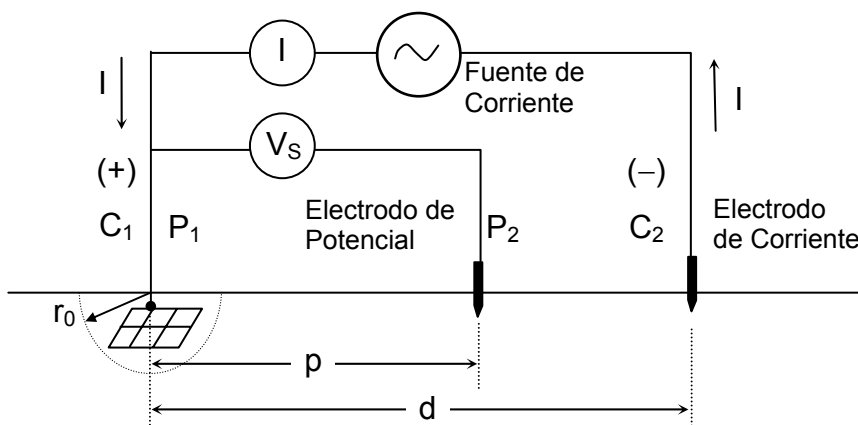
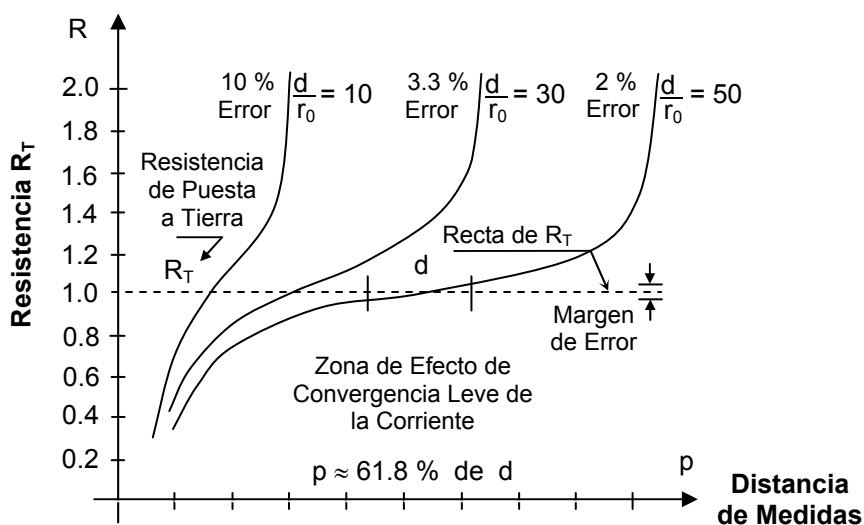


Figura 19. Despliegue del Circuito de Medidas

- Se calcula el Radio Equivalente ( $r_0$ ) como función del Área de Cobertura ( $A$ ) de la Red de Puesta a Tierra con  $A = 2\pi r_0^2$  [4]
- Se calcula la distancia del Circuito de Corriente ( $d$ ) que nos lleve a un mínimo error en la medida. El Estándar IEC [16] recomienda una distancia ( $d$ ) igual a 5 diagonales de la Red de Puesta a Tierra cuadrada equivalente ( $d \approx 17.5 r_0$ ). Un mayor valor siempre beneficiará la precisión de la medida.
- Se dispondrán los circuitos de medida de ( $I$ ) y ( $V_s$ ) preferentemente en forma paralela con separación ( $> 1$  m) o bien divergentes ( $\alpha < 90^\circ$ ) para evitar el acoplamiento mutuo (inductivo, capacitivo) o salir de la línea equipotencial sondeada por el electrodo ( $P_2$ ) [12]



**Figura 20.** Precisión de la Medida en función de la Relación ( $d/r_0$ )

- Existen diferentes procedimientos para realizar la medida de la corriente ( $I$ ) y la Diferencia de Potencial ( $V_s$ ), en los que varían la distancia ( $p$ ) de ubicación del electrodo ( $P_2$ ) y el número de medidas efectuadas:

- Aproximado; considera el perfil de Resistividades del Suelo en modelo homogéneo con  $p = 0,618 (d)$ , o además tomando 2 puntos adicionales de medidas, a ( $\pm 10\%$ ) del primero, es decir con  $p = 1,1 \times 0,618 (d)$  y con  $p = 0,9 \times 0,618 (d)$ .
- Preciso por puntos; impone un mínimo de nueve medidas intermedias progresivas con diferentes distancias ( $p$ ) para graficar una Característica ( $R$  vs  $p$ ); muy laborioso en el Campo.
- Preciso con una sola medida; exige el cálculo exacto de la distancia ( $p$ ) considerando el perfil de Resistividades del Suelo ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$  y  $h_1$ ) en modelo de dos estratos (Anexo E), requiere la medida y el procesamiento previo de las Resistividades Aparentes del Suelo.
- La ejecución de la medida hallándose la Red de Puesta a Tierra aislada de otras instalaciones se hace incrementando la corriente progresivamente tomando en cada nivel los valores de ( $V_S$ ) e ( $I$ ) hasta el Límite de 1% de la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) o bien ( $<100$  A) para cubrir las derivaciones y la Carga de las Capacitancias Parásitas [16]; no obstante, las instalaciones desenergizadas permiten medidas confiables utilizando menores corrientes:
  - Del orden de 10 A (desconectando bajadas del Transformador) en Suelos de alta Resistividad, evitando su desecamiento y la inestabilidad de la medida.
  - Entre 10 A y 20 A en Suelos de baja Resistividad y húmedos o cuando las bajadas del transformador a la Red no han sido desconectadas.

#### 4.5.3 Ejecución Práctica de las Medidas

Para realizar una Medida representativa de la Resistencia de Dispersión ( $R_{PAT}$ ), debe seguirse el siguiente procedimiento [4]:

##### a. **Previamente a la Ejecución de la Medida**

- Definir la distancia de ubicación del electrodo auxiliar ( $C_2$ ) en base al cálculo de la mínima distancia ( $d$ ) que permita un error de lectura  $< 5\%$ , siendo la única restricción la zona disponible para el tendido de los Circuitos de Medida.
- Determinar la Ruta a seguir sobre el terreno por los circuitos de corriente y potencial, evitando la presencia de objetos metálicos de superficie o enterrados. En caso de disponer de una Línea Eléctrica desenergizada aprovechar su recorrido, conductores y Puestas a Tierra.
- Determinar la conformación del Suelo en la dirección de los Circuitos de Medida para el cálculo exacto de la distancia del Circuito de Potencial ( $p$ ) o la preparación de un relleno de instalación de los electrodos ( $C_2$ ) y ( $P_2$ ).
- Seleccionar una Fuente de Corriente con capacidad de provisión del 1% de la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) y de Frecuencia diferente a la Frecuencia de Suministro de la Subestación ( $\pm 5\%$ ) para evitar la perturbación de las medidas que ocasionan corrientes parásitas que circulan permanentemente a través de la Red de Puesta a Tierra.
- Para evitar generar transitorios peligrosos para los equipos de la Subestación durante las medidas, la fuente inyectará la corriente en Baja Tensión a través de un Transformador Variable (Variac).

- Verificar la continuidad de los circuitos, la existencia de dispositivos de protección y la eficacia de las conexiones entre la salida de la fuente de alimentación, el variador, los sistemas de protección, los electrodos auxiliares y la Red de Puesta a Tierra.
- Desconectar todas las Puestas a Tierra, electrodos periféricos y bajadas de Cable de Guarda; asimismo, abrir los seccionadores de Tierra de las Líneas Eléctricas desenergizadas y desconectar los Neutros de los Transformadores de Potencia y Reactancias, Neutros de Distribución y puntos de Tierra de los Rectificadores.

**b. Durante la Ejecución de la Medida**

- Medir la Resistencia de Dispersión de la Red de Puesta a Tierra con niveles progresivos de corriente inyectada. Cada medida será estabilizada en un intervalo uniforme máximo de 30 segundos, repitiendo las medidas hasta alcanzar el límite máximo de 1 % de la Corriente ( $I_G$ ), o el amortiguamiento natural de la Corriente de Medidas.
- En caso de no alcanzarse el valor adecuado de la corriente de medidas se debe disminuir la Resistencia del Electrodo ( $C_2$ ) conectando electrodos adicionales en paralelo o incrementar ya sea el voltaje o la potencia de la fuente de Alimentación.
- Realizar las medidas en el menor tiempo posible para evitar el desecamiento del suelo por calentamiento y el incremento de la Resistencia de Dispersión, situación irreversible en suelos sin recarga natural de agua [4]; en suelos de alta Resistividad el uso del 1% de la Corriente ( $I_G$ ) considerado en Estándares Internacionales es discutible



**c. Finalizada la Ejecución de la Medida**

- Poner fuera de servicio la fuente de alimentación y proceder a la desconexión y repliegue de los Circuitos de Medida, con recuperación total de los conductores, instrumentos y accesorios utilizados para las medidas.
- Reconectar sólidamente tal como hallado todas las Puestas a Tierra, electrodos periféricos y bajadas de Cable de Guarda; luego, cerrar los seccionadores de Tierra de las Líneas Eléctricas desenergizadas y reconectar los Neutros de los Transformadores de Potencia y Reactancias, Neutros de Distribución y puntos de Tierra de los Rectificadores.

**4.5.4 Procesamiento, Interpretación y Reporte de Medidas**

Evaluamos los valores de la Corriente ( $I$ ) y Diferencia de Potencial ( $V_S$ ) obtenidos para las distancias del Circuito de Potencial ( $p$ ) utilizando la Ley de Ohm ( $R = V_S/I$ ).

El procesamiento para obtener el valor de la Resistencia de Dispersión de la Red podrá ser analítico o simplificado dependiendo del método de medida utilizado:

**a. Método Aproximado:**

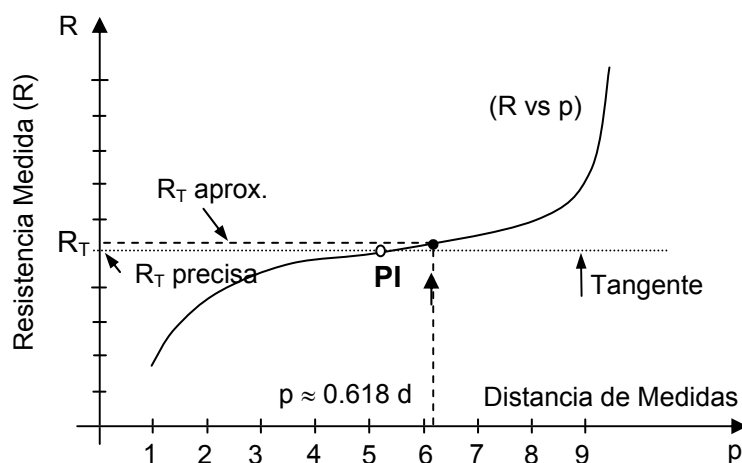
- Con medida única: El resultado obtenido es la Resistencia de Dispersión aproximada asumiendo un perfil de Resistividad del Suelo en modelo homogéneo ( $p = 0.618 d$ ).
- Con 3 puntos de medidas: El promedio de las 3 Resistencias calculadas será la Resistencia de Dispersión aproximada; rara vez difiere de los valores que da la Medida única.

**b. Preciso por puntos:**

- Se grafican los valores de (R vs p) de los puntos formando una característica; mediante una regresión matemática se halla la respectiva cónica o función continua  $f(p)$ .
- La proyección en el eje de ordenadas del Punto de Inflexión (PI) de la característica, en el que la pendiente de la curva se hace cero, permite calcular la Resistencia de Dispersión exacta.

**c. Preciso con una sola medida**

- El resultado obtenido es la Resistencia de Dispersión exacta.



**Figura 21.** Cálculo preciso y aproximado de la Resistencia de Dispersión

El Informe de Medidas consignará la Resistencia de Dispersión obtenida, los datos de placa del equipo de medidas, participantes, hora del día (inicio y finalización), distancias (d) y (p), ángulo de divergencia (a) de los circuitos de Corriente (I) y Potencial ( $V_S$ ) y una tabla con los valores de Corriente, Tensión y Resistencia medidos

Deberá concluirse indicando el significado del valor obtenido y las recomendaciones para su conservación o mejoramiento.

#### 4.6 Medida de los Potenciales de Toque y Paso

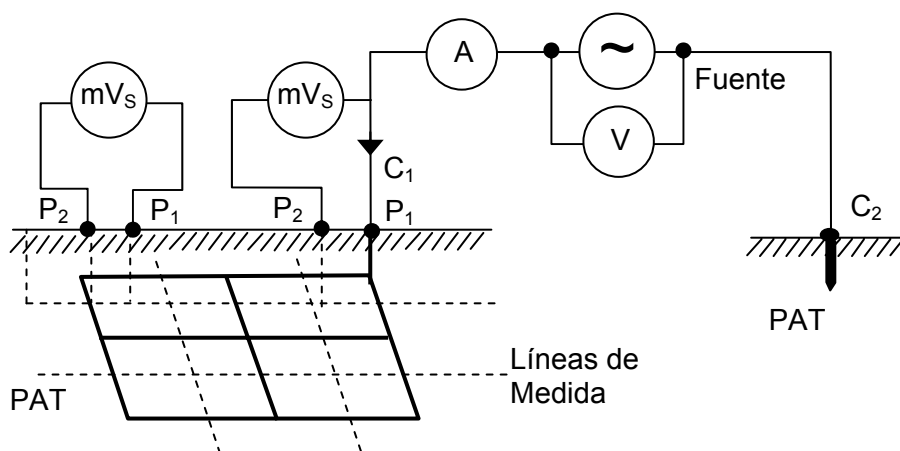
La Medida de los Potenciales de Toque ( $V_T$ ) y Paso ( $V_P$ ) generalmente es precedida por la Medida de la Resistencia de Dispersión ( $R_{PAT}$ ) dado que ambas requieren similar fuente de alimentación y configuración del circuito de corriente, siendo asimismo necesario conocer ambas para determinar si la Red puede dispersar sin peligro elevadas Corrientes de Falla.

##### 4.6.1 Descripción del Método de Medidas

Se aplica el principio de Caída de Potencial, con un esquema de cableado fijo para el Circuito de Corriente ( $C_1C_2 = d$ ) tomando las mismas consideraciones sobre la distancia ( $d$ ) y el valor de la corriente ( $I$ ) que las tomadas en la medida de la Resistencia de Dispersión.

La disposición del Circuito de Medidas se realizará de la siguiente forma:

- Se conecta un Voltímetro de baja escala (mV) entre los electrodos móviles ( $P_1$ ) y ( $P_2$ ), que al ser de alta Resistencia interna ( $10\text{ M}\Omega$ ) deberá adaptársele una Resistencia de  $1\text{ K}\Omega$  en paralelo para mejorar la estabilidad de las medidas [16]



**Figura 22.** Despliegue del Circuito de Medidas

- Los Electrodo de Medida que simulan los pies tendrán preferentemente una superficie ( $S \geq 200 \text{ cm}^2$ ) plana rectangular (10 x 20 cm), y deberán soportar un peso ( $> 50 \text{ kg}$ ) repartido en partes iguales para garantizar una interfase de óptimo contacto con el suelo.
- Las medidas en el área y la periferia de la Red de Puesta a Tierra se obtienen sobre trayectorias equidistantes a los electrodos enterrados o alejándose de estos según sus propios ejes de simetría también orientados hacia la periferia.
- Los Potenciales de Toque se miden a una distancia de 1 m desde una masa fija y el suelo, o bien entre un terminal de la proyección emergente del conductor enterrado y el suelo.
- Los Potenciales de Paso se miden en intervalos sucesivos de 1 m ubicados entre dos puntos cualesquiera del suelo que preferentemente se hallen sobre las trayectorias equidistantes de las hileras de conductor de la Red.

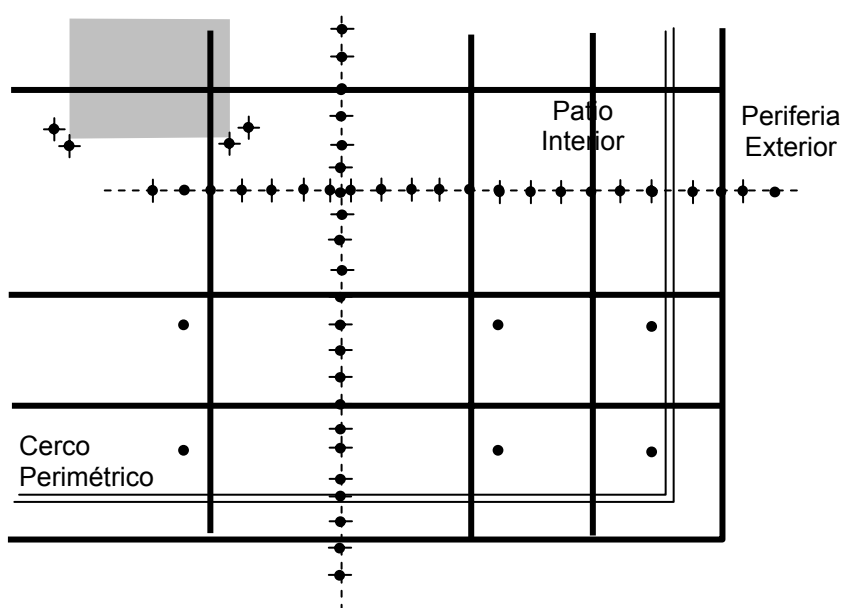
#### **4.6.2 Ejecución Práctica de la Medida de Potenciales de Toque y Paso**

Para realizar medidas representativas de los Potenciales de Toque ( $V_T$ ) y Paso ( $V_P$ ) en la Subestación se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

##### **a. Previamente a la Ejecución de la Medida**

- Se siguen los mismos pasos previos a la medida de la Resistencia de Dispersión, preparándose una sola Puesta a Tierra para el electrodo ( $C_2$ )
- En caso de realizarse esta medida inmediatamente después de la medida de la Resistencia de Dispersión, solo tendrá que desconectarse el electrodo ( $P_2$ ), replegar y reubicar el Circuito de Medida de ( $V_S$ ) conectando en paralelo el voltímetro con la fuente de Corriente.

- Preparar un Mapa de Puntos de medida a partir del plano de instalación para zonas de preferencia libres, puntos alrededor de equipos y en los principales puntos obligatorios de trabajo o de tránsito de las personas:
  - Para redes simétricas, se consideran trayectorias según los ejes de simetría de las hileras (longitudinal, transversal, radial).
  - Para redes asimétricas, se tomaran medidas adicionales en las mallas de mayor y menor área más representativas de la Red, considerando en lo posible trayectorias de puntos equidistantes a las hileras de cada malla.
- Se trazan en el suelo las líneas directrices de medida y se ubican en ellas los puntos de toma de las Diferencias de Potencial, tanto aquellos que corresponden al armado de la Red de Puesta a Tierra como aquellos que se desea verificar en localizaciones especiales.



**Figura 23.** Ejemplo de Mapa de Puntos de Medida

**b. Durante la Ejecución de la Medida**

- Se toman las mismas consideraciones descritas en la ejecución de la medida de la Resistencia de Dispersión respecto a la Corriente de Medidas y el tiempo de duración de la misma para cada medida.
- Cada electrodo en su base deberá contar con un paño húmedo; el lastre mínimo de 25,5 kg (250 N) puede ser superado por el peso de una persona sobre cada electrodo [16].
- Se miden los Potenciales de Toque ( $V_{mt}$ ) conectando el voltímetro a la masa metálica de cualquier equipo conectado a Tierra, o desde un terminal proveniente de la Red, y a un electrodo plano situado sobre un punto señalado previamente en el mapa.
- Se miden los Potenciales de Paso ( $V_{mp}$ ), conectando el voltímetro entre dos electrodos planos separados 1 m situándolos sobre las directrices de puntos señalados previamente en el mapa

**c. Finalizada la Ejecución de las Medidas**

- Se siguen los mismos pasos de desconexión del Circuito de Medidas y reconexión sólida del Sistema de Puesta a Tierra descritos para finalizar la medida de la Resistencia de Dispersión.

**4.6.3 Procesamiento, Interpretación y Reporte de la Medida**

El procesamiento de los Potenciales de Toque ( $V_{mt}$ ) y Paso ( $V_{mp}$ ) medidos consiste en trasladarlos a escala real multiplicándolos por un Factor de Proporcionalidad ( $k$ ) para obtener los Potenciales de Toque ( $V_T$ ) y Paso ( $V_P$ ) reales:

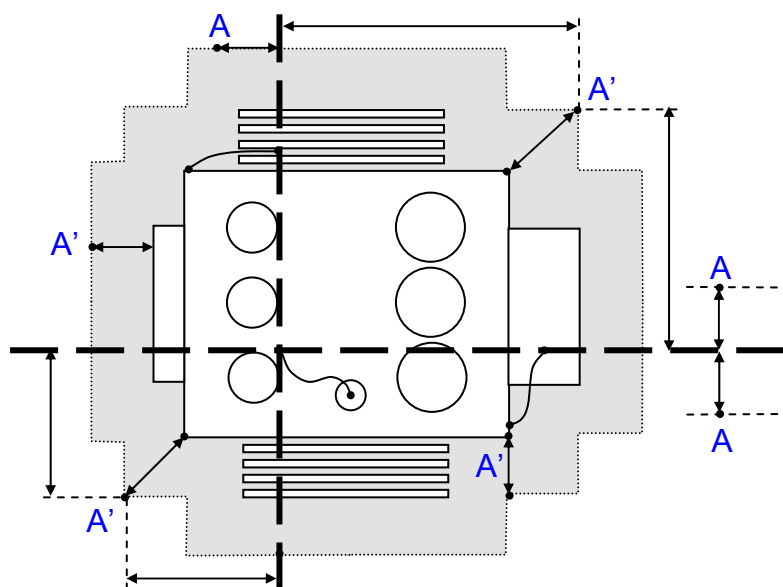
$$V_T = V_{mt} \times k \quad (V) \quad , \quad V_P = V_{mp} \times k \quad (V)$$

Dicho Factor de Proporcionalidad ( $k$ ) se obtiene en función de la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) y la Corriente de Medidas ( $I_{medida}$ ) según:

$$k = \frac{I_G}{I_{medida}} \quad (\text{p.u.})$$

Los Potenciales de Toque ( $V_T$ ) obtenidos midiendo a 1 m de distancia alrededor de equipos o masas voluminosas tales como el Transformador de Potencia se deben interpretar con mucha atención, dado que no necesariamente representan Potenciales de Toque estandarizados:

- Los puntos (A) representan Potenciales de Toque estandarizados con distancias de 1 m.
- Los puntos (A') representan Potenciales de Toque no estandarizados con distancias  $\neq 1$  m.



**Figura 24.** Medida de Potenciales de Toque en Equipos Voluminosos

Los Potenciales de Toque y Paso medidos de la manera descrita no deberán tener un valor superior a 50 Voltios, siendo este el máximo permisible para la seguridad de las personas.

El Informe de medidas, aparte de una tabla completa de resultados que relieve los mayores valores registrados tanto al interior como en la periferia exterior de la Red de Puesta a Tierra, consignará los datos de placa del equipo de medidas, participantes, hora del día (inicio y finalización) y distancia (d) del Circuito de Corriente (I).

Deberá concluirse indicando si estos valores cumplen o no con los parámetros de Diseño y las recomendaciones para su conservación o mejoramiento.



## CAPITULO V

### DISEÑO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA

#### 5.1 Información de Base

Antes de proceder al diseño de la Red de Puesta a Tierra, deben recolectarse diferentes datos provenientes tanto de la Inspección de Campo, como otros que dependen de los parámetros determinados por el cliente para su futura Subestación.

Estos datos son:

##### 5.1.1 Datos a ser Suministrados por el Cliente

Se obtienen de los Términos de Referencia del proyecto; en su defecto, el especialista deberá solicitárselos al Área de Planeamiento del cliente. Estos son:

- Corriente Máxima de Falla Fase-Tierra (según Tensiones Nominales) :  $I_F$  (kA)
- Tiempo Máximo de Aclaramiento de Falla:  $t$  (s)
- Resistencia de Dispersión objetivo:  $R_{obj}$  ( $\Omega$ )
- Área disponible:  $A$  ( $m^2$ )
- Líneas Aéreas de Llegada/ Salida con Aterramiento:  $n$
- Líneas Eléctricas Subterráneas con chaqueta o Neutro a Tierra
- Alimentadores de Distribución
- Régimen del Neutro
- Parámetros eléctricos de Secuencia Directa y Cero

### **5.1.2 Datos a ser Recolectados en el Campo**

Deben ser obtenidos por el especialista en calidad de complemento a los datos técnicos disponibles. Se pueden dividir en cuatro grandes grupos:

#### **a. Datos Locales**

Corresponden al área involucrada en el proyecto. Estos son:

- **Clima, Precipitaciones Pluviales, Altitud**  
Son necesarios para la previsión del mantenimiento de la Red de Puesta a Tierra.
- **Características Topográficas y Geológicas del Sitio**  
Permiten avizorar el comportamiento del suelo respecto al desempeño mecánico de la Red de Puesta a Tierra.
- **Ubicación Geográfica y proximidad a Suelos Húmedos o mineralizados.**  
Son datos que pueden dar lugar a soluciones para el mejoramiento del Diseño de la Red de Puesta a Tierra cuando se requieren bajas Resistencias de Dispersión.
- **Infraestructura Periférica (Aérea, de Superficie, Subterránea)**  
Su conocimiento permite prever los condicionantes del Diseño de la Red de Puesta a Tierra y las posibilidades de medidas de sus parámetros eléctricos.
- **Área de cobertura y disponibilidad de espacio periférico adicional**  
Tratándose de Suelos de Alta Resistividad, debe inspeccionarse los alrededores y revisarse los planos del terreno circundante previendo su

posible aprovechamiento con la instalación de componentes periféricos adicionales para la Red de Puesta a Tierra (pozos satélites, electrodos en anillo, etc).

**b. Datos del Suelo Natural**

- Resistividad Eléctrica en Modelo Estratificado.

Se utiliza para conocer el comportamiento conductivo del Suelo a la profundidad de instalación de la Red de Puesta a Tierra y de los Electrodo Verticales.

- Su forma: Explanada natural, Terraza con Cortes y Rellenos, Taludes.

Permite determinar si la instalación de la Red de Puesta a Tierra requerirá de obras civiles de acondicionamiento del suelo o aportes de material de relleno.

- Características Físicas y Químicas de la Tierra del sitio.

Se tomarán muestras haciendo calicatas exploratorias para determinar si existirán problemas de desecamiento, erosión o inestabilidad química del suelo al instalarse la Red de Puesta a Tierra.

- Contenidos Salinos, Humedad, granulometría y pH del Suelo.

Son obtenidos mediante el análisis de las muestras del suelo en laboratorio. Dicha caracterización permite inferir los eventuales mecanismos de corrosión en la Red de Puesta a Tierra y en las estructuras metálicas enterradas, conectadas o no conectadas a la misma.

**c. Tipo de Aterramiento requerido**

- Carácter de Protección contra Gradientes de Potencial peligrosos

Las Redes de Puesta a Tierra de Subestaciones de Transmisión y Generación atendidas o automatizadas, deben prever Potenciales de Toque y Paso tolerables por las personas y una baja Resistencia de Dispersión, para los tiempos de aclaramiento de falla previstos. [4]

Solo en el caso de Subestaciones de Distribución en las que los Tiempos de Aclaramiento de Falla proyectados sean prácticamente instantáneos, la Red de Puesta a Tierra no tendrá exigencias de control de potenciales y deberá proporcionar básicamente una mínima Resistencia de Dispersión.

- Magnitud de la Resistencia de Dispersión requerida.

De no estar especificada en los términos de Referencia del proyecto, deberá ser la Resistencia límite de sensibilidad requerida por los equipos de protección de Fallas a Tierra. [17]

Según [2], [4], [18] generalmente dichos límites máximos son:

- Para Subestaciones de Distribución:  $R_{PAT} \leq 5 \Omega$
- Para Subestaciones de Transmisión y Generación:  $R_{PAT} \leq 1 \Omega$

- Magnitud del Potencial Máximo de Dispersión

Su valor no deberá exceder el Nivel Básico de Aislamiento de los equipos de Control, Medidas, Protección y otros Subsistemas y Servicios alimentados en Baja Tensión de la Subestación.

- Su capacidad de Dispersión de Corrientes

Deberá evaluarse las Corrientes de Falla a Tierra proyectadas a futuro por el cliente en los niveles de tensión de transformación existentes; en caso de no contar con dichos valores, el especialista deberá obtenerlos preferentemente mediante el uso de un software de Sistemas de Potencia.

## 5.2 Selección y Descripción del Método de Diseño a Adoptarse

Ante la ausencia de normas o recomendaciones técnicas que abarquen el cálculo de Redes de Puesta a Tierra en nuestro medio, se ha comparado los Estándares Internacionales IEEE 80-2000 e IEC 479-1.

El Estándar IEEE 80-2000 es ampliamente aplicado en Estados Unidos, el Perú y otros países del mundo, mientras que el Estándar IEC 479-1 es menos utilizado debido a que está en proceso de elaboración y falta completar algunos tópicos.

No obstante, ambos estándares presentan métodos de cálculo que garantizan límites de corrientes admisibles por el Cuerpo Humano al producirse en el suelo de la instalación potenciales de Toque y Paso debido a la dispersión de Corrientes de Falla por la Red, por lo cual se ha elaborado un cuadro comparativo con sus principales características (**Tabla 5**).

**Tabla 5.** Comparación de los Estándares IEEE 80-2000 e IEC 479-1 [19]

Concepto	IEEE 80-2000	IEC 479 – 1
Ediciones	Cuatro (1961, 1976, 1986 y 2000)	Una (1984)
Resistencia Eléctrica del Cuerpo Humano	1000 Ohms	Depende del Voltaje y recorrido de la Corriente
Uso de Corrección por Grava Superficial	Gráfico o Ecuación con $h_s$ , $\rho$ , $C_s$ y $\rho_s$	No hay guía
Resistencia Equivalente Thevenin	1.5 $C_s\rho_s$ para Potencial de Toque 6.0 $C_s\rho_s$ para Potencial de Paso	No hay guía
Potenciales de la Red	Ecuaciones simplificadas $K_i K_m L_T I_G$ , o uso de modelos computacionales sugerido	No hay guía
Corriente Permisible por el Cuerpo Humano	0.116 / $\sqrt{t}$ para personas de 50 kg 0.157 / $\sqrt{t}$ para personas de 70 kg	Curvas independientes del peso de la persona

De los dos estándares revisados, el Estándar IEEE 80-2000 es el que respaldado con una amplia experiencia técnica, presenta el procedimiento de cálculo más evolucionado, completo y simple, sin comprometer la seguridad en el diseño, consignando asimismo todas las ecuaciones y fórmulas aproximadas requeridas por el ingeniero, por lo cual lo aplicaremos en el diseño de Redes de Puesta a Tierra.

### **5.3 Descripción del Método de Diseño Seleccionado**

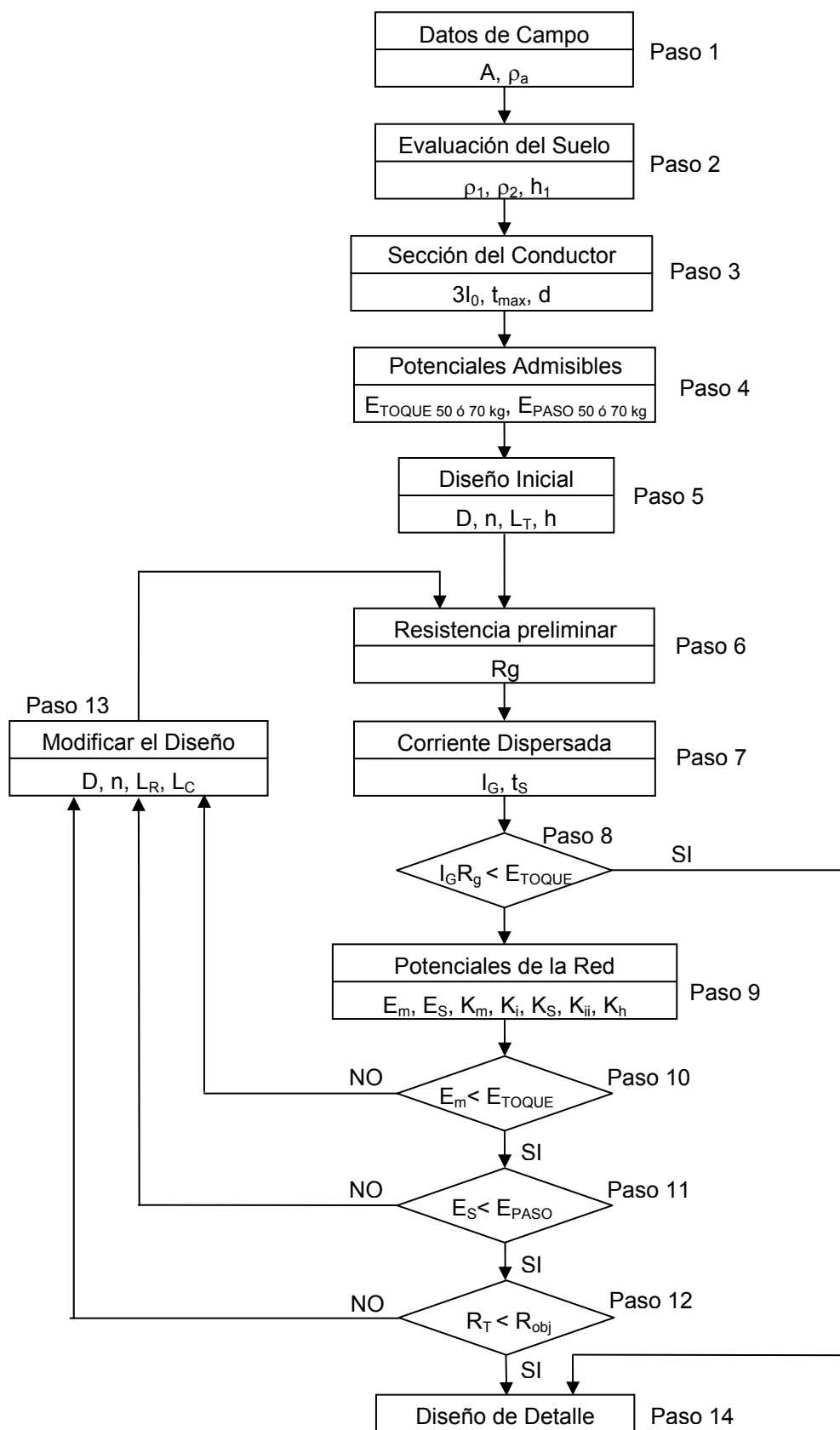
El Estándar IEEE 80-2000 recomienda un método de diseño aceptado internacionalmente y que viene aplicándose ininterrumpidamente desde hace más de 30 años, no habiendo sufrido modificaciones sustanciales sino solamente perfeccionamientos de actualización periódicos cada 10 a 15 años.

