

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PUESTAS A TIERRA PARA EL
COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL GUALACEO, BASADO EN LAS
RECOMENDACIONES PRACTICAS PARA EL ATERRIZAMIENTO
EN SISTEMAS ELECTRICOS COMERCIALES E INDUSTRIALES
DE LA IEEE”**

Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

PABLO MAURICIO GÓMEZ AGUILAR

DIRECTOR:

ING. JAIME SANCHEZ

CUENCA – 2010

I

ING. JAIME SANCHEZ

CERTIFICA:

Haber efectuado la labor de dirigir y revisar cada uno de los capítulos que se desarrollan en esta tesis, efectuada por el Sr. Pablo Mauricio Gómez Aguilar.

Debido al total cumplimiento de todos sus requisitos, autoriza su presentación.

.....

II

AGRADECIMIENTO:

Mi mayor agradecimiento al Ing. Jaime Sánchez por haberme guiado y brindado sus amplios conocimientos en el desarrollo de este proyecto de tesis.

De la misma manera agradezco a las autoridades del Colegio Técnico Industrial Gualaceo, por su gran colaboración.

III

DEDICATORIA:

El presente proyecto de tesis lo dedico con todo mi corazón a mi abuelita Cruz, a mis padres Vicente y Lucía, a mi hermana Priscila y a mi sobrina Ana Liz.

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo Pablo Mauricio Gómez Aguilar, autor del presente trabajo de tesis titulado: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PUESTAS A TIERRA PARA EL COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL GUALACEO, BASADO EN LAS RECOMENDACIONES PRACTICAS PARA EL ATERRIZAMIENTO EN SISTEMAS ELECTRICOS COMERCIALES E INDUSTRIALES DE LA IEEE”, declaro que:

En el desarrollo de esta tesis los conceptos presentados, analizados y revisados, conjuntamente con las conclusiones y recomendaciones son de exclusiva responsabilidad del autor.

.....

Pablo Mauricio Gómez Aguilar

V

INTRODUCCION

La puesta a tierra de las instalaciones eléctricas y equipos es un tema que afecta a varias de las diferentes disciplinas implicadas en la construcción y en el equipamiento eléctrico de un moderno edificio, centro comercial o industrial, los arquitectos tienen que hablar con los ingenieros, los profesionales de la informática tienen que debatir estos asuntos con los ingenieros eléctricos, etc. Sin embargo, a veces estos ingenieros especialistas no hablan el mismo lenguaje técnico y no son conscientes de las necesidades de las instalaciones de los otros.

En este proyecto de tesis se presenta una aproximación global del tema de las puestas a tierra que va a servir de guía básica para la realización de las puestas a tierra y la supresión de interferencias y que sea utilizable por los equipos multi-disciplinares. En general cualquier sistema de puestas a tierra debe cumplir los siguientes requisitos:

Seguridad: el sistema de puesta a tierra debe conducir las corrientes de cortocircuito y rayos a tierra sin que se produzca una subida de tensión intolerable o tensiones de contacto.

Protección de equipos y funcionalidad: El sistema de puesta a tierra debe proteger los equipos eléctricos y electrónicos, facilitando una ruta de evacuación de baja impedancia a los equipos interconectados. La canalización, ordenación y el apantallamiento adecuado de los cables constituyen aspectos muy importantes y sirven para la producción de averías que podrían afectar el funcionamiento de los equipos antes mencionados.

Rayos y cortocircuito: El sistema de puesta a tierra debe proteger a los ocupantes evitando daños directos tales como: fuego, descargas eléctricas o explosiones a causa del impacto directo de un rayo o a un sobrecalentamiento provocado por una corriente de cortocircuito.

Aunque los requisitos exigibles para estos tres aspectos a menudo se especifican por separado, su aplicación exige una solución integrada para todo el sistema.

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PUESTAS A TIERRA PARA EL
COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL GUALACEO, BASADO EN LAS
RECOMENDACIONES PRACTICAS PARA EL ATERRIZAMIENTO
EN SISTEMAS ELECTRICOS COMERCIALES E INDUSTRIALES
DE LA IEEE”**

INDICE:

**CAPITULO 1: PUESTAS A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
INDUSTRIALES Y COMERCIALES**

1.1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	1
1.1.1 Definiciones.....	2
1.1.2 Propósito de un Sistema de Puesta a Tierra.....	4
1.1.3 Constitución de una puesta a Tierra.....	5
1.1.4 Métodos de puesta a Tierra.....	7
1.1.4.1 Sistema no aterrizado.....	7
1.1.4.2 Sistema aterrizado	8
1.1.4.2.1 Sistema de puesta a tierra mediante impedancia	9
1.1.4.2.2 Sistema de puesta a tierra con baja impedancia (sólidamente puesto a tierra).....	10
1.1.5 Puesta a tierra de sistemas de bajo voltaje y en el interior de locales.....	10
1.1.5.1 Tipos de sistemas.....	10
1.1.6 Conductores de Tierra.....	14
1.1.6.1 Requerimientos del sistema de puesta a tierra	15
1.1.6.2 Conductores de protección y conductores de conexión.....	15
1.1.6.3 Electrodo de tierra.....	16

1.1.6.4 Barras o electrodo vertical.....	17
1.1.6.5 Placas y Mallas.....	18
1.1.6.6 Electrodo horizontales.....	19
1.1.6.7 Electrodo secundarios.....	19
1.1.7 Métodos de Instalación.....	20
1.1.7.1 Barras o electrodo vertical (picas)	21
1.1.7.2 Planchas.....	21
1.1.7.3 Electrodo horizontales.....	22
1.1.7.4 Relleno.....	22
1.1.7.5 Conexiones.....	23
1.1.7.5.1 Conexiones mecánicas.....	23
1.1.7.5.2 Conexiones bronceadas.....	24
1.1.7.5.3 Uniones exotérmicas.....	24
1.1.7.5.4 Conexiones soldadas en forma autógena.....	25
1.1.8 El comportamiento de los electrodos de Tierra.....	26
1.1.8.1 Efecto de la forma, tamaño y posición del electrodo.....	27
1.1.8.1.1 Incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme.....	27
1.1.8.1.2 Incremento de longitud de un conductor horizontal.....	29
1.1.8.1.3 Incremento de la longitud del lado de una plancha o malla de tierra cuadrada....	30
1.1.8.1.4 Incremento del radio de una barra o electrodo de tierra.....	31
1.1.8.1.5 Profundidad de enterramiento.....	31
1.1.8.1.6 Efecto de proximidad.....	32
1.1.8.2 Arreglos complejos de electrodos.....	33
1.1.8.3 Resistividad del terreno.....	35
1.1.8.4 Medida de la resistividad del terreno.....	36
1.2 DISEÑO PARA LA CONEXIÓN A TIERRA.....	41
1.2.1 Normativa para el diseño.....	41
1.2.1.1 Principales normas y reglamentos del diseño de puestas a tierra.....	44
1.2.2 Diseño de sistemas de electrodos de tierra.....	44

1.2.2.1	Sistemas de electrodos de área pequeña.....	46
1.2.2.2	Sistemas de electrodos de área media.....	47
1.2.3	Diseño de puesta a tierra en el interior de edificios.....	50
1.2.3.1	Diseño tipo TN-S.....	51
1.2.3.2	Sistemas de puesta a tierra integrados.....	54
1.3	EL EQUIPO DE PUESTA A TIERRA.....	55
1.3.1	Medición de la Impedancia de Electrodos de Tierra.....	55
1.3.2	Equipo necesario.....	56
1.3.3	Método de la Caída de Potencial para medir la RPT.....	56
1.3.4	Gradientes de Potencial.....	58
1.3.5	Medida de sistemas de electrodos de gran área.....	60
1.3.6	Medida de resistencia de puesta a tierra sobre pavimentos o suelos de concreto.....	61
1.3.7	Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra mediante medidor tipo pinza.....	61
1.3.8	Seguridad.....	64
1.3.8.1	Consideraciones de seguridad en los procedimientos de medida de la Resistencia de puesta a Tierra (RPT).....	64
1.3.8.2	Consideraciones de Seguridad en la medición de la Resistencia de Puesta a Tierra en Pararrayos.....	65
1.4	ESTATICA Y PROTECCION A TIERRA CONTRA RAYOS.....	65
1.4.1	La formación del rayo.....	66
1.4.2	Análisis para colocar un pararrayos, estimación de riesgo.....	67
1.4.3	Componentes de un sistema de protección contra descarga atmosférica.....	68
1.4.3.1	Terminaciones en aire.....	68
1.4.3.2	Conductores de bajada y de conexión.....	69
1.4.3.3	Terminal de tierra.....	70
1.4.3.4	Dispositivos de protección de onda.....	71

**CAPITULO 2: LEVANTAMIENTO Y ANALISIS DE LOS SISTEMAS
ELECTRICOS EXISTENTES EN EL COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL
GUALACEO**

2.1 Datos informativos del CTIG.....	72
2.2 Antecedentes.....	73
2.3 Disposición y distribución de de las redes existentes de M.T. y B.T.....	73
2.3.1 Línea de 22KV.....	73
2.3.2 Acometida.....	74
2.3.3 Transformador TR1.....	74
2.3.4 Medición de la energía.....	75
2.4 Tablero principal de barras de distribución existente en el CTIG.....	76
2.4.1 Descripción de las zonas alimentadas por las diferentes instalaciones eléctricas existentes, en función de los tableros.....	77
2.5 Análisis de los sistemas eléctricos existentes en el CTIG.....	79
2.6 Designación de los diferentes SPT a construirse en función de los tableros.....	79

**CAPITULO 3: MEMORIA TECNICA DESCRIPTIVA DEL DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA EL
COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL GUALACEO**

3.1 Finalidad del diseño constructivo de puestas a tierra en el Colegio Técnico Industrial Gualaceo (CTIG).....	82
3.2 Norma IEEE 80-2: Guía para mediciones del Sistema de Puesta a Tierra (SPT).....	82
3.2.1 Precauciones generales.....	83
3.2.2 Seguridad en la preparación de las pruebas.....	83
3.3 Análisis matemático para la determinación de la resistividad eléctrica de los suelos en el CTIG.....	84
3.3.1 Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos.....	85
3.3.2 Análisis de Humedad en el CTIG.....	86
3.3.3 Análisis de Temperatura.....	87
3.3.4 Análisis de Salinidad en el CTIG.....	87
3.4 Medición de la resistividad del terreno en los diferentes puntos designados para la construcción de las puestas a tierra en el CTIG.....	88
3.4.1 Criterios que se tomaron en cuenta al medir la resistividad del terreno en el CTIG para la elaboración de los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT).....	88
3.4.2 Procedimiento utilizado para la medición de la resistividad del terreno en el CTIG, aplicación del método de Wenner basado en la caída de potencial.....	89
3.4.2.1 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 1 correspondiente al aterrizamiento del Transformador de 100 KVA que alimenta al CTIG.....	91
3.4.2.2 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 2 perteneciente al aterrizamiento del tablero de distribución general del CTIG.....	92
3.4.2.3 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 3 perteneciente al aterrizamiento de los Talleres de Mecánica Industrial y Opciones Prácticas.....	93
3.4.2.4 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 4 perteneciente a los talleres de Electricidad y Electrónica y Refrigeración.....	93
3.4.2.5 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 5 perteneciente al aterrizamiento del Coliseo y Producción.....	94

3.4.2.6 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 6 perteneciente al aterrizamiento del pabellón de aulas de los tres segundos, los tres terceros de educación básica e inspección.....	95
3.4.2.7 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 7 perteneciente al aterrizamiento de los Laboratorios de Computación.....	96
3.4.2.8 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 8 que correspondiente al aterrizamiento de audiovisuales, biblioteca, aulas de los octavos años de básica.....	97
3.4.2.9 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 9 correspondiente al aterrizamiento de los talleres de electricidad y aulas.....	98
3.4.2.10 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 10 correspondiente al aterrizamiento de los departamentos médico, dental, DOBE, laboratorio de electrónica, bodega y aulas.....	99
3.4.2.11 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 11 perteneciente al aterrizamiento del taller de electricidad, laboratorio de física, bodega 2, aula.....	100
3.4.2.12 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 12 correspondiente al aterrizamiento de los talleres de Mecánica Automotriz y Mecatrónica.....	100
3.4.2.13 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 13 correspondiente al aterrizamiento de los talleres de refrigeración y un taller de mecánica automotriz.....	101
3.4.3 Resumen de Valores de Resistividad del terreno obtenidos en cada uno de los SPT proyectados en el CTIG.....	102
3.5 Diseño de los Sistemas de Puesta a Tierra a construirse en el CTIG.....	103
3.5.2 Cálculo y diseño de mallas para los SPT1, SPT3, SPT7.....	103
3.5.2.1 Resultados obtenidos, luego del cálculo para el dimensionamiento de mallas a tierra, utilizados para el aterrizamiento de los SPT1, SPT3, SPT7, con el terreno en estado natural.....	113
3.5.2.2 Análisis para el mantenimiento del SPT2.....	113
3.5.3 Cálculo y diseño del electrodo de puesta a tierra para los SPT en el CTIG.....	114
3.5.3.1 Tabla de resultados obtenidos, luego del cálculo de resistencia a tierra de los diferentes electrodos, utilizados para el aterrizamiento de los SPT4, SPT5, SPT6, SPT8, SPT9, SPT10, SPT11, SPT12, SPT13, con el terreno en estado natural.....	114

3.6 Mejoramiento del terreno para disminuir la resistencia de puesta a tierra en los diferentes SPT.....	115
3.6.1 Tratamiento químico del suelo mediante la adición de Gel.....	116
3.7 Materiales requeridos para la elaboración de los diferentes SPT en el CTIG.....	118
3.8 Construcción del SPT1.....	118
3.9 Mantenimiento del SPT 2.....	125
3.10 Construcción del SPT 3.....	127
3.11 Construcción del SPT7.....	129
3.12 Construcción de los SPT4, SPT5, SPT6, SPT8, SPT9, SPT10, SPT11, SPT12, SPT13, mediante la utilización de electrodo vertical.....	132
3.13 Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra (RPT).....	138
3.14 Tabla de valores de las RPT, medidos en cada uno de los Sistemas de Puesta a Tierra construidos en el CTIG.....	139
3.15 Análisis de resultados.....	139

CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.....	141
4.2 Recomendaciones.....	142
Bibliografía.....	144
Anexos.....	145

CAPITULO 1: PUESTAS A TIERRA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES Y COMERCIALES

1.1 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La mayoría de los sistemas eléctricos necesitan ser aterrizados, por tal motivo esta práctica en función del tiempo ha continuado y se ha desarrollado progresivamente, de modo que tales conexiones a tierra se encuentran en casi todos los puntos del sistema eléctrico. Incluyéndose la estación generadora, las líneas de transmisión, los cables que distribuyen la energía eléctrica y los locales domiciliarios, comerciales e industriales en los cuales se utiliza.

En el transcurso de los últimos años, es visible un rápido desarrollo en lo referente a los sistemas eléctricos, tal es el punto que debemos estar conscientes en que debe existir un modelamiento de sistemas de puesta a tierra, motivo por el cual esto ha incrementado el interés, comprensión y aplicación del tema propiamente dicho, teniendo en cuenta al mismo tiempo que la actividad del diseño ha llegado a ser muy significativo debido a que las nuevas normas requieren diseños seguros, confiables y eficientes.

Es así que mediante el desarrollo de este proyecto se tendrá la oportunidad de explicar más claramente los conceptos que intervienen en lo que se refiere a puestas a tierra y una necesidad de que estos conocimientos sean traspasados a los diseñadores e instaladores, de tal modo que pueda lograrse una mayor comprensión del tema en estudio.

La IEEE define como sistema de puesta a tierra a la conexión conductora, por medio de la cual un circuito o equipo eléctrico se conecta a tierra, o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de tierra.

Se entiende por puesta a tierra la unión eléctrica de un equipo o componente de un sistema eléctrico a tierra por medio de dispositivos que son conductores de electricidad adecuados. Es importante mencionar que el término normalizado para designar la resistencia ofrecida al paso de una corriente eléctrica hacia el suelo a través de una puesta a tierra es “Resistencia de Puesta a Tierra” (RPT).

Una puesta a tierra presenta resistencia, capacitancia e inductancia, cada cual influye en la capacidad de conducción de corriente a tierra. Por lo tanto, no se debe pensar solamente en una resistencia de puesta a tierra, sino más bien en una impedancia de puesta a tierra.

Para bajas frecuencias, bajas corrientes y valores de resistividad del suelo no muy elevados, son despreciables los efectos capacitivos y de ionización del suelo y el mismo se comporta prácticamente como una resistencia. También hay que tener en cuenta que para el caso de altas frecuencias, es necesario considerar el efecto capacitivo, principalmente en suelos de altas resistividades. Las ondas tipo rayo sufren la oposición de la reactancia inductiva de las conexiones al penetrar el suelo propiamente dicho.

1.1.1 Definiciones

Las definiciones que a continuación se mencionan están establecidas de acuerdo a las especificaciones IEEE Std 81-1983.

Puesta a Tierra: Es toda aquella conexión intencional del sistema eléctrico con un elemento considerado tierra. Es aplicada a todo el equipo o parte de una instalación eléctrica (neutro, centro estrella de transformadores o generadores, carcazas, incluido también una fase para sistemas en delta, entre otros sistemas), que posee una conexión intencional mediante un elemento mejor conocido como puesta a tierra.

Tierra: Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a sistemas de puesta a tierra propiamente dichos. En cuanto a los temas eléctricos es asociado el suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. Solo se debe utilizar el término “masa” para aquellos casos en que la referencia no es el suelo, como en el caso de: los aviones, los barcos, los carros entre otros.