La secuencia de pasos a seguir para el diseño es la siguiente:

- a. Con las Resistividades Aparentes ( $\rho_a$ ) medidas en el Campo se elabora la Característica de Sondeos Geoeléctricos (CSG), la cual se procesa para obtener las Resistividades de diseño ya sea en modelo de Suelo homogéneo ( $\rho$ ), de dos estratos ( $\rho_1, \rho_2, h_1$ ) o Multiestrato.
- b. Se calcula la Sección mínima (S) de conductor de la Red de Puesta a Tierra según el metal seleccionado para el armado.
- c. Se calculan los Potenciales de Toque ( $E_{TOQUE}$ ) y de Paso ( $E_{PASO}$ ) máximos admisibles para personas de 50 y 70 kg.
- d. Se define una configuración inicial del armado de la futura Red de Puesta a Tierra.

- e. Se calcula la Resistencia de Dispersión preliminar ( $R_g$ ) con la expresión aproximada de Sverak.
  
- f. Se calcula la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) y con la Resistencia de Dispersión preliminar ( $R_g$ ) se halla el Potencial Máximo de Dispersión (PMD); si su valor es menor que el Potencial Admisible de Toque, se da por concluido el cálculo, asegurando el pleno cumplimiento de las exigencias de seguridad.
  
- g. Se calculan los Potenciales de Toque ( $E_m$ ) y Paso ( $E_s$ ) y la Resistencia de Dispersión de la Red ( $R_T$ ); si los valores obtenidos sobrepasan los Potenciales máximos admisibles o no se alcanza la Resistencia de Dispersión requerida, se revisan los parámetros de diseño para modificar los que sean convenientes y proceder al recálculo con los mejoramientos efectuados en el armado de la Red

### 5.3.1 Diagrama de Flujo del Diseño





### **5.3.2 Uso de Programas Computacionales de Cálculo**

Para el diseño de Redes de Puesta a Tierra existen programas de cálculo computacionales basados en métodos numéricos como el Método de Diferencias Finitas (DF), Método de Elementos Finitos (FEM) [20] y Método de Elementos de Capa (BEM) [21], [22], siendo este último más rápido que los anteriores.

Dichos programas requieren elevadas velocidades de procesamiento computacional; no obstante, presentan las siguientes ventajas:

- Modelamiento preciso del diseño, eliminando costos por sobredimensionamientos innecesarios.
- Modelamiento de Redes simétricas o asimétricas, incluyendo o no Electrodo Verticales dispuestos en forma ordenada o arbitraria.
- Cálculo de Potenciales de Toque y Paso en todos los puntos del Área de cobertura de la Red.
- Modelamiento de Puestas a Tierra Auxiliares o de interconexión conectadas en Paralelo.

No obstante, programas de cálculo basados en el Método de Elementos Finitos (FEM) pueden dar resultados irreales cuando se incrementa la segmentación de sus elementos a un tamaño comparable al diámetro del conductor de la Red [22].

Por lo tanto, se recomienda verificar los resultados obtenidos de la aplicación de dichos programas computarizados con aquellos que se obtienen utilizando el Método de Cálculo manual del Estándar IEEE 80-2000, el cual sigue manteniéndose vigente hasta la fecha.

#### **5.4 Procedimiento de Cálculo**

Para el diseño de la Red de Puesta a Tierra es necesario el cálculo de ciertos parámetros de operación, mientras que otros deben ser determinados en función tanto de un menor costo de la obra como de criterios y experiencia de ingeniería; a continuación, se da una breve descripción de los más relevantes en el Diseño.

##### **5.4.1 Geometría del Reticulado**

El cálculo de la Red de Puesta a Tierra se inicia escogiendo la forma y dimensiones de malla a adoptarse, pudiendo ser regular (cuadrada), irregular (rectangular, triangular u otra) o mixta (mallado combinado). Generalmente se escoge el reticulado de malla cuadrada dado que:

- a. Pueden ser calculados utilizando métodos de cálculo manual recomendados por Estándares Internacionales con una aproximación aceptable y variando un menor número de parámetros durante las aproximaciones del diseño.
- b. Existe una mayor experiencia descrita en bibliografía disponible para el cálculo y verificación de los resultados.

Los Reticulados irregulares o mixtos se eligen según el valor de la corriente a dispersar, generalmente para áreas o patios muy grandes con superficies de cobertura irregular o bien de diferente Resistividad del Suelo y presentan ligeramente mejor desempeño que los reticulados regulares a igual número de mallas y longitud de conductor [23]; no obstante, un modelamiento confiable de éstos requiere del uso de programas computacionales de cálculo.

#### **5.4.2 Tiempo de Aclaramiento de Falla**

Es el tiempo comprendido desde el inicio de la falla hasta la finalización del ciclo de apertura del interruptor que la despeja; dicho lapso es definido previamente por el estudio del Sistema de Potencia y la selectividad del Sistema de Protección.

Por ejemplo, para Líneas de Transmisión de 220 kV con rutas de gran altitud y condiciones climáticas favorables para la extinción del arco eléctrico durante una Falla a Tierra, se utilizan generalmente intervalos de 245 ms y 525 ms para recierres trifásico y monofásico respectivamente [24]. Asimismo, debe considerarse que:

- Elevados niveles de corriente derivados desde una masa al suelo a través del Cuerpo Humano pueden ser admitidos si el tiempo de aclaramiento de falla de la protección es rápido.
- El recierre automático inmediato sin haberse aclarado completamente una Falla a Tierra puede conducir a un segundo choque, condición equivalente a un solo choque cuya duración es la suma de los intervalos de ambos choques individuales.

En el diseño, la elección entre el tiempo de aclaramiento de la protección primaria o de la protección de respaldo dependerá del sistema en estudio, del margen de confiabilidad de la protección primaria, del factor de seguridad requerido y de la diferencia en los costos del proyecto.

#### **5.4.3 Corrientes Admisibles por el Cuerpo Humano**

El choque eléctrico producido en el instante de una Falla a Tierra resulta del paso de una corriente por el Cuerpo Humano por la Diferencia de Potencial que se presenta entre dos partes cualesquiera del mismo, siendo el recorrido más peligroso aquel que compromete al corazón, aún para corrientes moderadamente pequeñas. **(Tabla 6)**

Experimentos realizados por Charles Dalziel en animales y aceptados como validos en seres humanos [26] determinaron que según el peso corporal (50 o 70 kg), el 99.5 % de personas saludables puede tolerar una máxima Corriente a Frecuencia Industrial ( $I_k$ ) que circule a través de la región torácica del corazón dada por:

$$I_k = k/\sqrt{t_s} \quad (A)$$

Donde:

$k$  : Constante de Energía de Aguante ( $k_{50 \text{ kg}} = 0.116$  ;  $k_{70 \text{ kg}} = 0.157$ )

$t_s$  : Tiempo de Aclaramiento de Falla previsto (s)

Las Corrientes a Frecuencia Industrial (50 o 60 Hz) son las más peligrosas por presentar un límite admisible 5 veces menor que el de Corriente Continua y hasta 25 veces menor que el de corrientes a Alta Frecuencia (> 3000 Hz). [25]

**Tabla 6.** Efectos de la Corriente a Frecuencia Industrial sobre el Cuerpo Humano (1.0 s < t < 3.0 s)

<b>Corriente</b>	<b>Efectos experimentados</b>
1 mA	Límite de la Percepción
6 – 8 mA	Intervalo Admisible, fastidio
9 – 25 mA	Malestar, dolor descontrol de músculos Estriados
25 – 50 mA	Respiración difícil, contracción de músculos lisos
50 – 100 mA	Abandono, fibrilación ventricular ( $t \geq 3.0$ seg.)
> 100 mA	Paro cardiaco, quemaduras, muerte

#### 5.4.4 Espeor del Recubrimiento del Suelo de la Subestación

Es práctica común utilizar un recubrimiento de grava, piedra picada o losa de concreto en el suelo natural de la Subestación y su periferia próxima. Su necesidad se justifica por su favorable comportamiento eléctrico:

- a. Durante una falla propicia límites más altos de potenciales de toque y paso admisibles, al incrementar la Resistencia de Contacto con el Suelo de los objetos o pies, limitando la corriente que circula a través del suelo hacia la superficie [27].
- b. Retarda la evaporación de la humedad del suelo, limitando el desecamiento de la superficie del suelo y de sus capas subyacentes, especialmente durante los períodos de estiaje o sequía [1].
- c. Su presencia no incrementa significativamente la Resistencia de Dispersión de la Red.

Generalmente a dicho recubrimiento se le asigna un espesor ( $h_s$ ) de (0,08m - 0,15m) cuya efectividad depende de la Resistividad ( $\rho_s$ ) en situación húmeda (3000 – 8000  $\Omega$ .m) del tipo de recubrimiento utilizado, y en el caso de la grava asimismo del número de tamiz seleccionado.

Su efecto se expresa a través del Coeficiente de Contacto con el Suelo ( $C_s$ ), el cual expresa el nivel de contacto entre los pies y el Suelo natural a través del espesor de recubrimiento utilizado. Se obtiene gráficamente [1] o se calcula mediante la expresión:

$$C_s = 1 - 0.09 \left[ \frac{1 - \rho/\rho_s}{2h_s + 0.09} \right] \quad (1/m)$$

Donde:

$h_S$  : Espesor de la capa de grava (m)

$\rho$  : Resistividad del Suelo Superficial Natural ( $\Omega.m$ )

$\rho_S$  : Resistividad de la capa de recubrimiento utilizada ( $\Omega.m$ )

En Subestaciones de gran envergadura o con grandes áreas para futuras ampliaciones debe evaluarse solo el costo de recubrir el área útil de la instalación, pudiendo todavía dar preferencia sólo a las zonas transitables y restringiendo la circulación del personal fuera de ellas; para este fin las trayectorias que siguen las canaletas constituyen la vía más corta para el tránsito del personal de la Subestación.

#### **5.4.5 Potenciales Admisibles de Toque y Paso**

Se calculan a partir de la Ley de Thevenin aplicada al circuito Resistivo que forma el cuerpo humano ( $1000 \Omega$ ) con la Red de Puesta a Tierra ( $< 5 \Omega$ ) durante la dispersión en el Suelo de una elevada Corriente de Falla a través de la Red de Puesta a Tierra.

Para personas de 50 kg:

$$E_{\text{toque } 50\text{kg}} = (1000 + 1.5C_S\rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad (V)$$

$$E_{\text{paso } 50\text{kg}} = (1000 + 6C_S\rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad (V)$$

Para personas de 70 kg:

$$E_{\text{toque } 70\text{kg}} = (1000 + 1.5C_S\rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \quad (V)$$

$$E_{\text{paso } 70\text{kg}} = (1000 + 6C_S\rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \quad (\text{V})$$

Donde:

$C_S$  : Coeficiente de Contacto con el Suelo (1/m)

$\rho_S$  : Resistividad de la capa de recubrimiento utilizada ( $\Omega\cdot\text{m}$ )

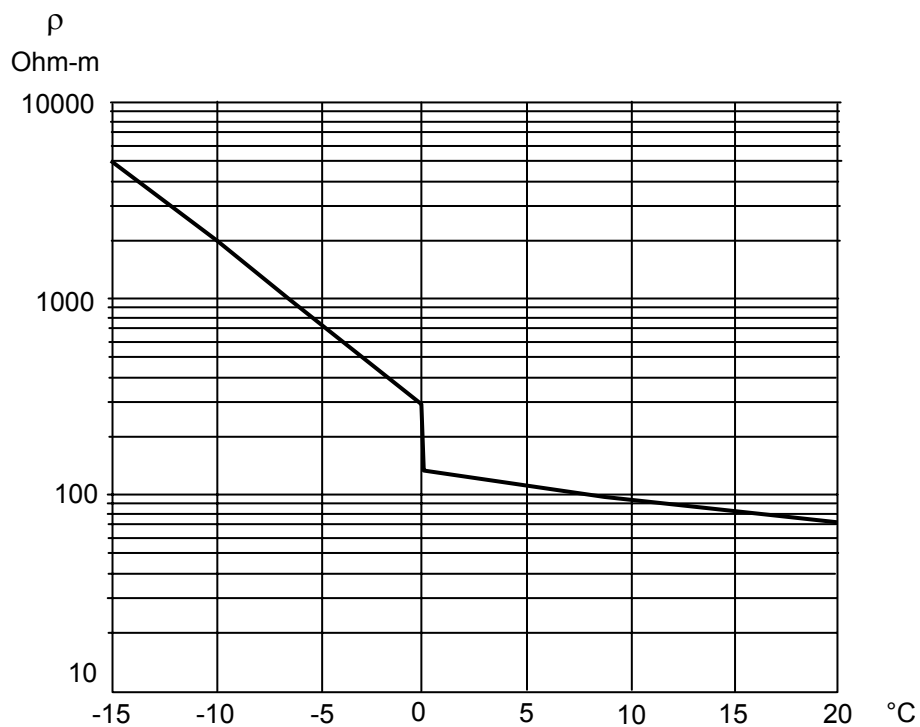
$t_S$  : Tiempo de Aclaramiento de Falla previsto (s)

#### **5.4.6 Profundidad de Enterramiento**

En países de clima con estaciones invernales de frío permanente, la Red de Puesta a Tierra debe ser instalada por debajo de la línea de congelamiento del suelo, [11] dado que el hielo o el suelo húmedo congelado presentan una alta Resistividad que ocasionaría el incremento desmedido de la Resistencia de Dispersión y limitaría la circulación de las Corrientes de Falla creando potenciales peligrosos en la superficie del suelo.

La profundidad de enterramiento (h) considerada normal para estos casos se encuentra entre 0.8 m y 1.2 m, incrementándose a medida que hay proximidad con los círculos polares de la Tierra; no obstante, para temperaturas por encima de 4°C, el comportamiento de la Resistividad está totalmente supeditado al contenido de humedad y a la temperatura del Suelo.

En zonas geográficas de clima templado como es el caso del Perú, la temperatura media del suelo a 0.5 m de profundidad varía desde 13 °C (a gran altitud) hasta 30 °C (en la Costa), no llegando a temperaturas bajo cero aún en zonas de clima nocturno gélido, lo cual permite profundidades de enterramiento (h) menores de 0.5 m.



**Figura 25.** Efecto de la Temperatura en la Resistividad del Suelo [1]

No obstante se recomienda su instalación a mayores profundidades para:

- a. Proteger el conductor de los esfuerzos mecánicos de compresión y cizallamiento debidos al paso de vehículos de transporte de carga y mantenimiento.
- b. Aprovechar los estratos profundos de menor Resistividad, más estables frente a cambios climáticos de la superficie. [11]
- c. Disminuir el Potencial Máximo de Dispersión (PMD) y los Potenciales de Toque y de Paso de la Red, que tienden a decrecer con la profundidad. [23]

La profundidad máxima de enterramiento de la Red dependerá de la profundidad a la que se encuentre del estrato de menor Resistividad, del control de las Tensiones de



Toque y Paso en la periferia de la Red, del control del deslizamiento de taludes durante la excavación y del costo de las obras civiles de remoción de tierra.

#### **5.4.7 Resistencia de Dispersión preliminar**

Se realiza utilizando la ecuación de Sverak en la Etapa Inicial de cálculo de las Corrientes de Falla para obtener un valor aproximado del Potencial Máximo de Dispersión (PMD).

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (\Omega)$$

Donde:

- $\rho$  : Resistividad del Suelo a la profundidad de instalación de la Red ( $\Omega.m$ )
- $A$  : Área Total de la Red ( $m^2$ )
- $L_T$  : Longitud Total de conductor enterrado (m)
- $H$  : Profundidad de enterramiento de la Red (m)

#### **5.4.8 Corriente a ser Dispersada por la Red**

Para el cálculo de la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) debe definirse lo siguiente:

##### **a. Corriente de Falla a Tierra**

Proviene del estudio de la coordinación de la Protección y generalmente se calcula mediante el uso de software de sistemas de potencia [25].

Generalmente la Corriente de Falla Monofásica a Tierra es la que tiene tanto mayor valor como probabilidad de ocurrencia (**Tabla 7**), considerando

asimismo que el suelo no interviene en la dispersión de Corriente durante Fallas de 2 y 3 Fases a Tierra.

**Tabla 7.** Porcentaje típico de Ocurrencia de Fallas en Líneas de Transmisión [28]

Tipo de Cortocircuito	Ocurrencias (%)	Trayectoria
3f	06	Conductores
2f	15	Conductores
2f – Tierra	16	Puesta a Tierra
1f – Tierra	63	Puesta a Tierra

A falta de datos o para un cálculo estimativo se utiliza entonces la Corriente de Falla Monofásica a Tierra o bien el máximo valor simétrico eficaz ( $I''$ ) en el instante inicial ( $I_f = 3I_0$ ). Dicha corriente se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_0 = \frac{E}{3R_F + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} ; I'' = \frac{E}{X''_1 + X_2 + X_0} ;$$

$$X/R = \frac{(X_1 + X_2 + X_0)}{(R_1 + R_2 + R_0)}$$

Donde:

$I_0$  : Componente de Secuencia Cero de la Corriente de Falla a Tierra (A)

E : Tensión Fase-Neutro, (V)

Según Estándar IEC: Tensión pre-falla = 1,1 E

$R_F$  : Resistencia de Falla (Según Estándar IEEE 80:  $R_F = 0$ ), ( $\Omega$ )

$R_1, R_2, R_0$  : Resistencias de Secuencia positiva, negativa y cero ( $\Omega$ )

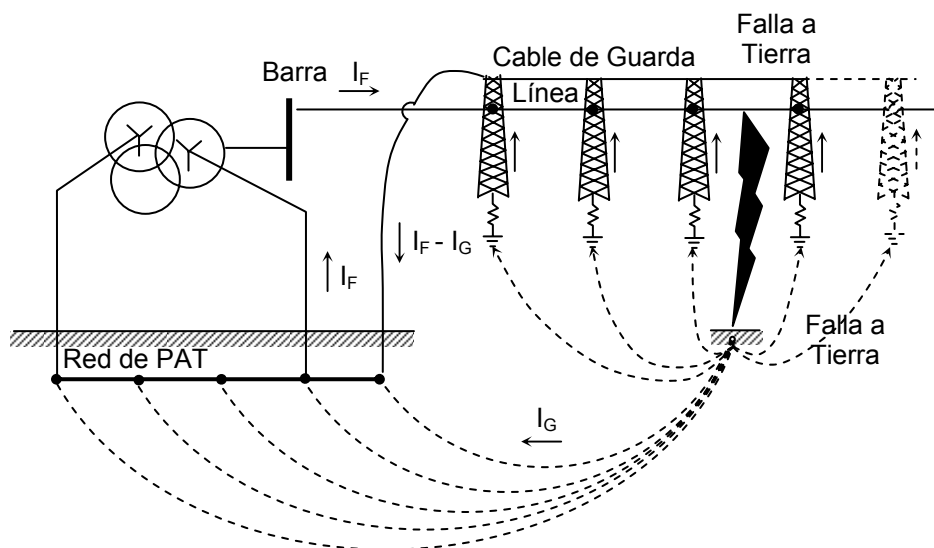
$X_1, X_2, X_0$  : Reactancias de Secuencia positiva, negativa y cero ( $\Omega$ )

$X''_1 = X_1$  : Reactancia Subtransitoria ( $\Omega$ )

$X / R$  : Razón de la reactancia inductiva a la resistencia del sistema (p.u.)

#### b. Factor de División de la Corriente de Falla a Tierra

Durante la dispersión de una corriente a través de la Red, los Cables de Guarda, Neutros corridos o Puestas a Tierra periféricas conectados a la Red participan proporcionando un camino de retorno alternativo de baja impedancia.



**Figura 26.** División de la Corriente de Falla a través del Cable de Guarda o Neutro corrido

Los cálculos del Potencial Máximo de Dispersión (PMD) y de los Potenciales de Toque y Paso excluyen toda porción de corriente que no fluya entre la Red de Puesta a Tierra y el suelo considerando un Factor de División de Corriente ( $F_d$ ), el cual puede ser calculado tanto por métodos numéricos como gráficos. [29]

El método gráfico, recomendado por el Estándar IEEE 80-2000 por su simplicidad y buena aproximación para el cálculo de la Corriente Simétrica que

circula por la Red de PAT ( $I_g$ ), requiere como datos el número de líneas y alimentadores con Cable de Guarda o Neutros corridos, el porcentaje de contribución local y remota de la Corriente de Falla y la Resistencia de Dispersión objetivo de la Red de Puesta a Tierra.

$$I_g = F_d I_f \quad (A)$$

Donde:

$I_g$  : Corriente Simétrica que circula por la Red de Puesta a Tierra (A)

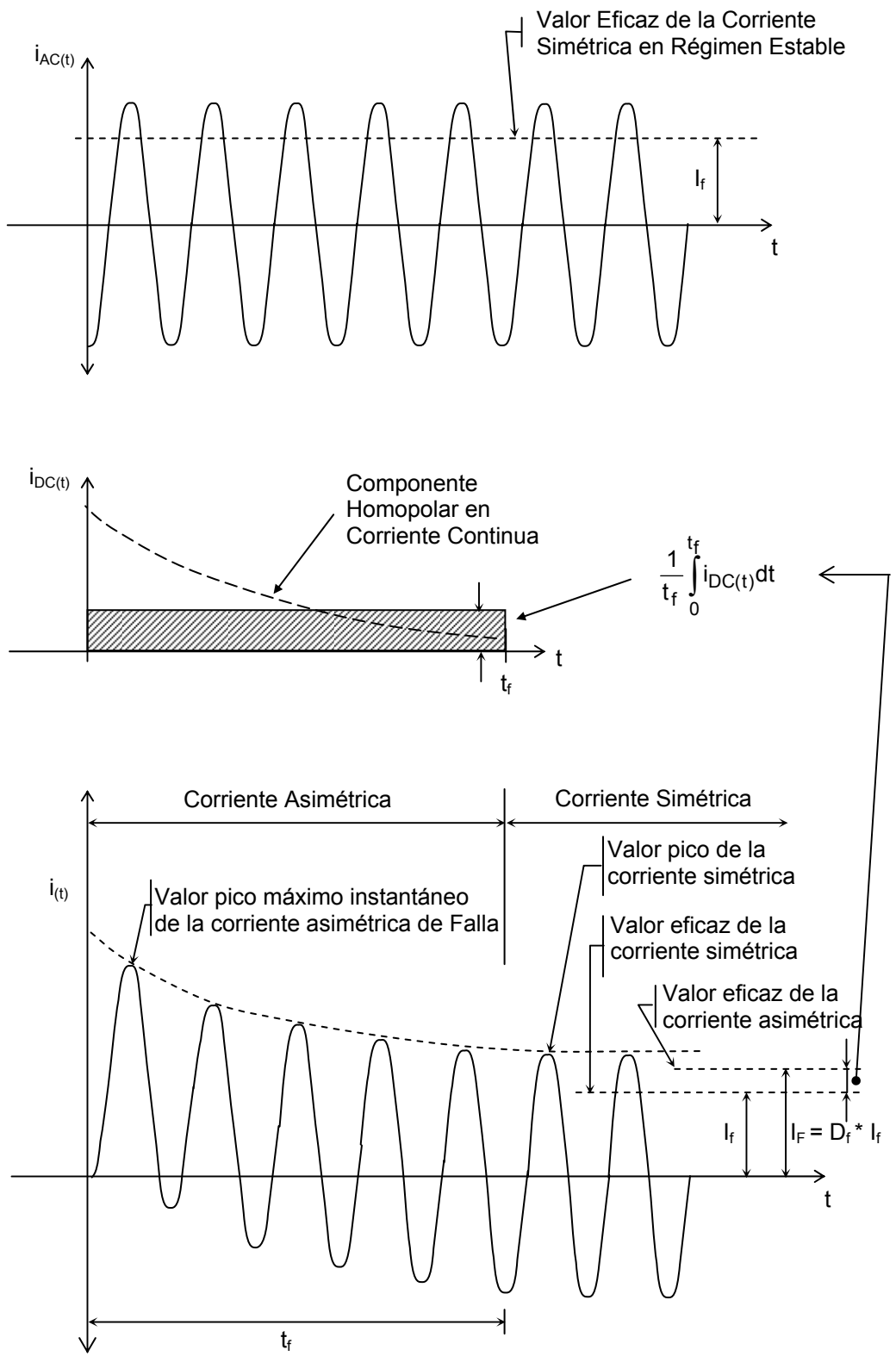
$F_d$  : Factor de División de Corriente (0.1 – 0.64), (p.u.)

$I_f$  : Corriente Simétrica de Falla a Tierra ( $I_f = 3 I_0$ ), (A)

**c. Factor de Decremento de la Corriente de Falla a Tierra**

Toda Corriente de Falla a Tierra es de naturaleza asimétrica y está formada por componentes Subtransitoria, Transitoria y Estable en Corriente Alterna así como por una componente Homopolar en Corriente Continua; tanto las componentes Subtransitoria y Transitoria como la componente Homopolar decaen exponencialmente en el tiempo con una tasa de atenuación diferente.

No obstante, para simplificar los cálculos, el Estándar IEEE 80-2000 considera que el valor inicial de la componente en Corriente Alterna permanece constante y no decae en el tiempo; asimismo, un valor constante equivalente es considerado para incluir la componente Homopolar de Corriente Continua.



**Figura 27.** Relación entre el valor eficaz de la Corriente de Falla y valores de  $I_F$ ,  $I_f$  y  $D_f$  para tiempos de duración  $t_f$  [1]

Para hallar el valor de la Corriente Asimétrica de Falla a Tierra ( $I_F$ ) en función del valor de la Corriente Simétrica de Falla a Tierra ( $I_f$ ) se utiliza el Factor de Decremento ( $D_f$ ) el cual compensa la Componente Homopolar decreciente en Corriente Continua.

$$I_F = D_f I_f \quad (A)$$

Donde:

$I_F$  : Corriente Asimétrica de Falla a Tierra (A)

$D_f$ : Factor de Decremento (p.u.)

$I_f$  : Corriente Simétrica de Falla a Tierra (A)

El Factor de Decremento ( $D_f$ ) es dado por:

$$D_f = \sqrt{\frac{1}{t_s} \left[ t_s + \frac{1}{\omega R} \left( 1 - e^{-\frac{2\omega t_s}{X/R}} \right) \right]} \quad (p.u.)$$

Donde:

$t_s$  : Tiempo de Aclaramiento de Falla previsto (s)

$\omega$  : Frecuencia Angular del Sistema (rad/s)

$X/R$ : Razón de la Reactancia Inductiva a la Resistencia del Sistema (p.u.)

Asimismo, existen tablas con valores tabulados de  $D_f$  para diferentes  $X/R$ .

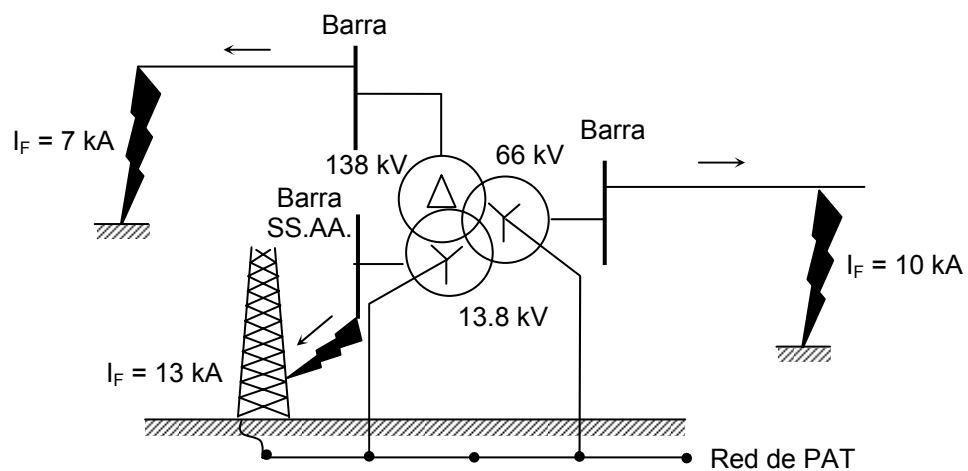
**(Tabla 8)**

**Tabla 8.** Valores típicos de  $D_f$

Tiempo de aclaramiento, $t_s$		Factor de Decremento, $D_f$			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0.008	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

**d. Determinación de la Corriente más Desfavorable de Falla a Tierra**

Cada nivel de Tensión de Transformación tiene un valor diferente de Corriente de Falla que depende de su Potencia de Cortocircuito.



**Figura 28.** Corrientes de Falla según Nivel de Tensión del Transformador

Para el cálculo de la Red de Puesta a Tierra se elegirá la Corriente que produzca el mayor Potencial Máximo de Dispersión (PMD) y Potenciales de Toque y Paso en la Subestación en función de su magnitud, del Tipo de Falla (interior o exterior), Probabilidad de ocurrencia, longitud y recorrido de las

Líneas de Transmisión y Distribución, Tipo de Conexión a Tierra del Transformador y del Tiempo de Aclaramiento de Falla previsto

**e. Previsión del Desarrollo Futuro del Sistema**

La potencia de salida entregada por la Subestación se incrementa en el tiempo al expandirse y modernizarse el sistema eléctrico en función del crecimiento de la demanda, aumentando paralelamente el valor de la Corriente de Falla ( $I_f$ ).

Para el diseño de la Red se tomará entonces el valor de la Corriente de Falla a Tierra más desfavorable proyectada a futuro para la Subestación.

Finalmente, la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) será igual a la Máxima Corriente de Falla que dispersará la Red hacia el Suelo, y se calculará según:

$$I_G = D_f I_g = D_f (F_d I_f)$$

Donde:

$I_g$  : Corriente Simétrica que circula por la Red de Puesta a Tierra (A)

$I_f$  : Corriente Simétrica de Falla a Tierra (A)

$F_d$  : Factor de División de Corriente (p.u.)

$D_f$  : Factor de Decremento (p.u.)

**5.4.9 Dimensionamiento del Conductor**

La dispersión en el suelo de elevadas corrientes (kA) durante intervalos muy cortos de tiempo (ms), puede ocasionar la fusión de las uniones entre electrodos con su consiguiente separación, la vitrificación del lecho de suelo que rodea al electrodo enterrado y el aumento de la Resistencia de Dispersión de la Red de Puesta a Tierra.



La Sección mínima de Conductor (S) que limite el sobrecalentamiento de la Red de Puesta a Tierra se calcula para el metal seleccionado en el armado de la Red, mediante la expresión de Sverak.

$$S = \frac{I}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_{max} \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (\text{mm}^2)$$

Donde:

- I : Corriente en valor eficaz (kA)
- TCAP : Capacidad térmica por unidad de volumen (J/cm<sup>3</sup> °C)
- $\rho_r$  : Resistividad del conductor a la Temperatura de Referencia  $T_r$  (mΩ-cm)
- $t_{max}$  : Tiempo máximo de Aclaramiento de Falla (s)
- $K_0$  :  $1 / a_0$  o  $(1 / a_r) - T_r$
- $a_0$  : Coeficiente térmico de la Resistividad a 0°C (1/°C)
- $a_r$  : Coeficiente térmico de la Resistividad a la Temperatura de Referencia
- $T_r$  : Temperatura de Referencia para las constantes de los metales (°C)
- $T_a$  : Temperatura del Suelo a la profundidad de enterramiento de la Red (°C)
- $T_m$  : Temperatura máxima permisible del conductor (°C), dependerá del tipo de junta o unión entre electrodos:
  - $T_m = 250$  °C, para uniones con conectores a presión.
  - $T_m = 450$  °C, para uniones hechas con soldadura de latón.
  - $T_m = 850$  °C, para uniones hechas con soldadura exotérmica.

Las Redes de Puesta a Tierra se diseñan generalmente de cobre debido a que presenta una excelente conductividad, fácil soldabilidad y buen desempeño frente a la

corrosión; no obstante, el Estándar IEEE 80-2000 permite el diseño utilizando otros metales (**Tabla 9**).

A pesar que lo más conveniente sería el uso de pletinas para el diseño de la Red, en nuestro medio generalmente se utiliza conductores torzalados debido a que no hay variedad de éstas en el mercado.

Asimismo, para prever una mayor resistencia mecánica del conductor a sismos, esfuerzos electrodinámicos y tráfico de superficie, generalmente se multiplica la sección calculada por un Factor de Seguridad del 100 % al 150 %, recomendándose la elección de una sección no menor a 2/0 AWG (70 mm<sup>2</sup>).

De manera complementaria al Estándar IEEE 80-2000 se recomienda el cálculo de la Sección mínima de Conductor de cobre recocido de las mechas de salida ( $S_{\text{salidas}}$ ) de la Red de Puesta a Tierra a los equipos energizados mediante la expresión:

$$S_{\text{Salidas}} = \frac{I * \sqrt{t_{\text{max}}}}{0.14356} \text{ (mm}^2\text{)}$$

Las salidas de la Red de Puesta a Tierra a masas desenergizadas (cerco de púas, techos de canaleta metálica, etc.) emplean menores secciones de conductor, siendo aun menores para otras masas inertes (puerta de ingreso a la Instalación).