Conductor de Puesta Tierra: Se define de esta manera al conductor que es conectado sólidamente de manera intencional a una puesta a tierra, para conectar a tierra los diferentes puntos de una instalación.

Resistividad del Suelo: Mediante este término se define a la resistencia específica del suelo a cierta profundidad, pudiendo ser también un estrato del suelo; se obtiene indirectamente mediante mediciones realizadas en un determinado campo; su magnitud se expresa en $(\Omega * m)$ u $(\Omega * cm)$, es inversa a la conductividad. Entonces la resistividad eléctrica (ρ) es la relación que se da entre la diferencia de potencial en un material y la densidad de corriente que resulta en el mismo.

Resistividad Aparente: Se trata de la resistividad que se obtiene con una medida directa en el suelo natural, realizado por el método de cuatro electrodos, aplicando circuitos de tipo independientes, de corriente y potencial, siendo solo representativo para un punto del suelo.

Resistencia mutua entre Electroodos: Es aquel fenómeno resistivo que aparece entre electrodos de puesta a tierra o puntos próximos ubicados en el suelo, hay que tener en consideración que la corriente que se dispersa a través de uno de ellos, modifica el potencial del otro, su unidad de medida es el Ohmio (Ω).

Potencial Eléctrico: Se denomina así a la diferencia de voltaje existente entre un punto y alguna superficie equipotencial que generalmente es la superficie del suelo, la misma que es seleccionada arbitrariamente como potencial cero o tierra remota, entonces hay que conocer que el punto el cual tiene un potencial más alto que el cero se llama potencial positivo y en caso contrario será denominado potencial negativo.

Tierra Remota: Conocida también como Tierra de Referencia, es el lugar, espacio o la zona de mínima resistencia, más cercana del suelo subyacente a una instalación eléctrica o a una puesta a tierra, respecto de las cuales se le atribuye por convención el valor del potencial cero.

1.1.2 Propósito de un Sistema de Puesta a Tierra

El propósito de un sistema de puesta a tierra se puede resumir en lo siguiente:

- Proporcionar una impedancia suficientemente baja para facilitar la operación satisfactoria de las protecciones en condiciones de falla.
- Asegurar que los seres vivos presentes no queden expuestos a potenciales inseguros, en régimen permanente o en condiciones de falla.
- Permitir la conducción a tierra de cargas estáticas o descargas atmosféricas.
- Garantizar a niveles seguros los valores de la tensión a tierra de equipos o estructuras accidentalmente energizados y mantener en valores determinados la tensión fase-tierra de sistemas eléctricos, fijando los niveles de aislamiento.
- Limitar el voltaje a tierra sobre materiales conductivos que circundan conductores o equipos eléctricos.

Por otro lado en el interior de instalaciones es también necesaria una conexión a tierra, para asegurar la correcta operación del equipo por ejemplo dispositivos electrónicos. Es primordial considerar la puesta a tierra como un sistema completo y asociado al sistema eléctrico por lo tanto hay que diseñarla e instalarla de la manera adecuada.

La puesta a tierra de instalaciones eléctricas se relaciona en primera instancia con la seguridad, por lo tanto debe ser diseñada normalmente para cumplir dos funciones de seguridad.

La primera es establecer conexiones equipotenciales: Toda estructura metálica conductiva expuesta, puede ser tocada por una persona, se conecta a través de conductores de conexión eléctrica. La mayoría de los equipos eléctricos se aloja en el interior de cubiertas metálicas y si un conductor energizado llega a entrar en contacto con éstas, la cubierta también quedará temporalmente energizada. La conexión a tierra es para asegurar que, si tal falla ocurriese, entonces el potencial sobre todas las estructuras metálicas conductivas expuestas sea virtualmente el mismo. Dicho de otra manera, la conexión a tierra iguala el potencial en el interior del local, motivo por el cual las diferencias de potencial resultantes son mínimas, de este modo, se crea una “superficie equipotencial”

La segunda función de un sistema de puesta a tierra es garantizar que cuando se produzca una falla a tierra, toda la corriente de falla que se origine, pueda retornar al sistema de una forma controlada: Por una forma controlada se entiende que la trayectoria de retorno está predeterminada, de tal modo que no ocurra daño al equipo o lesión a las personas. La conexión a tierra no es de capacidad infinita e impedancia nula. Sin embargo, la impedancia del sistema de tierra deberá ser lo bastante baja de modo que pueda fluir suficiente corriente de falla a tierra para que operen correctamente los dispositivos de protección, los cuales a su vez provocarán la operación de interruptores o fusibles para interrumpir el flujo circulatorio de corriente.

1.1.3 Constitución de una puesta a tierra

La resistencia ofrecida al paso de la corriente eléctrica a través de un electrodo dirigida hacia el suelo tiene tres componentes principales (Figura 1-1):

1. Se trata de la resistencia del electrodo (metal): La cual es despreciable en comparación con el ítem 3.
2. Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo. Se puede despreciar si el electrodo está exento de cualquier cubierta aislante como tintas, pinturas, grasa, etc.; y si la tierra está bien compactada en la zona de contacto de sus paredes.
3. Resistencia de la tierra circundante: ésta en realidad es la componente que influye en el valor de la resistencia de una puesta a tierra y depende básicamente de la resistividad del suelo y de la distribución de la corriente proveniente del electrodo.

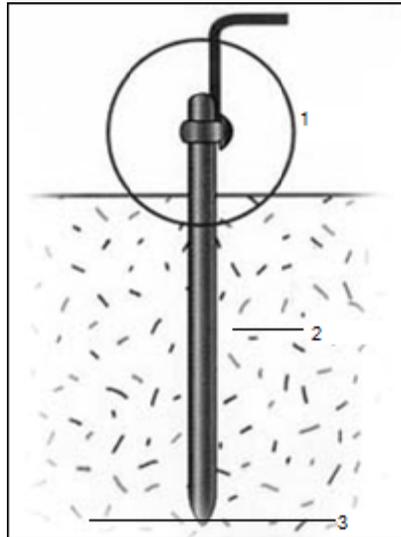


Figura 1-1. Elementos que constituyen una puesta a tierra.

En la Fig.1-1 también se ilustra lo que se encuentra alrededor del electrodo de puesta a tierra, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias serie de las celdas o capas concéntricas circundantes del suelo, localizadas progresivamente hacia fuera del electrodo, a medida que aumenta la distancia, será notorio que las capas del suelo presentan una mayor área transversal a la corriente y por tanto una menor resistencia. Entonces hay que tener en cuenta que la resistencia de puesta a tierra reside esencialmente en las capas de suelo más próximas al electrodo. Normalmente para una varilla de 1,80 m. de longitud, el 90% del valor de la resistencia de puesta a tierra se encuentra dentro de un radio de 2 m.

1.1.4 Métodos de puesta a Tierra

Hay que considerar la puesta a tierra de redes de potencia en primer lugar, ya que el método de puesta a tierra de estas redes influye fuertemente el método subsiguiente escogido en el interior de construcciones residenciales, comerciales o industriales.

Para realizar el diseño de puestas a tierra es necesario conocer las diferentes técnicas, que se desarrollarán en función de todos los detalles de los puntos que siguen a continuación:

1.1.4.1 Sistema no aterrizado

Este sistema no tiene una conexión a tierra formal, intencional o deliberada. Pueden existir algunas conexiones de alta impedancia para instrumentación, por ejemplo el bobinado de un instrumento de medida (transformador de potencial o de corriente). En condiciones normales, la capacidad entre cada fase y tierra es sustancialmente la misma. El efecto es estabilizar el sistema respecto a la tierra de modo que en un sistema trifásico, el voltaje de cada fase a tierra es el voltaje estrella del sistema. El punto neutro, si existe y está presente, está en o cerca del potencial de tierra como se puede observar en la Figura 1-2

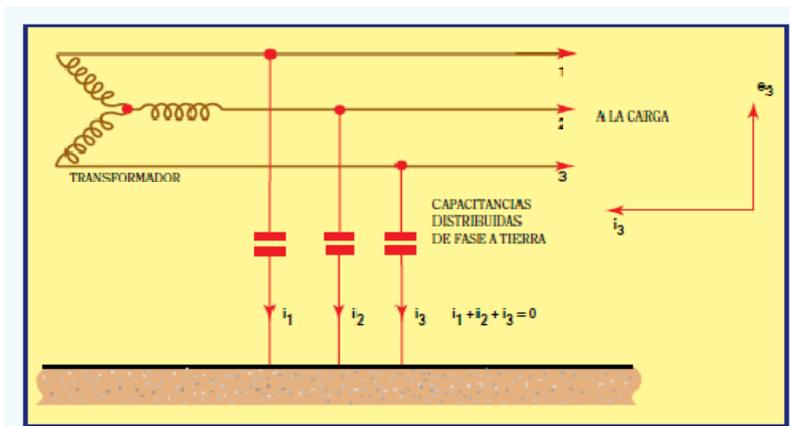


Figura 1-2. Corrientes capacitivas en un sistema trifásico

No son infrecuentes fallas en líneas de distribución aéreas, estas pueden ocurrir durante condiciones de mal tiempo, cuando caen ramas de árboles sobre las líneas. Entonces cuando se da el primer incidente, implicando un contacto entre un conductor y tierra, puede no haber daño porque no existe un circuito conductor cerrado que permita el flujo de corriente. Esto es diferente en un sistema aterrizado donde puede fluir una corriente significativamente alta. Es notorio a primera vista, el sistema no aterrizado aparenta ser un sistema más seguro y más confiable. Realmente fluye una corriente en un sistema no aterrizado, que retorna vía los acoplamientos capacitivos de las otras dos fases. La corriente capacitiva que fluye en el punto de falla es tres veces la corriente capacitiva normal a tierra de cada fase del sistema completo. El daño producto de la primera falla probablemente sea leve, debido a que la corriente total es aún relativamente pequeña. Sin embargo, la corriente podría ser suficiente para provocar riesgo de electrocución si alguien tocara el conductor dañado.

Es lógico mencionar que la continuidad de servicio es un factor importante para el sistema de distribución, entonces un sistema no aterrizado puede tener algunas ventajas. Motivo por el cual, es probable que la aislación aplicada entre cada conductor de fase y tierra necesite incrementarse al menos al mismo nivel que la aislación entre diferentes fases, para controlar el riesgo por fallas monofásicas a tierra y por carga encerrada.

1.1.4.2 Sistema aterrizado

Un sistema aterrizado (o puesto a tierra) tiene al menos un conductor o punto (centro estrella) intencionalmente conectado a tierra. Debido a condiciones prácticas y de costo, esta conexión se realiza normalmente cerca de donde se unen los tres bobinados individuales de un transformador trifásico, es decir el neutro o el centro estrella.

Este método se adapta cuando hay necesidad de conectar al sistema cargas fase neutro, para prevenir que el voltaje neutro a tierra varíe con la carga.

La conexión a tierra tiene por objetivo reducir las fluctuaciones de voltaje y los desequilibrios que podrían darse de otra forma.

Una ventaja más es que puede usarse relés residuales para detectar fallas antes que se conviertan en fallas fase-fase. Esto puede reducir el daño real causado y la solicitud impuesta en otras partes de la red eléctrica.

A continuación se indica la clasificación del tipo de puesta a tierra según el tipo de conexión instalada. Los principales tipos son:

1.1.4.2.1 Sistema de puesta a tierra mediante impedancia

En este sistema se colocan deliberadamente resistores y/o reactancias en la conexión entre el punto neutro y tierra, normalmente esto se efectúa para limitar la corriente de falla a un nivel aceptable. En teoría, la impedancia puede ser lo bastante alta como para que fluya una corriente de falla poco mayor que en la situación de sistema no aterrizado. En la práctica, para evitar sobrevoltajes transitorios excesivos debido a resonancia con la capacitancia en paralelo del sistema, las puestas a tierra inductivas deben permitir que fluya a tierra por falla al menos un 60% de la capacidad de cortocircuito trifásico. Esta forma de puesta a tierra tiene menor disipación de energía que la puesta a tierra resistiva.

También es utilizable como conexión a tierra bobinas de supresión de arco, también conocidos como bobinas de Peterson, o neutralizadores de falla a tierra. Estas son reactancias sintonizadas que neutralizan el acoplamiento capacitivo de las fases sanas y de este modo la corriente de falla es mínima. Dado que la naturaleza auto-compensada de este tipo de puesta a tierra, es efectiva en ciertas circunstancias en sistemas aéreos de media tensión, por ejemplo, aquellos que están expuestos a un alto número de fallas transitorias. Con el uso de interruptores de reconexión automática se ha reducido el uso de este método de puesta a tierra en sistemas de alta y media tensión. La puesta a tierra por resistencia es de uso más común, porque permite limitar la corriente de falla y atenuar los sobrevoltajes

transitorios, eligiendo el valor correcto de resistencia. A inicios se utilizó resistencias líquidas.

Hoy en día es más común el uso de resistores del tipo cerámico. Estos requieren menos espacio, tienen menores costos de mantenimiento y luego del paso de la corriente de falla se enfrían más rápido que las resistencias líquidas usadas a inicios.

1.1.4.2.2 Sistema de puesta a tierra con baja impedancia (sólidamente puesto a tierra)

Particularmente en bajo voltaje esta es una técnica muy común. En este sistema el neutro se conecta a tierra a través de una conexión adecuada en la cual no se agrega intencionalmente ninguna impedancia. Una de las desventajas de este arreglo es que las corrientes de falla a tierra son normalmente altas pero los voltajes del sistema permanecen controlados bajo condiciones de falla.

1.1.5 Puesta a tierra de sistemas de bajo voltaje y en el interior de locales

Hasta el momento se ha revisado los tipos de puesta a tierra existentes en Sistemas de Potencia, se considera ahora el sistema de bajo voltaje e instalación eléctrica en el interior de locales residenciales, comerciales e industriales.

1.1.5.1 Tipos de sistemas

Hay ciertos métodos determinados para efectuar una conexión a tierra, los cuales reciben definiciones estándares. Cada uno se identifica por un código que contiene las siguientes letras:

T : tierra, conexión directa a tierra.

N : neutro

C : combinada

S : separada

En el desarrollo de este estudio se describen los tipos principales, incorporando las figuras y diagramas que permiten explicarlos con más detalle. Hay que tomar en cuenta y notar que los electrodos de tierra en los diagramas incluyen el símbolo del resistor para mostrar que el electrodo tiene una impedancia, que es predominantemente resistiva.

TN-S: En este tipo, el neutro de la fuente tiene un único punto de conexión a tierra en el transformador de alimentación. Los cables de alimentación tienen neutro separado del conductor de tierra de protección. Generalmente, el conductor de neutro es un cuarto “conductor” y el conductor de tierra forma una vaina o cubierta protectora (conductor PE). Este era el arreglo estándar antes de la introducción de los sistemas de puestas a tierra de protección múltiples, el mismo que muestra en la Figura 1-3.

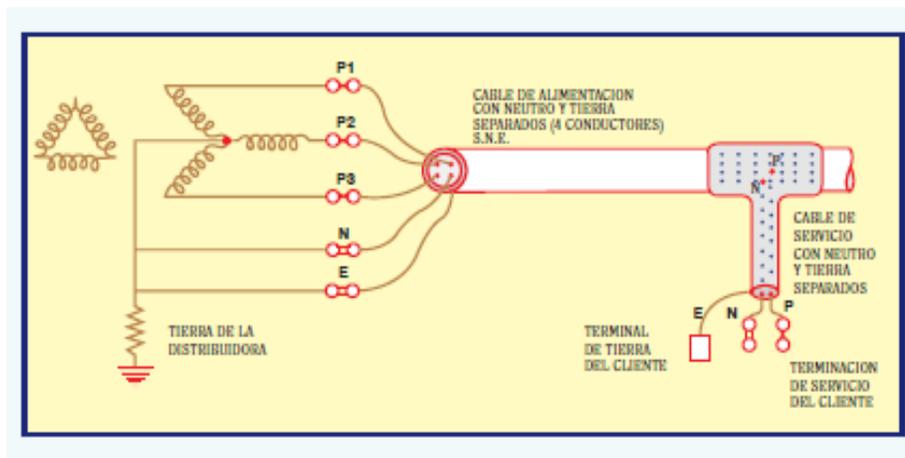


Figura 1-3. Sistema TN-S. Fuente puesta a tierra en único punto.
Conductores de neutro y tierra separados.
Se dispone de un terminal de tierra desde la pantalla del cable de servicio

TN-C-S: En este tipo, y mediante la Figura 1-4 se puede observar que el neutro de la alimentación es puesto a tierra en varios puntos. El cable de alimentación tiene una pantalla metálica externa que combina neutro y tierra, con una cubierta de PVC. La pantalla que combina neutro y tierra es el conductor tierra de protección del neutro.

El fabricante proporciona un terminal de tierra, que está conectado al neutro de la alimentación. La alimentación en el interior de la instalación del usuario debiera ser TN-S, es decir, el neutro y la tierra deben estar separados, conectados sólo en la posición de servicio. Dado a que se permite al cliente o usuario utilizar el terminal de tierra, el proveedor debe asegurarse que todos los elementos metálicos internos, normalmente expuestos (tales como tuberías de agua, de gas, calefacción, etc.) se conecten juntos en la forma prescrita en las normas.

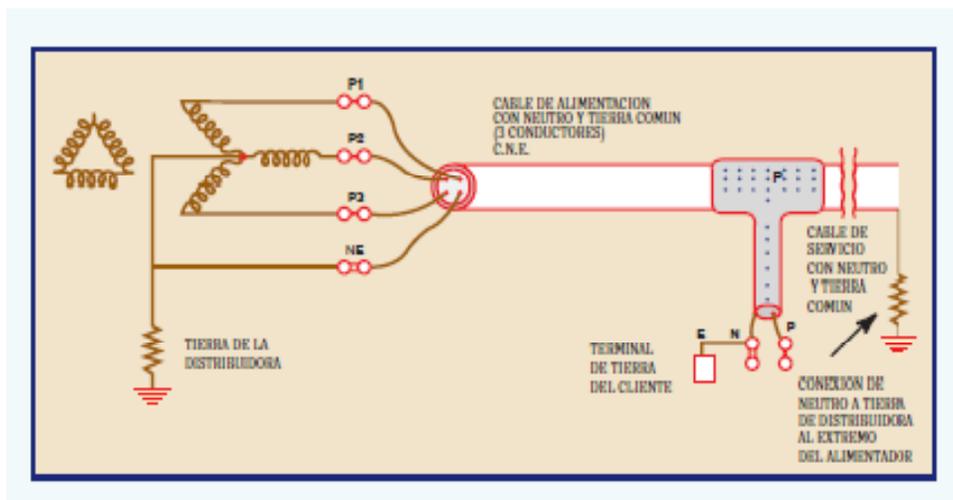


Figura 1-4. Suministro TN-C-S (tierra de protección múltiple)
 Neutro puesto a tierra por el proveedor en varias ubicaciones.
 El cliente o usuario dispone de un terminal de tierra conectado a neutro de servicio

PNB: Conocido como conexión a neutro de protección. Este es una variación del sistema TN-C-S en que el cliente o usuario dispone de un terminal de tierra conectado al neutro de la alimentación, pero el neutro se conecta a tierra en un único punto, normalmente cerca del punto de alimentación al cliente. Se reserva el uso de este arreglo cuando el cliente tiene un transformador particular, se ilustra en la Figura 1-5.

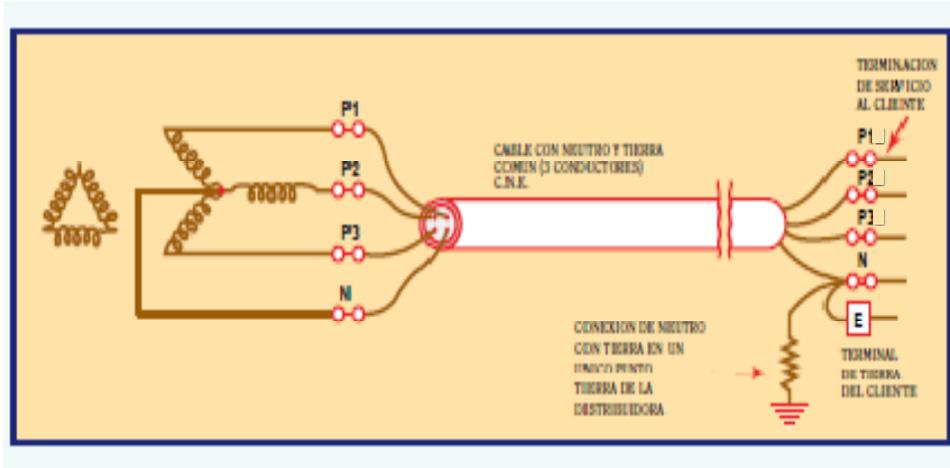


Figura 1-5. Sistema PNB
 El cliente o usuario tiene transformador propio.
 Se usa cables CNE con tierra y neutro en único punto

TT: Este es un sistema donde la alimentación se pone a tierra en un único punto, pero se puede notar que la pantalla del cable y las partes metálicas expuestas de la instalación del cliente están conectadas a tierra vía un electrodo separado que es independiente del electrodo de alimentación, su constitución se puede observar en la Figura 1-6.

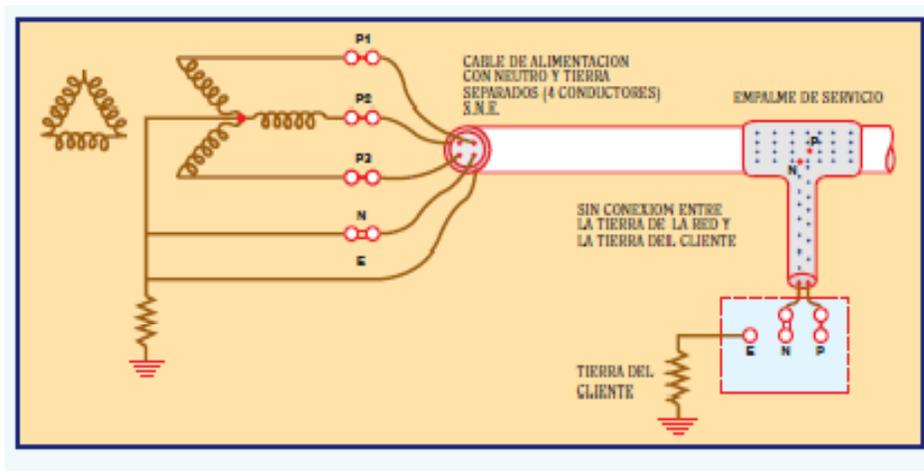


Figura 1-6. Sistema TT. La alimentación se pone a tierra en un único punto.
 El cliente instala su tierra propia que es independiente de la tierra de la alimentación

IT Este es un sistema que no tiene conexión directa entre partes vivas y tierra pero con las partes conductivas expuestas de la instalación conectada a tierra. En algunas ocasiones se proporciona una conexión a tierra de alta impedancia para simplificar el esquema de protección requerido para detectar la primera falla a tierra, esto se puede observar en la Figura 1-7.

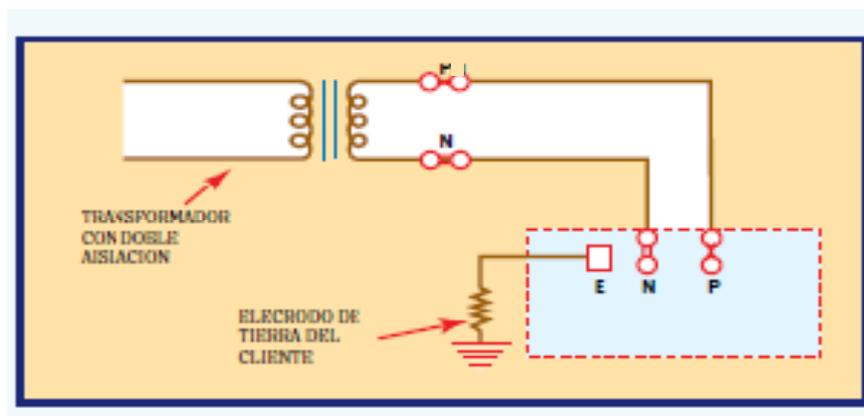


Figura 1-7. Fuente aislada de tierra o conectada a tierra a través de alta impedancia. Todas las partes conductivas expuestas de la instalación se conectan a una tierra independiente

El principio subyacente es tomar primero todas las precauciones razonables para evitar un contacto directo con las partes eléctricas vivas y en segundo lugar proporcionar medidas de protección contra contactos indirectos. Lo último implica puesta a tierra y conexión equipotencial efectiva y un sistema de protección que remueva la condición de falla.

1.1.6 Conductores de Tierra

Anteriormente se presentó la variedad de modos de puesta a tierra posibles, es necesario considerar ahora el sistema mismo de puesta a tierra. Entonces es muy valioso explicar a continuación las funciones más importantes de los conductores de tierra, presentándose algunas definiciones. Además se describen los diferentes tipos de electrodos de tierra disponibles, se usan generalmente los mismos tipos, ya sea si el sistema de puesta a tierra es para un sistema eléctrico domiciliario, industrial o comercial.

1.1.6.1 Requerimientos del sistema de puesta a tierra

La función del sistema de puesta a tierra es doble:

- Debe proporcionar un camino de impedancia suficientemente baja, vía los conductores de tierra, de regreso a la fuente de energía, de tal modo que ante el evento de una falla a tierra de un conductor activo, fluya por una ruta predeterminada una corriente suficiente, que permita operar al dispositivo de protección del circuito.
- Otra función es limitar a un valor seguro la elevación de potencial en todas las estructuras metálicas a las cuales tienen normalmente acceso personas y animales, bajo condiciones normales y anormales del circuito. La conexión conjunta de todas las estructuras metálicas normalmente expuestas, previene la posibilidad de una diferencia de potencial peligrosa que surja entre contactos metálicos adyacentes ya sea bajo condiciones normales o anormales.

Existen dos tipos principales de conductores de tierra: los conductores de protección (o de conexión) y los electrodos de tierra.

1.1.6.2 Conductores de protección y conductores de conexión

Conductor de protección de circuito:

Este es un tipo de conductor separado instalado con cada circuito, estando presente para asegurar que parte o toda la corriente de falla regrese a la fuente a través de él. Este puede ser un conductor individual, la cubierta metálica exterior de un cable o la estructura de un ducto metálico.

Conductores de conexión:

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

Conductores de conexión equipotencial principales:

Estos son los que conectan entre sí y a tierra, partes conductivas expuestas que normalmente no llevan corriente, pero podrían hacerlo bajo una condición de falla. Estas conexiones normalmente unen al sistema de puesta a tierra lo que son tuberías metálicas de gas y agua expuestas que ingresan a la instalación, estructura metálica del edificio y servicios principales. En el interior de instalaciones, estas conexiones deben ser de un cierto tamaño mínimo (al menos 6 mm^2 , aproximadamente #8AWG) y generalmente no necesitan ser mayor que 25 mm^2 (aproximadamente # 4AWG) en cobre.

Conductores de conexión suplementarios:

Estos conductores son para asegurar que el equipo eléctrico y otros ítems de material conductivo en zonas específicas estén conectados entre sí y permanecen sustancialmente al mismo potencial. Son utilizados en adición a los conductores de conexión equipotencial principales y conductor de protección de circuito.

1.1.6.3 Electrodo de tierra

Un electrodo de tierra es aquel componente del sistema de puesta a tierra que está en contacto directo con el terreno proporcionando un medio para descargar o absorber cualquier tipo de corriente de fuga a tierra. Se requerirá normalmente en los sistemas puestos a tierra, llevar una corriente de falla bastante grande por un corto período de tiempo y, en consecuencia, se necesitará tener una sección suficientemente grande como

para ser capaz de llevar esta corriente en forma segura. Deben tener los electrodos propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para continuar respondiendo a las sollicitaciones durante un período de tiempo relativamente largo, en el cual es difícil efectuar ensayos reales o inspección alguna. El material deberá poseer una buena conductividad eléctrica y no corroerse.

Los materiales usados son: cobre, acero galvanizado, acero inoxidable y hierro fundido, el cobre generalmente es el material preferido, el aluminio se usa algunas veces para conexiones fuera del terreno, pero la mayoría de los estándares prohíben su uso como electrodo de tierra debido al riesgo de corrosión acelerada. El producto corrosivo deja de ser conductivo y reduce la efectividad de la puesta a tierra. El electrodo puede tomar diversas formas pudiendo ser estas: barras verticales, placas y conductores horizontales. A continuación se describen las formas más comunes.

1.1.6.4 Barras o electrodo vertical (picas)

Es la forma más común de electrodos, porque su costo de instalación es relativamente bajo y pueden usarse para alcanzar en profundidad un suelo de baja resistividad, sólo con excavación limitada y relleno. Están disponibles en diversos tamaños, longitudes, diámetros y materiales. La barra está elaborada de cobre puro o de acero recubierto de cobre. El tipo recubierto se usa cuando la barra se entierra por medios mecánicos (impacto) ya que el acero usado tiene alta resistencia mecánica. Hay que tomar en cuenta que la capa de cobre debe ser de alta pureza y aplicada electrolíticamente, esto asegura que el cobre no se deslice al enterrar la barra. En condiciones de suelo más agresivo, por ejemplo cuando hay alto contenido de sal, se usan barras de cobre sólido. Las barras de acero inoxidable son más anódicas que el cobre y se usan ante riesgo de corrosión galvánica. Hay que tomar en consideración el hecho que el acero inoxidable tiene baja capacidad de transporte de corriente en comparación con el cobre.

En cada extremo de la barra hay sectores tratados que permiten disponer de un extremo aguzado, un extremo con una cabeza endurecida o con hilo para atornillar barras adicionales. Importante es señalar en el caso de barras recubiertas, que la capa de cobre se mantenga intacta en la sección fileteada (con hilo).

Se dispone de secciones apantalladas de barra para uso, por ejemplo, cuando hay una capa de suelo altamente corrosivo, a través de la cual debe atravesar una barra profunda. La pantalla debe ser por ejemplo de PVC para prevenir el contacto entre la barra y el suelo corrosivo. Por supuesto esta sección no contribuye a reducir el valor de impedancia, puesto que no está en contacto con el suelo propiamente dicho.

1.1.6.5 Placas y Mallas

Son utilizados varios tipos de placas o de mallas para propósitos de puesta a tierra, pero el único tipo que se considera generalmente como electrodo debe ser sólido y de tamaño sustancial. Las placas tipo enrejado, tal como se muestra en la Figura 1-8, se usan para graduar potenciales y no se espera que permitan el paso de niveles de corriente de falla significativos. Normalmente se construyen mallas de cobre o de acero recubierto.

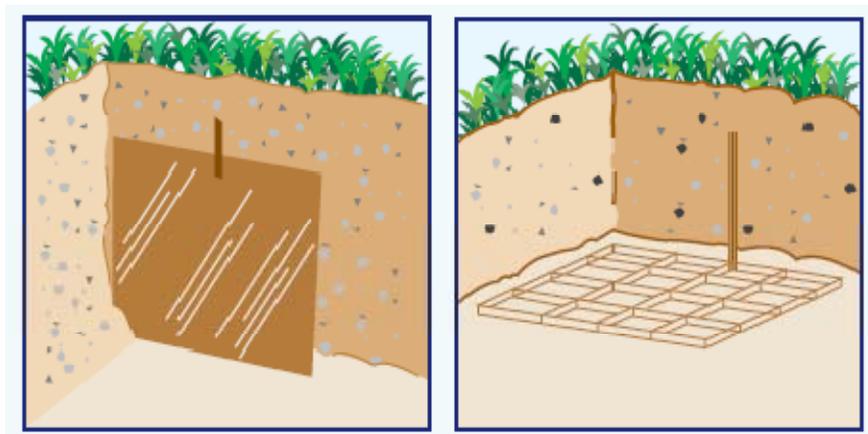


Figura 1-8. Placas y mallas de tierra

1.1.6.6 Electrodo horizontales

Estos están hechos de cintas de cobre de alta conductividad o conductores retorcidos (cable flexible). La cinta es el material más conveniente pues para una sección dada de material presenta una mayor superficie y se considera que tiene un comportamiento mejor a alta frecuencia, debido a la capacitancia levemente mayor a tierra. Puede ser más difícil de conectar (por ejemplo a barras verticales), de modo que puede significar un costo de instalación levemente mayor. Para reducir costos globales, la cinta se puede usar para los electrodos que llevarán la mayor corriente (por ejemplo electrodos del perímetro y conexiones principales a los equipos) mientras que el conductor flexible puede usarse en otra parte. La cinta que se instala bajo tierra es totalmente recocida de modo que puede ser plegada fácilmente. Para realizar conexiones exteriores al terreno está disponible la cinta cubierta de PVC, conductores sólidos o flexibles. También existen cintas de cobre cubiertas de plomo o estaño para aplicaciones en casos especiales.

1.1.6.7 Electrodo secundarios

Existen algunos tipos interesantes de electrodos secundarios, su propósito es mejorar el comportamiento de un electrodo de tierra. Ellos incluyen pozos de tierra y embalses de terreno, un pozo de tierra puede comprender varias tuberías largas enterradas verticalmente en el suelo, están conectadas entre sí y rodeadas por un material de baja resistividad, también pueden ser tipo espiral o muelle.

Un embalse de tierra es típicamente una cavidad en una ubicación donde se pueda mantener la humedad, que está llena con desechos metálicos y otro material conductivo. Un ejemplo de electrodo secundario consiste de un tubo de cobre de 50 mm de diámetro, el cañón interior se llena parcialmente con sales metálicas en bruto y los extremos superior e inferior del tubo se sellan con tapas. Se perfora el tubo en la parte superior para ventilación y también para drenaje en la parte inferior, el material de relleno recomendado es bentonita.

El dispositivo funciona de la siguiente manera:

Producto de los cambios en la presión atmosférica y del movimiento natural del aire, se bombea aire a través de los huecos de ventilación, en la parte superior del tubo. La humedad existente en el aire absorbido entra en contacto con la sal y se forman gotas de agua vía un proceso higroscópico. Al acumularse la humedad, se forma una solución electrolítica que escurre hacia la parte inferior del tubo. Con el tiempo se forma suficiente electrolito el cual fluye a través de las perforaciones inferiores de drenaje hacia el suelo circundante, mediante osmosis. De esta manera, el electrolito forma “raíces” en el terreno que lo rodea, las cuales ayudan a mantener su impedancia en un nivel bajo.

1.1.7 Métodos de Instalación

Cuando se realizan los trabajos de instalación de los electrodos de tierra, se deben satisfacer tres condiciones:

- El trabajo debe ser realizado eficientemente para minimizar costos de instalación.
- El terreno o material de relleno usado no debe tener un índice de acidez pH que cause corrosión al electrodo, además deberá tener un valor bajo de resistividad
- Todas las uniones o conexiones bajo tierra deben ser construidas de modo que no se presente corrosión en la unión o conexión.