**Tabla 9.** Constantes de Diseño para diferentes Metales [1]

Material	Conductividad (%)	$a_r$ , factor a 20°C	$K_0$ a 0°C (°C)	Temp. fusión $T_f$ (°C)	$\rho_r$ a 20°C (mΩ-cm)	TCAP (J/cm <sup>3</sup> °C)
Cobre recocido, (soft-drawn)	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre comercial (hard-drawn)	97	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Cable Acero recub. Cobre	40	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Cable Acero recub. Cobre <sup>a</sup>	30	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Varillas Acero recub. Cobre <sup>b</sup>	20	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminio grado EC	61	0.00403	228	657	2.86	2.56
Aluminio Aleación 5005	53.5	0.00353	263	652	3.22	2.60
Aluminio Aleación 6201	52.5	0.00347	268	654	3.28	2.60
Cable Acero recub. Aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.58
Acero SAE 1020	10.8	0.00160	605	1510	15.90	3.28
Varillas acero recub. Inox <sup>c</sup>	9.8	0.00160	605	1400	17.5	4.44
Varillas acero zincadas	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.93
Acero inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.03

<sup>a</sup> Según estándares de la ASTM

<sup>b</sup> Varillas de Acero recubiertas de un espesor de 0.254 mm de Cobre

<sup>c</sup> Varillas de Acero SAE N° 1020 recubiertas de un espesor de 0.508 mm de Acero Inoxidable

#### 5.4.10 Potencial Máximo de Dispersión

Se determina calculando el Potencial ( $V_{PMD}$ ) que produce la Corriente de Diseño de la Red de PAT ( $I_G$ ) al circular a través de la Resistencia de Dispersión ( $R_g$ ).

$$V_{PMD} = I_G R_g \quad (V)$$

Se recomienda que el Potencial Máximo de Dispersión (PMD) durante la circulación de una Corriente de Falla no exceda los 5000 Voltios [2], pudiendo justificarse entonces Resistencias de Dispersión superiores a 1 Ohm para Corrientes ( $I_G$ ) menores que 5 kA.

#### 5.4.11 Número equivalente de hileras y separación

Para calcular Redes tanto de forma regular como irregular, se utiliza un número equivalente de hileras de conductor paralelas en una dirección ( $n$ ), el cual es dado en función de las características de la configuración inicial definida para el armado de la futura Red:

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (\text{p.u.})$$

Donde:

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (n_b = 1 \text{ para Redes Cuadradas})$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x L_y}{A} \right]^{0.7A} \quad (n_c = 1 \text{ para Redes Cuadradas y Rectangulares})$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (n_d = 1 \text{ para Redes Cuadradas, Rectangulares y en Forma de L})$$

$L_C$  : Longitud Total de Conductor en la Red Horizontal (m)

$L_p$  : Longitud Perimétrica de la Red (m)

$L_x$  : Longitud máxima de conductores en la dirección del eje x (m)

$L_y$  : Longitud máxima de conductores en la dirección del eje y (m)

$D_m$  : Diagonal máxima de la Red (m)

$A$  : Área Total de la Red ( $m^2$ )

Entonces, para un número equivalente de hileras ( $n$ ) determinado, la separación entre hileras de conductor horizontal ( $D$ ) será:

$$D = \frac{\sqrt{A}}{n-1} \quad (\text{m})$$

Deberá verificarse que la separación entre hileras ( $D$ ) calculada cumpla con:

- a. No ser menor que la mínima distancia requerida por la maquinaria pesada para el tránsito y excavación en la obra sin ocasionar taludes en las zanjas ya excavadas; distancias pequeñas restringen la profundidad de enterramiento de la Red.
- b. No ser mayor que la máxima distancia que permita el control de los Potenciales de Toque y Paso; distancias grandes permiten mayores profundidades de enterramiento de la Red.

Si la separación entre hileras (D) requerida para el control de los Potenciales de Toque y Paso es demasiado pequeña y conlleva a costos de obra muy elevados, se procede a la revisión y optimización el diseño.

#### **5.4.12 Potenciales de Toque y Paso propios de la Red**

Se originan cuando circula una Corriente de Falla entre la Red de Puesta a Tierra y el Suelo; se calcula de la siguiente forma:

a. Potencial de Toque de la Red

$$E_m = \frac{\rho_l I_G K_m K_i}{L_M} \quad (V)$$

Donde:

$K_m$  : Coeficiente de Espaciamiento para Voltajes de Toque

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (p.u.)$$

D : Separación entre hileras (m)

d : Diámetro del Conductor de la Red (m)

h : Profundidad de Enterramiento de la Red (m)

n : Número equivalente de hileras (p.u.)

$K_{ii}$  : Coeficiente de Instalación de Electrodo Verticales

- Para Redes con pocos o ningún electrodo vertical

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (p.u.)$$

- Para Redes con Electrodo esquineros, perimétricos o en toda la Red

$$K_{ij} = 1 \quad (\text{p.u.})$$

$K_h$  : Coeficiente de profundidad de la Red

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad h_0 = 1\text{m (profundidad de referencia de la Red)}$$

$K_i$  : Coeficiente de Irregularidad ( $K_i$ )

Considera el flujo de Corriente no uniforme de partes diversas de la Red.

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (\text{p.u.})$$

$L_M$  : Longitud efectiva de conductor para Voltajes de Toque

- Para Redes con pocos o ningún electrodo vertical

$$L_M = L_C + L_R \quad (\text{m})$$

- Para Redes con Electrodo esquineros, perimétricos o en toda la Red

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (\text{m})$$

Donde:

- $L_C$  : Longitud Total de Conductor en la Red Horizontal (m)
- $L_R$  : Longitud Total de todos los electrodos verticales (m)
- $L_r$  : Longitud de cada Electrodo Vertical (m)
- $L_x$  : Largo máximo de la Red (m)
- $L_y$  : Ancho máximo de la Red (m)

b. Potencial de Paso de la Red

$$E_S = \frac{\rho I_G K_S K_i}{0.75L_C + 0.85L_R} \quad (V)$$

Donde:

- $K_S$  : Coeficiente de Espaciamiento para Voltajes de Paso

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (p.u.)$$

c. Potenciales Transferidos y de Paso al exterior de la Red

De manera complementaria al Estándar IEEE 80–2000 [30], se pueden calcular en función del Potencial del Suelo ( $V_x$ ) según:

$$V_x = \frac{2 \cdot V_{PMD}}{\pi} \arcsen \left( \frac{r}{r+x} \right) \quad (V)$$



Donde:

x : Distancia desde el borde de la Red (m)

r : Radio del Área circular equivalente de la Red (m)

Cabe resaltar que en ninguno de los cálculos se considera la longitud de los conductores de bajada para la conexión de los equipos debido a que no contribuyen al mejoramiento del desempeño de la Red de Puesta a Tierra por no constituir formas de conductor cerradas en forma mallada.

#### **5.4.13 Instalación de Electrodo Verticales**

Utilizados por su capacidad de dispersar densidades de corriente cercanas al doble de los electrodos horizontales [27], son de particular interés cuando los estratos subyacentes son de menor Resistividad que el estrato de instalación de la Red o cuando dicho estrato pueda incrementar su Resistividad debido a condiciones estacionales.

Se recomienda instalar Electrodo Verticales de cobre de Longitud estándar de 2,45 m; no obstante, para alcanzar estratos subyacentes de menor Resistividad pueden instalarse electrodos de mayores longitudes por clavado automatizado o mas profundamente con perforaciones rotatorias. Generalmente se prefiere ubicarlos en:

- a. En la periferia y/o las esquinas de la Red para controlar mejor los Potenciales de Toque y Paso.
- b. En la intersección de hileras donde se conecten desde las bases de los equipos las bajadas a Tierra de interruptores, neutros de transformadores, apartarayos, etc.

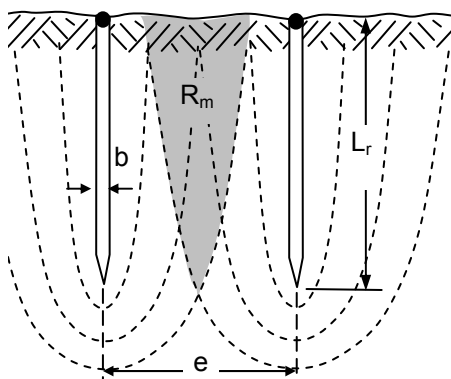
- c. En la parte del área donde la Resistividad del estrato subyacente es más baja o menor.
- d. En puntos simétricos de la Red, cuando su uso se destina a reducir la Resistencia de Dispersión.

Para disminuir la Resistencia mutua entre electrodos ( $R_m$ ) e incrementar su eficiencia, se recomienda instalarlos intercalados a una distancia ( $e$ ) que depende de [4]:

$$e \geq 2L_r + b \quad (\text{m})$$

Donde:

- $e$  : Distancia mínima de separación entre Electrodo Verticales
- $L_r$  : Longitud de los electrodos verticales (m)
- $b$  : Diámetro de los electrodos verticales (m)



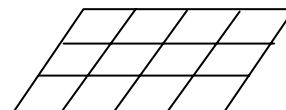
**Figura 29.** Resistencia Mutua entre Electrodo Verticales

#### **5.4.14 Resistencia de Dispersión objetivo**

Para determinar la Resistencia de Dispersión de la Red, se emplean las ecuaciones de Schwarz:

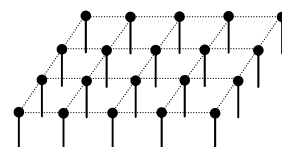
Resistencia del Reticulado:

$$R_{11} = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \text{Ln} \left( \frac{2L_C}{\sqrt{hd}} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (\Omega)$$



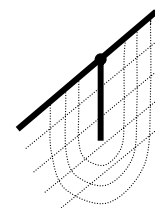
Resistencia de la Cama de Electrodo Verticales:

$$R_{22} = \frac{\rho_{EQ}}{2\pi N L_r} \left[ \text{Ln} \left( \frac{8L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{N} - 1)^2 \right] \quad (\Omega)$$



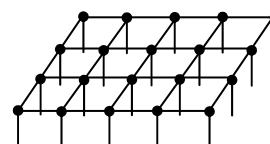
Resistencia Mutua entre Red – Cama de Jabalinas:

$$R_{12} = R_{21} = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[ \text{Ln} \left( \frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (\Omega)$$



Resistencia Total del Sistema de Aterramientos:

$$R_T = \frac{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}} \quad (\Omega)$$

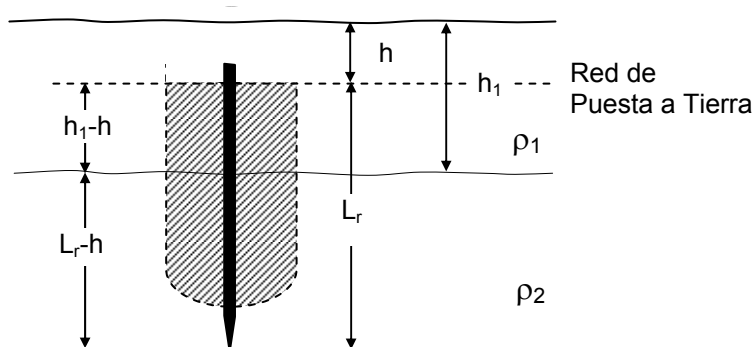


Donde:

- h : Profundidad de Enterramiento de la Red (m)
- $L_C$  : Longitud Total de Conductor de la Red Horizontal (m)
- d : Diámetro del Conductor de la Red Horizontal (m)
- $L_r$  : Longitud de los Electrodo Verticales (m)
- b : Diámetro de los Electrodo Verticales (m)
- A : Área Total de la Red (m<sup>2</sup>)
- N : Número Total de Electrodo Verticales (p.u.)

$\rho_{eq}$  : Resistividad equivalente del suelo ( $\Omega\cdot m$ )

$$\rho_{eq} = \frac{L_r \rho_1 \rho_2}{\rho_2 (h_1 - h) + \rho_1 (L_r + h - h_1)} \quad (\Omega\cdot m)$$



**Figura 30.** Cálculo de la Resistividad Equivalente en Electrodo Verticales de la Red de Puesta a Tierra

$K_1$  y  $K_2$ : Coeficientes de forma; determinados gráficamente o analíticamente [1], [27]:

$$K_1 = 1.43 - \frac{2.3h}{\sqrt{A}} - 0.044 \frac{L_x}{L_y} \quad (\text{p.u.})$$

$$K_2 = 5.50 - \frac{8h}{\sqrt{A}} - \left(0.15 - \frac{h}{\sqrt{A}}\right) \frac{L_x}{L_y} \quad (\text{p.u.})$$

$K_1 = 1.4$  ,  $K_2 = 5.6$  , para un área cuadrada

#### 5.4.15 Verificación de la confiabilidad del diseño

Consiste en verificar que los Potenciales de Toque y Paso propios de la Red proyectada no sean peligrosos, especialmente en la periferia y/o las esquinas de la

Red donde tienden a ser mayores, y que la Resistencia de Dispersión calculada se encuentre por debajo del límite establecido.

Los Potenciales de Toque y Paso de la Red se verifican en función del peso corporal de las personas que se requiere proteger, según los siguientes criterios:

Para personas de 50 kg:

$$E_m \leq E_{\text{TOQUE } 50\text{kg}}$$

$$E_S \leq E_{\text{PASO } 50\text{kg}}$$

Para personas de 70 kg:

$$E_m \leq E_{\text{TOQUE } 70\text{kg}}$$

$$E_S \leq E_{\text{PASO } 70\text{kg}}$$

Donde:

$E_m$  : Potencial de Toque de la Red (V)

$E_S$  : Potencial de Paso de la Red (V)

$E_{\text{TOQUE } 50 \text{ y } 70 \text{ kg}}$ : Potencial de Toque Admisible para personas de 50 y 70 kg (V)

$E_{\text{PASO } 50 \text{ y } 70 \text{ kg}}$ : Potencial de Paso Admisible para personas de 50 y 70 kg (V)

Generalmente, una vez que se ha verificado que los Potenciales de Toque estén por debajo del límite admisible por el Cuerpo Humano, los Potenciales de Paso también lo estarán, salvo que no se prevea el uso de grava, piedra picada o losa de concreto en las partes transitables, especialmente en Suelos de Baja Resistividad.

Los Potenciales de Paso admisibles al exterior de la Subestación se calcularán considerando el uso o no de una capa de recubrimiento superficial en el Suelo de la periferia exterior.

De no llegar el diseño a alcanzar Potenciales de Toque y Paso seguros o la Resistencia de Dispersión objetivo, se procederá a la revisión y optimización el diseño.

#### **5.4.16 Revisión y Optimización del Diseño**

Muchas veces durante el cálculo de la Red de Puesta a Tierra, especialmente en Suelos de alta Resistividad, no es posible llegar a obtener ni los Potenciales de Toque y Paso ni la Resistencia de Dispersión objetivo del diseño.

En tales casos, el ingeniero podrá aplicar los siguientes recursos:

- a. Para disminuir ó controlar los Potenciales de Toque y Paso.
  - Incrementando la Longitud de Conductor enterrado para obtener mallas más pequeñas.
  - Aumentando el espesor y/o composición del recubrimiento de grava.
  - Aumentar la Profundidad de enterramiento de la Red de Puesta a Tierra.
  - Conectando Neutros y Cables de Guarda adicionales a la Red.
  - Disminuyendo la Resistencia de Dispersión de los soportes de las Líneas Eléctricas con Cable de Guarda cercanas a la instalación.
  - Limitando la Corriente de Falla mediante la conexión de una impedancia en serie entre el neutro del Transformador y la Red, mientras esto no incremente el Tiempo de Aclaramiento de Falla
  - Restringiendo el acceso del personal a ciertas áreas para disminuir la probabilidad de peligro.

- b. Para disminuir la Resistencia de Dispersión.
- Incrementando la Longitud de Conductor enterrado.
  - Instalando electrodos verticales clavados o en pozos perimétricos o satélites.
- c. Para disminuir tanto los Potenciales de Toque y Paso como la Resistencia de Dispersión.
- Instalando electrodos verticales especialmente perimétricos.
  - Incrementando la Profundidad de instalación de la Red en la periferia.
  - Ampliando los linderos en la periferia para adicionar mas conductor horizontal a la Red de Puesta a Tierra.

Si aplicando las recomendaciones dadas líneas arriba no se alcanzan los Potenciales de Toque y Paso o la Resistencia de Dispersión requeridos, será necesario analizar y evaluar una forma efectiva de incrementar la Capacidad de Dispersión de la Red de Puesta a Tierra.

### **5.5 Adecuación del Diseño a Suelos de Alta Resistividad**

En el Perú, la mayor parte de suelos son altamente resistivos ( $> 300 \Omega.m$ ) por su elevado contenido de óxidos de Silicio y de Aluminio (70 - 80%), su baja salinidad media (0,1–2,0 %), bajo nivel de humedad en zonas secas ( $< 1\%$ ) y aún menor en zonas sin recarga de humedad ( $< 0.1\%$ ) [4].

Muchas veces no es posible alcanzar ni la Resistencia de Dispersión ni los Voltajes de Toque requeridos en Subestación con Áreas de Cobertura usuales (2000 - 10000 m<sup>2</sup>) dado que todo cálculo hecho con cualquier método de diseño existente tiene como límite de eficacia la Resistividad del Suelo.

Es necesario entonces analizar el fenómeno de la Dispersión de Corriente en el Suelo a través de una Puesta a Tierra para evaluar una manera efectiva de incrementar la Capacidad de Dispersión de la Red.

### **5.5.1 Naturaleza de la Resistencia de Dispersión**

La Resistencia de Dispersión se divide básicamente en tres partes:

a. La Resistencia metálica del electrodo

Es la resistencia óhmica del electrodo metálico enterrado; depende de su geometría y del metal del cual esté conformado. Generalmente es de magnitud despreciable.

b. La Resistencia de Contacto Electrodo-Suelo

Es la resistencia debida al cambio de un medio a otro en el trayecto de la corriente dispersada. En electrodos libres de recubrimientos superficiales (pintura, grasa, etc.) su valor es despreciable.

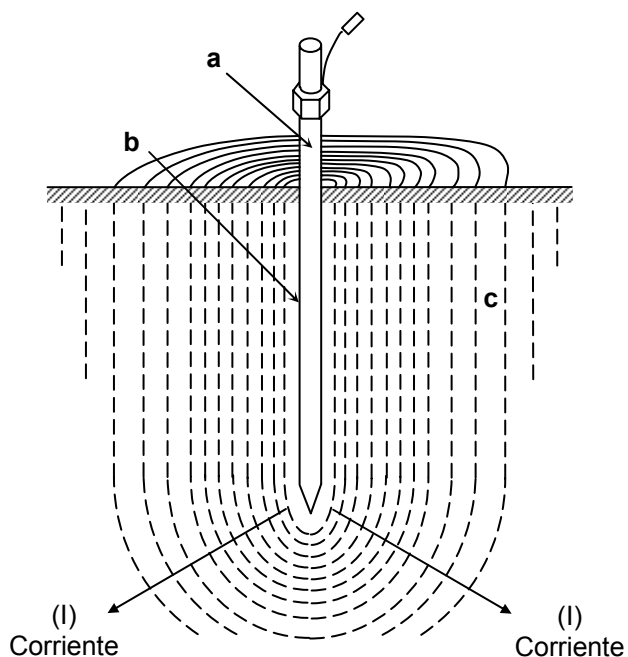
c. La Resistencia del Suelo natural circundante

Es la suma de las resistencias en serie de las capas cilíndricas de tierra localizadas radialmente hacia fuera del electrodo; las capas más próximas al electrodo son las que presentan mayor Resistencia a la Dispersión de Corriente, mientras que las más alejadas presentan Resistencias decrecientes cercanas a cero debido a su mayor superficie.

Es así que en un electrodo vertical de 3 m de largo y 16 mm de diámetro, prácticamente el 70% de su Resistencia de Dispersión está contenida en un radio de 0.30 m. [11]



El mayor porcentaje de la Resistencia de Dispersión, independientemente de la Resistividad del Suelo, se encuentra entonces en el volumen de Suelo que rodea al electrodo de Puesta a Tierra.

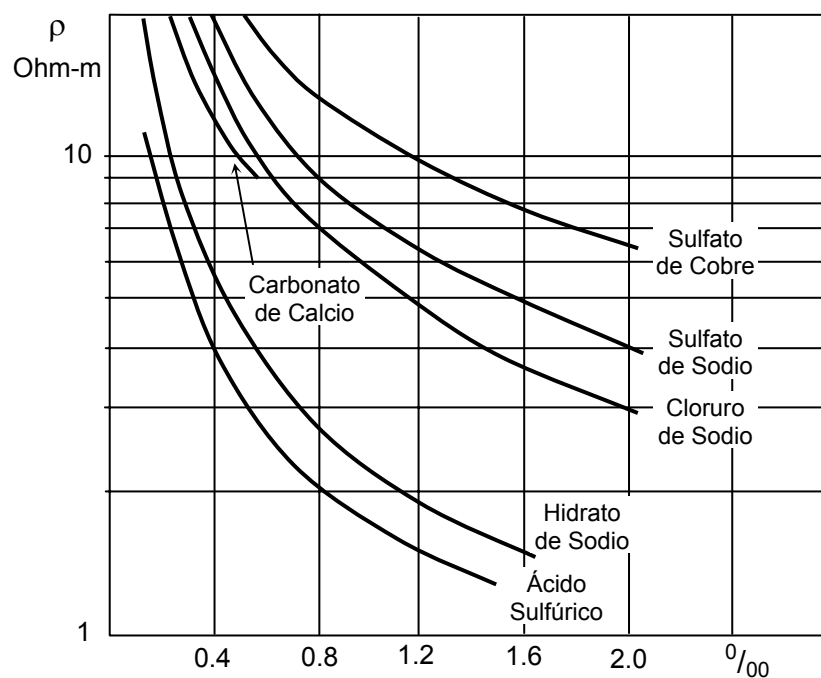


**Figura 31.** Componentes de la Resistencia en Electrodo de Puesta a Tierra

La aplicación de un relleno neutro de mayor conductividad en torno al electrodo de la Red de Puesta a Tierra será entonces la manera más efectiva de incrementar su Capacidad de Dispersión [1], [2], [11], [31]

### **5.5.2 Métodos de Tratamiento del Suelo**

Actualmente, existen a la venta rellenos conductivos en forma de gelatinas, agregados químicos solubles, fraguables y residuos de procesamiento de minerales que sirven para disminuir la Resistencia de Dispersión en Puestas a Tierra; no obstante, el valor de la Resistencia de Dispersión logrado inicialmente con el uso de estos productos puede llegar a duplicarse en tiempos inferiores a cuatro años.



**Figura 32.** Efecto de la Salinidad en la Resistividad del Suelo [3]

Un procedimiento alternativo y durable de tratamiento natural del suelo que permitirá incrementar considerablemente la Capacidad de Dispersión [32] de la Red de Puesta a Tierra consiste en:

- a. Utilizar Bentonita, tierra aglutinante y estable que al ser adecuadamente mezclada con la Tierra del sitio ( $50 \text{ kg/m}^3$ ) configura un relleno neutro no corrosivo de baja Resistividad ( $2,5 \Omega\text{-m}$  a 300% de humedad) y naturaleza higroscópica que le permite absorber la humedad del medio que la rodea. [4]
- b. Utilizar una solución de Cloruro de Sodio ( $\text{NaCl}$ ) u otras sales minerales naturales inocuas, dado que incrementan la conductividad eléctrica en los suelos. [1], [2].

No se recomienda el uso de rellenos orgánicos tales como la tierra de cultivo por no tener estabilidad física y derivar generalmente en tiempos menores a 2 años en un incremento de la Resistencia de Dispersión, además de ser altamente corrosivos para todos los metales, especialmente para el cobre

#### **5.6 Acabados de Instalaciones de la Red de Puesta a Tierra**

Una vez finalizado el cálculo, se procede a elaborar el Diseño de Detalle de la Red de Puesta a Tierra, para lo cual se implementan, entre otros, los siguientes acabados:

- Se conectarán a la Red todas las masas metálicas de equipos eléctricos, cercos, estructuras, bandejas, canaletas, ductos y tuberías, así como cualquier otro elemento metálico presente en la Subestación, como techos de calamina, alambrados perimétricos, puertas metálicas, etc.
- Se implementará una barra equipotencial conectada a Tierra para los equipos electrónicos del Sistema de Control en Baja Tensión, tanto de Corriente Alterna como de Corriente Continua, para evitar fallas inversas al dispersar la Red Sobrecorrientes Impulsionales de Rayo de Alta Frecuencia.
- Se recomienda que la cobertura de la Red de Puesta a Tierra incluya el cerco perimétrico, o que esté lo más cerca posible del mismo para evitar Potenciales de Toque peligrosos en el exterior.
- Se colocarán las cajas de registro en puntos desde donde se prevea conectar el circuito de medidas de la Resistencia de Dispersión y Potenciales de Toque y Paso, así como en puntos de futura conexión con Puestas a Tierra de las estructuras de llegada o de salida, con otras Redes de Puesta a Tierra vecinas o para ampliación futura de la misma.

- El apantallamiento de los cables de control de equipos electrónicos deberá estar conectado a tierra en ambos extremos, y de ser posible también en tramos intermedios del recorrido. [1]
- Alrededor de equipos voluminosos como el Transformador de Potencia, para evitar que se produzcan Potenciales de Toque más elevados que los calculados, se colocarán las denominadas "Grounding Mats".
- Se recomienda instalar tres electrodos verticales de Puesta a Tierra por cada Nivel de Tensión del Transformador con Neutro a Tierra para la conexión de los apartarrayos de cada fase y dispersar Sobretensiones de Rayo o Maniobra, pudiendo obviárselos sólo cuando las fases tienen ductos de apantallamiento y la utilización del nivel de tensión esté restringida a los servicios de la Subestación.
- Se redondean las esquinas de la Red de Puesta a Tierra para evitar la aparición de "puntos calientes" debido a la elevada corriente a ser dispersada al suelo.
- La longitud de las hileras del conductor de la Red de Puesta a Tierra debe ser incrementada aproximadamente en un 5 % para darle la flexibilidad necesaria toda vez que incidan esfuerzos mecánicos grandes como sismos, presiones externas, esfuerzos electrodinámicos.

## 5.7 **Planos y Detalles de Instalación**

Una vez finalizado el Diseño de Detalle de la Red de Puesta a Tierra, se procede a la elaboración de los Planos y Detalles de Instalación de la Red de Puesta a Tierra siguiendo las siguientes recomendaciones generales:

- Se dibujará primero él o los planos de diseño en vista de planta; si hubiesen etapas de instalación se procederá idénticamente para cada una de dichas etapas constructivas.
  - En instalaciones de área regular (cuadrada, rectangular y en forma de L) se dibujará el cuadrillado con la Distancia entre Hileras obtenida en los cálculos.
  - En instalaciones de área irregular (trapezoidal, triangular, etc.) debe procurarse mantener la simetría en distribución de la Red con un armado de número constante de hileras longitudinales y transversales, pudiendo dibujarse como máximo, mallas de forma cuadrangular de área y lado equivalente al de la malla cuadrada calculada.

Se incluirá en ellos la ubicación de los cabos o mechas de salida (pigtailes) para la conexión de los puntos y masas energizables, neutros de los transformadores, masas pasivas de los elementos estructurales y barras equipotenciales para la conexión de equipos complementarios de la Subestación.

- Se dibujarán vistas de corte de la instalación en su etapa final, cuando la Red no sea simétrica o cuando se utilicen diferentes profundidades de enterramiento o electrodos verticales distribuidos.

- Se dibujará un plano de detalles del recorrido del conductor indicando los principales aspectos que debe cumplir el contratista tanto para su instalación como para su correcto desempeño.
- Se dibujará un plano de detalles de instalación que incluirá cada una de las piezas de conexión a aplicarse en el armado de la Red tales como empalmes, conexiones subterráneas y aéreas, así como su forma y método de aplicación.
- Los planos deberán consignar información adicional tal como: Parámetros de Diseño, Leyenda de Símbolos, Notas de Instalación, Figuras auxiliares, Especificaciones de Instalación y membrete con los nombres o iniciales del personal técnico que lo elaboró.
- Las dimensiones de los planos obedecerán a la escala solicitada y al Estándar ISO. Su rotulación se hará en el idioma oficial; no obstante, de ser solicitado se hará en idioma extranjero.

## CAPITULO VI

### EXAMEN DE LA CORROSIVIDAD DEL SUELO

#### 6.1 Definición de la Corrosión de los metales

Todo metal es extraído de la naturaleza en forma de óxidos o compuestos termodinámicamente estables. Para su refinamiento, estos absorben y almacenan energía, alcanzando finalmente un estado de pureza termodinámicamente inestable.

La corrosión es la reacción química o electroquímica entre un metal y su entorno que produce el retorno del metal a su condición natural de óxidos metálicos, con la consiguiente liberación de la energía almacenada. [33]

La tendencia de un metal a corroerse será proporcional a la cantidad de energía utilizada durante su refinamiento. [34], [35]

#### 6.2 Costos y Pérdidas ocasionadas por la Corrosión

En nuestro país la corrosión tiene una elevada incidencia económica en diversos sectores industriales; cada año se pierden millones de dólares por no realizar diseños de ingeniería que consideren ya sea el problema de la corrosión o medios de Protección contra esta. **(Tabla 10)**

**Tabla 10.** Datos Estimados de Pérdidas por Corrosión en el Perú [36]

Industrias o Sector	Total de Pérdidas (%)	Pérdidas (Millones US\$)	Ahorro Potencial (Millones US\$)
Vivienda y Construcción	18,3	390,7	78,1
Alimentación	3	64,1	6,1
Ingeniería (General)	9	192,1	61,3
Instalaciones Marítimas	21,5	459	78
Refinamiento de metales	2,2	47	6,1
Petróleo y productos químicos	14,2	303,2	25,1
Energía	4,4	94	39,2
Transporte	25,6	546,5	153,0
Agua	1,8	38,4	6,1
Total	100%	2135	453

La corrosión de Redes de Puesta a Tierra en Subestaciones de Corriente Alterna puede ocasionar un peligroso incremento de la Resistencia de Dispersión y de los Potenciales de Toque y Paso en la instalación, originándose dos grandes tipos de pérdidas:

- Pérdidas Directas
  - Reemplazo o reparación de la Red de Puesta a Tierra o equipo dañado.
  - Programas de mantenimiento correctivo.
  
- Pérdidas Indirectas
  - Mal funcionamiento de los sistemas de protección.
  - Reemplazo o reparación de equipo electrónico dañado.



- Lucro cesante por salidas de servicio.
- Accidentes fatales.
- Multas y penalizaciones.

Es importante entonces para el ingeniero electricista poseer un buen conocimiento del tema de la corrosión en el diseño de Redes de Puesta a Tierra para poder elaborar un diseño óptimo que no requiera de costosas renovaciones o reparaciones a largo plazo

### **6.3 Clasificación de los Procesos de Corrosión**

Para su estudio, los procesos de corrosión se clasifican según el medio en el que se desarrollan o según su morfología:

#### **6.3.1 Clasificación Global**

Se utiliza para evaluar los mecanismos de ataque y causas de la corrosión. Los procesos de corrosión se clasifican en:

- a. Corrosión química: Se presenta cuando el metal reacciona con un medio no iónico. A este grupo pertenecen la corrosión seca a altas temperaturas y parte de la corrosión líquida.
- b. Corrosión electroquímica: Es la forma más común de corrosión en la naturaleza y se presenta cuando el metal reacciona con un medio iónico, generalmente un electrolito, formando una celda electroquímica. A este importante grupo pertenecen la corrosión por agua de mar, la corrosión atmosférica, la corrosión en suelos, etc.

#### **6.3.2 Clasificación Morfológica**

Se utiliza frecuentemente en ingeniería para evaluar las formas y daños producidos por la corrosión. Los procesos de corrosión se clasifican en:

- a. Corrosión Uniforme: Es la forma más lenta y benigna de corrosión. Se manifiestan zonas extensas afectadas por un ataque uniforme en la superficie del metal, siendo la penetración media casi igual en todos los puntos.
- b. Corrosión Localizada o por picado: Es la forma más peligrosa de corrosión. Se manifiestan pequeñas zonas afectadas por un ataque localizado en la superficie del metal que se propaga cada vez con mayor intensidad hacia el interior de este.
- c. Corrosión en Placas: Es un caso intermedio entre corrosión uniforme y localizada. Se manifiesta un ataque en algunas zonas localizadas de poca extensión en la superficie del metal y que se hallan como islas en medio de superficies de mayor extensión donde la corrosión es uniforme.
- d. Corrosión por Aireación Diferencial: Se presenta por la formación de zonas desprovistas de oxígeno (Anódicas), y otras con abundante oxígeno (Catódicas).
- e. Corrosión Intergranular: Se presenta por la formación de microceldas en los límites de grano de la fase matriz del metal y se manifiesta con la presencia de precipitados intergranulares. Se propaga ocasionando tanto la vulnerabilidad al ataque de otros tipos de corrosión desde el exterior como el disloque estructural.
- f. Corrosión Fisurante: Se presenta cuando el metal está sometido a un medio corrosivo y a tensiones mecánicas de tracción, formándose fisuras transgranulares o intergranulares que se propagan hacia el interior del metal, provocando su fractura.

## 6.4 Origen y Potenciales de Corrosión

### 6.4.1 Potenciales de Electrodo de los Metales

Todo metal inmerso en una solución presentará una diferencia de Potencial respecto de ésta.

No obstante, al ser imposible la medida directa del Potencial absoluto de dicho metal respecto de la solución, se define el Potencial de un Electrodo como aquel del metal inmerso en la solución medido contra un Electrodo de Referencia sin considerar disminución alguna del Potencial por la Resistencia de la solución ni del circuito externo. Tanto la naturaleza del Electrodo de Referencia como del electrolito definirán su valor. [34], [37]

Asimismo, dicho Potencial representa el trabajo reversible de mover una unidad de carga desde la superficie del electrodo a través de la solución hasta el electrodo de referencia [33].