El método de instalación, relleno y conexiones que se detalla en los siguientes párrafos dependerá del tipo de sistema de electrodos que se usará y de las condiciones del terreno.

1.1.7.1 Barras o electrodo vertical (picas)

Las barras generalmente ofrecen la forma más conveniente y económica de instalarse. A menudo se requiere modificar poca superficie (tal como romper superficies de concreto). Los métodos de instalación incluyen accionamiento manual, accionamiento mecánico y perforación. Las barras (hasta 1,80 m. de largo) se instalan a menudo empleando un martillo pesado (combo) operado manualmente. Los golpes relativamente cortos y frecuentes son más efectivos normalmente. Las barras están acondicionadas con una cabeza endurecida y una punta de acero para asegurar que la barra misma no se dañe durante el proceso.

1.1.7.2 Planchas

A comienzos de siglo, las planchas eran tan comunes que a todos los electrodos de tierra se les llamaba planchas de tierra. Cuando se incrementó el uso de la electricidad, las planchas debieron manejar corrientes mayores, lo cual significó aumentar las dimensiones de la plancha. Su uso continuó por un tiempo considerable, principalmente debido a la costumbre y la práctica, a pesar de que tenían algunas desventajas. Por ejemplo, generalmente requieren excavación manual o mecánica y, por lo tanto, el costo de instalación puede ser muy alto.

Para reducir la magnitud de la excavación requerida, las planchas se instalan normalmente en un plano vertical, desde aproximadamente 0,5 metros bajo la superficie. Es fácil compactar el terreno contra la plancha cuando se rellena, si está instalada verticalmente. Si las planchas tienen que llevar una cantidad importante de corriente, entonces su resistencia necesita ser de bajo valor. En la práctica, las resistencias combinadas no eran aún lo suficientemente bajas y las corrientes de falla generalmente seguían otras rutas. De esta manera por lo tanto, en esta situación no se cumplía la mejor densidad de corriente, señalada como una ventaja para las planchas. Usualmente podía lograrse un arreglo mejor

usando barras y electrodos horizontales. Debido al costo de instalación relativamente alto, poco se justifica usar planchas, en las existentes cuando se detecta deterioro, son reemplazadas normalmente por un conjunto de barras.

1.1.7.3 Electrodo horizontales:

Los electrodos horizontales pueden ser instalados en surcos directamente en el terreno o más frecuentemente en zanjas de hasta un metro de profundidad. El uso de equipo de excavación mecánica de pala angosta puede resultar en costos de instalación menores, en sitios donde esto es posible. La profundidad de instalación tiene normalmente un mínimo de 0,6 metros y más si es necesario pasar bajo el nivel de cultivo o de escarcha en zonas heladas. En algunos proyectos grandes, toda el área puede ser excavada para permitir obras civiles. Esto presenta a menudo una buena oportunidad para minimizar costos tendiendo el conductor del electrodo de tierra en ese momento. Hay que tener cuidado de prevenir el daño o robo del conductor, una vez tendido.

1.1.7.4 Relleno

El material de relleno no debe ser corrosivo, de un tamaño de partícula relativamente pequeño y si fuera posible, que ayude a retener la humedad. A menudo, el material previamente excavado es apropiado como relleno, pero debiera ser cernido para remover piedras antes de rellenar, asegurándose de que quede bien compactado. El suelo debiera tener un índice de pH entre 6,0 (ácido) y 10,0 (alcalino). La arcilla dura no es un material de relleno conveniente ya que si es fuertemente compactada, puede llegar a ser casi impermeable al agua y podría permanecer relativamente seca. Puede formar también grandes terrones que no se afianzan alrededor del conductor. Los materiales que no deben ser usados como relleno son: arena, polvo, ceniza, muchos de los cuales son ácidos y corrosivos. En algunas ocasiones, se requiere materiales de relleno de tipo especial como por ejemplo el gel, esto con el objetivo de mejorar la resistividad del suelo, con adición de gel al terreno se consigue reducciones en la resistencia de puesta a tierra que van de 25% al 80% del valor original sin tratamiento.

1.1.7.5 Conexiones

Los electrodos de tierra tienen que ser conectados entre sí de alguna manera y es normal que sea vía cobre desnudo si es posible, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global. Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es muy importante evitar uniones y conexiones innecesarias. Debe considerarse el valor de corriente de falla y la duración de la falla que se espera que soporte el sistema de tierra.

A continuación se explican con mayor detalle los métodos de unión que se emplean, incluyendo métodos mecánicos, bronceados (soldadura en fuerte), soldadura exotérmica y soldados por fusión autógena.

1.1.7.5.1 Conexiones mecánicas

Estas se utilizan comúnmente y pueden ser mecánicas (conexión apernada) o hidráulicas (compresión). Los conectores deben satisfacer los requerimientos de los estándares aplicables. El proceso de probar el cumplimiento de las normas involucra habitualmente una serie de pruebas de vida durante las cuales el conector es sometido a impactos mecánicos, eléctricos y térmicos. En consecuencia son factores importantes el diseño, tamaño y material usado particularmente ya que tales conectores pueden permanecer invisibles en el terreno por cierto número de años, antes de que sean solicitados para operar. Es esencial una conexión eléctrica de baja resistencia, especialmente en sistemas de electrodos del tipo radial. Se han dado casos en los que durante el proceso de mantenimiento, se han descubierto conexiones con resistencia de más de 30 ohms, esto perjudica notablemente el comportamiento del sistema de electrodos. Cuando se apernan entre sí cintas de cobre, debe tenerse cuidado con el tamaño de las perforaciones efectuadas para acomodar el perno. Si son demasiado grandes, la capacidad de transporte de corriente de la cinta se perjudicará. Motivo por el que, los estándares y reglamentos de

práctica normalmente limitan el diámetro de la perforación a un tercio del ancho de la cinta o menos.

Cuando se apenan metales diferentes (por ejemplo cintas de cobre y aluminio), las superficies deben ser minuciosamente limpiadas y protegidas por un inhibidor de óxido. Una vez efectuada la conexión, el exterior debe ser cubierto por pintura bituminosa u algún otro medio para proteger contra el ingreso de humedad. Cuando se une cobre y aluminio, el cobre primero debe ser estañado. Una unión apenada de este tipo es actualmente el método recomendado preferentemente en los estándares para conectar metales diferentes, en el caso de instalaciones exteriores y en subestaciones eléctricas. Estas conexiones deben estar a una mínima distancia sobre tierra y no pueden ser enterradas.

1.1.7.5.2 Conexiones bronceadas

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y aleaciones de cobre. Este método tiene la ventaja de proporcionar una baja resistencia de unión la cual no se corroe. Actualmente, es el método preferido descrito por los estándares para conectar cintas de cobre por ejemplo en el interior de subestaciones. Sin embargo, es esencial que el bronceado sea efectivo. Puede ser difícil hacer una buena unión en terreno, particularmente donde están involucradas grandes áreas de sección transversal. Son esenciales las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado generalmente no fluyen como la soldadura. Existe así la posibilidad de conexiones adecuadas sólo en los puntos de contacto, pero con vacíos importantes que quedan sin llenar. Para este trabajo es esencial una buena fuente de calor, particularmente para lo que son los conectores grandes.

1.1.7.5.3 Uniones exotérmicas

Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se

enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro en torno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito. Si se ocupa y mantiene adecuadamente, cada molde puede usarse para realizar entre 50 y 70 uniones. Este tipo de unión asegura los siguientes beneficios:

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

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

1.1.7.5.4 Conexiones soldadas en forma autógena

El cobre puede unirse por soldadura de bronce o soldadura al arco. La técnica de unión por soldadura de bronce es efectiva y de bajo costo, empleada primariamente para realizar uniones en terreno (por ejemplo en trabajos con tuberías de cobre). En esta técnica, se usa bronce como metal de relleno para formar un enlace superficial entre las partes de cobre. La técnica emplea alta temperatura y un material de relleno que es el que más se ajusta al cobre. A pesar de que la soldadura de bronce puede usarse para conectar cobre a metales ferrosos, esto normalmente no se cumple para puestas a tierra.

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

1.1.8 El comportamiento de los electrodos de Tierra

Al realizar el trabajo de elaborar un sistema de puesta a tierra, uno se enfrenta normalmente con dos tareas: lograr un valor requerido de impedancia y asegurar que los voltajes de paso y contacto son satisfactorios. Algunas veces en la mayoría de los casos habrá necesidad de reducir estos valores. En un principio, el diseñador se debe concentrar en obtener un cierto valor de impedancia. Este valor puede haber sido definido por consideraciones de protección.

Los factores que influyen la impedancia son:

- Las dimensiones físicas y atributos del sistema de electrodos de tierra
- Las condiciones del suelo (composición, contenido de agua, etc.)

Consiste entonces el sistema de puesta a tierra en un material conductor fuera del terreno (conductores de conexión, etc.), electrodos metálicos enterrados y el terreno mismo. Cada uno de estos componentes contribuye al valor de impedancia total. Nos referiremos en primer lugar a las componentes metálicas del sistema de puesta a tierra y más adelante en el desarrollo de este capítulo se discutirá la situación del terreno. Es muy importante

reconocer que las características del terreno afectan fuertemente en el comportamiento del sistema de puesta a tierra. La característica más importante del terreno es su resistividad, que se mide en ($\Omega * m$).

1.1.8.1 Efecto de la forma, tamaño y posición del electrodo

Una parte dominante de la impedancia se debe a la orientación física de los electrodos de tierra. Las gráficas que se mostrarán a continuación desde la Figura 1-9 a la Figura 1-14 ilustran el efecto que pueden tener los cambios en estas dimensiones sobre la impedancia y capacitancia. Así como sigue a continuación:

1.1.8.1.1 Incremento de la profundidad de enterramiento de una barra vertical en suelo uniforme

En la Figura 1-9 se muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando la longitud de la barra enterrada.

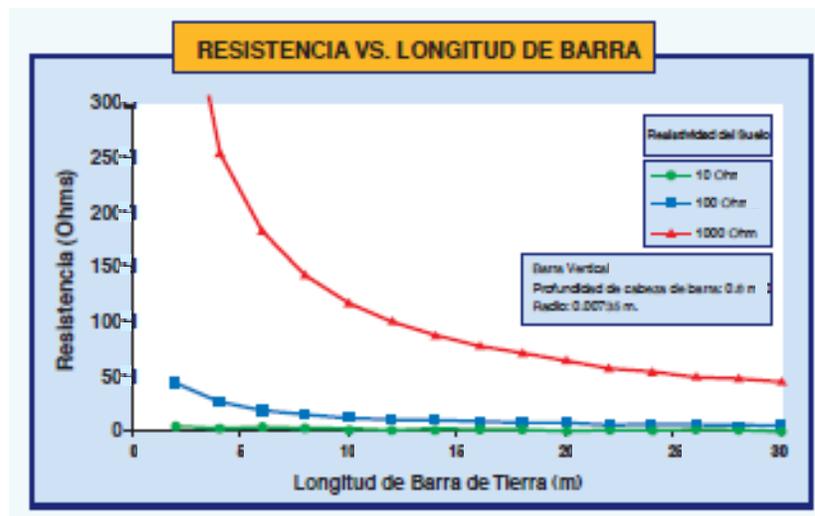


Figura 1-9. Resistencia vs Longitud de barra

Se muestra también que el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la barra aumenta. Sin embargo, el gráfico que ilustra el comportamiento en suelo uniforme no

cuenta la historia completa, el decrecimiento en resistencia obtenido mediante una barra larga puede ser particularmente deseable en condiciones de suelo no uniforme. La Figura 1-10 demuestra el mejoramiento posible en la resistencia de electrodo cuando se incrementa la longitud de una barra en un suelo que consiste de tres capas. Las capas superiores son de resistividad relativamente alta hasta una profundidad de seis metros. La resistencia de la barra es alta hasta que su longitud supera estas capas, debido a la alta resistividad del suelo que la rodea.

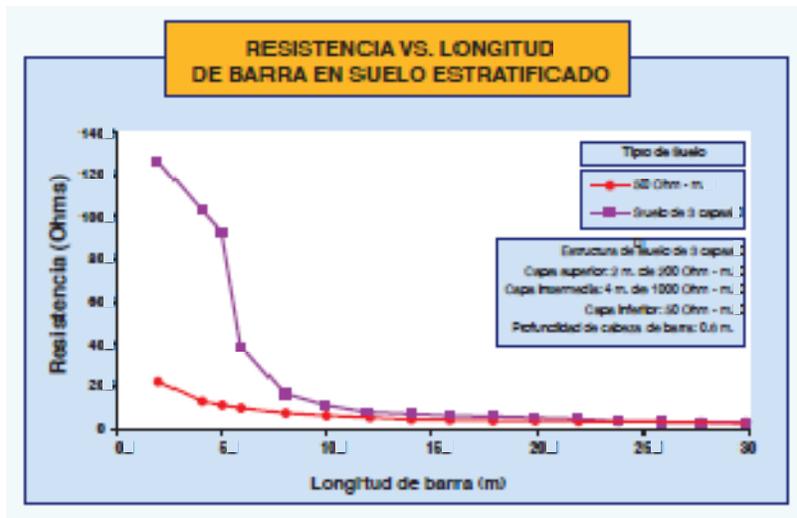


Figura 1-10. Resistencia vs Longitud de barra en suelo estratificado

A medida que la longitud de la barra aumenta, la resistencia total baja más rápido. Esto se debe a la capa más profunda con mejores propiedades eléctricas. En este caso es clara la mejoría de comportamiento con cada metro adicional de barra instalada, mucho mayor a esta profundidad que para barra en suelo uniforme. Una vez que la barra alcanza aproximadamente 15 metros de longitud, hay poca diferencia en la resistencia de una barra en esta estructura de suelo, comparada con otra en un suelo uniforme de 50 ohm- metro de resistividad. Sin embargo, el mejoramiento por unidad con cada metro adicional instalado comienza a reducirse rápidamente en el caso de de que se tenga un suelo uniforme.

En condiciones de suelo como los que se ilustra en la Figura 1-10, es importante que la sección superior de la barra tenga baja resistencia longitudinal ya que esta sección proporciona la conexión a la parte inferior del electrodo que lo mejora. Esto puede realizarse ya sea usando un sector superior de cobre sólido o plateado (con recubrimiento

metálico) con una sección transversal incrementada. En algunas condiciones de terreno, particularmente donde existe un área disponible limitada, el empleo de barras verticales puede ser la opción más efectiva, pero depende de la estructura del terreno.

Es importante notar que las barras verticales otorgan un grado de estabilidad a la impedancia del sistema de puesta a tierra. Normalmente deben ser de longitud suficiente de modo que estén en o cerca de capas de agua (si existen a profundidad razonable en el lugar) y bajo la línea de congelamiento. Esto significa que la impedancia sería menos influenciada por variaciones estacionales en el contenido de humedad y en la temperatura del suelo.

1.1.8.1.2 Incremento de longitud de un conductor horizontal

En la Figura 1-11 se muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad, incrementando la longitud de un electrodo de tierra tendido horizontalmente a una profundidad de 0,6 metros.

Debe notarse que el cálculo en este ejemplo no considera la impedancia lineal del conductor, de modo que los valores son optimistas en el caso de grandes longitudes.

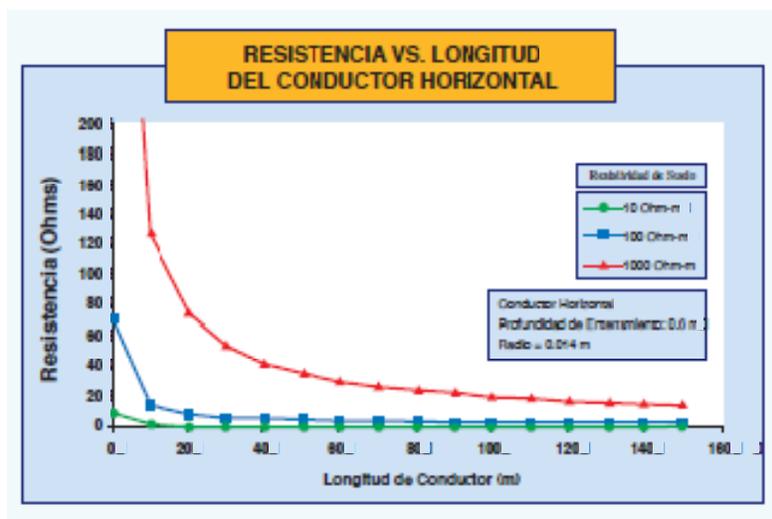


Figura 1-11. Resistencia vs Longitud del conductor horizontal

Normalmente, el mejoramiento por unidad de longitud disminuye a medida que la longitud del electrodo aumenta. Una cinta tendida horizontalmente se considera generalmente una buena opción, particularmente cuando es posible encaminarla en diferentes direcciones.

Esto incrementa aún más la posible reducción, pero sin lograr superar un 50%. Para aplicaciones en alta frecuencia, incrementar de esta manera el número de caminos disponibles reduce significativamente la impedancia de onda.

1.1.8.1.3 Incremento de la longitud del lado de una plancha o malla de tierra cuadrada

Se puede observar en la Figura 1-12 el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementando el área abarcada por un electrodo cuadrado.

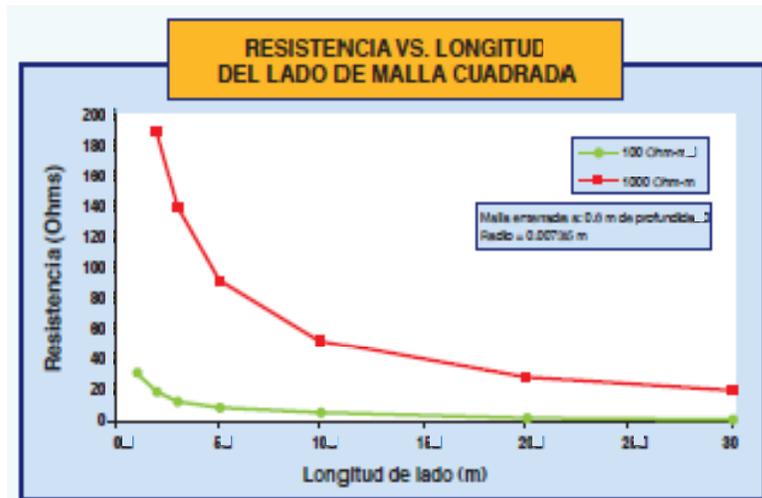


Figura 1-12. Resistencia vs Longitud del lado de malla cuadrada

A pesar de mostrar que el mejoramiento por unidad de área disminuye, la reducción en resistencia resulta aún significativa. En realidad ésta es frecuentemente la forma más efectiva para reducir la resistencia de un electrodo de tierra.

1.1.8.1.4 Incremento del radio de una barra o electrodo de tierra

La Figura 1-13 muestra el beneficio que puede obtenerse en suelos de diferente resistividad incrementado el radio de la barra. Hay una rápida reducción en el beneficio por unidad de incremento en el diámetro, una vez que éste excede 0,05 metros, excepto en suelos de alta resistividad, donde el mismo efecto se aprecia a un diámetro de 0,2 metros.

Normalmente, hay poco que ganar aumentando el radio de electrodos de tierra por sobre lo necesario de acuerdo a los requisitos mecánicos y por corrosión. Puede usarse tubos en vez de conductores sólidos para aumentar el área superficial externa, con un aumento moderado en el volumen del metal empleado.

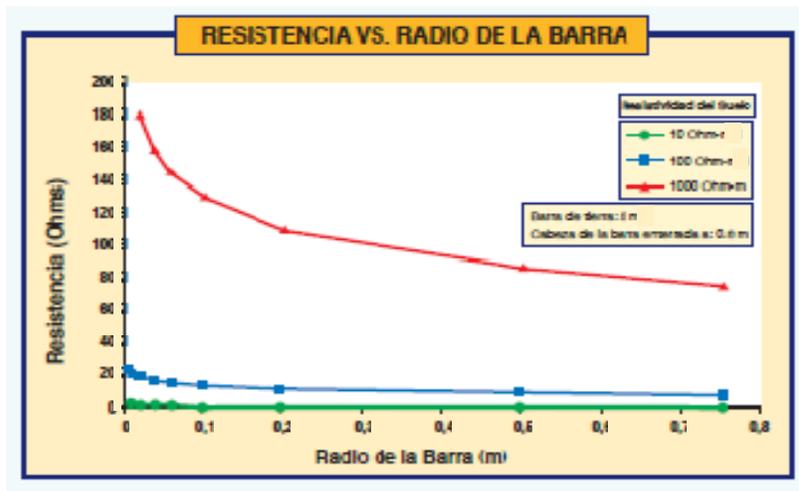


Figura 1-13. Resistencia vs Radio de la Barra

En condiciones de suelo rocoso, puede ser ventajoso aumentar el diámetro efectivo del electrodo rodeándolo con material de menor resistividad que la roca.

1.1.8.1.5 Profundidad de enterramiento

Se puede indicar que este efecto proporciona sólo una reducción marginal en la impedancia, pero a un costo relativamente alto, de modo que normalmente no es considerado. Debe

recordarse sin embargo, que mientras mayor sea la profundidad de enterramiento, menores son los gradientes de voltaje en la superficie del suelo. En el interior de una subestación, se requiere un voltaje alto sobre la posición del electrodo, para minimizar los voltajes de contacto. Sin embargo, si un electrodo de tierra se extiende fuera de la subestación, entonces se requiere un voltaje bajo en la superficie del suelo para reducir los potenciales de paso.

En algunos casos es ventajoso incrementar la profundidad de los electrodos para reducir el riesgo de electrocución. En el caso de barras, esto puede obtenerse instalando una envoltura plástica alrededor de uno o dos metros en el extremo superior de cada barra.

1.1.8.1.6 Efecto de proximidad

Si en algún caso dos electrodos de tierra se instalan juntos, entonces sus zonas de influencia se traslapan y no se logra el máximo beneficio posible. Si dos barras o electrodos horizontales están muy próximos, la impedancia a tierra combinada de ambos puede ser virtualmente la misma que de uno solo, lo cual significa que el segundo es redundante. El espaciamiento, la ubicación y las características del terreno son los factores dominantes en esto.

En la Figura 1-14 se muestra cómo la resistencia total de dos barras verticales por ejemplo de 5 metros de longitud, cambia a medida que la distancia entre ellas aumenta. De esta manera en la figura puede verse que las barras debieran estar separadas una distancia superior a 4 metros en suelo uniforme. Los cálculos de este tipo son la base para establecer la práctica de instalar electrodos al menos con una separación equivalente a su longitud.

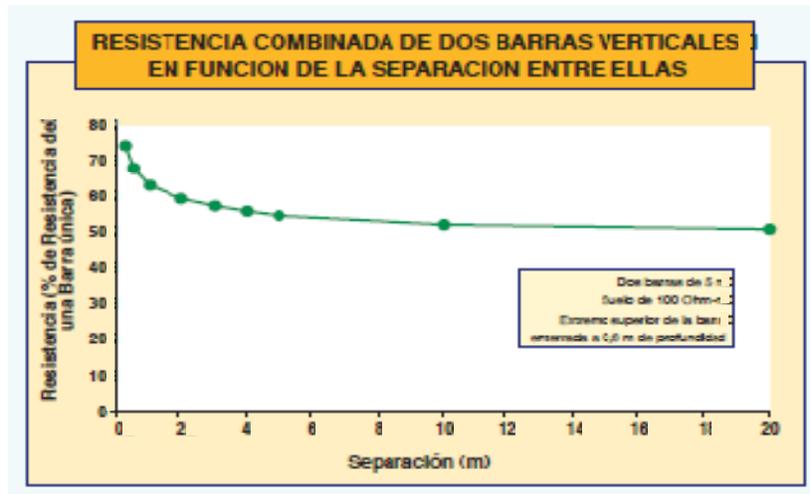


Figura 1-14. Resistencia combinada de dos barras verticales en función de la separación entre ellas

1.1.8.2 Arreglos complejos de electrodos

En el caso de arreglos más complejos de electrodos, se requiere un análisis más detallado para tomar en consideración todos los factores anteriores. Las figuras anteriores, excepto la Figura 1-10, ilustran el comportamiento en condiciones de suelo uniforme.

Desafortunadamente, en la práctica no es usual encontrar condiciones de suelo uniforme, un suelo multi-estratificado es más frecuente, por ejemplo, puede existir una capa superficial de tierra de moldeo o turba sobre arena, grava o arcilla, más abajo aún el material puede cambiar a roca. Esto puede representarse como una estructura de suelo de tres capas, donde la resistividad de las capas aumenta con la profundidad.

Algunas otras ocasiones puede existir sedimento o arena/gravilla y luego una capa de agua a pocos metros bajo la superficie. Esto puede formar una estructura de dos capas, con la resistividad de la capa de agua significativamente menor que aquella de la capa superficial.

La estructura real del suelo y las propiedades eléctricas de cada capa afectarán el valor de resistencia a tierra del electrodo y puede ser importante apreciar esto anticipadamente.

Existe una formulación relativamente directa para lograr una predicción razonablemente precisa de la resistencia de electrodos en suelo de resistividad uniforme. Se destaca que distintos estándares utilizan formulación diferente y a pesar que a menudo estas proporcionan estimaciones de valores similares, esto no significa que se descuide el hecho de asegurar que se usa la formulación y el modelo correcto, dependiendo de las especificaciones de diseño y del estándar en que se basa.

En el caso de una barra o electrodo vertical (pica), la fórmula es:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \quad (\Omega)$$

En donde:

R : resistencia de puesta a tierra (Ω)

ρ_e : resistividad equivalente del suelo ($\Omega * m$)

l : longitud de la barra (m)

a : radio de la barra (m)

Para un conductor corto, enterrado horizontalmente, la fórmula es:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{4l^2}{dh}\right) - Q \right]$$

En donde:

R : resistencia de puesta a tierra (Ω)

l : longitud del conductor (m)

d : diámetro del conductor (m)

ρ_e : resistividad del suelo ($\Omega * m$)

h : profundidad de enterramiento (m)

Q : 1,3 para conductores circulares (de sección)

Q : 1,0 para conductores tipo cinta

1.1.8.3 Resistividad del terreno

El factor restante de mayor importancia que afecta la impedancia del sistema de tierra es la impedancia del medio en el cual está situado el electrodo, es decir, el terreno. El valor de la resistividad del terreno es un factor de suma importancia en el comportamiento de electrodos de tierra, la resistividad del terreno se expresa en $[\Omega * m]$. En la tabla 1-1 se muestran los valores de resistividad para diferentes suelos.

Valores típicos de resistividad de diferentes suelos		
Tipo	Resistividad (ohm-metro)	
Agua de mar	0,1 -	1
Tierra vegetal/arcilla húmeda	5 -	50
Arcilla, arena y grava	40 -	250
Creta (tiza) porosa	30 -	100
Piedra caliza cristalina	300 +	
Roca	1.000 -	10.000
Roca ígnea	2.000 +	
Concreto seco	2.000 -	10.000
Concreto húmedo	30 -	100
Hielo	10.000 -	100.000

Tabla 1-1. Valores de resistividad de diferentes suelos. (Fuente: ANSI/IEEE Std. 81: 1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.)

Dos son los factores principales que afectan el valor de resistividad de suelo primero la porosidad del material y segundo el contenido de agua. Porosidad es un término que describe el tamaño y número de huecos dentro del material, lo cual está relacionado con su tamaño de partícula y diámetro del poro. Varía entre 80/90% en el sedimento de lagos, hasta 30/40% en el caso de arena y arcilla no consolidada y menos en piedra caliza consolidada.

Anteriormente se mencionó que es muy poco frecuente encontrar un terreno uniforme para propósitos de puesta a tierra. En el terreno se interesa llegar hasta una cierta profundidad, que corresponde aquella hasta la cual pueden fluir las corrientes de falla a tierra. Puede ser una delgada capa de terreno superficial, si hay capas de roca más abajo. Cada capa de roca sucesiva puede tener menos grietas, ser más sólida y se esperaría que tuviese una resistividad mayor.

Si un electrodo se instala en la superficie, entonces la distancia, espesor y resistividad real de cada una de las capas serán factores importantes que afectan el valor de su resistencia a tierra. El contenido de agua y la temperatura tienen una influencia importante en la resistividad del terreno y luego en el comportamiento del sistema de tierra. Un incremento en el contenido de agua provoca una reducción drástica de la resistividad, hasta alcanzar un 20% del nivel original cuando el efecto tiende a estabilizarse. Los minerales y sales disueltas en el agua ayudan a reducir aún más la resistividad, particularmente cuando éstas están produciéndose en forma natural y no terminan diluyéndose con el tiempo. El contenido de agua varía estacionalmente y es probable que origine variaciones en la impedancia del sistema de tierra.

1.1.8.4 Medida de la resistividad del terreno

Es importante que la resistividad de un suelo o terreno pueda verificarse en forma tan precisa como sea posible, ya que el valor de resistencia a tierra del electrodo es directamente proporcional a la resistividad del suelo. Motivo por el cual si se usa un valor incorrecto de resistividad del terreno en la etapa de diseño, la medida de impedancia del sistema de tierra puede resultar significativamente diferente de lo planificado.

La prueba es realizada utilizando un medidor de tierra de cuatro terminales. Cuatro picas o estacas se clavan en el suelo como se muestra en el diagrama de la Figura 1-15, separado a una distancia “a” metros. La profundidad de cada pica se trata de que no exceda “a” dividido por 20 y normalmente es inferior a 0,3 metros. Las dos picas exteriores se conectan a los terminales de corriente *C1* y *C2* del instrumento y las picas interiores, a los terminales de potencial *P1* y *P2*.

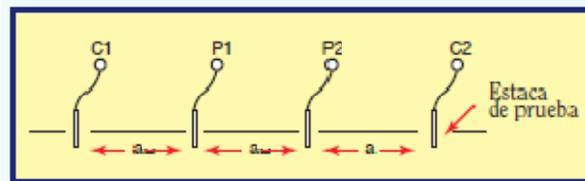


Figura 1-15. Diagrama para la medición de resistividad, utilizando cuatro picas o estacas (Wenner)

Si “R” es la lectura de resistividad del instrumento, en ohms, para una separación de “a” metros, entonces la resistividad aparente está dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Resistividad} = 2 \pi a R \quad (\text{ohm-metro})$$

Es utilizado el término “resistividad aparente” debido a que la fórmula anterior supone que el terreno es uniforme hasta una profundidad “a” metros bajo el punto central del esquema de medida. Se puede obtener información respecto de la estructura real del suelo tomando una serie de lecturas, incrementando “a” en pasos de 1 metro hasta una separación de 3 metros, luego en pasos de 3 metros hasta una separación de 9 metros. Para instalaciones de área muy grande, especialmente donde hay roca abajo, puede ser aconsejable lecturas a 50 m, 80 m y aún 100 m de separación de picas.

El instrumento empleado debe ser suficientemente preciso para medir valores de resistencia muy pequeños con estos grandes espaciamientos del orden de $0,01\Omega$ a $0,002\Omega$. Preferiblemente las medidas deben realizarse en un área de terreno razonablemente no perturbado. Típicamente los valores más bajos de “a” darán altos valores de resistividad de suelo porque ellas estarán fuertemente influenciadas por la capa superficial que normalmente drena el agua o su contenido de agua está reducido por el sol y/o el viento. Conforme la distancia “a” aumenta, la resistividad aparente normalmente se reducirá, a menos que exista roca subyacente.

En el transcurso de la realización de la medida se debe dibujar una curva de resistividad versus separación. Esta curva nos proporcionará información respecto de la estructura general del terreno en la localidad, identificando lecturas extrañas y ayudando a decidir cuántas medidas se requieren. Si hay grandes fluctuaciones en los valores medidos, es probable que las condiciones del suelo sean variables, la tierra ha sido compuesta o existen tuberías enterradas en el área. En tales casos, las medidas deben tomarse en algunas direcciones transversales a través del sitio. Algunas de estas transversales deben ser en ángulo recto unas de otras, para permitir la identificación de interferencias de cables eléctricos cercanos.

Algunos ejemplos de curvas de resistividad de terreno se muestran en las Figuras 1-16 y 1-17. En la Figura 1-16, se han tomado diversas medidas en un determinado lugar, existiendo variaciones entre ellas. El valor de la resistividad aparente es alto para pequeños espaciamientos y luego se reduce a valores dentro de una banda uniforme, razonablemente estrecha.

El análisis computacional genera un modelo de dos capas donde la capa superior tiene 0,2 metros de espesor y tiene una resistividad de 126 ohm-metro. El material inferior tiene un valor de 47 ohm-metros (orientado hacia las lecturas mayores).