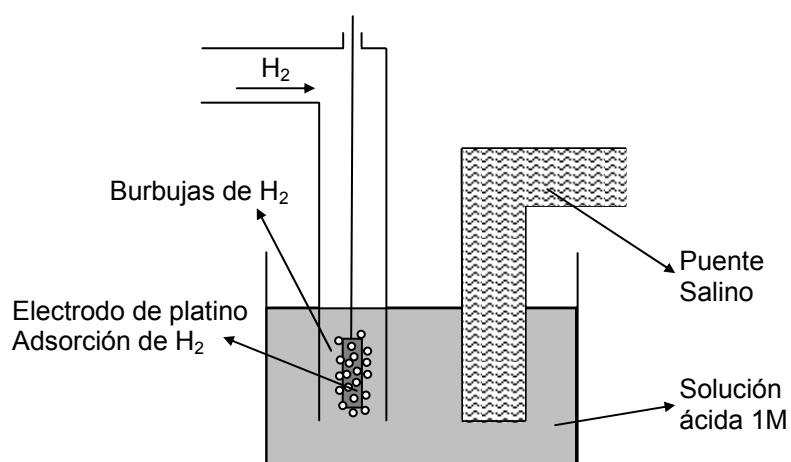
Para establecer una Serie Patrón de Potenciales gerarquizados, se diseñó una escala llamada Serie Electroquímica de Potenciales de Reducción (**Tabla 11**) con el potencial de equilibrio termodinámico de cada metal colocado en una solución de electrolito 1 Molar con sales de sus propios iones ( $\text{Me}/\text{Me}^{n+}$ ) medidos a condiciones estándar y asignándosele por convención a la reacción de reducción del hidrógeno ( $\text{H}_2/\text{H}^+$ ) el Potencial Cero de referencia para cualquier temperatura.

Los metales más nobles presentarán un Potencial de Reducción más positivo que el del Hidrógeno, mientras que los más activos, tales como los Alcalinos y los Alcalinotérreos, debido a sus electrones periféricos de débil cohesión, presentarán un Potencial de Reducción más negativo.

**Tabla 11.** Serie Electroquímica de Potenciales de Reducción de Electrodo Respecto del Electrodo de Hidrógeno ( $H_2 / H^+$ )

Reacción de Equilibrio		Potencial (V)
$Au^{+++} + 3e^- = Au$	<b>Metales</b>	+ 1.498
<b><math>O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O</math></b>	Catódicos	<b>+ 1.229</b>
$Pt^{++} + 2e^- = Pt$	(Nobles)	+ 1.200
$Ag^+ + 1e^- = Ag$		+ 0.800
$Hg_2^{++} + 2e^- = 2Hg$		+ 0.788
$Fe^{+++} + 1e^- = Fe^{++}$		+ 0.770
<b><math>O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4(OH)^-</math></b>		<b>+ 0.401</b>
$Cu^{++} + 2e^- = Cu$		+ 0.340
<b><math>2H^+ + 2e^- = H_2</math></b>		<b>0.000</b>
$Pb^{++} + 2e^- = Pb$		- 0.126
$Sn^{++} + 2e^- = Sn$		- 0.136
$Ni^{++} + 2e^- = Ni$		- 0.230
$Fe^{++} + 2e^- = Fe$		- 0.409
$Cr^{+++} + 3e^- = Cr$		- 0.740
$Zn^{++} + 2e^- = Zn$		- 0.763
$Al^{+++} + 3e^- = Al$	<b>Metales</b>	- 1.706
$Mg^{++} + 2e^- = Mg$	Anódicos	- 2.375
$Li^+ + 2e^- = Li$	(Activos)	- 3.045

Si se utilizan los Potenciales de Oxidación, la respectiva Serie Electroquímica tendrá signos opuestos.



**Figura 33.** Semicelda de Hidrógeno ( $H_2/H^+$ ) a Condiciones Estándar

Para concentraciones iónicas variables del metal (Me) en una solución de concentración ( $M^{Z+}$ ) de sus iones, el Potencial de Reducción (E) en escala de Hidrógeno es dado por la Ecuación de Nernst: [34]

$$E = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln(M^{Z+}) \quad (V)$$

Donde:

- $E_0$  : Potencial Normal del Metal (V)
- R : Constante de los gases R.T. = 0.059
- F : Constante de Faraday (C) F = 96,493 C
- T : Temperatura absoluta (K)
- Z : Valencia (p.u.)

De lo anterior resulta que el cabal conocimiento de los Potenciales de Reducción referidos a un Electrodo de Referencia es de suma importancia para la interpretación de los mecanismos de la Corrosión Electroquímica, ya que su medición permite establecer o inferir [35]:

- La detección de zonas anódicas y catódicas.
- La estimación de la velocidad de corrosión.
- El Estado Activo o Pasivo del Metal.
- Seguir la formación y rotura de Películas Superficiales.

En la práctica, para medir los Potenciales de Corrosión en metales y aleaciones de ingeniería inmersos en un electrolito conocido tal como agua de mar, concreto, suelo, etc. (**Tabla 12**), se utilizan medias celdas de Referencia fácilmente transportables (Cu-CuSO<sub>4</sub>, Ag-AgCl), para las cuales se han determinado Series Electroquímicas de Potenciales según el electrolito en el que esté inmerso el metal. [38]

**Tabla 12.** Serie Electroquímica de Potenciales de Electrodo en Agua de Mar respecto de la media celda (Cu–CuSO<sub>4</sub>)

ELECTRODO	POTENCIAL (V)
Acero Inox 304	- 0.15 Pasivo
Titanio Comercial	- 0.17
Plata	- 0.22
Acero Inox. 410	- 0.22
Acero Inox. 316	- 0.25
Acero Inox. 430	- 0.28
Cobre	- 0.43
Bronce Naval	- 0.47
Acero Inoxidable 410	- 0.59 Activo
Acero Inoxidable 304	- 0.60 Activo
Acero Inoxidable 430	- 0.64
Acero al Carbono	- 0.68
Aluminio	- 1.01
Zinc	- 1.10

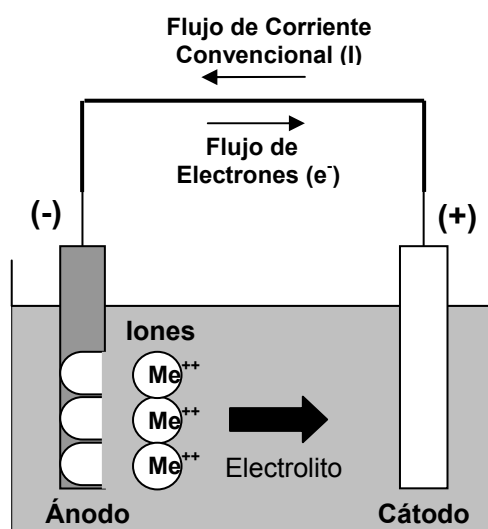
### 6.4.2 Celda Electroquímica y Reacciones

Es un sistema electroquímico para cuya formación se requiere de la presencia de cuatro elementos fundamentales [39]:

- Un Ánodo y un Cátodo.
- Una diferencia de Potencial Ánodo – Cátodo.
- Una Conexión Eléctrica directa Ánodo – Cátodo.
- Un medio electrolítico común de Inmersión Ánodo – Cátodo.

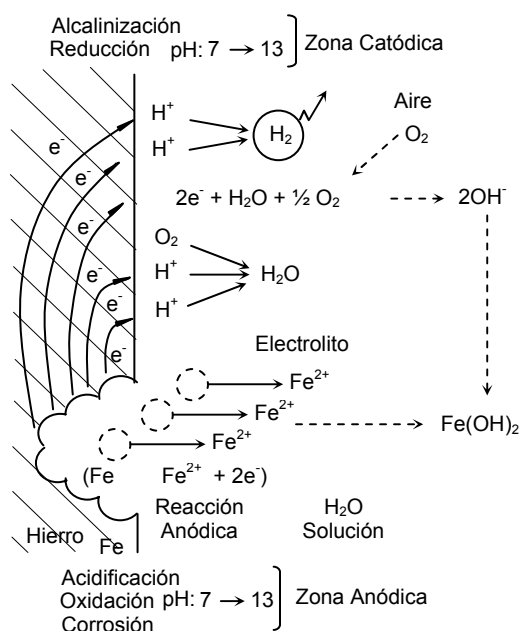
El Ánodo y el Cátodo deben estar conectados mediante una conexión eléctrica e inmersos en un electrolito.

El Ánodo, que se disuelve en la solución, envía electrones a través de la conexión eléctrica hacia el Cátodo, que permanecerá incólume, mientras que en el electrolito se hallan en movimiento en sentidos opuestos iones metálicos de ambos signos (aniones y cationes), que por convención se consideran a todos como cationes.



**Figura 34.** Esquema de Principio de una Celda Electroquímica

Puede apreciarse que en el Proceso de Corrosión, toda Reacción Anódica de Oxidación es y debe ser siempre acompañada por una Reacción Catódica de Reducción.



**Figura 35.** Representación Esquemática del Proceso de Corrosión del Hierro en soluciones aireadas

De este modo, la corrosión puede ser:

- Galvánica: En presencia de metales no similares en un mismo electrolito.
- Electrolítica: En un mismo metal inmerso en diferentes Electrolitos.
- De concentración: En un metal inmerso en diferentes concentraciones de un mismo electrolito.

Asimismo, el proceso de corrosión puede darse mediante la formación de:

- Macroceldas: Cuando el ánodo y cátodo son perceptibles a simple vista.
- Microceldas: Cuando existen multitud de ánodos y cátodos en la superficie del metal y estos no son perceptibles a simple vista.



En metales activos un subproducto de la Corrosión es la acumulación de una capa gaseosa de Hidrógeno en las zonas catódicas de la superficie, polarizando Catódicamente al metal y reduciendo espontáneamente el flujo de electrones.

Sin embargo, el oxígeno disuelto en el Electrolito puede reaccionar con el Hidrógeno para volver a formar agua, destruyendo dicha capa polarizante y permitiendo que la corrosión continúe. Es por esto que en los metales las áreas que tienen alta disolución de Oxígeno tienden a ser catódicas. [38]

#### **6.4.3 Naturaleza de las Reacciones Anódicas y Catódicas**

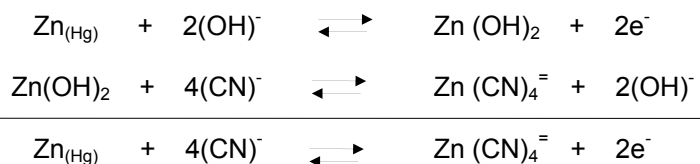
En una Celda de Corrosión Electroquímica, dependiendo de las características intrínsecas del metal y de la solución, pueden presentarse reacciones anódicas y catódicas medianamente complejas [34]:

##### a. Reacciones Anódicas

Involucran la liberación de electrones como consecuencia del paso del metal al electrolito en forma iónica. Por ejemplo:



En muchos metales este proceso ocurre en más de una etapa, las cuales pueden o no involucrar iones presentes en la solución:



Es por esto que generalmente se usa la representación simplificada:

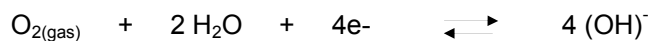


b. Reacciones Catódicas

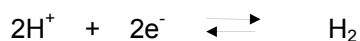
Involucran la captación de electrones para la reducción del  $H^+$  a  $H_{2(gas)}$  o para la despolarización del  $O_{2(gas)}$  [34], [35], [40]

Según el medio, las reacciones más comunes en un medio acuoso son:

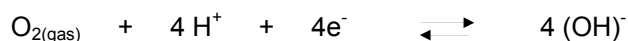
- Para un pH neutro o alcalino de la solución en agua aireada:



- Para un pH ácido de la solución (pH  $\approx$  1), en ausencia de oxígeno



- Para un pH de la solución próximo por el lado ácido al punto neutro (pH = 6), es decir, en presencia de Oxígeno e Hidrógeno, la reacción será:



#### 6.4.4 Diagramas de Pourbaix

Fueron elaborados por el investigador Belga Marcel Pourbaix a partir de cálculos basados en la ecuación de Nernst y las reacciones de equilibrio para la corrosión de metales en medio acuoso a 25°C, considerando los siguientes criterios de base: [35], [37], [40], [41]

- Por convenio, se utiliza como frontera de separación entre corrosión e inmunidad del metal un valor de concentración de iones metálicos  $[Me^{++}] = 10^{-6}$  M de la solución que cubre la superficie del metal, pues es tan bajo que equivale a niveles de corrosión insignificantes.

- Un metal se disuelve solamente por encima de un umbral de potencial dado.
- El potencial de disolución de un metal no es afectado por el pH del Medio.
- Si el metal disuelto da un óxido o hidróxido, la reacción ocurre a un potencial dependiente del pH.
- Si se neutraliza una solución ácida que contenga iones metálicos, a un cierto pH se forman precipitados de hidróxidos.
- El aumento del pH por encima de cierto valor, genera la redisolución de los hidróxidos previamente precipitados y produce Aniones e Iones complejos.

Tales representaciones gráficas muestran en función del potencial (E) y de la actividad del ión hidrógeno (pH) zonas de Estabilidad Termodinámica [34] de las diferentes especies químicas derivadas del metal en sistemas de electrolito acuoso:

- Zona de Inmunidad; corresponde al estado de resistencia del metal (Me) a la disolución anódica o corrosión.
- Zona de Corrosión; corresponde a la fase estable de los productos solubles de corrosión originados por la disolución del metal. ( $\text{Me}^{n+}$ ,  $\text{MeO}$ , etc.)
- Zona de Pasivación; Indica la formación de una película de óxidos o hidróxidos adherentes, poco solubles o insolubles en el medio, sobre la superficie del metal que dificultan el proceso de corrosión ( $\text{MeOH}$  y algunos  $\text{MeO}$ ).

Estas zonas están delimitadas observando las siguientes pautas de representación gráfica:

- Líneas Horizontales:  
Corresponden a reacciones con intercambio de electrones independientemente del pH.



- Líneas Verticales:

Corresponden a las reacciones dependientes del pH, pero independientes del potencial.

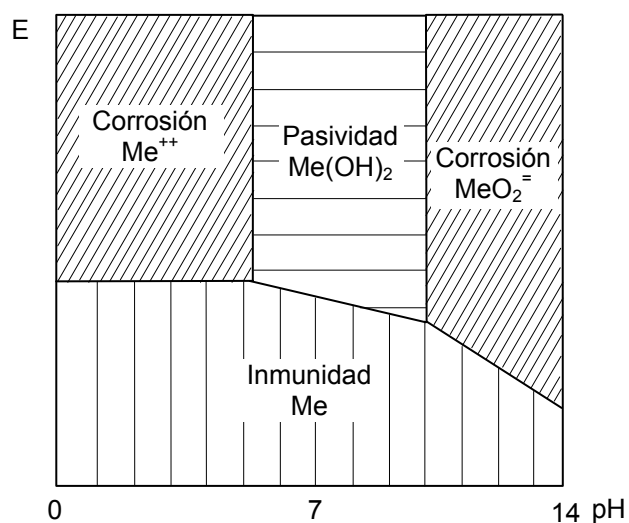


- Líneas Oblicuas:

Corresponden a las reacciones que dependen del potencial y del pH simultáneamente.

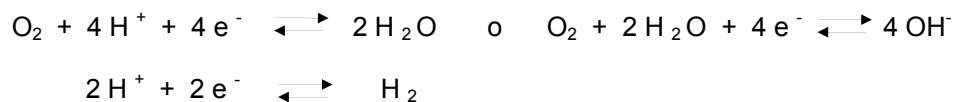


Cabe resaltar que los límites de las zonas de Estabilidad Termodinámica de cada metal dejarán de ser válidos cuando existan en la solución sustancias que den lugar a la formación de especies iónicas diferentes a las consideradas en la elaboración del Diagrama ( $\text{Me}^{+}$ ,  $\text{Me}^{++}$ ,  $\text{MeO}_2$ ,  $\text{MeO}_2^{-}$ , etc.).

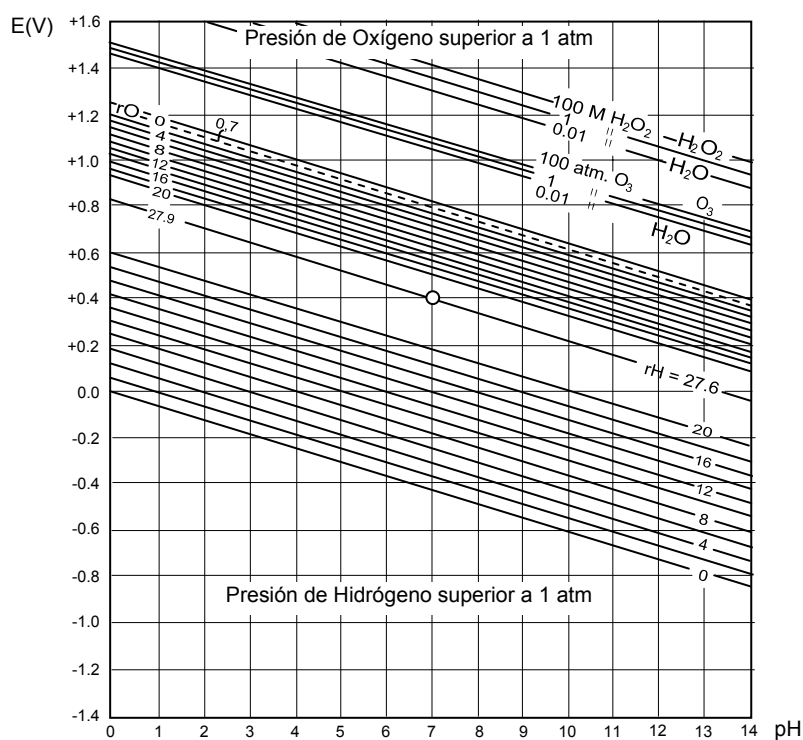


**Figura 36.** Zonas de Estabilidad Termodinámica en un Diagrama de Pourbaix

Asimismo, el dominio de Estabilidad Termodinámica del agua a presión atmosférica se delimita mediante dos líneas oblicuas paralelas que representan las siguientes reacciones catódicas:



Potenciales mayores o menores que este rango pueden alcanzarse únicamente mediante medios eléctricos (electrólisis) o químicos (uso de sustancias químicas oxidantes o reductoras).

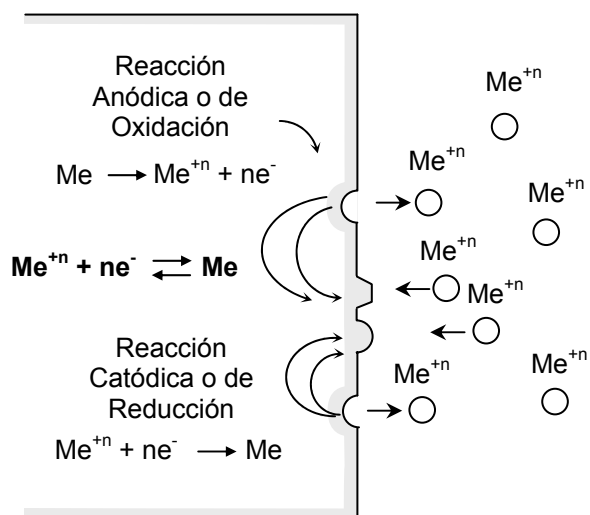


**Figura 37.** Dominios de Equilibrio del hidrógeno, oxígeno y compuestos derivados [41]

#### 6.4.5 Cinética de la Corrosión respecto de los Potenciales de Electrodo

En un metal sumergido en una solución no aireada que contenga sus propios iones se producirán de continuo y simultáneamente reacciones de oxidación por las cuales

se disuelve metal, y reacciones de reducción en donde el metal en solución se redeposita simultáneamente a igual velocidad, sin existir transformación química neta y presentándose un Potencial de Electrodo (E) determinado para dicha condición de equilibrio. [37]



**Figura 38.** Equilibrio dinámico de Oxidación-Reducción en un metal

Cualquier desviación que haya de la condición de equilibrio desplazará el potencial de Electrodo y entonces modificará las magnitudes de las velocidades de las reacciones de oxidación y reducción, produciéndose un flujo neto de electrones resultante.

La corrosión del metal podrá producirse entonces de dos formas:

a. Incremento del Potencial del metal

Ocurre cuando los electrones liberados en la reacción de equilibrio son absorbidos por un sistema que posea un potencial mayor [41], produciéndose un incremento en la velocidad de las reacciones de oxidación. Dicho sistema puede resultar de:

- Unión eléctrica con otro metal más catódico (Corrosión Electroquímica)  
Se formará una macrocelda de corrosión.
  
  - Presencia de un agente oxidante (Corrosión Química o Electroquímica)  
Se formarán microceldas de corrosión sobre la superficie del metal. [37]  
Además, tanto el ión hidrógeno ( $H^+$ ) como el oxígeno gaseoso ( $O_2$ ) presentes en el electrolito son susceptibles de actuar como agentes oxidantes frente a un metal de potencial más activo.
  
  - Presencia de un ánodo electrolítico (Corrosión Electrolítica)  
Se formará una macrocelda de corrosión debido a una diferencia de potencial externa establecida
- b. Disminución del potencial de equilibrio
- Ocurre cuando una sustancia capaz de producir compuestos con los iones del metal forma parte del electrolito disminuyendo el potencial de equilibrio del metal respecto de la solución, produciéndose una disminución en la velocidad de las reacciones de reducción. Dicho sistema puede resultar de:
- La disolución del metal por la desaparición de sus iones libres en la solución debido a la formación de compuestos solubles, pudiendo llegar a disminuir el potencial de equilibrio del metal por debajo del potencial de reducción del ión hidrógeno ( $H^+$ ), volviéndolo asimismo vulnerable a la acción oxidante de éste.
  
  - La formación de sales adherentes e insolubles en la superficie del metal, conformando una capa pasivante protectora que inhibirá el proceso de corrosión.

- Simultanea disolución del metal y precipitación de sales adherentes; en tal caso la corrosión dependerá de los factores de la Solución que favorezcan a una u otra tendencia.

Un indicador de la desaparición de iones libres del metal en la solución debido a la formación de compuestos lo constituye el Potencial Redox de la Solución, cuyo valor es proporcional a la presencia de iones metálicos libres en la solución. [41]

## **6.5 Mecanismos más frecuentes de la Corrosión en Suelos**

La instalación de una Red de Puesta a Tierra en el Suelo consiste básicamente en la inmersión de un metal en una masa Electrolítica no homogénea con diferentes concentraciones salinas y de oxígeno.

Asimismo, el suelo siempre tiene un grado de humedad debido a la impregnación de la humedad atmosférica y a la higroscopicidad de varias de sus sales. [40]

Los procesos de corrosión que afectan a la Red de Puesta a Tierra enterrada son entonces principalmente de naturaleza electroquímica al presentarse un movimiento de electrones entre zonas anódicas y catódicas a través de las partes del metal no involucradas en la reacción y cerrándose el circuito por el Suelo, que actúa como electrolito [35]. De este modo, la corrosión puede darse por:

### **6.5.1 Formación de una Cupla Galvánica**

Se presenta al unir eléctricamente dos armados metálicos enterrados (tuberías, rieles, estructuras enterradas, etc.) conformados por metales distintos; un ejemplo lo constituye la conexión eléctrica de la Red de Puesta a Tierra a un Sistema de tuberías metálico enterrado para reducir la Resistencia de Dispersión de la misma.



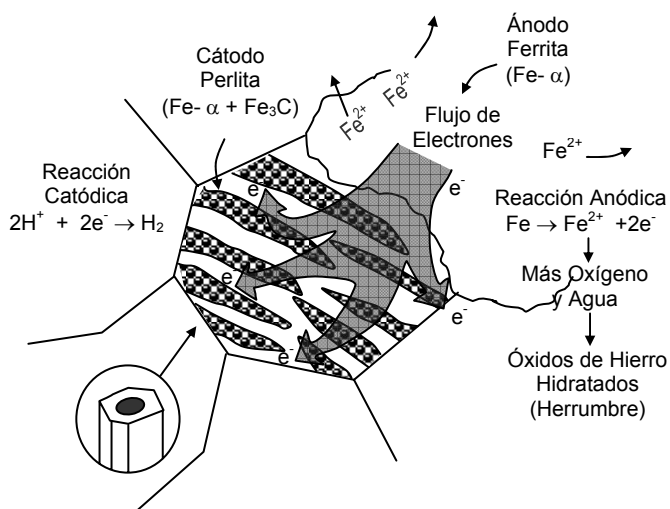
La velocidad de corrosión es proporcional a la penetración ( $p$ ) y dependerá de la relación de áreas cátodo/ánodo ( $B/A$ ) y de la penetración normal de corrosión del metal anódico sin acoplar ( $p_0$ ) según:

$$p = p_0 \left( 1 + \frac{B}{A} \right) \quad (\mu\text{m})$$

De otro lado, la Resistencia eléctrica de la Celda de Corrosión formada y la continuidad eléctrica de la conexión de los armados enterrados influirán sensiblemente en la velocidad de corrosión. [42]

### 6.5.2 Presencia de Fases distintas en una Aleación

Se presenta al utilizar metales aleados tales como aceros al carbón, cuyas fases diferentes y conductoras forman un par galvánico a nivel de microceldas debido a la humedad existente en el suelo, que constituirá el electrolito al formar películas de agua muy finas y casi imperceptibles sobre la superficie metálica, concentrando sales e impurezas presentes en el suelo tales como oxígeno, cloruros, etc. Solo en suelos secos esta forma de corrosión será prácticamente despreciable.



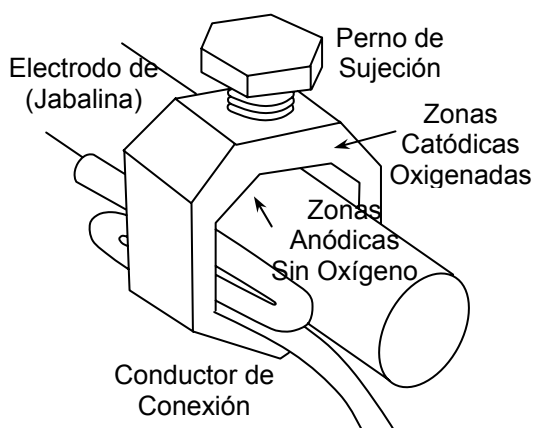
**Figura 39.** Corrosión en acero al carbono con fases de Ferrita (ánodo) y Perlita (Cátodo) [37]

### 6.5.3 Aireación Diferencial

Se presenta debido a heterogeneidades de concentración de oxígeno o aire sobre zonas adyacentes de un metal, generando diferencias de potencial entre ellas y, como resultado, celdas de corrosión de aireación diferencial. Generalmente se da:

- Entre los puntos de interfase de ajuste y externo de las Grapas de Presión empleadas en electrodos de Redes de Puesta a Tierra.
- Entre la superficie inferior y superior de los conductores horizontales en medio del relleno.
- En electrodos verticales debido a la compactación y a la diferencia de granulometría de los estratos del suelo con los que está en contacto. [40]

El oxígeno presente en el suelo poco profundo acompañado por la humedad y otras condiciones, al presentar un mayor Potencial de Reducción que los metales utilizados en el diseño de Redes de Puesta a Tierra, actúa como agente oxidante ocasionando la corrosión en los metales; no obstante, su efecto no será significativo para Redes de Puesta a Tierra instaladas a profundidades mayores a 0,5 m.



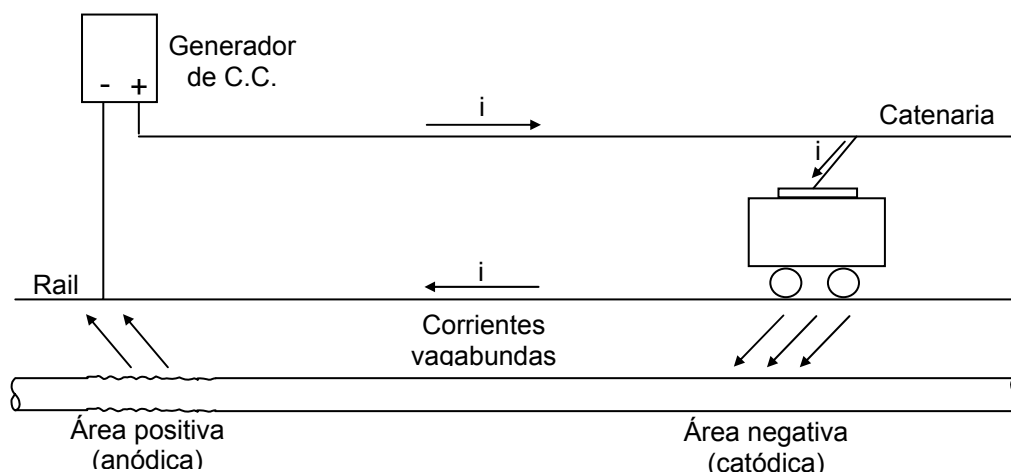
**Figura 40.** Caso típico de Corrosión por Aireación Diferencial

#### 6.5.4 Corrientes Vagabundas e Inducidas

Se presenta debido a la formación de una celda de corrosión electrolítica principalmente por la presencia de:

- Corrientes provenientes del funcionamiento de fuentes o cargas no lineales de Corriente Continua (C.C.) de una fuente externa como Rectificadores, Cargadores de Baterías, etc. en Plantas Industriales y que circulan fuera de su circuito previsto.
- Corrientes erráticas de origen geomagnético presentes en el Suelo natural

La zona en que dichas corrientes abandonan el metal inmerso en el electrolito será la que presente el ataque corrosivo y es conocida como cátodo electrolítico. [33]



**Figura 41.** Ejemplo de Corrosión por corrientes vagabundas causadas por una vía férrea en tuberías enterradas

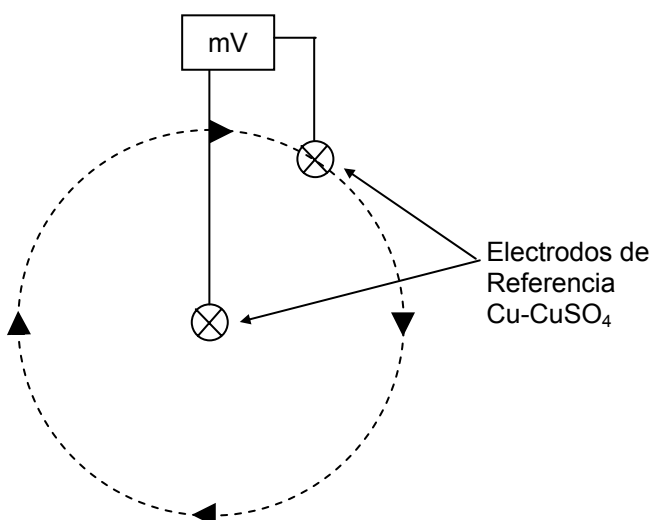
Las pérdidas por corrosión ocasionadas estarán en función de la magnitud de la Corriente y del metal utilizado (**Tabla 13**) [38].

**Tabla 13.** Pérdida de Peso en Kg/A-Año de Metales debido a Corrientes Erráticas

METAL	PESO ATOMICO	VALENCIA DEL METAL	PERDIDA Kg/A – AÑO
ALUMINIO (Al)	26.98	3	2.99
MAGNESIO (Mg)	24.32	2	4.00
HIERRO (Fe)	55.85	2	9.25
COBRE (Cu)	63.57	2	10.48
ZINC (Zn)	65.38	2	10.85
PLOMO (Pb)	207.20	2	34.27

Comparativamente, Corrientes Alternas de idéntica magnitud sólo ocasionan un pequeño porcentaje de la Corrosión y aquellas de Alta Frecuencia apenas iniciarían el proceso.

Su medida se realiza mediante dos Electrodo de Referencia conectados a un Voltímetro, midiendo la Diferencia de Potencial existente entre ambos a una distancia de separación determinada.

**Figura 42.** Esquema de Medida de Corrientes Vagabundas en el Suelo

Una clasificación de estas corrientes viene dada en función de la Caída de Potencial en (mV) que se presenta por metro lineal en la zona de medición (**Tabla 14**) [40].

**Tabla 14.** Clasificación de las corrientes vagabundas

Gradiente de Potencial	Características
Menos de 0,5 mV/m	Corrientes Vagabundas Débiles
0,5 – 5 mV/m	Corrientes Vagabundas Medianamente intensas
Más de 5 mV/m	Corrientes Vagabundas Intensas

#### **6.5.5 Formación de Iones Complejos en el Medio**

Se presenta debido a la presencia de sales o sustancias capaces de formar compuestos metálicos solubles con los iones libres del metal de la Red de Puesta a Tierra enterrada.

Por ejemplo, el ión cloro (Cl<sup>-</sup>) puede romper la pasividad de los metales enterrados y formar compuestos solubles debido a su gran poder de penetración o formar una capa protectora.

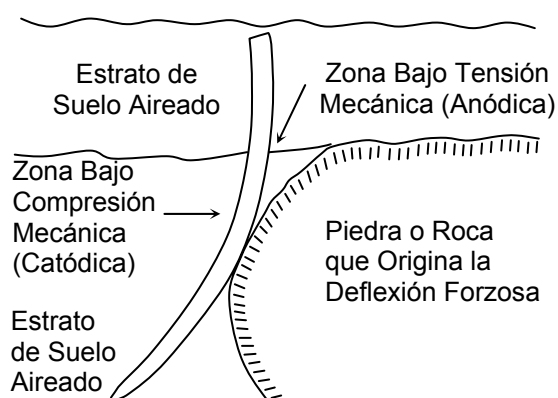
Asimismo, ciertas sales puede retardar o frenar el efecto corrosivo ocasionado por otras; un 5% de contenido de carbonatos en el suelo permite llegar a concentraciones de hasta 500 ppm (0.050%) de ión sulfato (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>) sin que se presente corrosión. [40]

La reacción que presente el metal ante determinadas sales o sustancias presentes en el suelo dependerá no solo de su Potencial de Electrodo, sino de las características propias de los compuestos derivados resultantes así como de las condiciones del sitio

#### **6.5.6 Existencia de Solicitaciones Mecánicas**

Se presenta debido a la presencia de Tensiones Mecánicas permanentes o recurrentes, definiendo zonas Anódicas de sollicitación mecánica de Tracción y otras Catódicas con sollicitación mecánica de Compresión. Generalmente ocurre en: [38]

- Electrodo verticales desviados o deformados accidentalmente durante su instalación.
- Electrodo horizontales doblados a un radio menor que el estimado para la cohesión de sus hebras y conservación de su capacidad de conducción.
- Electrodo conectados a puntos vibratorios, cuando una extremidad se fija a un punto vibratorio como es el caso de las cimentaciones de Grupos Electr6genos.