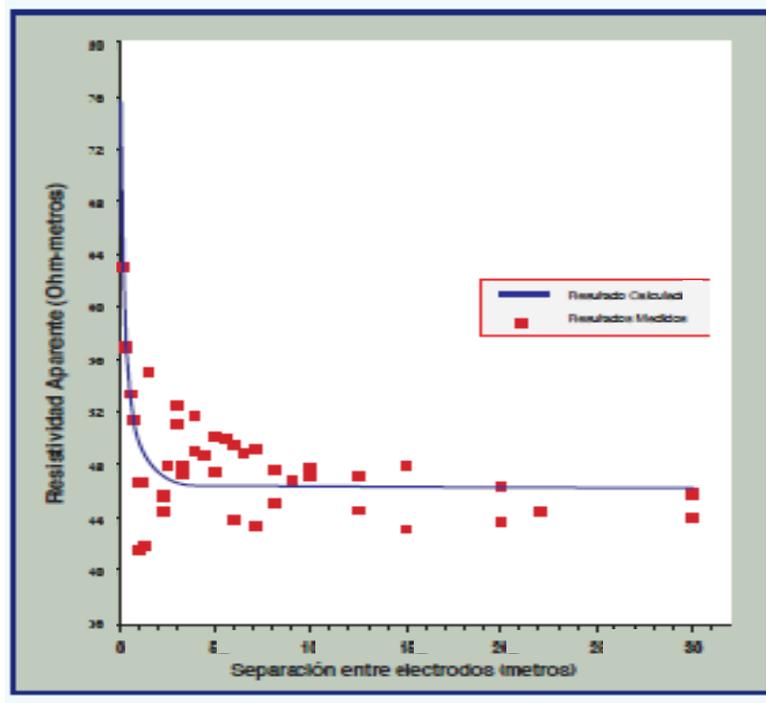


Figura 1-16. Resistividad aparente del suelo graficada en función de la separación de las estacas o picas de prueba. Suelo relativamente uniforme

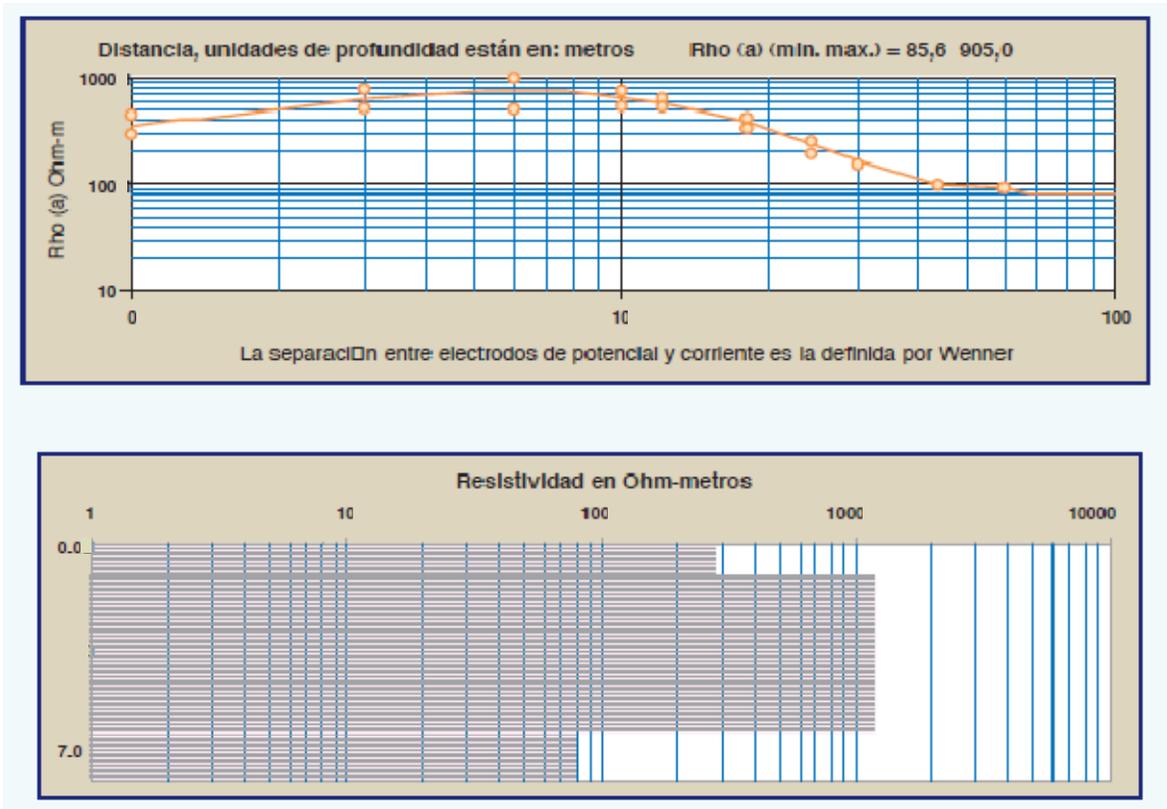


Figura 1-17 Resistividad aparente del suelo graficada en función de la separación de la estacas o picas de prueba. Suelo de tres capas

Para propósitos prácticos, se puede suponer un terreno uniforme de 50 ohm-metro, ya que el valor de la capa superficial cambiará. En el segundo ejemplo, (Figura 1-17), las lecturas son mucho más complejas de interpretar y el análisis mediante programa computacional produce un modelo de tres capas. La capa intermedia tiene resistividad baja, de modo que se debiera usar barras verticales o electrodos horizontales instalados a una profundidad mayor que la normal. Se observa que las lecturas reales están a ambos lados de una curva promedio modelada con computador y tipifica la variación esperada en diferentes direcciones a través del mismo sitio. El modelo promedio de tres capas se usa normalmente para cálculos de puesta a tierra.

El método de medida de resistividad de terreno descrito es el método de *Wenner*, que utiliza picas equidistantemente espaciadas. Existen otros métodos a usar en situaciones más difíciles. Por ejemplo la técnica de *Schlumberger* (Figura 1-18), donde la distancia entre el instrumento y cada estaca o pica de corriente es idéntica y lo mismo entre el instrumento y

cada pica de voltaje, pero diferente entre picas de voltaje y corriente. Esto se ilustra a continuación:

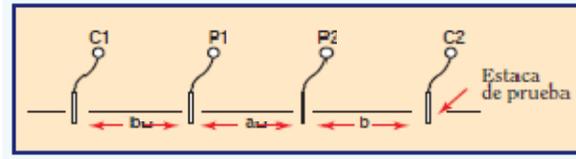


Figura 1-18. Diagrama para medir la resistividad del terreno (Schlumberger)

En este caso la resistividad resulta:

$$resistividad = \pi Rb \left(\frac{b}{a} + 1 \right) (\Omega * m) \quad (b/a \text{ se acostumbra a escoger numero entero})$$

Empleando la configuración de *Wenner*, la interpretación de los valores de resistividad aparente resulta más directa, lo cual permite visualizar con facilidad la tendencia del gráfico de campo. También en este caso los instrumentos pueden ser de menor sensibilidad que los empleados con la configuración de *Schlumberger*, ya que a medida que se separan los electrodos de corriente, también lo hacen los de potencial.

Por su parte, la configuración de *Schlumberger* es menos sensible a las variaciones laterales de terreno de los estratos, debido a que los electrodos de potencial permanecen inmóviles.

Además con la utilización de *Wenner*, la realización práctica de la medida es más ágil, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente.

1.2 DISEÑO PARA LA CONEXIÓN A TIERRA

1.2.1 Normativa para el diseño

Las normas proporcionan los límites de diseño que deben satisfacerse y (conjuntamente con los reglamentos de práctica), explican cómo pueden diseñarse los sistemas de puesta a tierra para ajustarse a ellos.

Las normas IEEE generalmente incluyen formulaciones para realizar los cálculos necesarios o una guía detallada sobre aspectos prácticos - por ejemplo, cómo conectar partes de un equipo o dónde ubicar los electrodos. Aquí se describen los fundamentos sobre los cuales se basan los límites de diseño, según la práctica habitual empleada en la alimentación de energía industrial o comercial. Hay que notar que hay diferencias en los límites de diseño dependiendo si se trata de las empresas suministradoras o de los consumidores. Por ejemplo, los límites de voltaje de choque eléctrico son menores en el interior de instalaciones eléctricas que en subestaciones de empresas eléctricas.

Los sistemas de puesta a tierra son diseñados para asegurar que los potenciales en su vecindad durante una falla están bajo los límites apropiados. Cuando ocurre una falla a tierra y la corriente fluye al terreno vía el electrodo de tierra, el potencial del electrodo y de cualquier equipo conectado a él, se elevará sobre el potencial real de tierra. El potencial alcanzado bajo condiciones de falla severa puede ser varios miles de volts. Como la corriente de falla a tierra fluye en el terreno que rodea al electrodo, el potencial en el suelo y en su superficie se elevará. Desplazándose lejos del sistema de electrodos, hacia un punto remoto, el potencial se reducirá progresivamente, hasta eventualmente llegar al potencial real de la tierra.

Esta situación se muestra en la Figura 1-19, donde se ha ilustrado en tres dimensiones la elevación del potencia en la superficie del suelo, en torno a una barra de tierra única vertical. La Figura 1-19 explica los potenciales involucrados, en una forma semi-estructural, aquí se puede observar que la tasa de reducción del potencial en la superficie

del suelo, o gradiente de potencial, es mayor cerca de la barra y se reduce al alejarse a un punto remoto. Imaginemos que una persona está caminando alejándose de la barra en línea recta hacia la tierra remota (de referencia), es decir, bajando la pendiente de potencial, tomando pasos igualmente espaciados. La diferencia de potencial entre los pies debiera ser mayor cerca de la barra (por ejemplo, en la posición A1, sería la diferencia de potencial entre los puntos A1 y A2) y se reduciría rápidamente con cada paso sucesivo (por ejemplo, es menor en la posición B1, con la diferencia de potencial entre los puntos B1 y B2) hasta anularse a alguna distancia mayor. Este efecto es reconocido en las normas y es la base del concepto de “potencial de paso”, que es la diferencia de potencial entre dos puntos sobre la superficie del suelo, separados un metro. La situación descrita para una barra única es similar a aquella definida para todo un sistema de electrodos y el potencial de paso es más alto en el área inmediatamente próxima a los electrodos enterrados en condiciones de suelo uniforme.

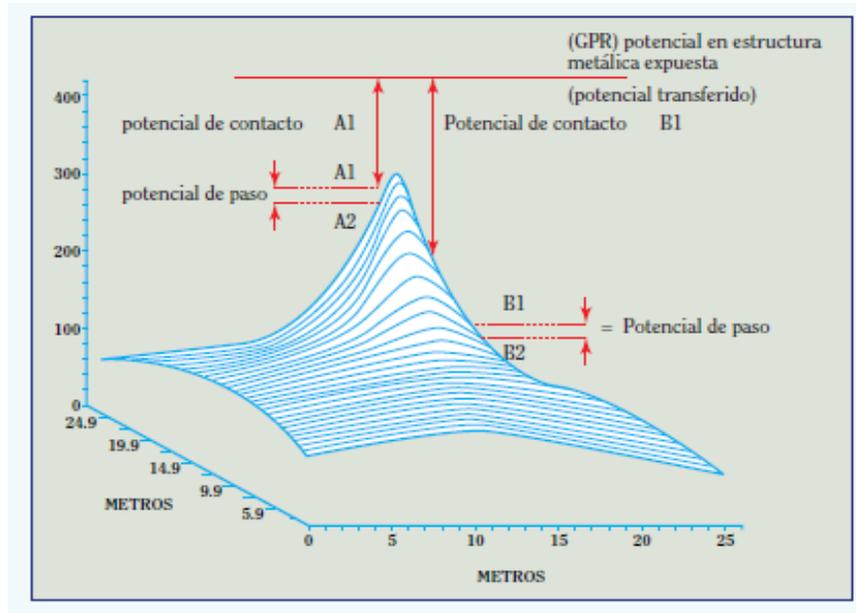


Figura 1-19. Potenciales de Contacto, de Paso y Transferidos en torno a una barra de tierra

Se ha reconocido que el potencial en la superficie del suelo difiere según la posición con respecto al sistema de electrodos. Esto tiene implicancias para el segundo tipo de diferencia de potencial, el “potencial de contacto”. Mientras la corriente de falla fluye a través de la impedancia del sistema de puesta a tierra, todos los metales expuestos conectados a éste

experimentan un alza de voltaje. Para sistemas pequeños, se supone un mismo valor en todo el armazón metálico y se refiere a él como la "*Elevación de Potencial de Malla*" (*Grid Potential Rise*). En el ejemplo mostrado en la Figura 1-19, esta elevación de potencial de malla es aproximadamente 420 V. El potencial en un punto sobre la superficie del suelo será inferior a este valor, en una cantidad que depende de la profundidad de enterramiento del electrodo y de su separación horizontal. Si una persona está en contacto con el armazón metálico expuesto y está parada sobre el suelo, entonces sus manos estarán al mismo potencial que el electrodo mientras que sus pies estarán a un potencial menor. Esta diferencia de potencial será menor si sus pies están directamente sobre la barra enterrada y aumenta si va alejándose. Los límites de diseño se han establecido como voltajes y para llegar a los límites apropiados, es necesario considerar la impedancia a través del cuerpo humano, la resistencia de contacto de la mano, la resistencia del calzado y la resistividad del material superficial bajo el calzado.

Todos estos factores se toman en consideración en las normas y se ha incluido la Figura 1-20 para ilustrar límites típicos suponiendo 100 ohm-metro la resistividad del suelo superficial, una impedancia de 1000 ohms para el ser humano, 4000 ohms de impedancia para el calzado y una resistencia de contacto de 300 ohms. De la Figura 1-20 es evidente que puede tolerarse un voltaje relativamente alto por cortos períodos de tiempo.

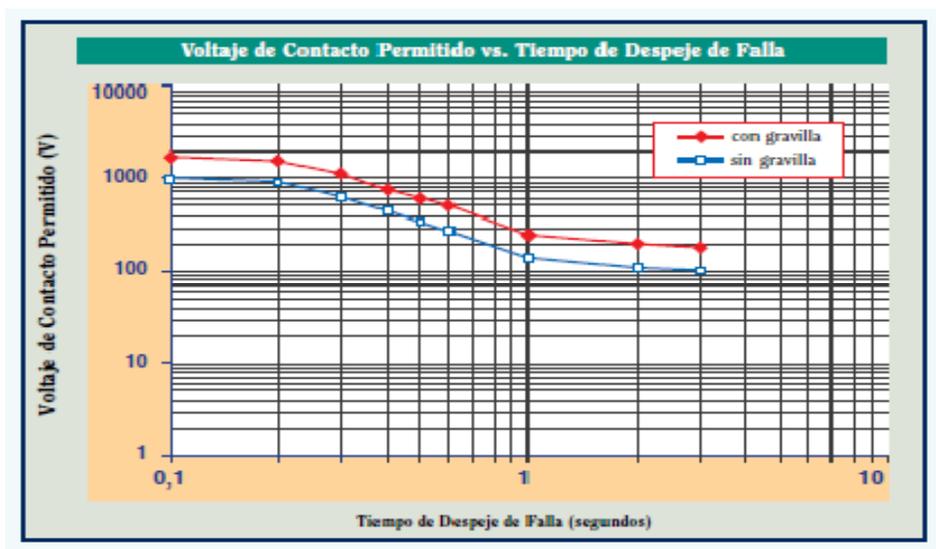


Figura 1-20. Potencial de contacto permitido

En el momento de realizar el diseño del sistema de tierra, se deberá usar las fórmulas y técnicas descritas en las normas o reglamentos para lograr un diseño que tenga potenciales de contacto inferiores a los límites aplicables.

1.2.1.1 Principales normas y reglamentos del diseño de puestas a tierra

- IEEE Practice for Grounding of Industrial Power Systems, IEEE *Green book, Std. 141-1993*.
- ANSI/IEEE Std. 80: 1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- ANSI/IEEE Std. 81: 1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, *Standard 42-1991*
- ANSI C114.1-1973 / IEEE *Standard 142-1972*

1.2.2 Diseño de Sistemas de Electrodo de Tierra

En esta segunda instancia se concentrará en el diseño más detallado, necesario para asegurar que se cumpla el criterio respecto de voltajes de paso y contacto, según las normas IEEE. Hay que notar que las corrientes de falla consideradas son mayores que aquellas normalmente previstas en instalaciones domésticas o comerciales, pero el comportamiento del electrodo debiera ser similar.

Para ilustrar el concepto diferente de diseño requerido, imaginemos que al diseñador se le ha solicitado asegurar que el electrodo de tierra tiene una impedancia de 5 ohms, de modo

que pueda operar el equipo de protección. Si además suponemos que el suelo es uniforme en el sector, con 50 ohm-metro de resistividad, y las propiedades mecánicas del suelo son apropiadas, entonces el método más económico de conseguir este valor puede ser usando una simple barra vertical. Por simulación computacional, mediante la fórmula de la sección 1.1.8.1 o usando el gráfico de la Figura 1-9, puede calcularse que una barra de aproximadamente 12,5m de longitud proporcionará ese valor. Supongamos que el equipo que se protege por este sistema de tierra está contenido en el interior de un gabinete metálico de 3 m de longitud y 2m de ancho. Si la corriente de falla prevista es 200 amperes, el potencial del electrodo y del gabinete claramente se elevará a 1000V durante el tiempo que demora la protección en operar. Habrá un voltaje en la superficie del suelo, sobre el electrodo, el cual se reduce al alejarse de él. Suponiendo que la barra de tierra se ha instalado en una esquina del gabinete, entonces los perfiles de voltaje en la superficie del suelo que rodea la barra serán como se muestra en la Figura 1-21 (nótese que la Figura 1-19 se basa en el mismo ejemplo y muestra la situación en tres dimensiones).

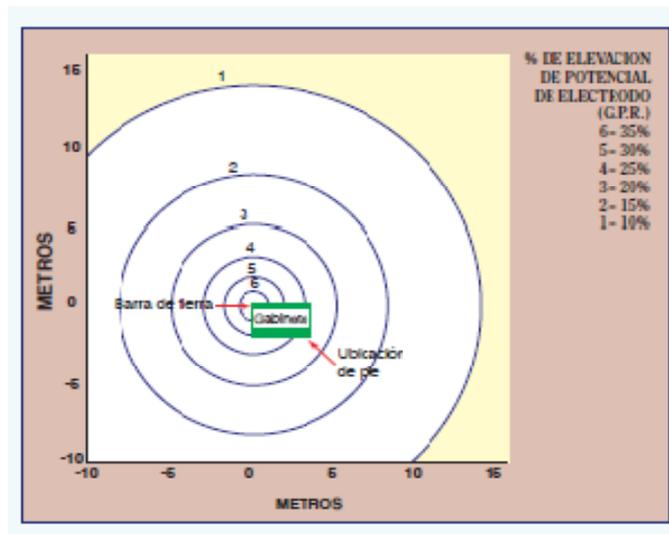


Figura 1-21. Potencial en la superficie del suelo en torno a una puesta a tierra de barra simple

Estos perfiles se forman al suponer que la corriente de falla fluye uniformemente en el terreno que rodea a la barra y los contornos de potencial resultan marcando las posiciones de igual voltaje a lo largo de cada trayectoria de corriente (las líneas equipotenciales en todas las figuras se muestran como porcentaje del alza de voltaje real del electrodo (GPR)).