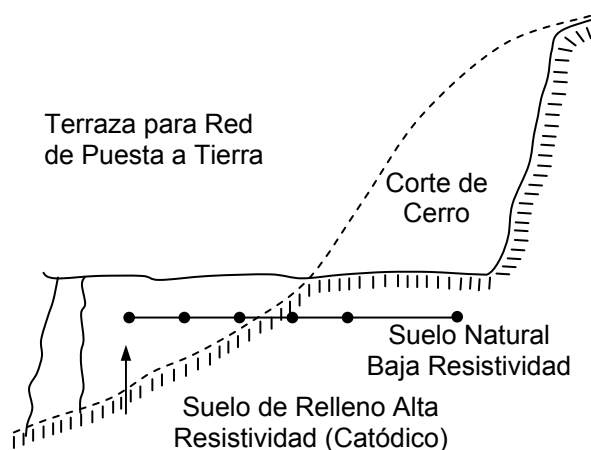
**Figura 43.** Corrosión por presencia de Esfuerzos Mecánicos

### 6.5.7 Diferencia de Resistividades

Se presenta una Celda de Conductividad Diferencial a partir de la existencia de Rellenos conductivos no homogéneos o estratos del suelo con diferente Resistividad en los que está instalado un electrodo, siendo Anódicos los Rellenos o estratos de Baja Resistividad y Catódicos aquellos de mayor o Alta Resistividad [38]. Generalmente ocurre en:

- Suelos nivelados con tierra de aporte en instalaciones con Electrodo Horizontales tendidos en suelos habilitados con Terraza o corte.

- Suelos estratificados naturales, en el caso de instalaciones con Electrodo Verticales clavados.
- Rellenos aplicados por capas de diferente material en electrodos verticales en pozo.



**Figura 44.** Corrosión por Diferencia de Resistividades

### 6.5.8 Presencia de Bacterias en el Suelo

Se presenta debido a bacterias anaeróbicas reductoras de sulfatos (*Devibrio desulfuricans*) que utilizan el hidrógeno ( $H_2$ ) presente en el Suelo o el catódico que se forma en la corrosión de metales activos para reducir los sulfatos inorgánicos a sulfuros y/o ácido sulfhídrico, lo cual ocasionará la sulfidación del metal [33], [40], [43] Estas bacterias requieren de un pH favorable del suelo (entre 5,5 y 8,5), ausencia de oxígeno disuelto y una concentración favorable de ión sulfato ( $SO_4^{=}$ ). [40]

Para evaluar el riesgo de Corrosión anaeróbica utilizamos como indicadores tanto la concentración de ión sulfato ( $SO_4^{=}$ ) como el Potencial Redox del Suelo (**Tabla 15**). [40], [44]

**Tabla 15.** Agresividad del Suelo según su Potencial Redox

Potencial Red-ox	Agresividad del Suelo
< 100 mV	Muy agresivo
100-200 mV	Moderadamente agresivo
200-400 mV	Débilmente agresivo
>400 mV	No agresivo

### 6.5.9 Concentración del ión hidrógeno

Se presenta en suelos ácidos con pH menor a 7 debido al exceso de iones Hidrógeno ( $H^+$ ) que en metales activos promueve la neutralización de electrones e incentiva el flujo de Corriente de Corrosión.

Así, las partes del Electrodo que se hallan en la zona ácida del Electrolito son Anódicas respecto de aquellas que se hallan en una zona de pH mayor. [38]

Muchos investigadores han estudiado la relación entre el pH y la corrosividad [34], [40], [41], [44], obteniendo tablas como la siguiente (**Tabla 16**):

**Tabla 16.** Agresividad del suelo en función del pH

pH	Medio	Comportamiento
< 4	Ácido muy fuerte	Muy agresivo
4.0 – 4.5	Muy ácido	
4.5 – 5.0	Ácido	
5.0 – 6.0	Moderadamente ácido	
6.0 – 6.5	Poco ácido	Agresivo
6.5 – 7.5	Neutro	No agresivo
7.5 – 8.5	Poco alcalino	
> 8.5	Muy alcalino	Condicionado

No obstante, el pH del medio como único indicador no es suficiente para determinar el comportamiento del Suelo respecto a un metal determinado, debiendo ser



complementado con el Diagrama de Pourbaix, el cual describe el comportamiento del suelo en función tanto de la concentración del ión hidrógeno (pH) como del Potencial de Electrodo respectivo del Metal (E).

#### **6.5.10 Bajas Resistividades del Suelo**

Todos los suelos están constituidos por sales solubles como cloruros, sulfatos y bicarbonatos alcalinotérreos, las cuales conjuntamente con la humedad incrementan la conductividad, favoreciendo la circulación de corriente en los procesos de corrosión con una baja resistencia eléctrica entre zonas anódicas y catódicas presentes en la corrosión por macro y microceldas.

Muchos factores deben ser considerados al determinar la compatibilidad de un metal enterrado en un suelo de baja Resistividad. No obstante, existen tablas referenciales (**Tabla 17**) para inferir el grado de corrosividad del suelo respecto a su Resistividad mínima. [40], [45]

**Tabla 17.** Grado de Corrosividad del Suelo en función a la Resistividad

Resistividad	Corrosividad del Suelo
< 10 $\Omega$ .m	Muy severa
10 – 20 $\Omega$ .m	Severa
20 – 50 $\Omega$ .m	Moderada
50 – 100 $\Omega$ .m	Ligera
> 100 $\Omega$ .m	Muy ligera

El funcionamiento de las pilas de corrosión originadas sobre la superficie del metal no es regido únicamente por la resistencia óhmica del recorrido de las corrientes de corrosión, sino también apreciablemente por las circunstancias vistas anteriormente como: aireación, humedad, pH, salinidad, gradientes de temperatura, estructura del Suelo, tipo de corriente en tránsito, dirección y densidad del flujo de corriente.

Por lo tanto, una baja Resistividad del Suelo no constituye de manera aislada un factor causante de la corrosión, sino una condición propicia que contribuirá a acelerar o retardar la velocidad con que ésta se esté produciendo en la Red de Puesta a Tierra enterrada, siendo los metales de Potenciales más activos los más susceptibles a ser afectados por este factor.

## **6.6 Comparación de la Corrosión de diferentes metales enterrados**

Existe una gran variedad de metales disponibles para el diseño de Redes de Puesta a Tierra en Subestaciones de Corriente Alterna, siendo el cobre el metal más utilizado por ser el más resistente a la corrosión en una gran variedad de Suelos.

No obstante, en lugares donde el cobre esté expuesto a riesgo de hurto, metales más económicos instalados adecuadamente, pueden también tener un desempeño óptimo. A continuación se compara el desempeño del cobre frente al de otros metales respecto a los principales tipos de macro y microceldas que se presentan en la corrosión en Suelos.

### **6.6.1 Desempeño del Cobre**

Metal noble ampliamente utilizado en la instalación de Redes de Puesta a Tierra por su alta conductividad y excelentes propiedades mecánicas al ser usado en estado de alta pureza. No obstante, es proclive al fenómeno de corrosión bajo ciertas condiciones de instalación identificables.

#### **a. Agresividad del Suelo o Relleno conductivo**

Su Potencial de Reducción en la Serie Electroquímica es mayor que el del Hidrógeno; se encontrará en equilibrio en un medio que contenga iones ( $H^+$ ) tal como los ácidos concentrados o agua desaireada, pudiendo permanecer en contacto con estos sin mayores consecuencias. También resiste el ataque corrosivo en medios fuertemente alcalinos y de las sales comunes del suelo

mediante la formación de una capa pasivante superficial dura de Óxido Cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

La presencia del ión cloruro generalmente no afecta de manera significativa al cobre, debido a que forma compuestos sólidos adherentes duros de cloruro de cobre que contribuyen a la pasivación del metal; no obstante, su resistencia eléctrica de contacto con el suelo circundante se ve incrementada.

El cobre no es resistente a compuestos químicos derivados de nitrógeno encontrados principalmente en suelos de cultivo tratados con fertilizantes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , etc.) o suelos cultivables con contenidos orgánicos; compuestos tales como:

- Compuestos de Cianuro ( $\text{CN}^-$ ) como la Cianamida Cálcica ( $\text{Ca}(\text{CN})_2$ ) que transforma los iones  $\text{Cu}^+$  y  $\text{Cu}^{++}$  en iones cupro-cianuros solubles  $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ , disminuyendo además el potencial de equilibrio por debajo del potencial de reducción del ión hidrógeno, haciéndolo tan susceptible al ataque de los ácidos como un metal de Potencial activo. [41]
- Compuestos de Amoníaco ( $\text{NH}_4^+$ ) como el Hidróxido de Amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) que en presencia de Oxígeno ( $\text{O}_2$ ), forma el ión complejo soluble  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{++}$  [44], con el mismo efecto de corrosión intensa que los compuestos cianurados.

La aplicación de rellenos orgánicos alrededor del electrodo resulta entonces perjudicial por su alto contenido de nitrógeno, ocasionando procesos corrosivos de cobertura extensa y lenta, del mismo modo que, en algunos casos, corrosión localizada y catastrófica. [38]

Asimismo, experiencias personales del autor indican que el uso de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) como componente del relleno conductivo en porcentajes mayores al 5% en Redes de Puesta a Tierra enterradas a profundidades menores a 0,5 m puede ocasionar la disolución acelerada del Cobre por formación de compuestos carbonatados solubles.

**b. Corrosión por cupla galvánica**

Siendo el cobre el metal más noble utilizado en instalaciones subterráneas tanto en electricidad como en otras ramas de Ingeniería, cualquier armado metálico convencional enterrado en el mismo suelo tendrá un potencial más activo que el de la Red de Puesta a Tierra, formándose una Celda Electroquímica en la que se preservará la Red que actuará como Cátodo en perjuicio del armado metálico conectado, que actuará como Ánodo.

Si el armado metálico conectado a la Red se halla en otro medio electrolítico tal como el Concreto, enterrado asimismo en el suelo, el proceso de corrosión será de naturaleza mucho más compleja, debiendo hacerse un análisis más detallado del caso particular.

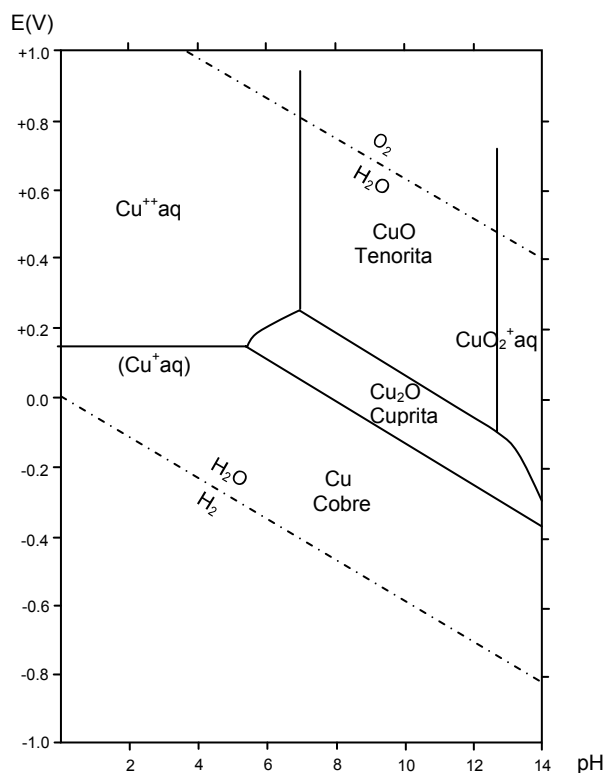
**c. Corrosión Bacteriana**

Siendo el cobre un metal noble, es muy resistente a los ácidos y uno de los pocos metales sobre el que no se depositan organismos incrustantes. [44]

Es por esto que aún ante la existencia de cepas fuertes de bacterias sulfato-reductoras, estas no ocasionarán un proceso de corrosión significativo en dicho metal, llegando como máximo a la formación de una delgada capa pasivante de sulfato de cobre en zonas localizadas de conductor enterrado después de muchos años.

#### d. Diagrama de Pourbaix

Presenta dos zonas de corrosión referidas hacia los medios Ácidos y Alcalinos fuertes; en el medio ácido, con un pH por debajo de 5.4 el límite del dominio de corrosión es una línea horizontal con un potencial de 0,15V; al aumentar el pH se produce un cambio de dirección del límite de corrosión con el inicio de formación de una capa pasivante de Óxido Cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) que protege al metal, y alcanzando un  $\text{pH} \approx 7$  se forma adicionalmente Hidróxido Cúprico ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) y Óxido Cúprico ( $\text{CuO}$ ), los cuales dejan de ser estables y se disuelven cuando el pH sobrepasa 11.6, dando lugar a la aparición de una segunda zona de corrosión. [35]



**Figura 45.** Diagrama de Pourbaix del Cobre (para medio acuoso a 25 °C)

#### e. Resistividad del Suelo

Dada la resistencia natural a la corrosión que presenta el cobre metálico enterrado en ausencia de compuestos nitrogenados, en ausencia de macro ó

microceldas significativas, una baja Resistividad del Suelo no favorecerá de manera apreciable la corrosión del cobre.

### **6.6.2 Desempeño del Hierro**

Metal activo utilizado como una alternativa económica del cobre en el diseño de Redes de Puesta a Tierra; no obstante, en ausencia de diversas precauciones de instalación, es susceptible al ataque corrosivo de diversas sales, bases y compuestos complejos presentes en el suelo.

#### **a. Agresividad del Suelo o Relleno conductivo**

Siendo el Hierro un metal cuyo Potencial de Reducción en la Serie Electroquímica es menor que el del Hidrógeno, es proclive a ser afectado por los ácidos concentrados así como por suelos de pH ácido. En ambientes alcalinos forma una capa pasivante superficial de Óxido Férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

#### **b. Corrosión por cupla galvánica**

Deberá evitarse la conexión de la Red de Puesta a Tierra de hierro con armados enterrados conformados por metales más nobles. De ser necesaria una conexión de este tipo, se recomienda que la Red presente un área superficial mucho mayor que la del armado metálico.

#### **c. Corrosión bacteriana**

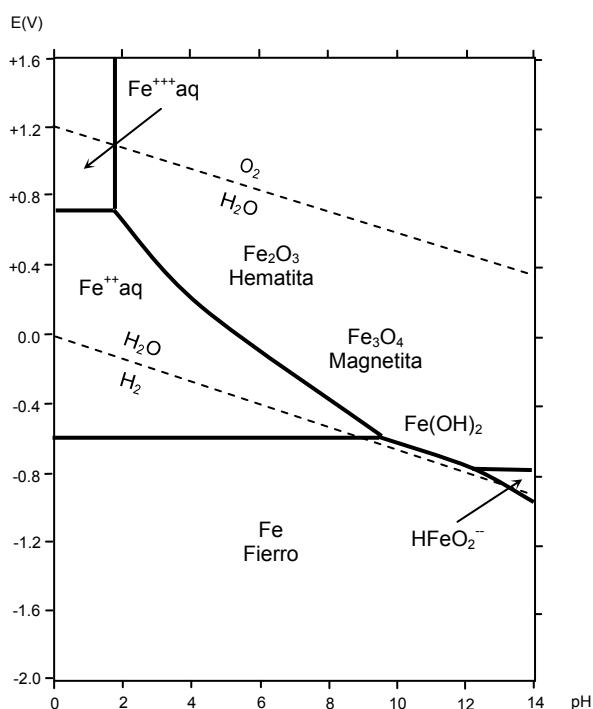
El efecto corrosivo de las bacterias anaeróbicas se verá favorecido por el desprendimiento de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) en las zonas catódicas que se produce en la corrosión de metales activos como el Hierro en Redes de Puesta a Tierra instaladas a profundidades mayores a 0,5 m, el cual normalmente es adsorbido sobre la superficie del metal y utilizado por las bacterias en la reducción de sulfatos. [44]

Deberá entonces preverse que tanto la concentración de ión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) como el Potencial Redox del suelo estén dentro de los límites recomendados.

En suelos químicamente muy agresivos será necesario instalar la Red de Puesta a Tierra rodeada por un relleno neutro o utilizar ciertos bactericidas en el lecho de tendido del conductor.

#### d. Diagrama de Pourbaix

Inestable en presencia de agua con un pH hasta de 9.6, se corroe también en soluciones acuosas no oxigenadas liberando hidrógeno; estas reacciones que son fuertes en medios ácidos, se apaciguan con el aumento del pH hasta cesar en el intervalo de 10 a 13, en que el metal resulta cubierto de una capa de óxido protector; sin embargo, a un pH superior a 13 las soluciones ya libres de agentes oxidantes resultan nuevamente corrosivas. [35]



**Figura 46.** Diagrama de Pourbaix del Hierro (para medio acuoso a 25 °C)

**e. Resistividad del Suelo**

Dada la propensión natural a la corrosión que presenta el hierro metálico enterrado en medios moderadamente agresivos, suelos de baja Resistividad favorecerán bastante el movimiento iónico de cualquier proceso previo de corrosión existente.

**6.6.3 Desempeño del Acero Inoxidable**

Material económicamente competitivo con el Cobre, su protección contra la corrosión se basa en la formación de una capa pasivante de óxido protector sobre el metal en presencia de oxígeno.

De este modo tiene un óptimo desempeño frente a la corrosión atmosférica; no obstante, al estar enterrado, su aireación se verá limitada o será mínima, por lo que necesitaría estar inmerso en un Suelo cuya composición química le permita renovar su capa pasivante protectora ante una eventual perforación de la misma.

Toda ausencia de Oxígeno, aún en forma localizada, en la superficie del Electrodo originará una zona Anódica en la que se iniciará el Proceso de Corrosión por Picadura, que se autoincentiva al reducirse cada vez más el pH al interior de ella, mientras que en el exterior se mantiene la zona Catódica alcalina protectora, progresando el fenómeno hasta que se produce la rotura física del Electrodo. [45]

No se recomienda entonces su uso en Redes de Puesta a Tierra con electrodos enterrados muy profundamente, especialmente en Suelos son finos y compactos, debido a que es un metal proclive a corroerse de manera acelerada en ausencia de oxígeno.



#### **6.6.4 Desempeño del Acero con electrodepositado superficial de cobre**

##### **electrolítico**

Viene siendo utilizado desde hace más de 75 años debido a su gran resistencia mecánica, alta conductividad y bajo incentivo a la codicia con mínima tasa de robos en instalaciones [46]

No obstante, es susceptible de sufrir una violenta corrosión interna y destrucción total en pocos años al formarse zonas anódicas en los intersticios de la capa de cobre originados por rayadura durante el transporte y/o instalación del electrodo. [38]

#### **6.7 Diseño para el control de la corrosividad del Suelo**

Generalmente, los métodos de mitigación o prevención de la corrosión están basados en la minimización de las corrientes de Corrosión que abandonan el electrodo; su aplicación perjudicaría el correcto desempeño de la Puesta a Tierra cuyo electrodo debe conducir y dispersar en el suelo corrientes de todo tipo.

Descartando el uso de la protección catódica por su costo y necesidad de mantenimiento, solo quedarían las posibilidades de uso de Electroodos resistentes a la corrosión y Rellenos conductivos estables y neutros, los cuales aplicados conjuntamente conducirán a la óptima preservación de la Red de Puesta a Tierra a largo plazo, sin menoscabo de la evacuación y dispersión de corrientes.

##### **6.7.1 Uso de metales altamente resistentes a la corrosión**

La evaluación conjunta muestra que el cobre presenta un mejor desempeño frente a la corrosión en la mayoría de suelos comparado con metales de menor inversión y desempeño inicial equivalente como el Hierro, el acero resistente a la corrosión y composiciones como el acero con electrodepositado superficial de cobre electrolítico, los cuales son más vulnerables a la corrosividad del Suelo.

Consecuentemente, para garantizar una larga duración de la Red de Puesta a Tierra enterrada en Suelos medianamente agresivos, no resultará conveniente el uso de otros metales así fueran aleaciones o composiciones especiales. [38]

#### **6.7.2 Uso de Relleno compacto y neutro**

La modificación del suelo que rodea al electrodo, como respuesta de un examen de la agresividad del suelo, reducirá sustancialmente el riesgo de corrosión.

Es por esto que en suelos muy agresivos se recomienda el uso de rellenos estables de pH neutro mezclados con el suelo natural, tal como la Bentonita, en los lechos de instalación de la Red de Puesta a Tierra, la cual es a la vez conductiva y limita la migración de sales corrosivas hacia el electrodo.

#### **6.7.3 Uso de conductor no hebrado**

A pesar de la alta resistencia a la corrosión del cobre, no se recomienda el uso de conductor cableado con hebras de muy pequeño diámetro debido a que en conjunto presentan una mayor superficie expuesta a corroerse por picadura en suelos agresivos.

Se debe preferir entonces el uso de conductor sólido de cobre en forma de pletina o bien de conductores de hebras gruesas en el diseño de Redes de Puesta a Tierra.

## CAPITULO VII

### APLICACION AL DISEÑO DE UNA RED DE PUESTA A TIERRA

Como ejemplo de aplicación de los conceptos expuestos en el diseño de Redes de Puesta a Tierra, desarrollaremos de manera abreviada el diseño básico de la ampliación de una Red de Puesta a Tierra de una Subestación de 60/22,9/10 kV ubicada al sur de Lima en la localidad de Lurín (**Plano 1**).

#### 7.1 Toma de Datos para el Diseño

Luego de llevarse a cabo un Concurso de Méritos para la Elaboración del Diseño de una Red de Puesta a Tierra por parte de una empresa Concesionaria del Sistema Eléctrico en nuestro medio, se dan inicio a las actividades de ingeniería que se desarrollan tanto en el campo como en gabinete, con las cuales se da cumplimiento a los objetivos y exigencias planteados en las Especificaciones Técnicas de las Bases del Concurso, cuyo resumen es el siguiente:

##### a. **Datos y Requerimientos Técnicos**

La información y los datos para el diseño de la Red de Puesta a Tierra suministrados por la empresa Concesionaria son de 1 ohm para la Resistencia de Dispersión y de 0,5 s para el Tiempo de Aclaramiento de Falla de la protección de respaldo.

Por razones de estandarización interna, el Concesionario requirió al Consultor un valor de 25 kA como Corriente de Diseño y una sección de 180 mm<sup>2</sup> ( $\approx$  350 AWG) de conductor de cobre desnudo.

**Tabla 18.** Corrientes de Falla previstas con un horizonte de 30 años

Tensión Nominal (kV)	Falla Trifásica, 3F-T		Falla Monofásica, 1F-T	
	$I_K''$ (kA)	$S_K''$ (MVA)	$I_{KA}''=3 I_0$ (kA)	$S_{KA}''$ (MVA)
60.0	8.3	860.8	10.8	372.5
22.9	13.7	545.1	18.0	237.5
10.0	19.9	345.2	-	-

Asimismo, la configuración de las instalaciones en su Etapa Constructiva Final proyectada son otorgados al Consultor **(Plano 2)**.

**b. Determinación de las Resistividades del Suelo en Modelo de 2 Estratos**

Las Medidas de Resistividad Aparente se realizaron con el Método de Wenner al interior y al exterior de la instalación en zonas no ocupadas por la Red de Puesta a Tierra y suficientemente alejadas de la misma **(Plano 3)**; la Característica de Sondeo Geoeléctrico (CSG) fue obtenida de las medidas en el exterior por ser las mas desfavorables, siendo luego procesadas con el Método de Procesamiento de la Universidad de Kiushu.

**c. Determinación de Etapas constructivas**

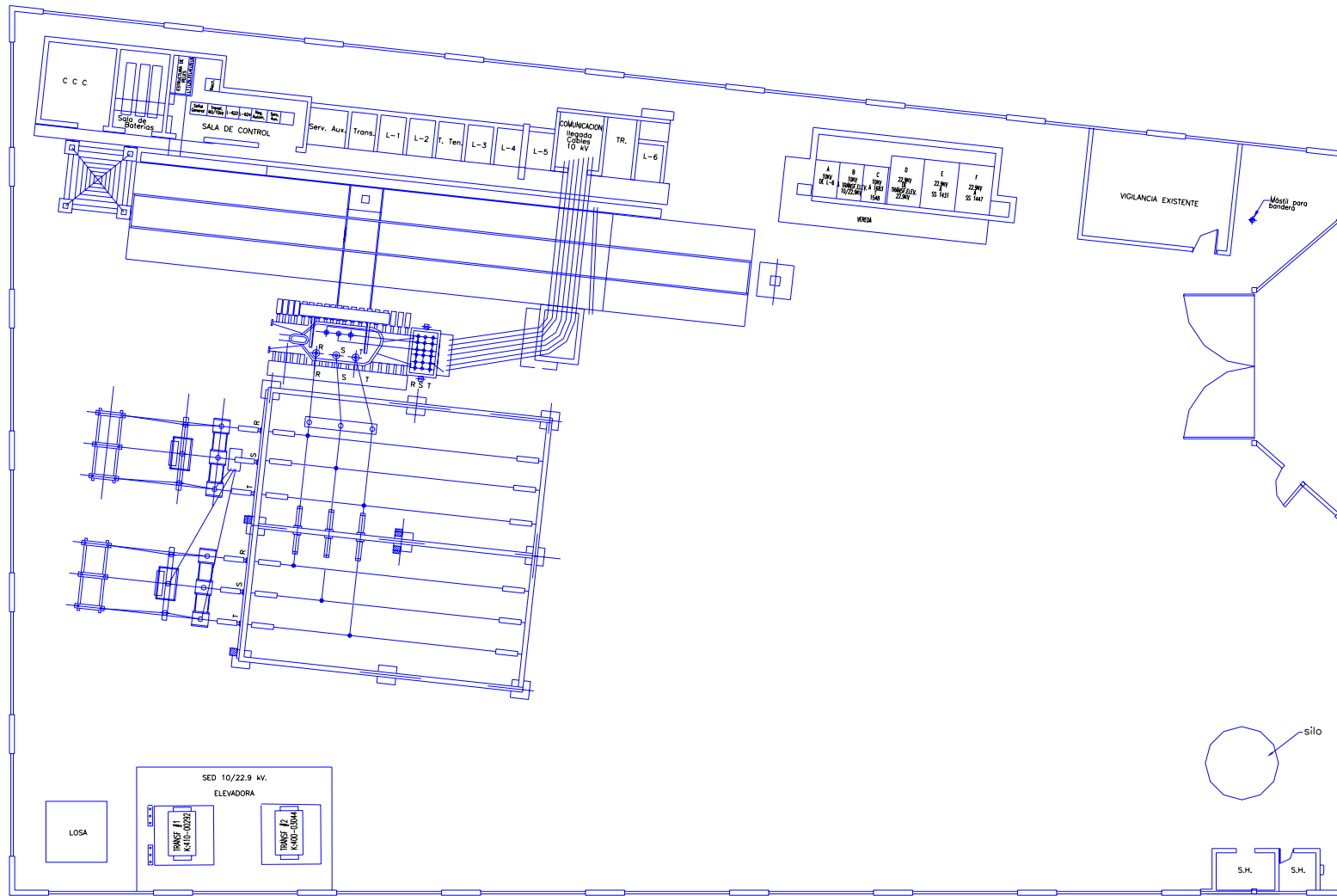
Considerando que se trata de un área trapezoidal de 1983 m<sup>2</sup>, no era posible aplicar un mallado cuadrangular, por lo que se tuvo que optar por un mallado de forma trapezoidal con idénticas dimensiones laterales, a instalarse en cuatro Etapas constructivas:

- Etapa A: Inicio del tendido de la Red de Puesta a Tierra y construcción de las cimentaciones para equipos en el área libre del patio, mientras las instalaciones existentes continúan en funcionamiento.
- Etapa B: Tendido y conexión inmediatos con la Etapa A ya instalada y en servicio previa demolición de las instalaciones antiguas existentes. Se

dejan todavía en funcionamiento la antigua sala de control, celdas de 22,9 kV y 10kV, sala de baterías, estructura con antena y la Subestación de Distribución elevadora de 10/22,9 kV.

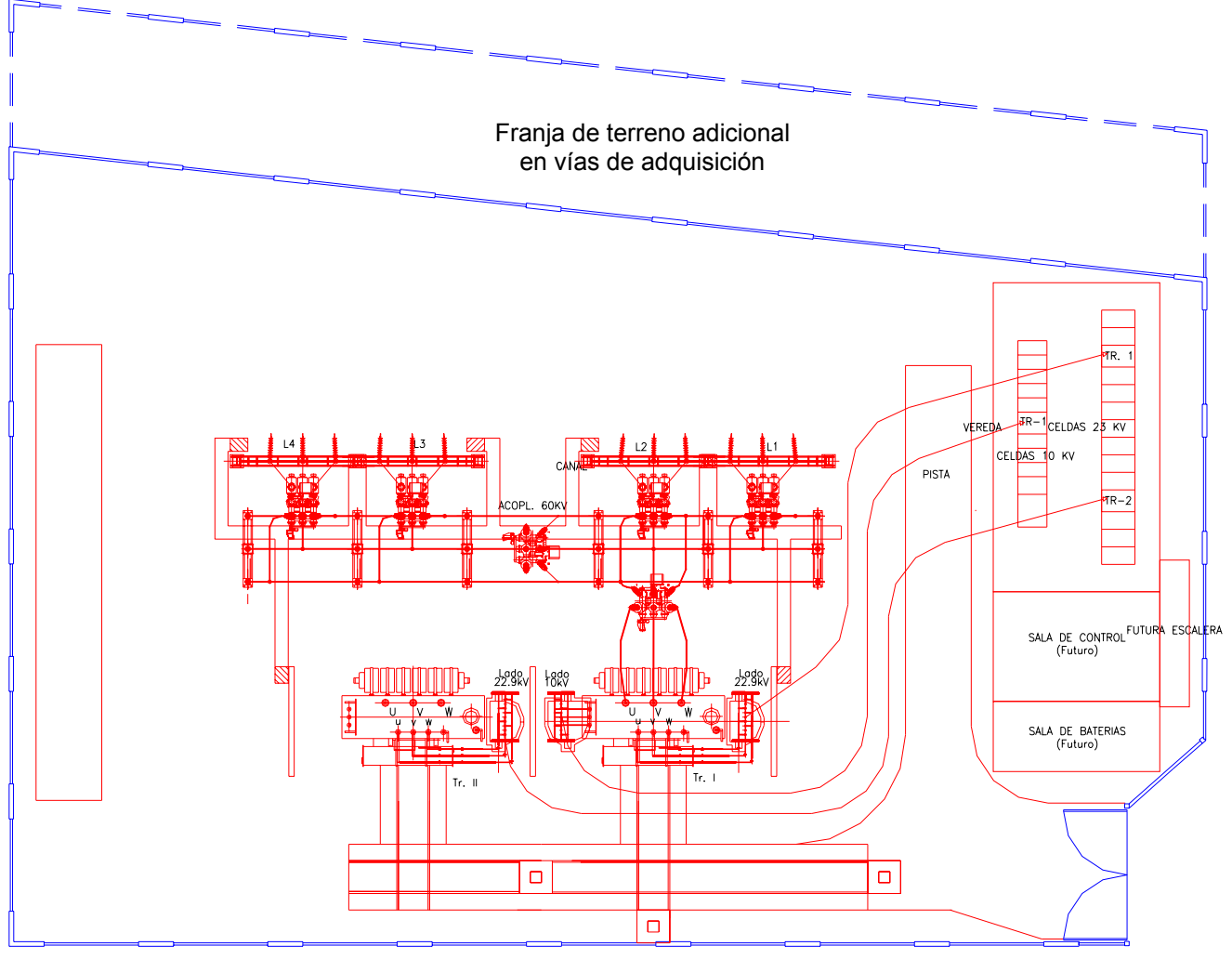
- Etapa C: A ser tendida e inmediatamente conectada a la nueva Red (Etapas A+B), previa demolición de las celdas de 22,9kV y 10 kV, desmontaje y reubicación de la estructura con antena, de la antigua sala de control y de la sala de baterías.
- Etapa D: Ampliación de la Red hacia franja de terreno en vías de adquisición, previa demolición de la pared Este del cerco perimétrico.