Como se mencionó en puntos anteriores, el voltaje de contacto permitido depende de la norma relevante y del tiempo tomado por el sistema de protección para desconectar el circuito fallado. Claramente, una simple barra no proporciona un sistema de tierra bien diseñado, pero precisamente es el tipo que tradicionalmente se ha usado en el pasado. Otro método tradicional era usar una placa, para propósitos de comparación, la Figura 1-22 ilustra los perfiles de voltaje que resultarían si en vez de la barra vertical se usara una placa cuadrada de 900mm por lado, enterrada a 0,6 metros de profundidad. Esta placa tendría una impedancia de 17 ohms. Las líneas equipotencialmente tienen forma elíptica cerca del electrodo y se transforman en circunferencias al alejarse de él. Para un flujo de corriente de 200 amperes, el potencial de contacto en la esquina del gabinete ahora es de 3060 volts. Este mayor valor se debe a la mayor impedancia de la placa comparada con la barra.

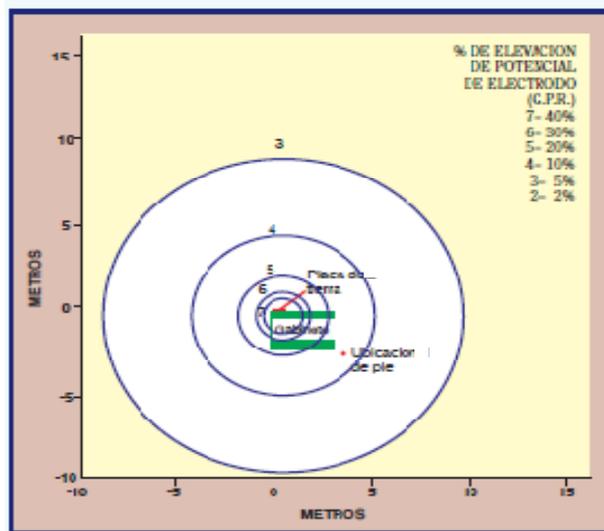


Figura 1-22. Potencial en la superficie del suelo en torno a una puesta a tierra de placa única

1.2.2.1 Sistemas de electrodos de área pequeña

Si se utilizan los tipos de electrodos anteriores como la tierra principal para una instalación domiciliaria residencial, puede ser suficiente. La corriente de falla prevista debiera ser menor que 200 A, de modo que la elevación de voltaje podría reducirse significativamente y de la misma manera el voltaje de contacto. Además, la pared de la casa normalmente no

es conductiva y la conexión al electrodo de tierra es aislada. Así, es improbable que una persona pueda experimentar un voltaje de contacto del tipo ilustrado.

Debiera notarse que el tiempo de despeje de la falla puede ser bastante más largo y por lo tanto el voltaje de contacto permitido, menor. Para poder mejorar la situación, puede instalarse en el terreno un electrodo perimetral (o graduador de potencial) situado aproximadamente a un metro de distancia, enterrado a 0,5 metros. Este conductor se llama algunas veces un anillo de guarda. El perfil de voltaje en torno al sistema de puesta a tierra, para la misma corriente de falla de 200 amperes, se muestra en la Figura 1-23. En este caso, con la barra simple y el conductor perimetral, la impedancia se reduce, el voltaje de contacto se reduce, Claramente el electrodo perimetral ha mejorado la seguridad de la instalación.

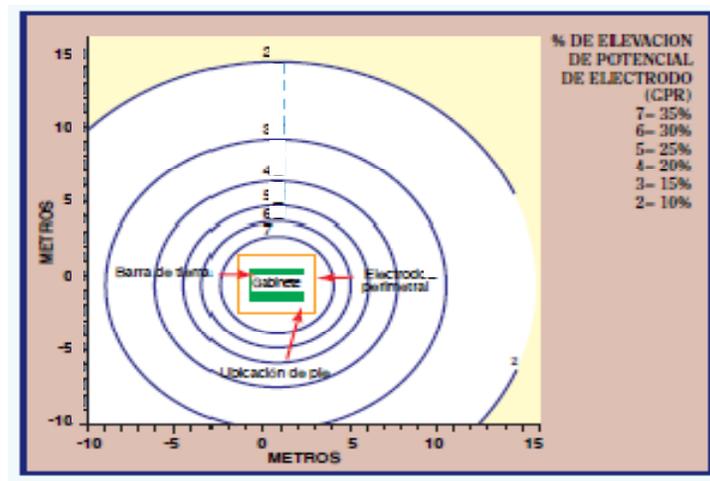


Figura 1-23. Potencial en la superficie del suelo con barra simple y electrodo perimetral (graduador de potencial)

1.2.2.2 Sistemas de electrodos de área media

Estos denominados sistemas de área media se encuentran en subestaciones eléctricas pudiendo ser aplicados a instalaciones industriales y comerciales si esta así lo requiere.

No es extraño encontrar en diseños antiguos arreglos de electrodos tales como aquel de la Figura 1-24. El principal objetivo de este diseño era obtener un valor específico de

impedancia a tierra. El diseño está basado en barras de tierra verticales, y en el conocimiento de que se hace un uso efectivo del área colocando barras de tierra separadas aproximadamente a la misma distancia que su longitud. Luego, electrodos horizontales interconectan estas barras y así disminuye aún más el valor de impedancia a tierra.

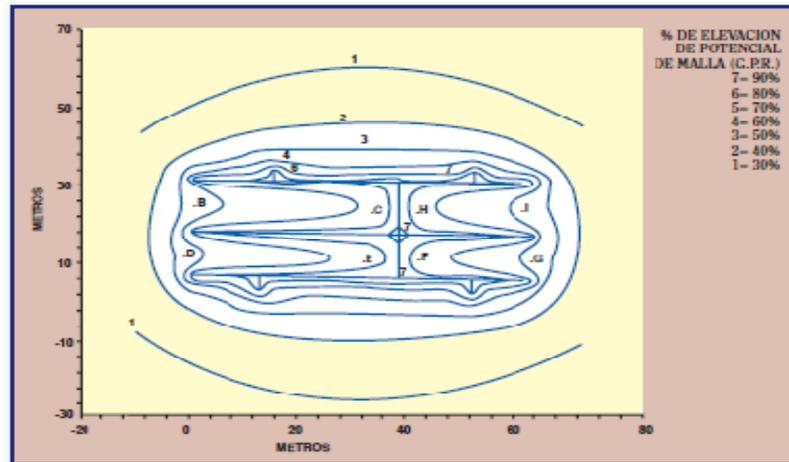


Figura 24. Potencial en la superficie del suelo en torno y en el interior de una subestación que incorpora barras y electrodos horizontales

Este concepto fue la partida de los modernos diseños de malla, pero en esta primera etapa, no se sabía que las barras en el interior del área tienen poco efecto. Debido al diseño de tipo radial, el comportamiento del sistema puede comprometerse seriamente si ocurre corrosión en cualquiera de las diferentes conexiones.

Un diseño moderno se muestra en la Figura 1-25. Está basado en los siguientes principios:

- Un bucle efectivo, formado por un conductor perimetral.
- Buena interconexión entre los electrodos y equipos importantes de la planta.
- Uso económico de material de buena calidad.
- Control de potenciales en toda el área.

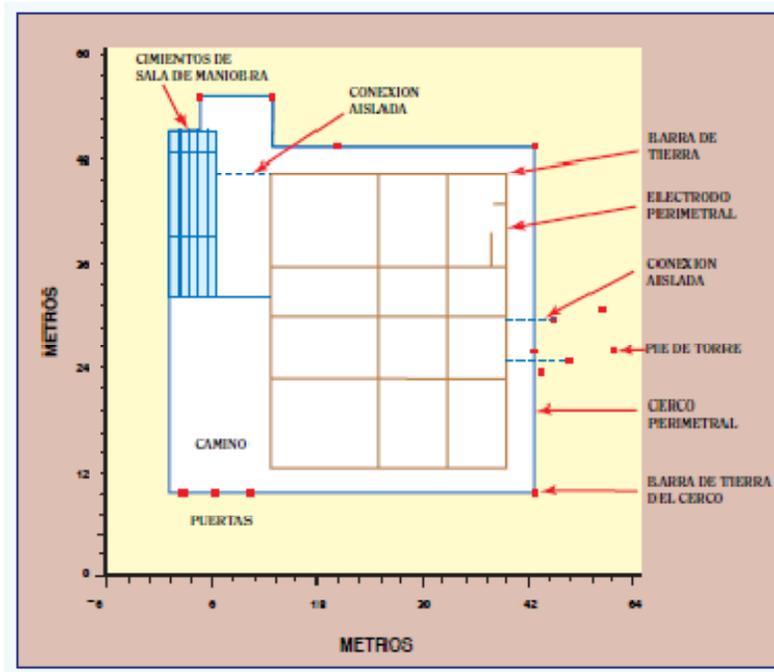


Figura 1-25. Constitución moderna del tipo malla, para puesta a tierra

Según la figura 1-25 se aprecia que el electrodo perimetral se ubica ya sea 2 metros hacia el interior de la reja o bien 1 metro afuera. Se conectan barras a tierra verticales al electrodo perimetral. Este electrodo recoge o distribuye la mayor parte de la corriente de frecuencia industrial y es un componente clave del sistema de tierra.

Las conexiones cruzadas cumplen dos funciones. La primera es permitir que todas las estructuras metálicas expuestas puedan conectarse entre sí y prevenir diferencias de potencial entre ellas. La segunda función es proporcionar un control de potenciales en la superficie dentro del área, para reducir los voltajes de paso y contacto. Los conductores transversales se conectan normalmente en cada intersección y en cada extremo del electrodo perimetral. Todos los electrodos están interconectados, para confirmar un alto grado de seguridad: una falla mecánica o corrosión de uno o más conductores no afecta seriamente el comportamiento del sistema de tierra. Esto es un hecho importante, ya que el sistema de electrodos no puede verse, está instalado posiblemente en un ambiente corrosivo y debe comportarse adecuadamente durante un largo período de tiempo.

Este tipo de diseño usa más cobre, pero lo usa efectivamente. Hay que tener cuidado en la elección del material utilizado, ya que es posible que experimente corrosión química o electroquímica. El empleo de metales diferentes puede incrementar este riesgo, por lo tanto el cobre se usa a menudo por todos lados. Las precauciones de diseño indicadas anteriormente aseguran la satisfacción del criterio referente a voltajes de paso y contacto. El perfil de voltaje en la superficie del suelo se muestra en la Figura 1-26. Una inspección de este perfil muestra que el potencial de superficie en el área sobre el electrodo principal está entre 70 y 90% del GPR. Esto significa que los voltajes de contacto están entre el 30 y el 10% del GPR.

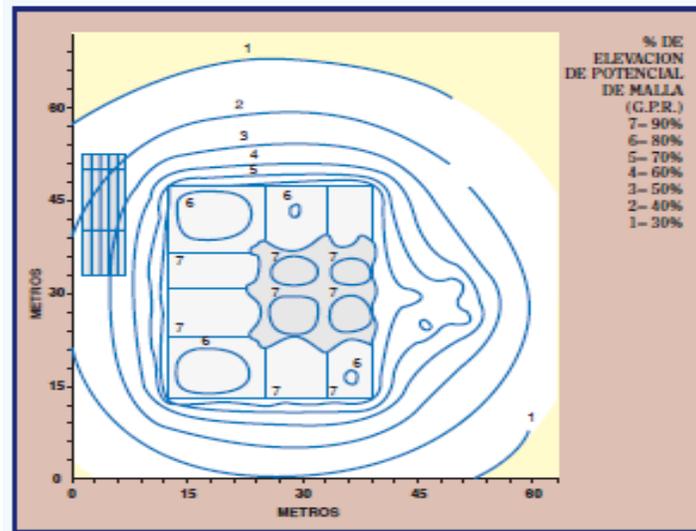


Figura 1-26. Potencial en la superficie del suelo en el entorno y sobre un arreglo de puesta a tierra moderno tipo malla

1.2.3 Diseño de Puesta a Tierra en el interior de edificios

El objetivo primordial de las normas referentes al tema es proteger a las personas, la propiedad y otros seres vivos contra riesgos que provengan de la instalación eléctrica. La puesta a tierra es fundamental en la mayoría de las prácticas para obtener seguridad. El sistema de puesta a tierra debe proporcionar un camino directo a tierra para las corrientes de falla a la vez que minimizar potenciales de paso y contacto.

La función secundaria es contribuir a reducir perturbaciones y servir como una referencia de voltaje común para equipo electrónico sensible. Sin embargo, con el creciente uso de este tipo de equipo, particularmente computadores, hay una mayor conciencia de la importancia de esta función secundaria del sistema de puesta a tierra. Esto está conduciendo a un consenso de opinión de que el sistema de puesta a tierra debe diseñarse como un sistema global tal que satisfaga los requisitos de seguridad, de comportamiento y de correcto funcionamiento.

1.2.3.1 Diseño tipo TN-S

La medida de protección más común es una conexión equipotencial puesta a tierra y desconexión automática de la alimentación. Las normas establecen tiempos máximos de desconexión para diferentes tipos de equipos. Para decidir qué tiempos son apropiados, tiene que considerarse también el arreglo de puesta a tierra externo a la propiedad, es decir, el de la red de alimentación. Esto es porque cualquier corriente de falla a tierra normalmente tiene que retornar al transformador de la fuente. La impedancia del bucle por tierra está formada por la impedancia del sistema de puesta a tierra en el transformador de fuente, los conductores de tierra entre el transformador, la propiedad y la impedancia desde el punto de falla al punto de alimentación en la propiedad

La Figura 1-27 muestra un arreglo típico en donde el terminal de tierra principal se instala a la llegada de la alimentación de energía. Este se conecta al neutro de la alimentación y a la barra de tierra en el tablero de distribución del consumidor. Además, las tuberías, agua y otros servicios básicos que ingresan a la propiedad se conectan al terminal de tierra principal.

Un conductor de protección (tierra de protección) acompaña cada circuito eléctrico que sale del tablero. En una instalación de alambrado normal, éste sería el alambre de tierra de cobre desnudo (sin aislación) que se encierra con los conductores aislados de fase y neutro en un cable con envoltura de PVC. Todas las partes de las estructuras metálicas conductivas

expuestas se conectan entre sí para asegurar que no existan diferencias de potencial entre ellas durante condiciones de falla.

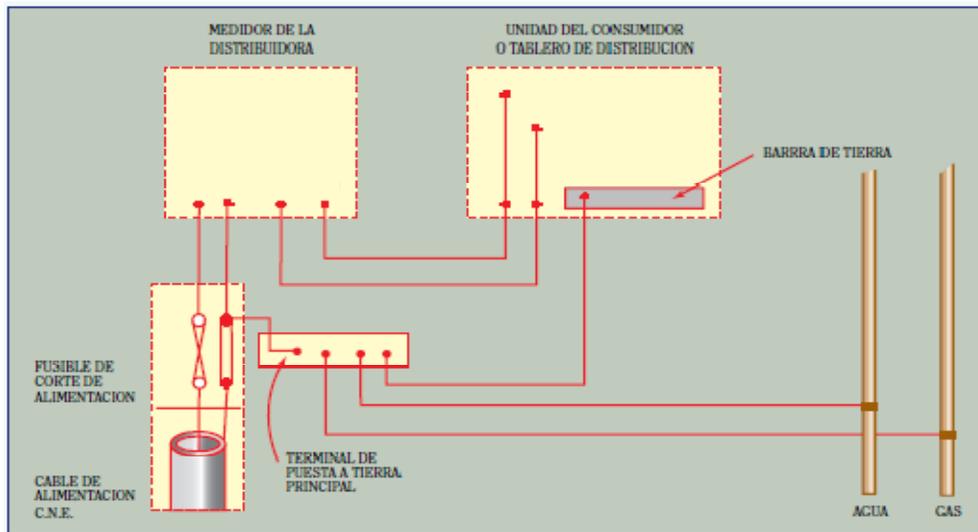


Figura 1-27. Constitución de puesta a tierra TN-C-S en una instalación domiciliaria

Se considera ahora una instalación más compleja, por ejemplo parte de aquella en el interior de una oficina o pequeña industria. En la Figura 1-28 se ilustra una disposición, con énfasis en el esquema de puesta a tierra, en donde puede verse que un conductor de protección acompaña a todos los conductores que llevan corriente. Si este conductor tiene una sección transversal de 10mm^2 o menos, debe ser de cobre. Las conexiones equipotenciales principales se usan para conectar servicios que ingresan a la propiedad (tales como tuberías metálicas de agua y en algunos casos otros servicios).

Debe instalarse una copla aislante, de extensión no inferior a un metro, al ingresar las tuberías al recinto de la instalación. El sistema interno de tuberías de distribución de agua, gas u otro servicio, debe conectarse al terminal de tierra como cualquier otro elemento metálico expuesto. Los conductores de conexión suplementarios dan una indicación visible de que el equipo metálico expuesto está interconectado y se usan principalmente cuando no pueden obtenerse los tiempos de desconexión requeridos.

Los conductores de protección de circuitos debieran ya asegurar esto, pero el enlace suplementario es normalmente más corto y así más directo. No se intenta que lleve corriente de falla, pero su dimensión mínima es tal que es como si llevara algo. Los conductores de conexión suplementarios pueden también usarse (si es necesario) para conectar partes metálicas externas tales como: escaleras, barandas, etc. Esto puede sólo ser necesario si la estructura metálica externa puede introducir un potencial (normalmente potencial de tierra) y quedará al alcance de partes conductoras del equipo.