No obstante que el área de cobertura de cada malla disminuía en una dirección, los cálculos obedecieron a la condición crítica determinada por el mallado de mayor cobertura. **(Plano 4)**

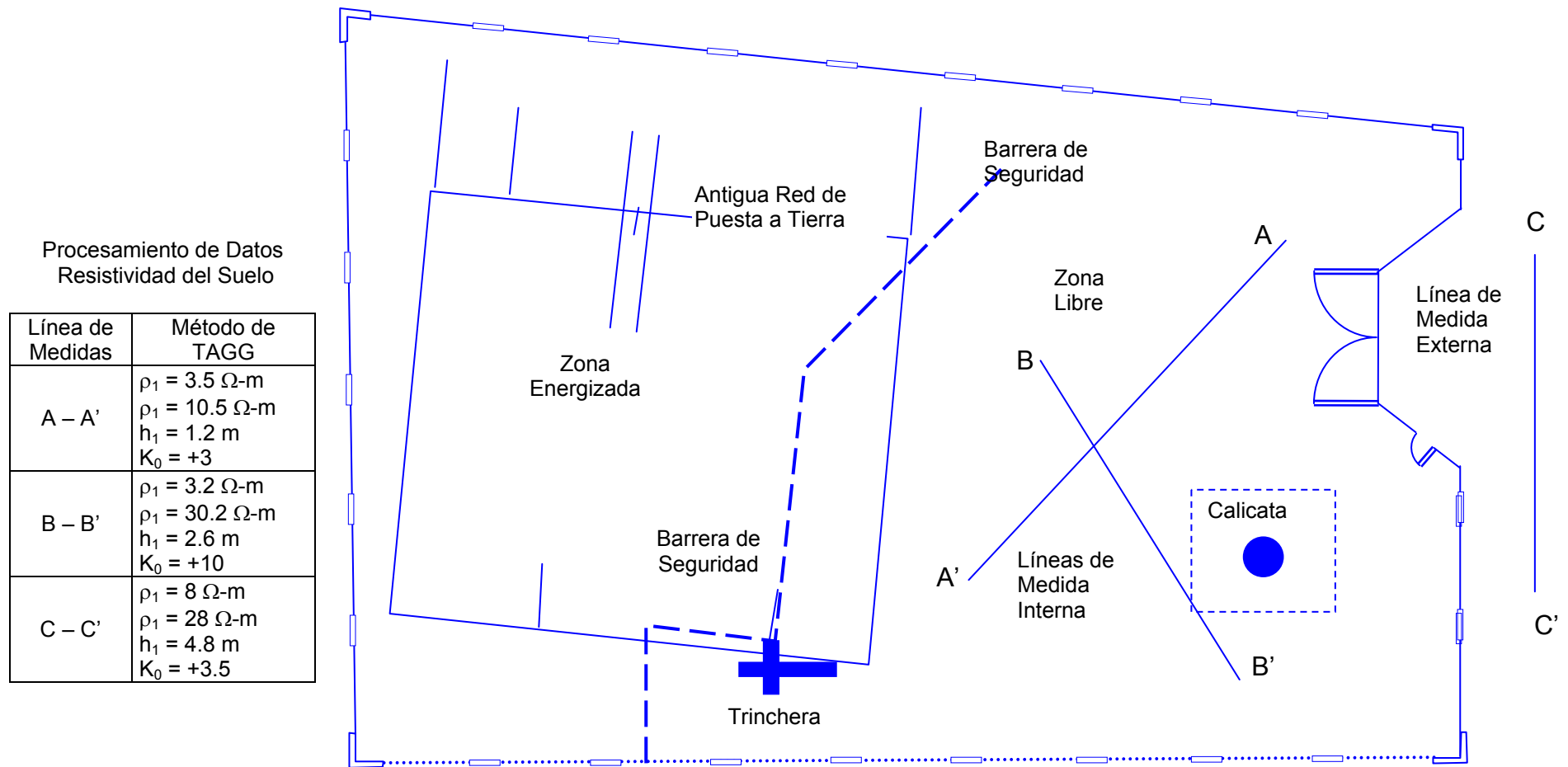


**Plano 1.** Disposición General de Construcciones y Equipos existentes en la Subestación a ser mejorada

Franja de terreno adicional  
en vías de adquisición

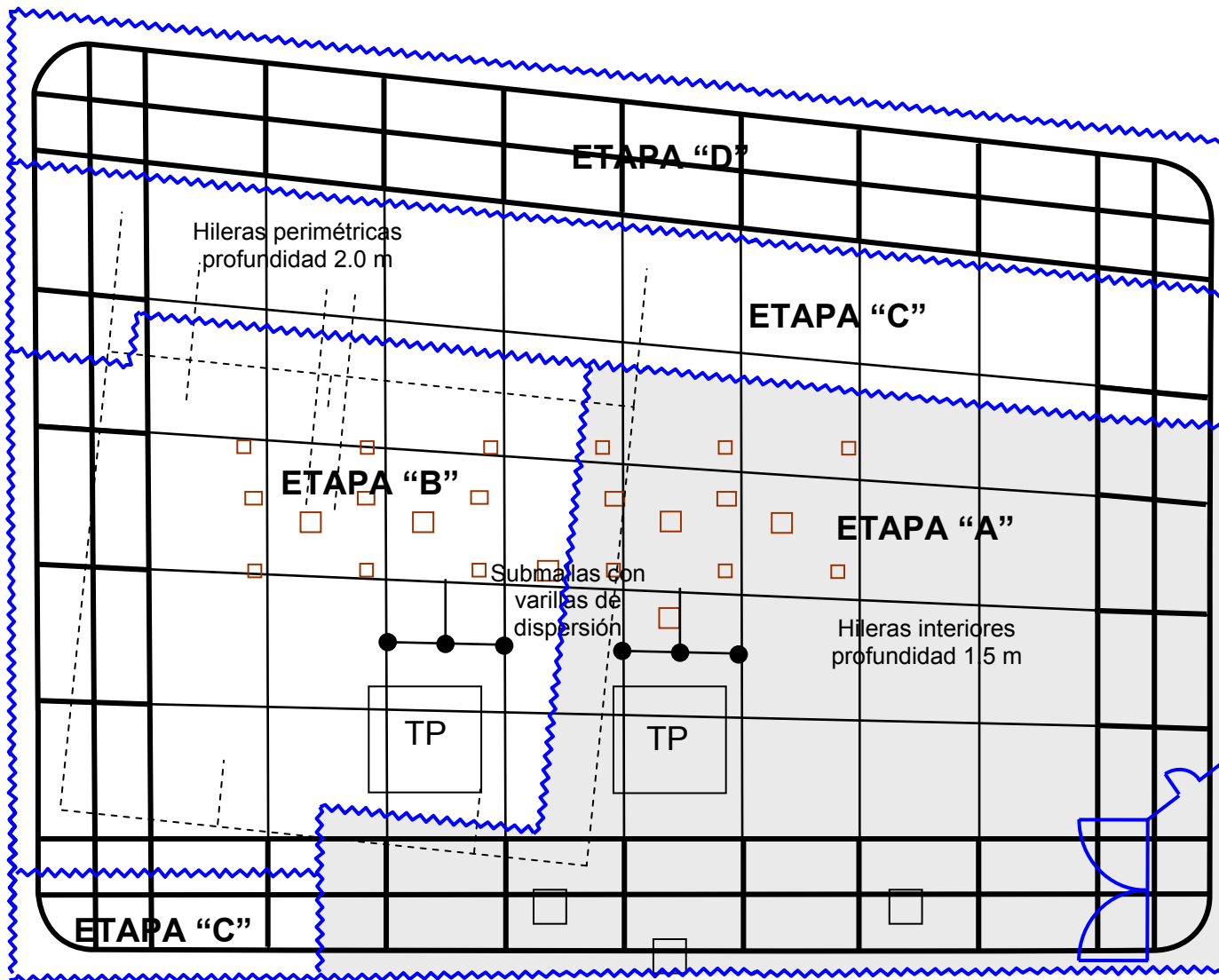


**Plano 2.** Disposición Final de Equipos y Construcciones proyectados para la Etapa Final de ampliación de la Subestación





**Plano 3.** Calicata, Trinchera y Líneas de Medidas Wenner



**Plano 4.** Esquema de Instalación por Etapas de la Nueva Red de Puesta a Tierra

**d. Exámenes Técnicos especializados de la Corrosividad del Suelo**

Las proyecciones del comportamiento del Suelo y su agresividad respecto del Conductor se desarrollaron tomando las siguientes mediciones:

- Medida de los Potenciales de Electrodo

Dicha verificación se llevó a cabo con una celda Cu-CuSO<sub>4</sub> en la antigua Red de Puesta a Tierra existente, obteniéndose los siguientes Potenciales de Electrodo:

**Tabla 19.** Potenciales de Electrodo medidos en la antigua Red de Puesta a Tierra existente

Puntos de Medida	E <sub>CORR</sub> (mV) Cu-CuSO <sub>4</sub>	E <sub>CORR</sub> (mV) H <sub>2</sub> /H <sup>+</sup>
A	-332.6	-16.6
B	-339.2	-23.2
C	-339.5	-23.5
D	-324.5	-8.5
E	-330.0	-14
F	-328.0	-12

- Medida de la Temperatura del Suelo

Se cumplieron mediante el uso de un termómetro de Mercurio con rangos desde -10°C hasta 70°C, introduciéndolo una longitud de 0.2 m paralelamente a la superficie del Suelo a diferentes profundidades (0.5 m, 1.0 m y 1.5 m), previa habilitación de una guía.

**Tabla 20.** Resultados de las medidas de Temperatura

Profundidad (m)	T <sub>SUELO</sub> (°C)	T <sub>SOMBRA</sub> (°C)	H.R.(%)	Hora
0,5	23,5	21	92	11:05
1,0	22,5	23	85	11:25
1,5	22,4	24	89	11:45

- Análisis de Laboratorio

Se preparó un protocolo especial para los análisis que permitiese evaluar la agresividad del suelo y su comportamiento electrolítico y electroquímico en muestras tomadas a diferentes profundidades (0.8 m, 1.2 m y 1.6 m).

**Tabla 21.** Parámetros asociados al comportamiento Electroquímico

Muestras	pH	Humedad (%)	Potencial Redox (mV)	Sales Solubles (%)
CAL – 0080M	7.4	17.10	95	0.414
CAL – 0120M	7.7	24.59	92	0.195
CAL – 0160M	7.4	20.49	100	0.092

**Tabla 22.** Contenido porcentual (%) de sales a diferentes profundidades

Muestras	Cloruros	Sulfatos	Carbonatos	Nitratos
CAL – 0080M	0.206	0.016	9.85	0.004
CAL – 0120M	0.082	0.018	6.25	0.003
CAL – 0160M	0.020	0.026	0.98	0.001

**Tabla 23.** Parámetros asociados a la Conductividad del Suelo

Muestras	Conductividad (ms/cm)	Permeabilidad (m/s)
CAL - 0080M	1311	$1.9 \times 10^{-5}$
CAL – 0120M	876	$3.9 \times 10^{-4}$
CAL – 0160M	380	$6.0 \times 10^{-6}$

**Tabla 24.** Granulometría detallada de las muestras de Suelo

Tamiz	CAL – 0080M	CAL – 0120M	CAL – 0160M
+16 (1.19 mm)	3.51	7.50	0.48
+80 (0.177 mm)	31.71	1.69	37.97
+100 (0.150 mm)	8.61	1.13	6.57
+200 (0.075 mm)	21.80	1.79	27.34
-200 (< 0.075 mm)	34.37	87.89	27.64
<b>Total (%)</b>	100.00	100.00	100.00

- Evaluación de la agresividad del suelo en el cobre

En base a los resultados de los análisis de laboratorio se examinaron las posibles condiciones que pudiesen configurar algún tipo de agresividad en el suelo.

- Corrosión por Cupla Galvánica, posibilidad descartada
- Corrosión por presencia de oxígeno, posibilidad descartada
- Corrosión bacteriana, posibilidad descartada por ser mínima
- Corrosión por efecto del pH, posibilidad descartada
- Corrosión por la salinidad del suelo, posibilidad descartada
- Efecto de la Resistividad del Suelo, hay posibilidad, pero no condiciones favorables para la corrosión.

El análisis fue corroborado con la inspección del conductor de la Red de Puesta a Tierra existente con más de 30 años de servicio, que solo mostraba Corrosión superficial en la capa periférica (**Foto 01**) y formación de Sulfatos entre las hebras internas (**Foto 02**).

Paralelamente al estudio netamente eléctrico y de la corrosividad del suelo, también se realizaron estudios especializados de la estratigrafía del sitio a cargo de un geólogo.



**Foto 01.** Superficie del conductor enterrado de la Red de Puesta a Tierra existente; se observa sólo una delgada capa de Sulfato de Cobre producto de la corrosión bacteriana, no obstante se mantiene en buen estado.



**Foto 02.** Doblez en Conductor de la Red de Puesta a Tierra para descubrir la situación de las hebras internas, que presentan una delgada capa de Sulfato de Cobre, manteniendo la superficie cubierta en buen estado.

## 7.2 Elaboración del Expediente Técnico

### a. **Memoria Descriptiva**

Se puntualizaron de manera resumida las principales características del estudio realizado; los objetivos, la ubicación, los alcances, la información de base, los criterios y normas técnicas y los condicionantes del mismo.

También incluye la descripción del desarrollo de las diferentes actividades y etapas del estudio así como los resultados intermedios y finales, resumiendo de otro lado las previsiones de adquisición de materiales y los requerimientos para la obra, planteándose cronogramas respaldados por el presupuesto general evaluados para la adquisición de los suministros y el montaje.

### b. **Criterios de Diseño y Cálculos Justificativos**

Se incluyó una sección con los Cálculos Justificativos Eléctricos del diseño de la Red de Puesta a Tierra efectuados siguiendo la metodología de cálculo recomendada por el Estándar IEEE 80-2000 para cada Etapa constructiva de la futura Red de Puesta a Tierra consignándose tanto la secuencia como el procedimiento de cálculo y los criterios de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica concurrentes en la instalación. **(Tablas 25 a 28).**

Asimismo, se encargó ejecutar el Reporte Gráfico del cumplimiento de los potenciales de Toque y Paso de la Red con los Potenciales Admisibles recomendados por el Estándar IEEE 80-2000 en la Etapa Constructiva más exigente de la instalación de la Red de Puesta a Tierra, que en el presente caso corresponde al 65% de cobertura del Área, utilizando un programa computarizado basado en el Método de Elementos Finitos (FEM). **(Plano 5)**

**Tabla 25.** Cálculo de la Red de Puesta a Tierra - Etapa A

**Datos de Entrada**

**Parámetros de Operación**

Corriente Futura de Falla (22,9 kV)	$I_F =$	25 kA
Corriente Máxima de Falla (AT, MT) de Operación	$I_F =$	10.4 kA
Tiempo de Aclaramiento de Falla Máximo	$t_{max} =$	0.5 s
Factor de División de Corriente	$F_D =$	1 p.u.
Resistividad de la Grava	$\rho_{GRAVA} =$	4000 $\Omega$ -m
Espesor del piso de Grava	$h_S =$	0.15 m
Profundidad de enterramiento de la Red (1.5 m Red Interior, 2.0 m tres hileras perimétricas)	$H =$	1.7 m

**Características Propias de la Red**

Área Total disponible (largo x ancho)	$A_{DISP} =$	1983 m <sup>2</sup>
Área de Cobertura de la Red	$A =$	800 m <sup>2</sup>
Largo Máximo de la Red	$L_x =$	39.7 m
Ancho Máximo de la Red	$L_y =$	26.5 m
Longitud perimétrica	$L_p =$	128.5 m
Diagonal Máxima Red Cuadrangular	$D_m =$	46 m
Distancia entre hileras	$D =$	6.1 m
Cantidad de Electrodo Verticales	$\# =$	0 p.u.
Longitud de Electrodo Horizontal enterrado	$L =$	393.8 m

**Características del Suelo en Modelo Estratificado**

Resistividad del Primer Estrato	$\rho_1 =$	8 $\Omega$ -m
Resistividad del Segundo Estrato	$\rho_2 =$	28 $\Omega$ -m
Espesor del Primer Estrato	$h_1 =$	4.8 m

**Resultados**

**Cálculo de la Sección del Conductor de la Red**

Relación X/R	$X/R =$	5 p.u.
Factor de Seguridad por Esfuerzos Mecánicos	$F.S. =$	1.5 p.u.
Sección de Conductor Calculada	$S_{calc} =$	164.22mm <sup>2</sup>
Sección de Conductor mas próxima en Catálogos	$S =$	180mm <sup>2</sup>

**Potenciales de Toque y Paso Tolerables**

Potencial de Toque Tolerable (50kg)	$V_{TA\ 50kg} =$	921.65 V
Potencial de Paso Tolerable (50kg)	$V_{PA\ 50kg} =$	3194.46 V
Potencial de Toque Tolerable al Exterior (50kg)	$V_{PA\ 50kg\ ext} =$	171.92 V

**Potenciales de Toque y Paso de la Red**

Potencial de Toque en el Área de la Red	$V_{TR} =$	277.44 V
Potencial de Paso en el Área de la Red	$V_{PR} =$	91.05 V
Potencial de Paso al Exterior de la Red	$V_{PR} =$	91.05 V

**Resistencia de Dispersión de la Red**

Coeficiente $K_1$ Formula de Schwarz	$K_1 =$	1.23 p.u.
Coeficiente $K_2$ Formula de Schwarz	$K_2 =$	4.88 p.u.
Resistencia del Reticulado Schwarz	$R_{TOTAL} =$	0.134 $\Omega$



**Tabla 26.** Cálculo de la Red de Puesta a Tierra- Etapa A + B

**Datos de Entrada**

**Parámetros de Operación**

Corriente Futura de Falla (22,9 kV)	$I_F =$	25 kA
Corriente Máxima de Falla (AT, MT) de Operación	$I_F =$	25 kA
Tiempo de Aclaramiento de Falla Máximo	$t_{max} =$	0.5 s
Factor de División de Corriente	$F_D =$	1 p.u.
Resistividad de la Grava	$\rho_{GRAVA} =$	4000 $\Omega$ -m
Espesor del piso de Grava	$h_S =$	0.15 m
Profundidad de enterramiento de la Red (1.5 m Red Interior, 2.0 m tres hileras perimétricas)	$H =$	1.7 m

**Características Propias de la Red**

Área Total disponible (largo x ancho)	$A_{DISP} =$	1983 m <sup>2</sup>
Área de Cobertura de la Red	$A =$	1302 m <sup>2</sup>
Largo Máximo de la Red	$L_x =$	52.3 m
Ancho Máximo de la Red	$L_y =$	27.5 m
Longitud perimétrica	$L_p =$	153.75 m
Diagonal Máxima Red Cuadrangular	$D_m =$	58.3 m
Distancia entre hileras	$D =$	6.1 m
Cantidad de Electrodo Verticales	$\# =$	0 p.u.
Longitud de Electrodo Horizontal enterrado	$L =$	606.8 m

**Características del Suelo en Modelo Estratificado**

Resistividad del Primer Estrato	$\rho_1 =$	8 $\Omega$ -m
Resistividad del Segundo Estrato	$\rho_2 =$	28 $\Omega$ -m
Espesor del Primer Estrato	$h_1 =$	4.8 m

**Resultados**

**Cálculo de la Sección del Conductor de la Red**

Relación X/R	$X/R =$	5 p.u.
Factor de Seguridad por Esfuerzos Mecánicos	$F.S. =$	1.5 p.u.
Sección de Conductor Calculada	$S_{calc} =$	164.22mm <sup>2</sup>
Sección de Conductor mas próxima en Catálogos	$S =$	180mm <sup>2</sup>

**Potenciales de Toque y Paso Tolerables**

Potencial de Toque Tolerable (50kg)	$V_{TA\ 50kg} =$	921.65V
Potencial de Paso Tolerable (50kg)	$V_{PA\ 50kg} =$	3194.46V
Potencial de Toque Tolerable al Exterior (50kg)	$V_{PA\ 50kg\ ext} =$	171.92V

**Potenciales de Toque y Paso de la Red**

Potencial de Toque en el Área de la Red	$V_{TR} =$	471.18V
Potencial de Paso en el Área de la Red	$V_{PR} =$	158.32V
Potencial de Paso al Exterior de la Red	$V_{PR} =$	158.32V

**Resistencia de Dispersión de la Red**

Coefficiente $K_1$ Formula de Schwarz	$K_1 =$	1.24 p.u.
Coefficiente $K_2$ Formula de Schwarz	$K_2 =$	4.93 p.u.
Resistencia del Reticulado Schwarz	$R_{TOTAL} =$	0.104 $\Omega$

**Tabla 27.** Cálculo de la Red de Puesta a Tierra- Etapa A + B + C

**Datos de Entrada**

**Parámetros de Operación**

Corriente Futura de Falla (22,9 kV)	$I_F =$	25kA
Corriente Máxima de Falla (AT, MT) de Operación	$I_F =$	25kA
Tiempo de Aclaramiento de Falla Máximo	$t_{max} =$	0.5s
Factor de División de Corriente	$F_D =$	1 p.u.
Resistividad de la Grava	$\rho_{GRAVA} =$	4000 $\Omega$ -m
Espesor del piso de Grava	$h_S =$	0.15m
Profundidad de enterramiento de la Red (1.5 m Red Interior, 2.0 m tres hileras perimétricas)	$H =$	1.7m

**Características Propias de la Red**

Área Total disponible (largo x ancho)	$A_{DISP} =$	1983m <sup>2</sup>
Área de Cobertura de la Red	$A =$	1681m <sup>2</sup>
Largo Máximo de la Red	$L_x =$	52.5m
Ancho Máximo de la Red	$L_y =$	34.5m
Longitud perimétrica	$L_p =$	168.5m
Diagonal Máxima Red Cuadrangular	$D_m =$	62.5m
Distancia entre hileras	$D =$	6.1m
Cantidad de Electrodo Verticales	$\# =$	0 p.u.
Longitud de Electrodo Horizontal enterrado	$L =$	785.3m

**Características del Suelo en Modelo Estratificado**

Resistividad del Primer Estrato	$\rho_1 =$	8 $\Omega$ -m
Resistividad del Segundo Estrato	$\rho_2 =$	28 $\Omega$ -m
Espesor del Primer Estrato	$h_1 =$	4.8m

**Resultados**

**Cálculo de la Sección del Conductor de la Red**

Relación X/R	$X/R =$	5 p.u.
Factor de Seguridad por Esfuerzos Mecánicos	$F.S. =$	1.5 p.u.
Sección de Conductor Calculada	$S_{calc} =$	164.22mm <sup>2</sup>
Sección de Conductor mas próxima en Catálogos	$S =$	180mm <sup>2</sup>

**Potenciales de Toque y Paso Tolerables**

Potencial de Toque Tolerable (50kg)	$V_{TA\ 50kg} =$	921.65V
Potencial de Paso Tolerable (50kg)	$V_{PA\ 50kg} =$	3194.46V
Potencial de Toque Tolerable al Exterior (50kg)	$V_{PA\ 50kg\ ext} =$	171.92V

**Potenciales de Toque y Paso de la Red**

Potencial de Toque en el Área de la Red	$V_{TR} =$	393.54V
Potencial de Paso en el Área de la Red	$V_{PR} =$	134.94V
Potencial de Paso al Exterior de la Red	$V_{PR} =$	134.94V

**Resistencia de Dispersión de la Red**

Coeficiente $K_1$ Formula de Schwarz	$K_1 =$	1.27 p.u.
Coeficiente $K_2$ Formula de Schwarz	$K_2 =$	5.00 p.u.
Resistencia del Reticulado Schwarz	$R_{TOTAL} =$	0.092 $\Omega$

**Tabla 28.** Cálculo de la Red de Puesta a Tierra - Etapa A + B + C + D

**Datos de Entrada**

**Parámetros de Operación**

Corriente Futura de Falla (22,9 kV)	$I_F =$	25kA
Corriente Máxima de Falla (AT, MT) de Operación	$I_F =$	25kA
Tiempo de Aclaramiento de Falla Máximo	$t_{max} =$	0.5s
Factor de División de Corriente	$F_D =$	1 p.u.
Resistividad de la Grava	$\rho_{GRAVA} =$	4000 $\Omega$ -m
Espesor del piso de Grava	$h_s =$	0.15m
Profundidad de enterramiento de la Red (1.5 m Red Interior, 2.0 m tres hileras perimétricas)	$H =$	1.7m

**Características Propias de la Red**

Área Total disponible (largo x ancho)	$A_{DISP} =$	1983m <sup>2</sup>
Área de Cobertura de la Red	$A =$	1983m <sup>2</sup>
Largo Máximo de la Red	$L_x =$	52.3m
Ancho Máximo de la Red	$L_y =$	40.5m
Longitud perimétrica	$L_p =$	177m
Diagonal Máxima Red Cuadrangular	$D_m =$	66.3m
Distancia entre hileras	$D =$	6.1m
Cantidad de Electrodo Verticales	$\# =$	0 p.u.
Longitud de Electrodo Horizontal enterrado	$L =$	1018m

**Características del Suelo en Modelo Estratificado**

Resistividad del Primer Estrato	$\rho_1 =$	8 $\Omega$ -m
Resistividad del Segundo Estrato	$\rho_2 =$	28 $\Omega$ -m
Espesor del Primer Estrato	$h_1 =$	4.8m

**Resultados**

**Calculo de la Sección del Conductor de la Red**

Relación X/R	$X/R =$	5 p.u.
Factor de Seguridad por Esfuerzos Mecánicos	$F.S. =$	1.5 p.u.
Sección de Conductor Calculada	$S_{calc} =$	164.22mm <sup>2</sup>
Sección de Conductor mas próxima en Catálogos	$S =$	180mm <sup>2</sup>

**Potenciales de Toque y Paso Tolerables**

Potencial de Toque Tolerable (50kg)	$V_{TA\ 50kg} =$	921.65V
Potencial de Paso Tolerable (50kg)	$V_{PA\ 50kg} =$	3194.46V
Potencial de Toque Tolerable al Exterior (50kg)	$V_{PA\ 50kg\ ext} =$	171.92V

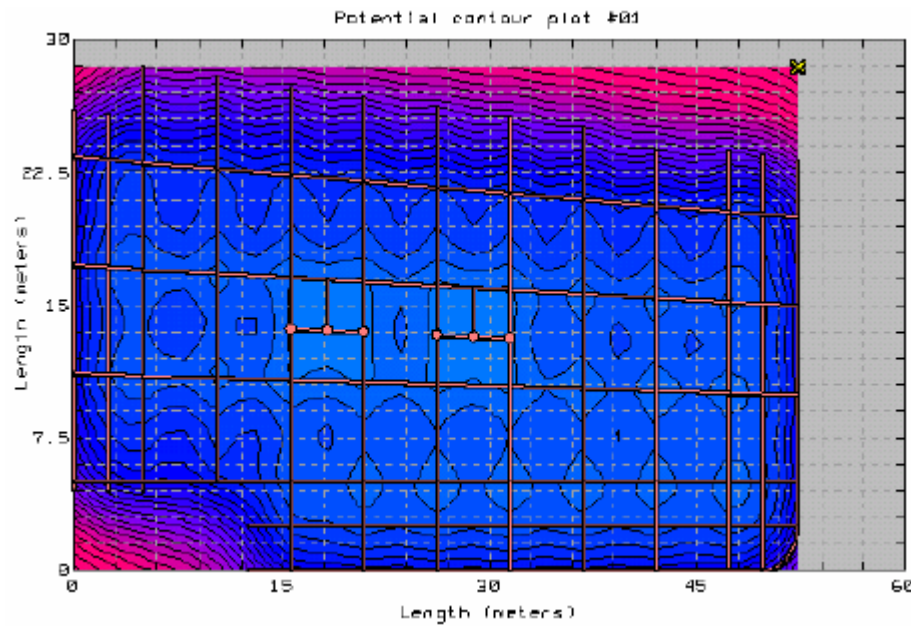
**Potenciales de Toque y Paso de la Red**

Potencial de Toque en el Área de la Red	$V_{TR} =$	339.54V
Potencial de Paso en el Área de la Red	$V_{PR} =$	119.82V
Potencial de Paso al Exterior de la Red	$V_{PR} =$	119.82V

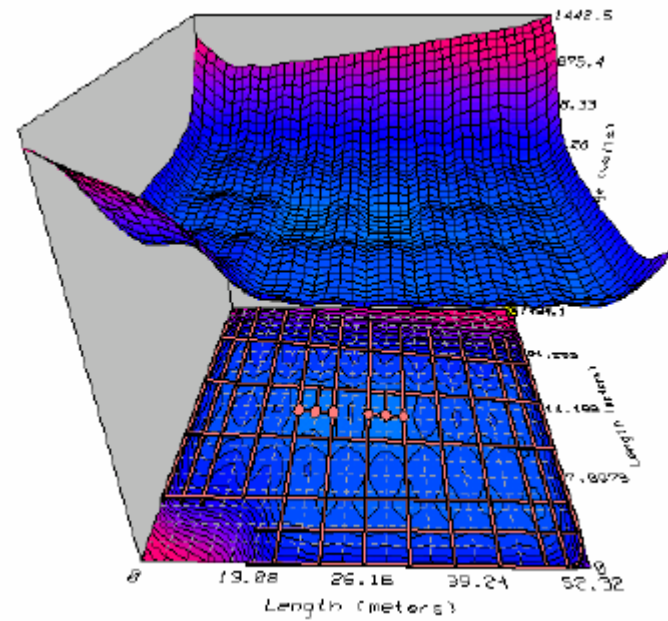
**Resistencia de Dispersión de la Red**

Coeficiente $K_1$ Formula de Schwarz	$K_1 =$	1.29 p.u.
Coeficiente $K_2$ Formula de Schwarz	$K_2 =$	5.05 p.u.
Resistencia del Reticulado Schwarz	$R_{TOTAL} =$	0.085 $\Omega$

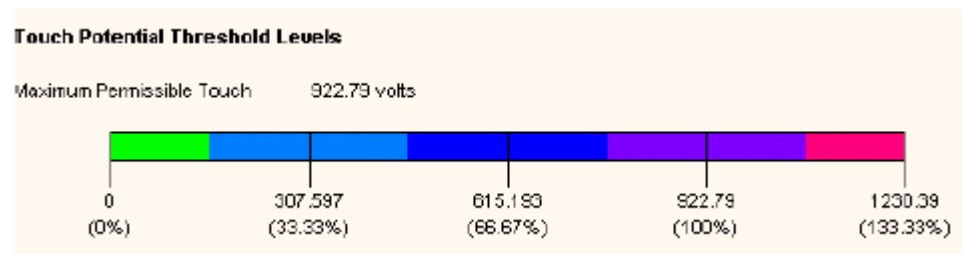
Distribución (vista de planta) de los Potenciales de Toque dentro de la malla



Distribución (vista en 3D) de los Potenciales de Toque



Código de colores para los valores de Potenciales de Toque y Paso presentes en la Red durante una Falla a Tierra



**Plano 5.** Evaluación mediante Software del Perfil de Potenciales de la Red de Puesta a Tierra Proyectada en su Etapa Constructiva más exigente

**c. Especificaciones Técnicas de los Suministros**

Se describió de manera pormenorizada cada uno de los componentes, materiales e insumos a ser utilizados en la instalación de la Red de Puesta a Tierra, definiendo los alcances de la función de cada uno de ellos, unidades de medida, condiciones de servicio y operación, Normas aplicables para el control de calidad y pruebas, calificación de conformidad, transporte y manipulación, marcas de envío, información técnica de respaldo, embalaje y pautas de Almacenamiento y Recepción.

Los principales componentes son:

- Conductores de Cobre para las hileras de la Red
- Varillas de cobre de sección cilíndrica.
- Moldes de soldadura exotérmica.
- Cartuchos de carga fungible de soldadura.
- Piedra picada o grava.

**d. Especificaciones de Construcción y Montaje**

Se incluyó las especificaciones particulares para el contrato de construcción civil y de montaje electromecánico de la Red de Puesta a Tierra, definiendo los alcances del contrato, las condiciones de contratación, las condiciones que afectan la obra, la observación y el cumplimiento de las leyes, la cesión del contrato o los subcontratos, cronograma de ejecución de obra, plazos contractuales, cuaderno de obra, organigrama para la ejecución de obra, leyes sociales, seguridad e higiene, herramientas y equipos de la construcción, criterios de inspección para elaborar ordenes de cambio y/o modificaciones, rechazos, daños de obra, limpieza y disposición de desechos y residuos y cumplimiento con la mano de obra.

En lo referente a la construcción civil se planteó el orden estratégico de las obras de instalación, las actividades y trabajos preliminares, las dimensiones y proceso de excavación de las zanjas, los taludes, los asomos hacia las cimentaciones y la antigua Red de Puesta a Tierra existente, la recuperación de la piedra picada, la inspección y pruebas del montaje civil.

En lo concerniente al montaje electromecánico se especificaron las profundidades netas del tendido, la configuración de las hileras rectilíneas, de las mallas y el clavado de los electrodos verticales.

Asimismo se especificaron en planos aparte los puntos de salida para conexión externa según forma de conexión termosoldada, se fijaron los registros de terminales de conexión, inspección y pruebas así como las medidas de verificación final de la Resistencia de Dispersión y de los Potenciales de Toque y de Paso.

**e. Metrados y Presupuesto de Obra**

Los metrados, cantidades y presupuesto de obra fueron estructurados en una tabla debidamente diferenciada en función de la filiación de los ítems respectivos (**Tabla 29**), estando compuesta de los siguientes rubros:

- Suministro electromecánico.  
Conductores y varillas de cobre, conectores y terminales, moldes cartuchos de carga de soldadura exotérmica, accesorios de instalación, materiales menores, herramientas y accesorios fungibles.
  
- Montaje Electromecánico y obras civiles  
Demoliciones, desmantelamiento, recuperación y obras civiles.

**Tabla 29.** Metrados y Presupuesto Etapa A+B+C+D

ITEM	DESCRIPCION	Unidad	Metrado	Precio Unit (S/.)	Parcial (S/.)	SubTotal (S/.)	Total (S/.)
<b>A</b>	<b>SUMINISTRO ELECTROMECHANICO</b>						
<b>1.0</b>	<b>Conductores de Cobre y Varillas de Cobre</b>						
1.1	Conductor desnudo de Cobre blando puro de 180 mm <sup>2</sup>	m	1,460.00	35.00	51,100.00		
1.2	Conductor forrado multihebra de cobre blando puro de 180 mm <sup>2</sup>	m	5.00	25.00	125.00		
1.3	Varilla de cobre desnudo de 5/8" (16mm) x 8' (2.44m), con punta en una extremidad	c/u	6.00	105.00	630.00		
<b>2.0</b>	<b>Conectores y Terminales</b>						
2.1	Conector Paralelo de Bronce, para conductores de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	6.00	25.00	150.00		
2.2	Conector bimetálico paralelo para conductor Cu de 180 mm <sup>2</sup> , Fe redondo de 13 mm	c/u	14.00	15.00	210.00		
<b>3.0</b>	<b>Moldes de Soldadura (Cadweld o similar)</b>						
3.1	Molde de Soldadura Exotérmica (XB) para unión en cruz de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	4.00	1750.00	7,000.00		
3.2	Molde de Soldadura Exotérmica (TA) para unión en "T" de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	4.00	450.00	1,800.00		
3.3	Molde de Soldadura Exotérmica (PT) para unión de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	4.00	450.00	1,800.00		
3.4	Molde de Soldadura Exotérmica (GL) para unión de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> a terminal pletina de cobre de (1/16" x 1"), de 1 ó 2 agujeros de (1/2")	c/u	4.00	450.00	1,800.00		
3.5	Molde de Soldadura Exotérmica (GR) para unión de conductor horizontal de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con cabeza de varilla de Cobre Desnudo de 5/8" (16mm diam) x 8' (2.44m)	c/u	2.00	450.00	900.00		
3.6	Molde de Soldadura Exotérmica (TP) para unión de conductor horizontal de cobre de 180 mm <sup>2</sup> a riel de rodamiento del transformador de potencia.	c/u	1.00	450.00	450.00		
<b>4.0</b>	<b>Cartuchos de Carga de Soldadura (Cadweld o similar)</b>						
4.1	Cartuchos de 500 gr para soldadura exotérmica en cruz sobrepuesta para conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	98.00	109.00	10,682.00		
4.2	Cartuchos de 200 gr para unión con soldadura exotérmica en "T" para conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con conductor de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	135.00	49.50	6,682.50		
4.3	Cartuchos de 300 gr para unión con soldadura exotérmica paralela superpuesta para conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con conductor de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	42.00	70.00	2,940.00		

(\*) Precios referidos al cambio de 1 US\$ por 3.3 S/. (2004-2005); no incluyen el IGV.

ITEM	DESCRIPCION	Unidad	Metrado	Precio Unit (S/.)	Parcial (S/.)	SubTotal (S/.)	Total (S/.)
4.4	Cartuchos de 115 gr para unión de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> a terminal pletina de cobre de (316" x 1"), de 1 ó 2 agujeros de (1/2")	c/u	50.00	49.50	2,475.00		
4.5	Cartuchos de 115 gr para unión con soldadura exotérmica de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> con varilla de Cobre de 5/8" x 8' (2.44 m)	c/u	6.00	49.50	297.00		
4.6	Cartuchos de 115 gr para unión con soldadura exotérmica de conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup> a riel de rodamiento del Transformador de Potencia.	c/u	12.00	49.50	594.00		
4.7	Cartuchos de 115 gr. Para unión de soldadura exotérmica Riel-Riel mediante conductor de cobre de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	24.00	49.50	1,188.00		
4.8	Tenaza para agarrar Moldes de Soldadura Exotérmica	c/u	8.00	281.00	2,248.00		
4.9	Chispero encendedor de la Soldadura	c/u	16.00	85.00	1,360.00		
4.10	Masilla plástica para intersticios	c/u	12.00	83.00	996.00		
4.11	Escobillas para limpiar los Moldes de Soldadura	c/u	12.00	15.00	180.00		
4.12	Guantes mixtos de cuero-tela	c/u	12.00	12.00	144.00		
4.13	Lentes de Seguridad para Soldadura	c/u	8.00	12.00	96.00		
<b>5.0</b>	<b>Accesorios de Instalación</b>						
5.1	Cajas de Registro, de concreto con tapa independiente	c/u	44.00	35.00	1,540.00		
5.2	Tubería de PVC pesado de 1" (25mm, diámetro interior) x 3m	c/u	14.00	11.00	154.00		
5.3	Tubería de PVC pesado de 3/4" (19mm, diámetro interior) x 3m	c/u	16.00	9.00	144.00		
<b>6</b>	<b>Materiales menores y herramientas, fungibles</b>						
6.1	Cinta de Material Plástico Grueso, 10 cm de ancho	rollo	18.00	90.00	1,620.00		
6.2	Cinta Aislante de Electricista	rollo	95.00	3.00	285.00		
6.3	Bolsas de Material Plástico Grueso, Largo 10" x Ancho 4", similar a bolsa de clavos	ciento	10.00	10.00	100.00		
<b>7</b>	<b>Herramientas y accesorios fungibles</b>						
7.1	Cuchillas retráctiles de marketero	c/u	40.00	5.00	200.00		
7.2	Soga Nylon flexible de 3/8" (10mm) diámetro	m	160.00	3.00	480.00		
7.3	Wype de Algodón lavado	kg	40.00	6.00	240.00		
	<b>SUBTOTAL DE SUMINISTRO (Soles)</b>					100610.50	

(\*) Precios referidos al cambio de 1 US\$ por 3.3 S/. (2004-2005); no incluyen el IGV.



ITEM	DESCRIPCION	Unidad	Metrado	Precio Unit (S/.)	Parcial (S/.)	SubTotal (S/.)	Total (S/.)
<b>B.</b>	<b>MONTAJE ELECTROMECHANICO Y OBRAS CIVILES</b>						
<b>1</b>	<b>Demoliciones</b>						
1.1	Demolición de paredes de ladrillo (cabeza) de 2.5 m de altura	m <sup>2</sup>	335.00	10.00	3,350.00		
1.2	Demolición de encofrados de 150 a 250 kg/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	81.15	25.00	2,028.75		
1.3	Demolición de cimientos de cerco y de pared de ladrillos	m	80.50	35.00	2,817.50		
1.4	Demolición de Losa de concreto de 0.2 m de espesor	m <sup>2</sup>	170.90	34.00	5,810.60		
1.5	Demolición de canaletas de concreto hasta 0.5 m x 0.8 m	m	112.80	35.00	3,948.00		
1.6	Demolición de pedestales ciclópeos y/o monolítico	m <sup>3</sup>	12.00	275.00	3,300.00		
1.7	Demolición de pedestales ciclópeos huecos	m <sup>2</sup>	51.70	58.38	3,018.25		
1.8	Recojo y disposición de escombros	m <sup>3</sup>	310.44	12.40	3,849.46		
<b>2</b>	<b>Desmantelamiento de Recuperación</b>						
2.1	Conductores aéreos y aisladores de barras y acometidas	m	46.40	21.63	1,003.63		
2.2	Equipos de intemperie de Celdas de Línea de Alta Tensión	c/u	10.00	30.00	300.00		
2.3	Transformador de Potencia y colocación al camión en el interior de la Subestación	c/u	1.00	1800.00	1,800.00		
2.4	Armarios, bastidores, celdas, de interior y exterior	c/u	18.00	150.00	2,700.00		
2.5	Cableados de Energía MT y BT, cableados de señal	m	112.30	5.30	595.19		
2.6	Columnas y vigas aéreas de madera (con grúa)	c/u	19.00	176.00	3,344.00		
2.7	Estructuras y reticulados (con inventario de piezas y deposito en el sitio)	kg	5,000.00	0.45	2,250.00		
2.8	Recojo y reprocesamiento (limpieza) de la grava superficial	m <sup>3</sup>	129.13	20.00	2,582.60		
2.9	Transporte y traslado de materiales y equipos recuperados	viaje	1.00	350	350.00		
<b>3</b>	<b>Obras civiles</b>						
3.1	Excavación de Zanja en suelo firme húmedo con retroexcavadora, para tendido interior de electrodo de la Red de Puesta a Tierra, dimensiones 0,6 x 1,50 m	m <sup>3</sup>	410.00	20.00	8,200.00		
3.2	Excavación de Zanja en suelo firme húmedo con retroexcavadora, para tendido interior de electrodo de la Red de Puesta a Tierra, dimensiones 0,6 x 2,00 m	m <sup>3</sup>	688.00	20.00	13,760.00		
3.3	Clavado de Varillas verticales redondas de cobre (Jabalinas) de 5/8" (16mm diam) x 7' (2.1m de longitud)	c/u	6.00	5.00	30.00		
3.4	Relleno y compactación a intervalos de 0.3 m, de la Zanja de instalación de la Red de Puesta a Tierra, con Material del sitio (tierra natural humedad) de 0,6 x 1,50 m	m <sup>3</sup>	410.00	12.17	4,989.70		
3.5	Relleno y compactación a intervalos de 0.2 m, de la Zanja de instalación de la Red de Puesta a Tierra, con Material del sitio (tierra natural humedad) de 0,6 x 2,00 m	m <sup>3</sup>	688.00	12.17	8,372.96		
3.6	Nivelación del Suelo en el acabado de las zanjas	m <sup>2</sup>	614.40	2.30	1,413.12		

(\*) Precios referidos al cambio de 1 US\$ por 3.3 S/. (2004-2005); no incluyen el IGV.

ITEM	DESCRIPCION	Unidad	Metrado	Precio Unit (S/.)	Parcial (S/.)	SubTotal (S/.)	Total (S/.)	
3.7	Adquisición de Grava de tamiz de 2" (50mm)	m <sup>3</sup>	198.10	70.00	13,867.00			
3.8	Aplicación de la Grava Nueva	m <sup>2</sup>	1,142.00	1.30	1,484.60			
<b>4</b>	<b>Instalaciones Electromecánicas</b>							
4.1	Tendido del conductor de 180 mm <sup>2</sup> en las hileras de zanjas longitudinales y transversales a 1.5 m de profundidad.	m	454.00	4.50	2,043.00			
4.2	Tendido del conductor de 180 mm <sup>2</sup> en las hileras de zanjas longitudinales y transversales a 2.0 m de profundidad.	m	574.00	4.50	2,583.00			
4.3	Entorches de protección con cinta plástica, cinta aislante y bolsa plástica, de los extremos libres del conductor, colocación en las cajas de registros.	c/u	122.00	1.00	122.00			
4.4	Entorches y protección con cinta plástica, cinta aislante y bolsa plástica, del extremo de conexión aérea, de las mechas de subida desde la Red.	c/u	96.00	1.00	96.00			
4.5	Cortado y entubado de PVC de las mechas de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	96.00	1.00	96.00			
4.6	Colocación de Moldes y Soldadura en las hileras de zanja de 0.8 m de la Red	c/u	31.00	15.50	480.50			
4.7	Colocación de Moldes y Soldadura en las hileras de zanja de 1.2 m de la Red	c/u	101.00	15.55	1,570.55			
4.8	Colocación de Moldes y Soldadura de las mechas de salida de 180mm <sup>2</sup> de la Red	c/u	46.00	15.60	717.60			
4.9	Colocación de Moldes y Soldadura de las mechas de salida de 70mm <sup>2</sup> de la Red	c/u	49.00	15.60	764.40			
4.10	Colocación de Moldes y Soldadura de los Terminales flexibles Riel-Riel de 180 mm <sup>2</sup>	c/u	24.00	15.00	360.00			
<b>5</b>	<b>Medidas Verificatorias de la Red antes de conexiones de superficie.</b>							
5.1	Medida periférica WENNER de la Resistividad del Suelo.	c/u	4.00	330.00	1,320.00			
5.2	Medida por caída de Potencial, de la Resistencia de Puesta a Tierra	c/u	8.00	226.00	1,808.00			
5.3	Medida por caída de Potencial, de los Potenciales de Toque y Paso	p/punto	4.00	350.00	1,400.00			
	<b>SUBTOTAL DE MONTAJE (Soles)</b>					108526.40		
<b>Nota 1:</b> Los moldes y accesorios de Soldadura Exotérmica se cuadruplican debido a que las Etapas de la Instalación de la Red de PAT no son continuas, si luego de la primera adquisición se conservan para las etapas sucesivas se economizará su costo.						<b>COSTO DIRECTO (C-D)</b>		209136.90
<b>Nota 2:</b> Las longitudes de Conductor consideradas para cada una de las Etapas de la Instalación de la Red de PAT corresponden al cuadrillado del plano, el contratista como parte de los replanteos, deberá considerar (1m) adicional por cada hilera para los recorridos de expansión sísmica, y el porcentaje de adicionales (por merma).						<b>GASTOS GENERALES (20% CCD.)</b>		41827.38
						<b>UTILIDADES (10% CCD.)</b>		20913.69
						<b>SUB-TOTAL</b>		271877.98
						<b>IGV (19%)</b>		51656.82
						<b>TOTAL</b>		323534.79

(\*) Precios referidos al cambio de 1 US\$ por 3.3 S/. (2004-2005); no incluyen el IGV.

### 7.3 Planos del Estudio

Para los fines de las obras de construcción y montaje electromecánico se elaboraron distintos planos y esquemas.

#### e. **Planos de Disposición General – Situación Final**

Se elaboraron dos planos, el primero corresponde a la vista de planta de la Red de Puesta a Tierra (**Plano 06**), incluyendo todas las dimensiones topográficas de su conformación, así como la ubicación de las cimentaciones de los equipos de intemperie y el recorrido de las canaletas; también figuran las divisiones que establecen los límites de la progresión de la obra que fue planificada para su realización en etapas; el segundo es complementario al plano de cortes de los lados normales de la Subestación (**Plano 07**), dichas vistas muestran las profundidades de enterramiento de 1,5 m del conductor interior y 2,0 m del conductor periférico.

Ambos planos aparte de la leyenda de símbolos incluyen la síntesis de parámetros de la Red de Puesta a Tierra en situación final, los datos del examen del suelo en calicata y en trinchera, así como las indicaciones para instalación y los datos del comportamiento del suelo en base a los análisis de laboratorio.

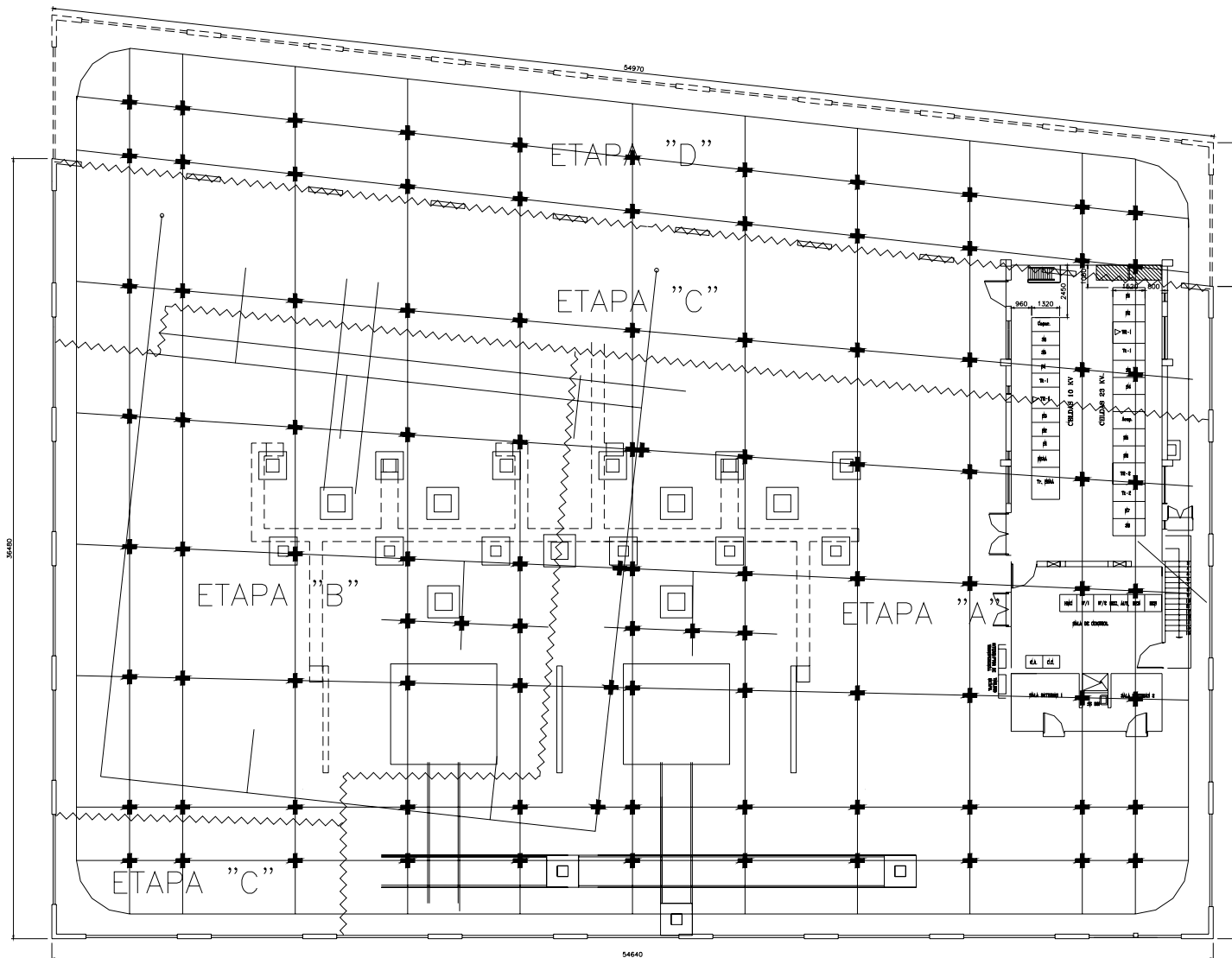
#### f. **Planos de Detalle de Instalación**

Se elaboraron dos planos mutuamente complementarios:

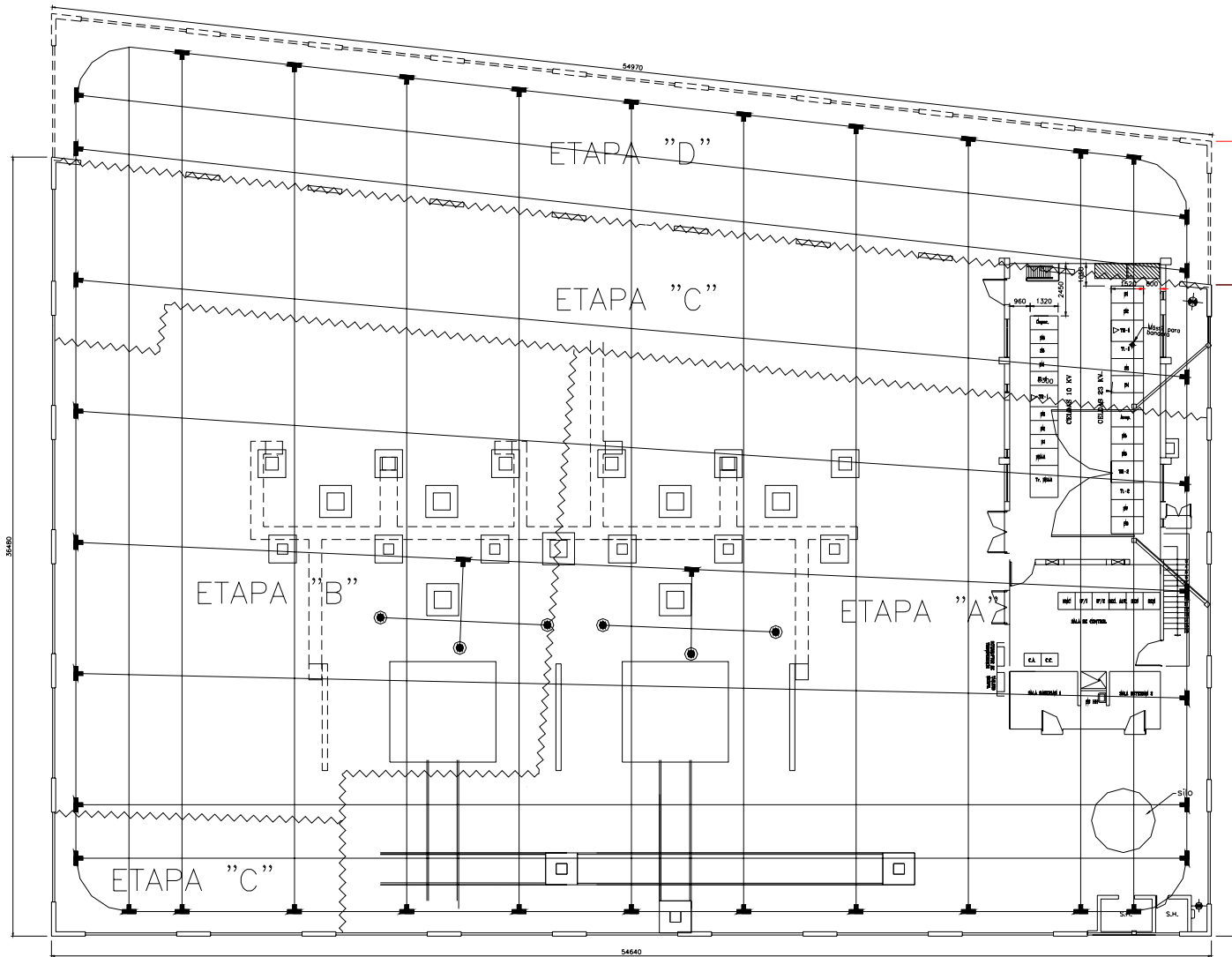
- El primero consigna los detalles de instalación, notas e indicaciones que corresponden al tendido, recorridos y conexiones del conductor de la Red de Puesta a Tierra (**Plano 08**).
- El segundo consigna los detalles de las conexiones de las mechas de subida para la conexión externa así como las notas e indicaciones para el reciclamiento de la piedra picada y pautas para el manejo y conexionado de la antigua Red de Puesta a Tierra existente (**Plano 09**).

**g. Esquemas de conexión diferenciada**

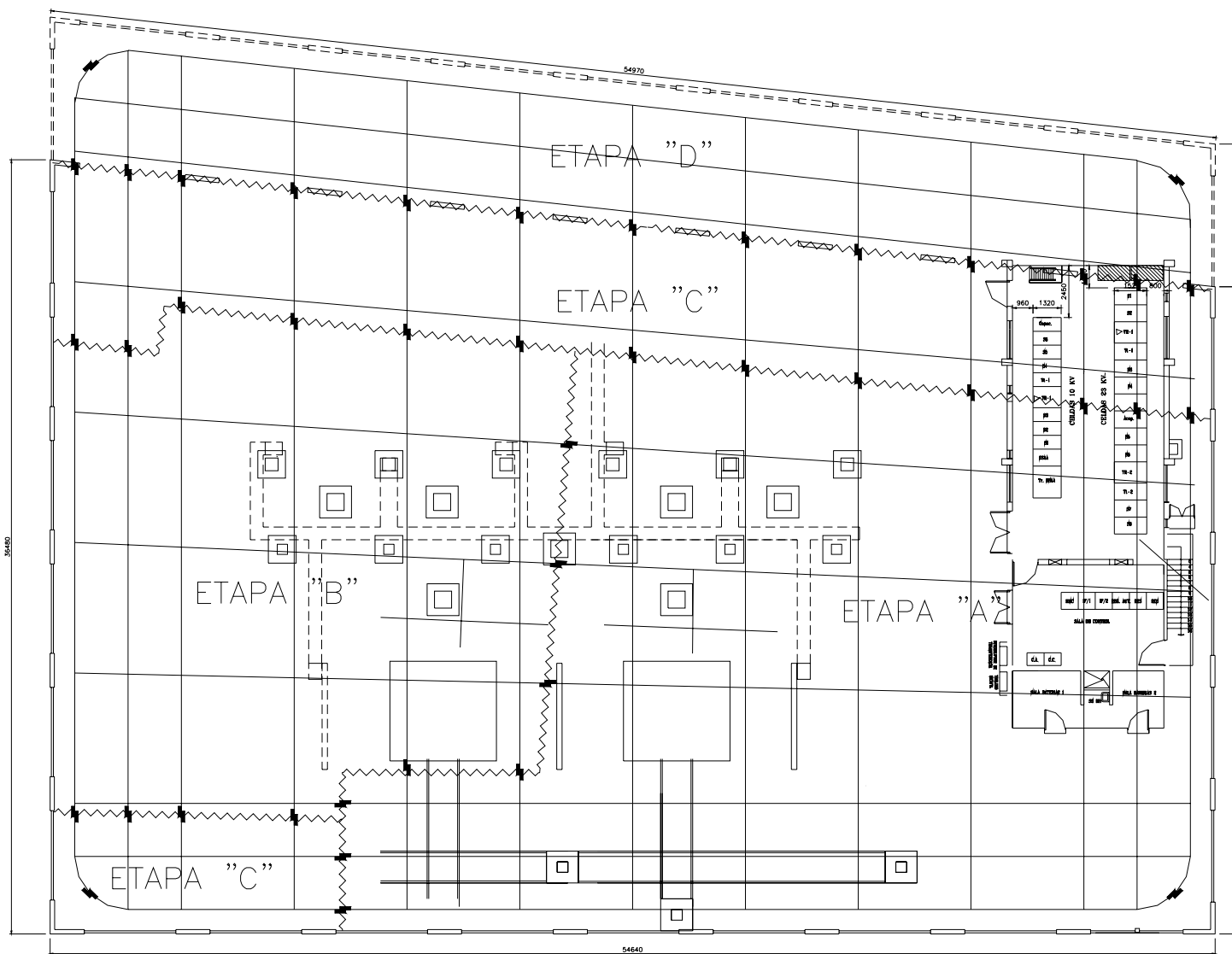
Dada la cantidad de conexiones exotérmicas que demanda la construcción de la Red de Puesta a Tierra, para evitar la emisión de un plano grande e inmanejable por la cantidad de símbolos utilizados, se optó por la elaboración de esquemas de conexión diferenciada en los que figuran un solo tipo o una sola calidad de conectores por cada plano, de modo que se les pueda ubicar fácilmente y sin lugar a confusiones, durante el tendido e instalación de la Red de Puesta a Tierra. **(Planos 10 a 16).**



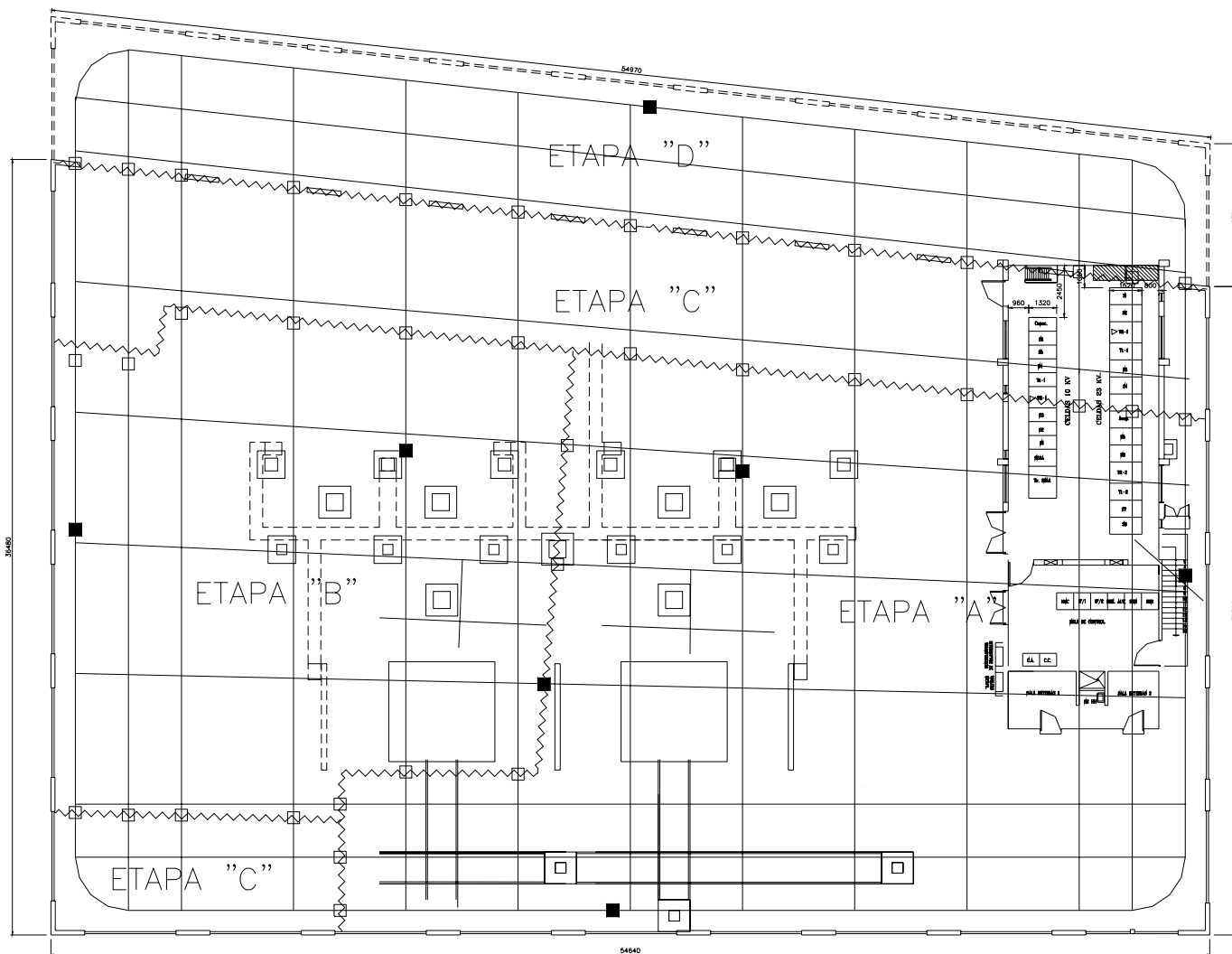
Plano 10. Plano de Detalle de Conexiones Exotérmicas Cruzadas (✚)



**Plano 11.** Plano de Detalle de Conexiones Exotérmicas Derivadas de Hileras (■) y de Varillas (●)

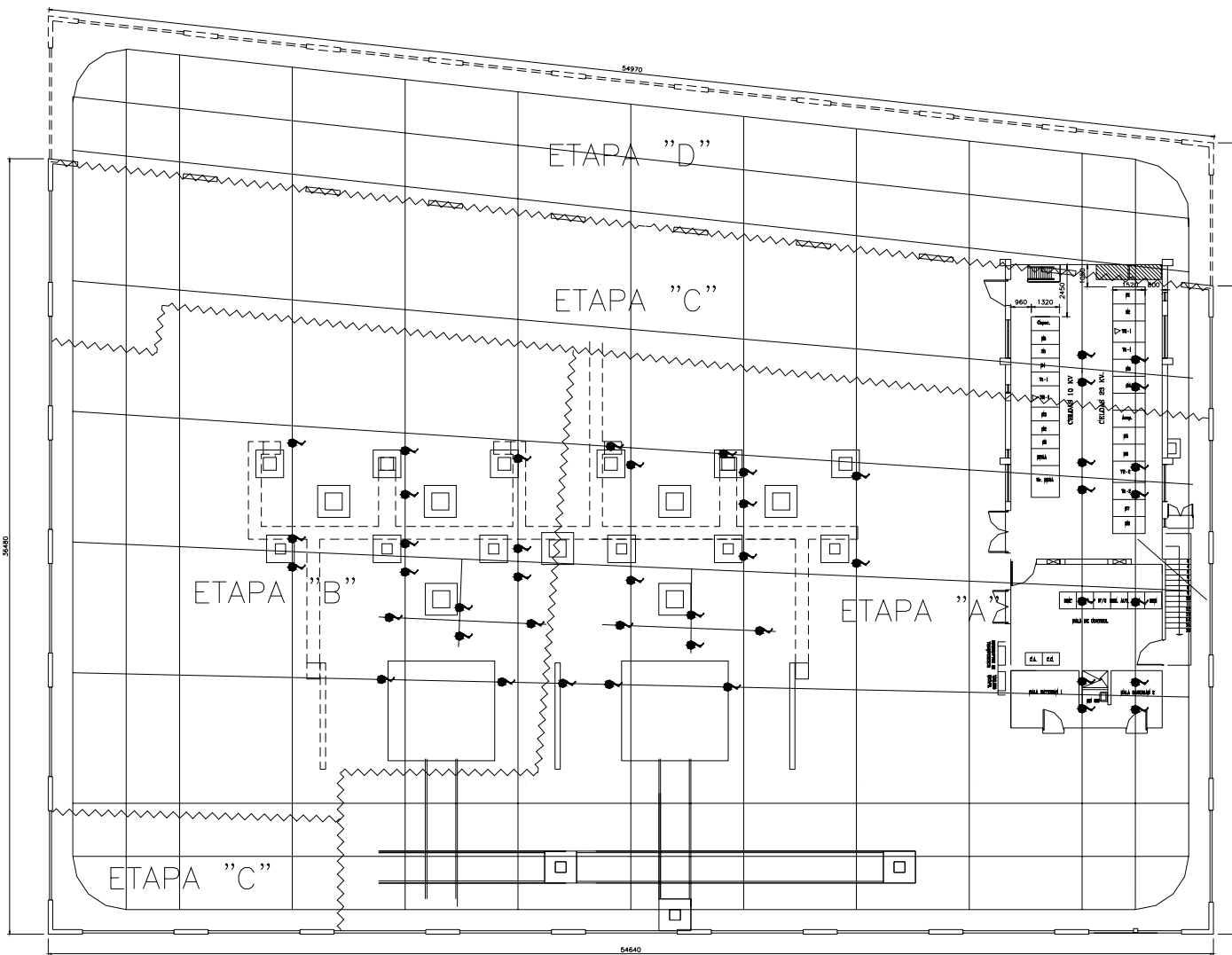


**Plano 12.** Plano de Detalle de Conexiones Exotérmicas Paralelas ( I )

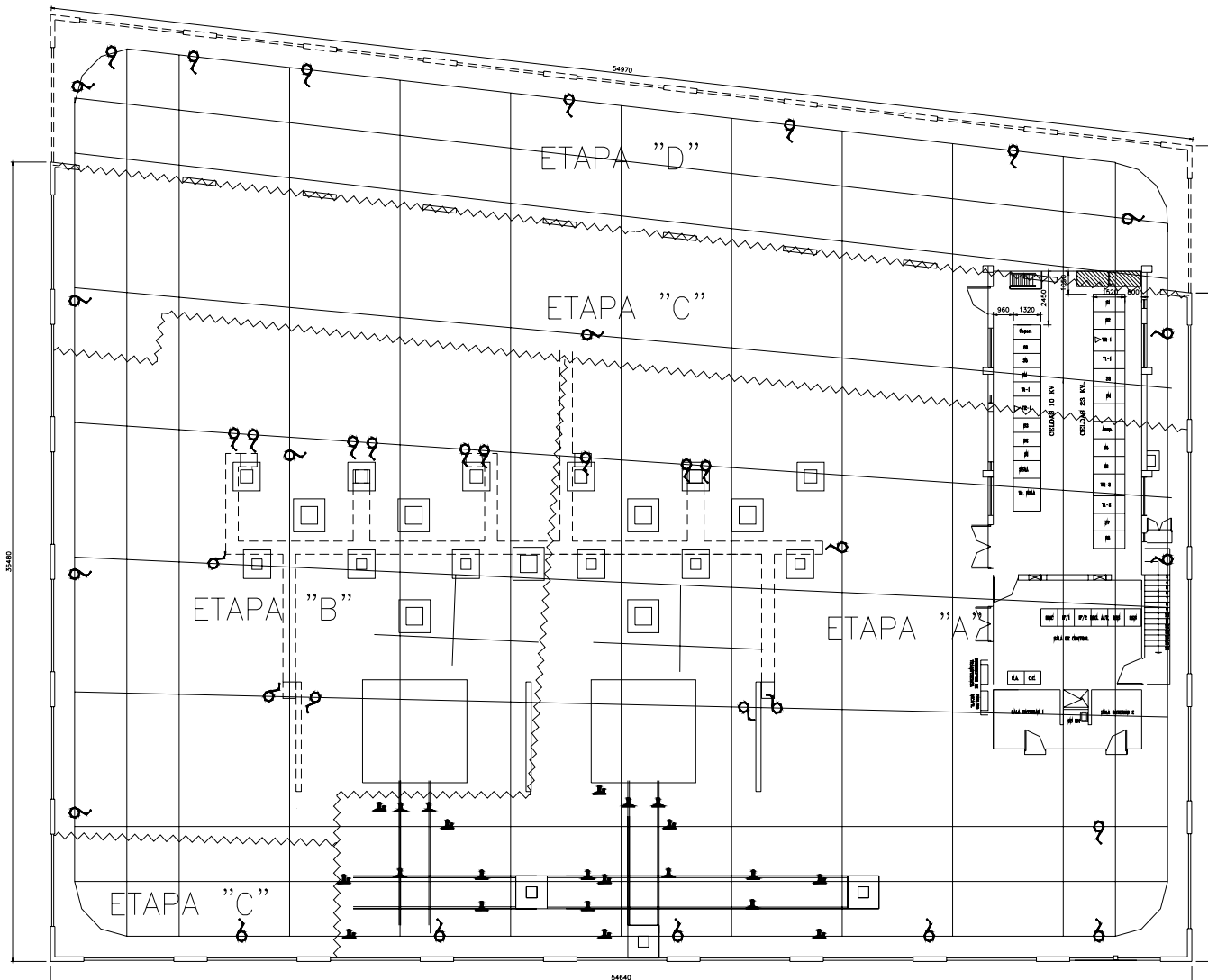


**Plano 13.** Plano de Detalle de Cajas de Registro con Tapas Permanentes (■) y Provisionales (□) en los Límites de las Etapas Constructivas de la Red

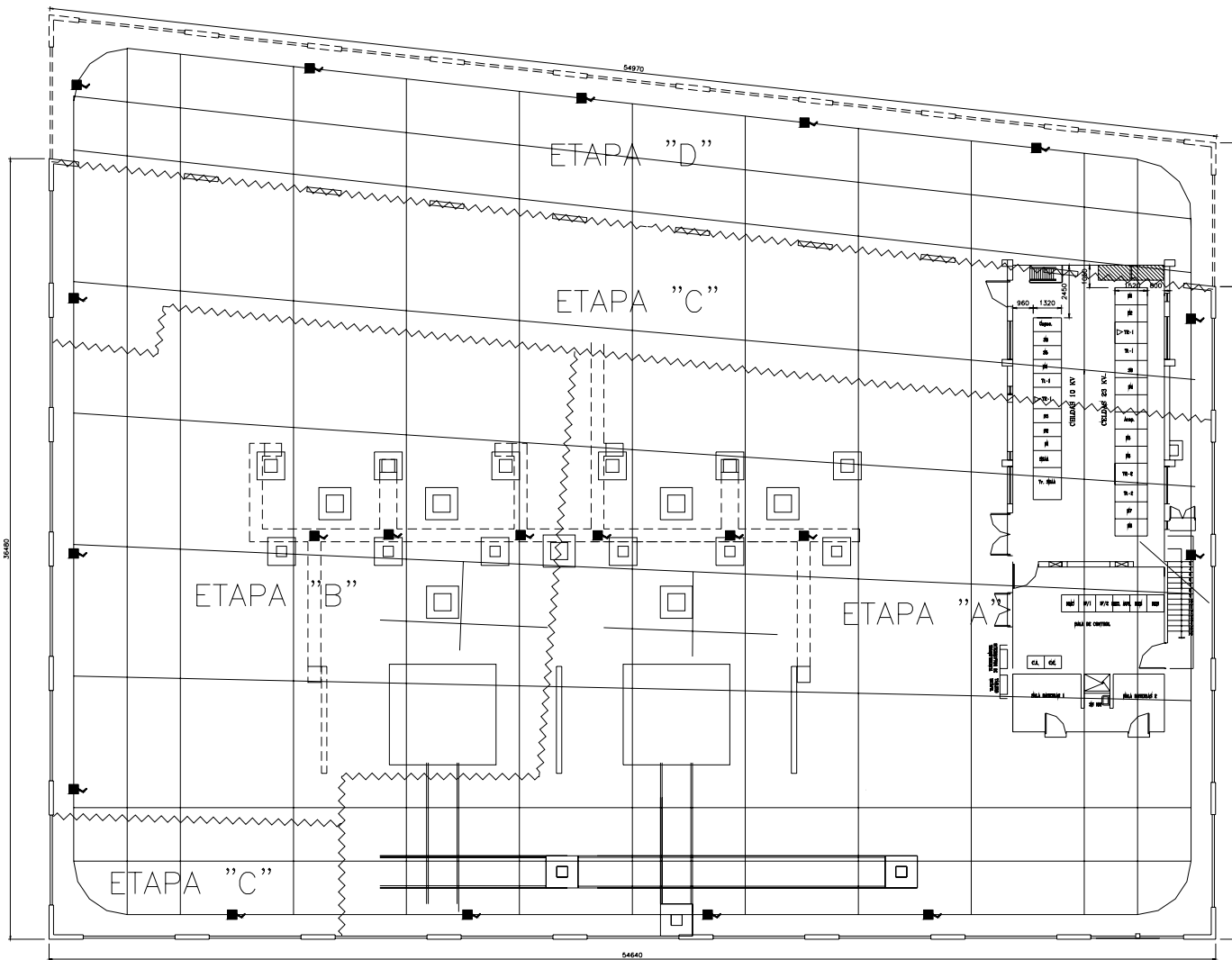




**Plano 14.** Plano de Detalle de Conexiones Exotérmicas Derivadas (●~)



**Plano 15.** Plano de Detalle de Conexiones Exotérmicas Derivadas - Pasivas  
 con Salida a Riel (▲), Unión Riel - Riel (▲) y Mecha de Circuito (∞)



**Plano 16.** Plano de Detalle de Conectores Aéreos Paralelos (■-) con Ajuste de Presión Perno - Tuerca

## CONCLUSIONES

- Para la instalación de Redes de Puesta a Tierra en Suelos de Alta Resistividad en nuestro país, es indispensable el uso de rellenos neutros y de baja Resistividad en torno al electrodo enterrado, lo cual permitirá incrementar la capacidad de Dispersión de la Red de Puesta a Tierra y disminuir tanto la Resistencia de Dispersión como los Potenciales de Toque y Paso.
- Siendo el cobre un metal noble, en Redes de Puesta a Tierra este no será susceptible a corroerse ante la presencia de ácidos ni de iones salinos en el suelo; no obstante, compuestos químicos derivados del nitrógeno encontrados en suelos de cultivo tratados con fertilizantes o suelos cultivables con contenidos orgánicos, ocasionarán una destrucción acelerada del metal, que propiciará el incremento de la Resistencia de Dispersión.
- Hacer uso de metales de menor inversión y desempeño inicial equivalente al del Cobre en Redes de Puesta a Tierra requiere de condiciones especiales de instalación que dependen de la naturaleza intrínseca del metal utilizado y de la composición del suelo natural o del relleno empleado, para que pueda cumplir con sus prestaciones sin corroerse y destruirse en el corto o mediano plazo dada su vulnerabilidad frente a la corrosividad de los Suelos.
- Comparado con el Estándar IEC-479-I y con métodos computacionales más sofisticados pero de mayor costo, el Estándar IEEE 80-2000 nos brinda el método

más simple y completo existente en el medio para el cálculo de Redes de Puesta a Tierra en Subestaciones de Corriente Alterna.

## RECOMENDACIONES

- Se propone la utilización de rellenos químicamente neutros y naturales de menor Resistividad que la del suelo natural alrededor del electrodo tales como la bentonita para incrementar la Capacidad de Dispersión de la Red de Puesta a Tierra en Suelos de Alta Resistividad.
- Deberá excluirse el uso de suelos de cultivo tratados con fertilizantes o suelos cultivables con contenidos orgánicos como rellenos al utilizar electrodos de Puesta a Tierra de Cobre, debido a que ocasionarán su destrucción acelerada, con el consiguiente aumento de la Resistencia de Dispersión y los Potenciales de Toque y Paso.
- En suelos agresivos respecto a los metales deberá evitarse el uso de varillas de acero inoxidable y de varillas de acero con electrodepositado superficial de cobre electrolítico, tan comúnmente utilizadas en nuestro medio, debido a que sufrirán un deterioro acelerado en ausencia de condiciones especiales de instalación.
- Finalmente, se recomienda la conexión de un punto de las barras equipotenciales de cada uno de los armarios y contenedores de equipos de subsistemas de Baja Tensión y electrónicos a la Red de Puesta a Tierra, para evitar las sobretensiones naturales durante la ocurrencia de Fallas y disturbios electromagnéticos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] IEEE Std 80 - 2000**  
IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [2] IEEE Std 142 – 1991 (Green Book)**  
Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- [3] Mukhedkar, D.,** Curso Corto: “Teoría y Aplicaciones de las Técnicas de Puesta a Tierra para Sistemas Eléctricos” (Elaboración J.Y.M.); AEP – IEEE, Oct. 19 – 21, Lima, 1987.
- [4] Yanque, J.,** Curso AG-PG 2002-I: Alta Tensión y Técnicas de Pruebas-Cap II- Técnicas de Aterramiento Eléctrico, UNI-FIEE, Lima.
- [5] IEEE Std 510 – 1983**  
IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing.
- [6] ASTM G 57 – 95a**  
Field Measurement of Soil Resistivity Using the WENNER Four – Electrode Method.
- [7] IEEE Std 81 - 1983**  
IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

- [8] **Yanque, J.**, “Métodos de Medida de la Resistividad del Suelo”  
ElectroRedes – Procobre Perú, Año 2001, Num 2.
- [9] **Mukhedkar, D.**, y **Gagnon, G.**; “Earth Resistivity Measurements in a Two Layer Earth Structure”  
IEEE Paper C-74-196-2. IEEE-PES Winter Meeting, New York, NY, Jan–Feb, 1974.
- [10] **Blattner, C. J.**, y **Dawalibi, F.**; “Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques”  
IEEE Trans. PAS, vol. PAS 103, no.2, pp 374-382, Feb. 1984.
- [11] **Manual de Instrumentos para medición de Resistividades y Resistencia de Puesta a Tierra**  
<http://www.leminstruments.com>
- [12] **Dawalibi, F.**,y **Mukhedkar, D.**  
“Ground Electrode Resistance Measurements in Non-Uniform Soils”  
IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol PAS-93, No 1, Jan 1974
- [13] **Tagg, G.F.**, “Earth Resistances”  
G. Newnes Ltd. London 1964 pp:13-14, 35-37
- [14] **Yanque, J.**, “Métodos de Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra”  
ElectroRedes – Procobre Perú, Año 2002, Num 2.
- [15] **Michaels, Kenneth M.**; “Earth Ground Resistance Testing for Low-Voltage Power Systems”  
IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 1, Jan./Feb. 1995



**[16] IEC 11-8**

Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica Impianti di terra. Terza Edizione, Dic. 1989

**[17] Kinderman, Geraldo y Campagnolo, Jorge Mário, "Aterramento Elétrico"**

3ra edição, Sagra – DC Luzzatto Editores, Porto Alegre 1995.

**[18] IEEE Std 141 – 1976 (Red Book)**

IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.

**[19] Lee Chien-Hsing y Meliopoulos, A. P.;** "A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Std 80 on Grounding Safety Criteria"

Proc. Natl. Sci. Council. ROC (A) Vol.23, No.5, 199 pp. 612 - 621.

**[20] Ventajas de los logiceles de Cálculo Digital**

<http://www.cyme.com/software/cymgrd/>

**[21] I. Colominas, F. Ambarina y M. Casteleiro,** "A numerical Formulation for Grounding Análisis in Stratified Soils", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No 2, Apr. 2002**[22] F. Ambarina, I. Colominas y M. Casteleiro;** "Why do Computer Methods for Grounding Analisis Produce Anomalous Results?"

IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No 4, Oct 2003.

**[23] Dawalibi, F.,y Mukhedkar, D.,** "Parametric Analysis of Grounding Grids"

IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol PAS-98, no 5, Sept/Oct 1979

**[24] Yanque, J.,** Curso 2003: Alta Tensión y Técnicas de Pruebas-Cap IV-Descargas en los Medios Gaseosos, UNI-FIEE, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

- [25] **Shan Griffith, M. y E. Crawford, Lonnie;** “A Closer Look at “the Facts of Life” in Ground Mat Design”  
IEEE Trans. on Industry Applications, vol IA-15, N°3, May/June 1979
- [26] **Dalziel, C. F., and Lee, W. R.,** “Reevaluation of Lethal Electric Currents”  
IEEE Trans. on Industry and General Applications, vol IGA-4, no 5, pp 467-476, 1968
- [27] **Dawalibi, F.,y Mukhedkar, D.,** “Influence of Ground Rods on Grounding Grids”  
IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol PAS-98, N° 6, pp 2089-2098,  
Nov/Dec 1979.
- [28] **Untiveros Zaldivar, Hernán;** “Líneas de Transmisión de Energía Eléctrica”  
Seminario de la AEP, Lima 2004
- [29] **Garrett, D. L., Mayers, J., y Patel, S.,** “Determination of Maximum Substation Grounding System Fault Current Using Graphical Analysis”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. POWRD-2, no3, pp. 725-732, Jul. 1987
- [30] **Peter A. Zotos;** “Ground Grid Design in Large Industrial Plants”  
IEEE Trans. on Industry Applications, Vol 24, N° 3, May/Jun 1988
- [31] **E. Martínez, L. Fuentealba, A.Cisternas, R. Galleguillos, F. Kasaneva y A. de la Fuente;** “A new Artificial Treatment for the Reduction of Resistance in Ground Electrode”  
IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.19, N° 2, Abril 2004
- [32] **Specification ER-35, Copperweld® wire**  
Copperweld steel company, wire and cable division Glassport, Pa. April, 1958

- [33] **ASTM G 15 - 93**  
Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing
- [34] **Galvele R., José.**, “Corrosión”; Secretaría General de la OEA, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington D.C., 1979
- [35] **Yanque, J.**, “Problemas de Corrosión en Infraestructura Eléctrica de Alta Tensión”  
Seminario sobre Problemas de Corrosión en la Industria –UNI– May. 1985 Lima-Perú
- [36] **Ing. Escudero Vega, Pedro**; Separatas del curso de Corrosión, Código MC-142  
Facultad de Ingeniería Mecánica – UNI
- [37] **Avila, Javier y Genescá, Joan**; “Mas allá de la Herrumbre”  
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/masalla.htm>
- [38] **Yanque, J.**, “¿Cómo incide la agresividad del Suelo en Electroodos de Aterramiento?”  
ElectroRedes – Procobre Perú, Año 98, Num 2
- [39] **McIntosh, Donald H.**, “Grounding Where Corrosion Protection is Required”  
IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. IA -18, No 6, Nov./Dec. 1982
- [40] **González Fernández, José.**, “Teoría y Práctica de la Lucha contra la Corrosión”;  
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas; Madrid, 1984.
- [41] **Pourbaix, Marcel**, “Thermodynamics of Dilute Aqueous Solutions with applications to Electrochemistry and Corrosion”; Edward Arnold & Co., London, 1949
- [42] **Ing. Pizarro Solís, Pedro e Ing. Quiroz García, Juan**; Separatas del curso de Corrosión, Código PI-515 – Facultad de Ingeniería Química –UNI

- [43] **Sundar Rajan y Srinivasa I. Venugopalan;** "Corrosion and Grounding Systems"  
IEEE Trans. on Industry Applications, Vol 1A-13, N° 4, Jul/Aug 1977
- [44] **Uhlig, Herbert H.,** "Corrosión y Control de Corrosión"  
Urmo, S.A. de Ediciones., España, 1979.
- [45] **F. Lewicki, Thomas and L. Fowler, Norman;** "The Effect of Corrosion Myths on National Electrical Standards", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 5, Sept/Oct 1993.
- [46] **Copperweld Fayetteville Division;** "Dead Soft Annealed Copperweld® wire and Strand for Grounding Applications"; Fayetteville, Tennessee.

## **ANEXO A**

### **Glosario de Términos Usuales**

1. Adherencia

Fuerza de unión entre un recubrimiento o precipitado cualquiera y una superficie (substrato) que puede ser metálica o no.

2. Aleación

Material metálico resultante de la solución de dos o más metales conjuntamente con propiedades específicas que pueden diferir sustancialmente de las de sus componentes, aunque sí continúan dependiendo de la naturaleza de ellas.

3. Anaeróbico

Se dice del medio que se halla exento de aire o es carente de oxígeno libre (no combinado).

4. Anión

Ion con carga o cargas negativas, que migra al ánodo de las celdas electroquímicas o electrolíticas.

5. Ánodo

Es el Electrodo de las celdas electroquímicas y electrolíticas en el que se produce como reacción principal la oxidación de alguna sustancia (los electrones salen del ánodo por el circuito externo. Es usualmente el electrodo en el cual ocurre la corrosión con desprendimiento de iones metálicos que entran en la solución).

6. Capa pasivante

Películas translúcidas, de unas decenas de Angstroms, de óxidos, oxígeno adsorbido o muchas veces de naturaleza desconocida, que al formarse reducen la velocidad de corrosión varios órdenes de magnitud, al impedir el contacto directo del material metálico con el medio agresivo.

7. Cation

Ion con carga positiva (+), que se orienta y dirige hacia el cátodo en una celda electrolítica, o ión que se produce en el ánodo de una celda electroquímica o pila de corrosión.

8. Cátodo

Es el Electrodo inmerso de polaridad negativa de las celdas electrolíticas y electroquímicas, en el que ocurre como reacción principal la reducción propia o de alguna sustancia (los electrones necesarios fluyen hacia él por el circuito externo).

9. Celda electrolítica

Celda que funciona con energía eléctrica para provocar reacciones de electrodo que se transforman en energía química. A menudo se confunde con la celda electroquímica, término que se utiliza para los dos conceptos.

10. Conexión a Tierra

Es la unión sólida e intencional con una Puesta a Tierra de la masa o del punto Neutro de un equipo o circuito eléctrico mediante un conductor eléctrico, las aplicaciones a través de Impedancias, obedecen a exigencias particulares en el funcionamiento de los sistemas eléctricos (control de corrientes o de tensiones).

11. Corriente de Dispersión

Es toda corriente que entra o sale a una instalación de Puesta a Tierra, ya sea desde el suelo o desde una conexión externa; pueden tener pequeños o moderados valores permanentes (carga, fuga, desbalance, inducción), o elevados valores de corta duración (fallas a FI, Descarga Atmosférica)

12. Diferencia de Potencial en el Suelo

Es la diferencia existente entre los Potenciales Eléctricos de dos puntos cualquiera del suelo separados a una distancia determinada, su aparición se debe a la dispersión o captación de una corriente en un electrodo ya sea hallándose este en la superficie del suelo o enterrado.

13. Electrodo

Conductor electrónico, normalmente metálico, por medio del cual se proporcionan los electrones necesarios a una reacción, o se consumen los electrones resultantes de la misma.

14. Electrodo de Medidas

Son varillas rígidas de metal en forma de estacas que se utilizan para las medidas de los parámetros eléctricos del suelo, introduciéndolas por clavado en el suelo y asegurando la mínima Resistencia Eléctrica de contacto.

15. Electrodo de Puesta a Tierra

Es un conductor metálico desnudo que se instala enterrado ya sea en el suelo natural o en un relleno previamente preparado, proporcionando un contacto eléctrico íntimo con el suelo, necesario para la dispersión o captación de las corrientes del sistema eléctrico. Puede tener diferentes formas.

16. Electrodo de Referencia

Es una semipila prácticamente impolarizable y de potencial constante, que sirve para medir y controlar el potencial de un electrodo sometido a observación en la celda de ensayo, refiriéndolo a una escala con cero arbitrario (p.e., el de la escala de hidrógeno, de Cu/CuSO<sub>4</sub>, de Ag/AgCl, etc)

17. Electrolito

Sustancia química o mezcla de ellas, usualmente líquida o en solución acuosa, que contiene iones que migran en presencia de un campo eléctrico. Más simplemente, es un conductor iónico.

18. Equilibrio Termodinámico

Estado en el que los cambios de energía que se producen en un proceso físico o químico son equivalentes en los dos sentidos y no dan lugar a una transformación neta de estado o sustancia.

19. Gradiente de Potencial en el suelo

Es un vector cuya dirección se identifica con la del crecimiento más rápido del Potencial en un punto determinado del Suelo. Su trayectoria en el plano es perpendicular a la de las Líneas Equipotenciales.

20. Ion

Es una partícula electrizada, átomo o grupo de átomos con carga eléctrica manifiesta.

21. Línea Equipotencial

Pertenece al espectro de superficies equipotenciales del Campo Eléctrico que se representa en un plano y une todos los puntos de un lazo en los que el Potencial Eléctrico tiene el mismo valor para un instante dado.



22. Medio Acuoso

Se refiere a medios que contienen agua fluida o en forma de vapor, en los que ésta actúa como electrolito o conductor iónico de la corriente eléctrica.

23. Metal activo

Término que puede referirse a un estado de los materiales metálicos en el que éstos tienden a corroerse, o a metales o aleaciones cuyo potencial propio se sitúa en el extremo de potenciales más negativos de las series electroquímicas o galvánicas de Reducción y son muy corroíbles.

24. Metal noble

Es un metal cuyo potencial propio es menos negativo o mas positivo que el del hidrógeno, por lo que su comportamiento es poco reactivo.

25. Oxidación

Es la pérdida de electrones que son sustituidos por enlaces con Oxígeno debida a un constituyente de una reacción química; también se refiere a la corrosión de un metal que está expuesto a elevadas temperaturas.

26. Pasivo

Estado que implica una reactividad muy pequeña, es decir, velocidades insignificantes de corrosión, en condiciones propicias con fuerte tendencia termodinámica a la corrosión del metal.

27. Perfil de Potencial en el suelo

Es el gráfico de corte plano que presenta los Potenciales Eléctricos producidos por una Corriente que pasa por la Puesta a Tierra, puede establecerse a lo largo de una determinada trayectoria o en una zona específica, para un instante dado.

28. pH

El pH es la medida del carácter ácido o alcalino de una solución, en función de la concentración de ión hidrógeno ( $H^+$ ) presente en el medio, correspondiendo el valor 7 a una solución neutra.

Su valor es dado por el logaritmo del inverso de la actividad de iones hidrógeno en la solución:  $pH = -\log a_{[H]^+}$

29. Pletina

Pieza metálica más ancha que gruesa, de 2 a 4 milímetros de espesor y de longitud variable.

30. Polarización

Es el cambio de potencial a partir del potencial de electrodo en circuito abierto como resultado del paso de una corriente continua.

31. Potencial Eléctrico del Suelo

Es el potencial que posee un punto cualquiera del suelo respecto a la Tierra Remota o respecto a otro punto de referencia donde se asume que el Potencial es Cero; será positivo o negativo si es mayor o menor que el del Punto de Referencia.

32. Potencial de Protección

Es el potencial que imprime una corriente opuesta a la corriente de corrosión, bajo el cual el picado y la corrosión por grieta son inhibidos.

33. Potencial Máximo de Dispersión (PMD)

También conocido como Ground Potential Rise (GPR), es el Potencial Eléctrico máximo de dispersión al cual se encontrará una Red de Puesta a Tierra con respecto a la Tierra Remota, durante la circulación de una Corriente a través de ella.

Dicho potencial será igual a la porción de la Corriente de Falla que se dispersa en el suelo multiplicada por la Resistencia de la Red de Puesta a Tierra.

34. Potencial Redox

Es el potencial de electrodo de un sistema reversible de oxidación – reducción, por ejemplo  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ , etc.

Se utiliza para determinar en que grado el medio en el que se encuentra un metal es oxidante ó reductor.

35. Protección Catódica

Técnica para reducir la tasa de corrosión de una superficie metálica al convertirlo en el cátodo de una celda electroquímica.

36. Puesta a Tierra (PAT)

Instalación de seguridad eléctrica en la que un conductor desnudo simple o armado es enterrado en suelo natural firme con la finalidad de dispersar o concentrar corrientes eléctricas, así como de alcanzar el Potencial Cero de Referencia de la Tierra Remota.

37. Radio Equivalente de un Electrodo ( $r_0$ )

Es el radio que deberá tener un electrodo de forma semiesférica para presentar la misma Resistencia de Dispersión que otro de distinta forma.

38. Resistencia de Dispersión ( $R_{PAT}$ )

Es la oposición al paso de la corriente que ejerce el suelo circundante a un electrodo de Puesta a Tierra; su valor es dado por el cociente entre el Potencial Eléctrico de dicho Electrodo respecto a la Tierra Remota y la Corriente que circula a o de Tierra.

39. Resistencia Mutua

Fenómeno Resistivo que aparece entre electrodos de Puesta a Tierra o puntos próximos en el suelo, debido a que la circulación de una corriente en el primero de ellos produce una modificación de potencial en el segundo, incrementando la Resistencia Final del Proceso de Dispersión.

40. Resistividad del Suelo

Es la Resistencia específica que presenta el suelo a una determinada profundidad. Su magnitud se expresa en Ohms.metro ( $\Omega.m$ ), siendo su inversa igual a la Conductividad.

41. Sistema de Puesta a Tierra

Es la interconexión en paralelo respecto de la Tierra Remota, de todas las Puestas a Tierra asociadas a un sistema y sus subsistemas para asegurar el mismo potencial de referencia y/o para disminuir la Resistencia de Dispersión como conjunto; también pertenecen al sistema las conexiones a los equipos y los recorridos de servicio externo.

42. Sondeo Geoelectrico Vertical (SGV)

Medida de Geofísica que permiten hallar valores de Resistividad Aparente en función de la profundidad de exploración y de la conformación estratificada del Suelo.

43. Sulfidación

Es la reacción de un metal o aleación con una sustancia que contenga azufre, para producir un compuesto sulfurado encima o debajo de la superficie del metal o aleación.

44. Tierra Equipotencial de Servicio

Armado de conductores desnudos ubicados por encima de la superficie del suelo, o en el piso o paredes, que se caracterizan por estar conectados a una Puesta a Tierra con la finalidad de propiciar conexiones de protección de personas y equipos contra Voltajes de Contacto peligrosos.

45. Tierra Remota

Es el lugar más próximo del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una Puesta a Tierra en el cual la Resistencia Mutua con el Electrodo, Malla o Sistema en consideración es cero, atribuyéndosele así por convención el Potencial Cero de Referencia.

46. Velocidad de Corrosión

Cantidad de metal o aleación deteriorada (oxidada) por unidad de tiempo. Puede expresarse en función del espesor de la penetración (mm/año,  $\mu\text{m}/\text{año}$ , etc.); de la variación de peso por unidad de superficie ( $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ,  $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{d}$ ), es decir, gramos por metro cuadrado por día o miligramos por decímetro cuadrado por día).

Nota: Las unidades de Medida que se aplican a todos los parámetros mencionados corresponden al Sistema Internacional (SI)

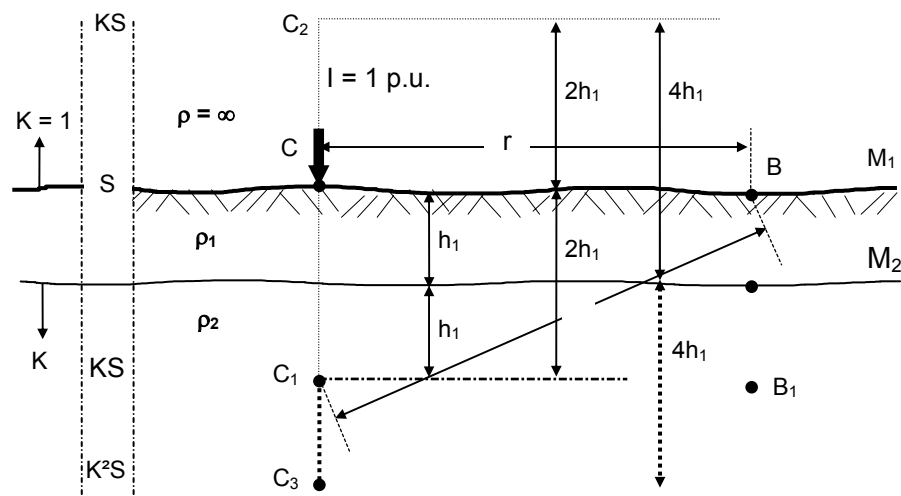


## ANEXO C

### Modelo Matemático del Procesamiento de las Medidas Wenner para perfil de Suelo de Dos Estratos

El suelo es de conformación rara vez homogénea siendo normalmente estratificado, con capas de diferente Resistividad que se asumen horizontales y con cambios laterales más graduales. [10]

De este modo, toda medida o determinación de la Resistividad del Suelo dará valores aparentes, como es el caso de las Medidas Wenner que aplican el Principio de Caída de Potencial entre dos puntos de la superficie del suelo cuyo potencial según TAGG está dado por una expresión que considera un modelo de suelo de 2 estratos ( $\rho_1$  y  $\rho_2$ ) conociendo el espesor ( $h_1$ ) del primero, la distancia ( $r$ ) del punto de observación y las  $n$  reflexiones con las que puede precisarse el método de cálculo mediante imágenes:



**Figura 47.** Modelo del Suelo de 2 Estratos usando el Método de las Imágenes

A partir del cual se deduce que:

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

Reemplazando (1) en  $\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot (V_s/I) \cdot a$  para un  $V_s = V_{P2} - V_{P1}$ , obtenemos la ecuación de la Resistividad Aparente ( $\rho_a$ ), en función de los parámetros del suelo ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $h_1$ ) y de la distancia de medidas ( $a$ ):

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1+(u)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(u)^2}} \right] \quad \dots (2) \quad u = \frac{2nh}{a}, \quad K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

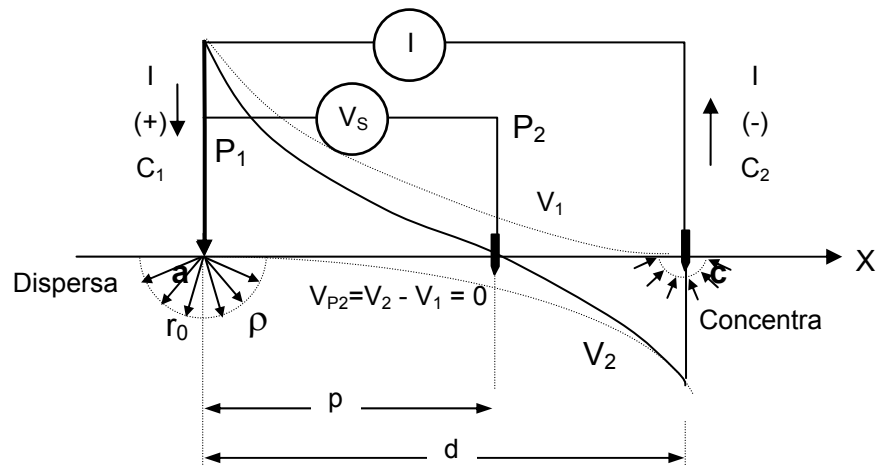
Esta ecuación es la base de todos los métodos de procesamiento existentes para las medidas de campo hechas a través de medidas de Resistencia bajo la configuración de electrodos Wenner.

En el caso particular del Método de Procesamiento de la Universidad de Kiusu, al graficar la ecuación (2) en escalas doblemente logarítmicas para diferentes valores de ( $K$ ) y ( $a/h$ ), origina la familia de Curvas Patrón Estándar (STD).



## ANEXO D

### Fundamento Teórico del Método Clásico de Caída de Potencial



**Figura 48.** Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra mediante Método Clásico de Caída de Potencial

Tomamos las siguientes consideraciones principales [12]:

- La resistividad metálica del electrodo es despreciable.
- El electrodo es equivalente a un hemisferio de radio  $r_0$ .
- La distancia ( $d$ ) es lo suficientemente grande para que la forma y dimensiones del electrodo no modifiquen el valor de la Resistencia mutua dada por asumir un electrodo puntual ( $d > 20r_0$ ).
- El radio  $r_0$  es pequeño respecto al espesor de la 1<sup>ra</sup> capa ( $r_0/h < 1/5$ ), para mantener válido el modelo de electrodo puntual.
- El electrodo de Puesta a Tierra se encuentra enterrado únicamente en el primer estrato.
- Se asume una densidad de corriente uniforme en el electrodo.

- g. Todas las impedancias tienen solamente una componente resistiva, siendo la componente reactiva despreciable en condiciones de estado estable y a frecuencia industrial.
- h. La corriente de Medidas que sale del circuito de Corriente hacia el electrodo (p) es despreciable.

Si ( $V_p^a$ ) es el Potencial inducido por el Electrodo (p) en un punto (a) del suelo, cuando circula una corriente ( $I = 1A$ ), se pueden definir los Potenciales en los electrodos (p) y (a) en la siguiente forma:

$$U_p = V_p^a(I) + V_p^c(-I) = V_p^a - V_p^c \quad \dots (3)$$

$$U_a = V_a^a(I) + V_a^c(-I) = V_a^a - V_a^c \quad \dots (4)$$

El voltaje involucrado en la medida de la  $R_{PAT}$  con el Método Clásico de Caída de Potencial es ( $V_S$ ):

$$V_S = U_a - U_p$$

$$V_S = V_a^a - V_a^c - V_p^a + V_p^c \quad \dots (5)$$

$$V_S = IR_a + (V_p^c - V_a^c - V_p^a)$$

La condición eléctrica de ubicación de (p) o bien de ( $P_2$ ) para la medida Wenner precisa será:

$$R_a = V_S/I \quad \text{que se cumple cuando} \quad V_p^c - V_a^c - V_p^a = 0 \quad \dots (6)$$

Es decir, a una distancia de medidas ( $p$ ) de la Red de Puesta a Tierra, la suma algebraica de las Características de Potencial de los Electrodo de Corriente es nula, simulándose un punto de Tierra Remota que nos permite medir la Resistencia de Dispersión de la Red.

Reemplazando (1) en (6) y escribiendo:

$$X = \frac{p}{d} \quad , \quad U = \frac{2nh}{d} \quad , \quad K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Obtenemos:

$$1 + \frac{1}{X} - \frac{1}{1-X} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1+U^2}} + \frac{K^n}{\sqrt{X^2+U^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{(1-X)^2+U^2}} \right] = 0 \quad \dots (7)$$

En suelos homogéneos ( $K = 0$ ,  $H = \infty$ ), resultando:

$$X = 0.618$$

$$p = 0.618 * d$$

En suelos de 2 estratos, se grafica la ecuación (7) para diferentes valores de ( $K$ ), obteniendo la posición de ( $p$ ) en función de ( $h$ ) y ( $d$ ).

### ANEXO E

#### Familia de Relación de Distancias de Medida (p/d) con Parámetro K