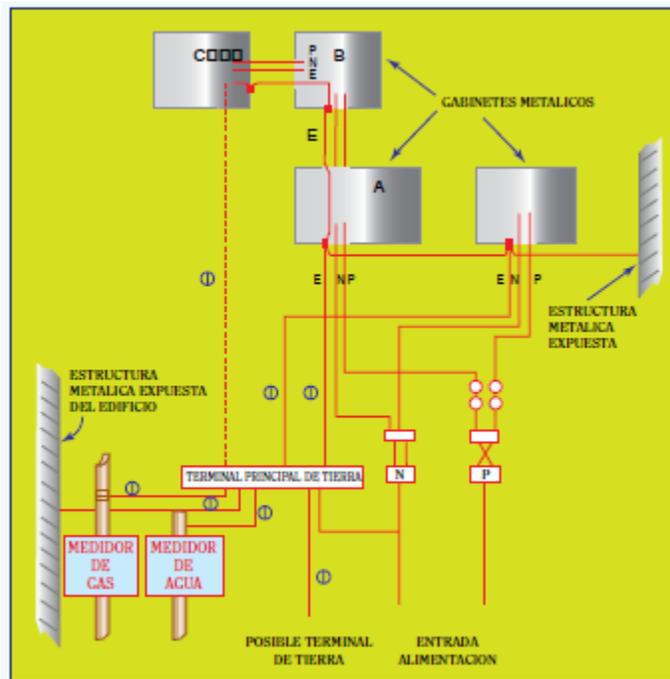


Figura 1-28. Instalación TN-S típica en el interior de una propiedad comercial o industrial

Al efectuar el diseño debe asegurarse que la impedancia del conductor de protección esté coordinada con las características del equipo de protección de modo que durante una falla a tierra, cualquier voltaje sobre el equipo expuesto que pueda ser tocado simultáneamente sea de magnitud y duración tal que no produzca peligro. La elevación de voltaje en un área durante una falla tiene que limitarse a un valor establecido en las normas y este valor se determina colocando un valor mínimo de impedancia del bucle de tierra. Es esencial que los conductores de protección de cobre usados tengan un área transversal suficientemente grande.

1.2.3.2 Sistemas de puesta a tierra integrados

Por generalidad no es posible tener un sistema compuesto de diferentes sistemas de puesta a tierra, ya que estos inevitablemente interactuarán y generalmente se acepta que un diseño integrado con una impedancia a tierra baja, es mejor que varias con valores de impedancia medianas. La Figura 1-29 ayuda a ilustrar por qué es necesario tener un diseño integrado. Se asume primero que los equipos en A y en B cada uno tienen su propio electrodo de tierra, y que las carcasas metálicas de cada uno están conectadas a éste. Si una falla a tierra se desarrolla en A, entonces la corriente de falla fluirá a tierra vía R_b y el potencial de las partes metálicas expuestas, subirá. Si no hay conexión entre A y B, el equipo en B no será afectado.

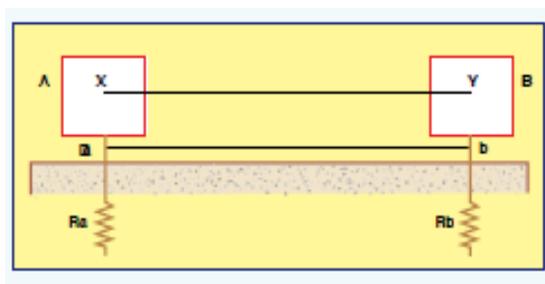


Figura 1-29. Problemas en la puesta a tierra que surgen cuando se interconectan equipos

Sin embargo, si existe la necesidad de tender un cable de comunicación (x-y) entre ambos lugares, y suponiendo inicialmente que éste tiene su pantalla puesta a tierra sólo en A, habrá una diferencia de potencial entre la pantalla y la carcasa en B que puede causar una descarga. Si la armadura del cable se conecta a una tierra de referencia de señal (el plano de tierra del equipo electrónico) en cada extremo, entonces puede resultar un daño importante debido a la diferencia de potencial y el flujo de corriente. Si la pantalla del cable se conecta a cada extremo, entonces fluirá corriente a través de ella y de R_b hacia tierra. La diferencia de potencial entre A y B dependerá de la magnitud de la corriente, la impedancia de la pantalla del cable y del valor de las impedancias individuales R_a y R_b . Hay que notar que

aún cuando se usen cables de fibra óptica, debe tenerse cuidado ya que ellos a menudo incorporan pantalla metálica o alambre de tracción.

La manera aceptable para reducir la diferencia de potencial es conectar ambas carcazas tan estrechamente como sea posible, usando diversas conexiones en paralelo. Esto incluye alambre de cobre de tierra, ductos y pantallas del cable, etc. Si A y B fueran edificaciones separadas, la forma preferida de conectar los sistemas de tierra es un electrodo en bucle horizontal aproximadamente 1 metro fuera de cada edificio, con varios electrodos interconectándolos.

1.3 EL EQUIPO DE PUESTA A TIERRA

1.3.1 Medición de la Impedancia de Electrodo de Tierra

La medición del valor óhmico de un electrodo enterrado se realiza por dos razones:

- Revisar su valor, posteriormente a la instalación y previo a la conexión del equipo, con las especificaciones de diseño.
- Como parte del mantenimiento de rutina, para confirmar que su valor no ha aumentado sustancialmente respecto del valor medido originalmente o de su valor de diseño.

El método más común para medir el valor de resistencia a tierra de electrodos de pequeño o mediano tamaño, se conoce como el método de "caída de potencial", descrito en detalle en las secciones posteriores. Para que este método pueda ser aplicado con éxito en instalaciones de gran área, se requiere que los cables de prueba se extiendan hasta 800 m ó aún hasta 1000 m de la instalación y en muchas partes esto no es factible. Entonces se tiene que usar otros métodos y algunos de ellos se describen de la misma manera más adelante.

1.3.2 Equipo necesario

En los sistemas de electrodos de pequeño y mediano tamaño es conveniente un probador de resistencia a tierra normal compuesto de cuatro terminales. Este puede ser el mismo instrumento usado para medida de resistencia de terreno. Hay dos terminales de potencial, P1 y P2 y dos terminales de corriente, C1 y C2, cuatro estacas de tierra y algunos rollos de cable.

Estos instrumentos normalmente miden sólo el valor resistivo de la impedancia del electrodo. Para proteger el instrumento contra posibles sobrevoltajes durante el período de prueba, los instrumentos modernos incluyen un fusible de 100 mA en el circuito de los cables de prueba (terminales C2 y P2). Si el instrumento no se proporciona con estos fusibles, se recomienda conectarlos externamente.

Para sistemas de electrodos de gran área, se requiere normalmente un equipo más sofisticado. Este tiene que medir impedancias muy pequeñas y tendrá que pasar más corriente que el instrumento normal. Normalmente se necesitan componentes discretas que incluyen un amplificador de potencia, una fuente de frecuencia variable e instrumentos de medida selectivos de frecuencia.

1.3.3 Método de la Caída de Potencial para medir la RPT

La resistencia de puesta a tierra debe ser medida antes de la puesta en funcionamiento de un sistema eléctrico, para su medición se debe aplicar el método de Caída de Potencial, cuya disposición de montaje para medición se muestra en la Figura 1-30.

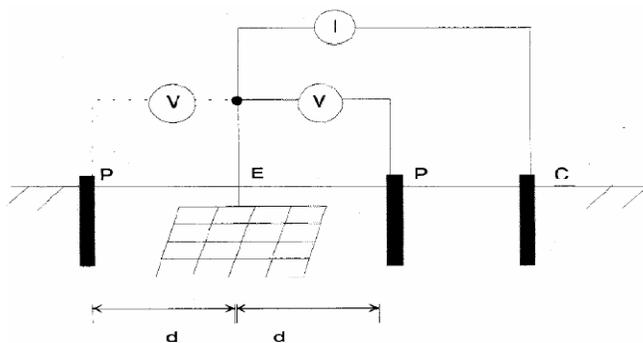


Figura 1-30. Método de la Caída de Potencial para medir la Resistencia de Puesta a Tierra (RPT).

Este método para medir la Resistencia de Puesta a Tierra (RPT) consiste en pasar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C) y medir el voltaje con la ayuda de un electrodo auxiliar (P) ilustrado en la Figura 1-30. Para poder minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente, se coloca generalmente a una sustancial distancia del sistema de puesta a tierra, esta distancia debe ser cinco veces superior a la dimensión más grande del sistema de puesta a tierra bajo estudio.

El electrodo de voltaje debe ser colocado en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también puede ser colocado en la dirección opuesta como se ve en la Figura 1-30. Cuando se realice la práctica, la distancia “d” para el electrodo de voltaje se elige al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta mencionada distancia está basada en la posición teóricamente correcta para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo en donde su resistividad sea homogénea.

El encontrar la localización del electrodo de voltaje, es muy crítico para medir la resistencia de un sistema de puesta a tierra. Esta localización debe estar libre de cualquier influencia del sistema de puesta tierra bajo medida y del electrodo auxiliar de corriente. La manera más clara y práctica de determinar si el electrodo de voltaje está fuera de la zona de influencia de los electrodos es obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de voltaje en varios puntos entre el sistema de puesta a tierra y el electrodo de corriente.

Dos o tres lecturas constantes y consecutivas pueden asumirse como representativas del valor de resistencia verdadera.

Ahora se puede observar mediante la Fig.1-31 una gráfica de resistencia contra distancia del electrodo de voltaje (**P**). La curva muestra como la resistencia es cercana a cero cuando (**P**) se acerca al sistema de puesta a tierra y se aproxima al infinito hacia la localización del electrodo de corriente (**C**). El punto de inflexión en la curva corresponderá a la resistencia de puesta a tierra del sistema bajo estudio.

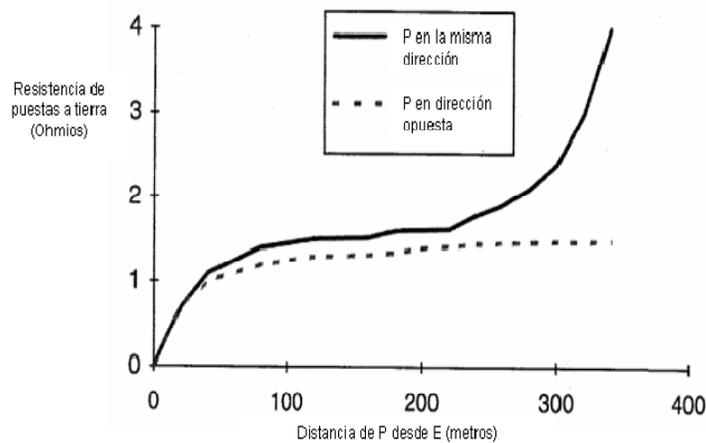


Figura 1-31. Resistencia de puesta a tierra versus distancia de (P).

1.3.4 Gradientes de Potencial

El método de Caída de Potencial para la medición de la RPT, es el producto de la inyección de corriente por tierra a través del electrodo de corriente. Por ello, si el electrodo de corriente, el de potencial y el sistema de puesta a tierra se encuentran muy cercanos entre sí, va a existir un solapamiento de los gradientes de potencial generados por cada electrodo, resultando una curva en la cual el valor de resistencia medida se incrementará con respecto a la distancia, se puede observar en la Figura 1-32

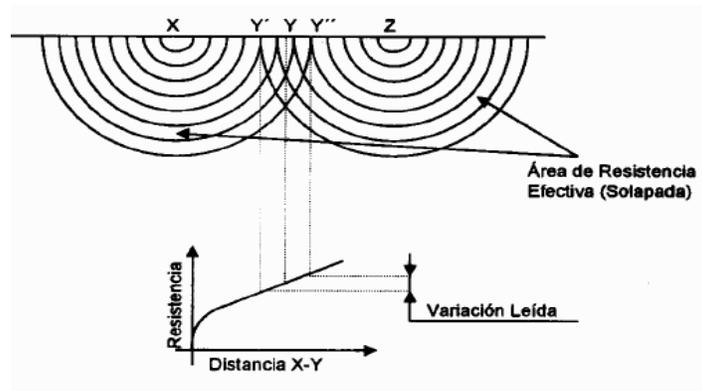


Figura 1-32. Solapamiento de los gradientes de potencial.

Al ubicarse el electrodo a una distancia lo suficientemente lejos del sistema de puesta a tierra a medir, la variación de posición del electrodo de potencial, desde la puesta a tierra hasta el electrodo de corriente, no producirá solapamiento entre los gradientes de cada electrodo, originándose entonces una curva como la mostrada en la Figura 1-33.

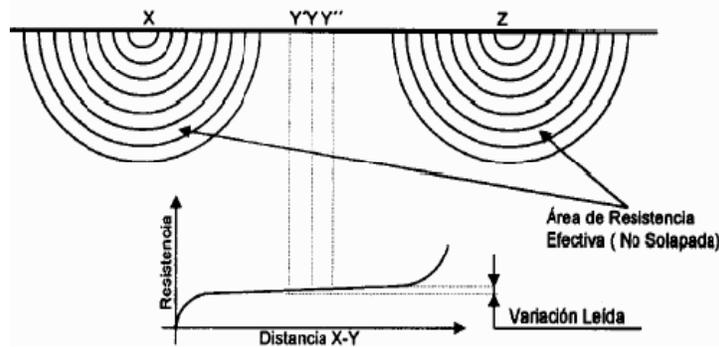


Figura 1-33. Curva de resistencia versus distancia sin solapamiento de gradientes de potencial.

Entonces en la Figura 1-33 puede observarse como existe una porción de la curva que permanece casi invariable, la cual será más prolongada o más corta esto se dará dependiendo de la separación de los electrodos de corriente (Z) y bajo prueba (X).

La valoración de resistencia asociada a este sector de la curva, será el correcto valor de resistencia de puesta a tierra del estudio.

1.3.5 Medida de sistemas de electrodos de gran área

El método de la caída de potencial puede usarse en sistemas de electrodos más grandes, pero se sugiere que el electrodo de corriente se ubique a una distancia entre 6 y 10 veces la distancia diagonal del sistema de electrodos. Esto normalmente no es práctico, de modo que se han desarrollado varias alternativas al método de caída de potencial. Estas incluyen el método de pendiente (donde se calcula el gradiente entre puntos de medida adyacentes) y el método de intersección de curvas.

En otra variación de la prueba, la pica de voltaje se desplaza en ángulo recto con respecto a la dirección malla-pica de corriente. La distancia de la pica de voltaje a la malla se aumenta progresivamente hasta que el valor medido apenas cambie. Este valor debe estar entonces justo bajo el valor de impedancia real de la malla.

Si existen cables o tuberías metálicas enterradas en la misma dirección que las rutas de los cables de prueba, producirán siempre una lectura incorrecta del valor de impedancia a tierra. Cuando la malla de tierra es muy grande o tiene conexiones radiales largas, por ejemplo, hacia pantallas de cables o cable de guardia de líneas de transmisión áreas, el tamaño efectivo resultante de la malla de tierra es tan grande que la medida tradicional por caída de potencial es impracticable. Aún se puede conseguir algunas veces una estimación mediante una serie de medidas de campo, respaldadas por simulación computacional.

Otro método llamado de inyección de alta corriente, hace circular varios cientos de amperes entre la malla y un sistema de electrodos de corriente alejado, usando un circuito de potencia. Se mide la elevación de potencial real con referencia al electrodo remoto y puede calcularse la impedancia del electrodo. Sin embargo, este método es caro y puede aún estar sujeto a errores. Un error común es no considerar para el cálculo de la impedancia, la impedancia de los circuitos metálicos que interconectan los dos sistemas empleados (interconexión de bajo voltaje, circuitos de comunicación, etc.)

1.3.6 Medida de resistencia de puesta a tierra sobre pavimentos o suelos de concreto

En algunas ocasiones el sistema de puesta a tierra se encuentra rodeado de suelos cubiertos por pavimentos, concreto o cemento y en los cuales no es tan fácil la colocación de los electrodos de prueba tipo varilla. En estos casos se pueden usar placas de cobre para reemplazar los electrodos auxiliares y también se utiliza agua para remojar el punto y de esta manera disminuir la resistencia de contacto con el suelo, esto se puede observar en la Figura 1-34.

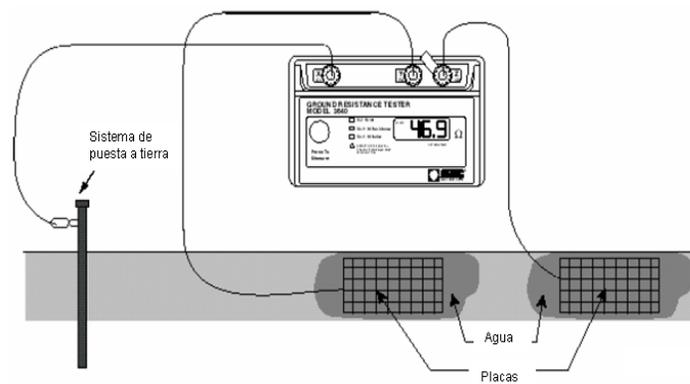


Figura 1-34. Medida de la resistencia de puesta a tierra en suelos o pavimentos.

Deberán ubicarse las placas de cobre a la misma distancia en que se colocarían los electrodos auxiliares de acuerdo al método de la Caída de Potencial antes descrito. Las dimensiones de la placa deberán ser de 30x30 cm y espesor de 3.8 cm. También se debe verter agua sobre las placas y remojar el lugar en donde serán ubicadas para mejorar el contacto con el suelo. Es importante mencionar que las placas realizarán la misma función de los electrodos auxiliares.

1.3.7 Medida de la Resistencia de Puesta a Tierra mediante medidor tipo pinza

Este es un método práctico que viene siendo ampliamente usado para medir la puesta a tierra en sitios donde es imposible usar el método convencional de caída de potencial, como

es el caso de lugares densamente poblados, celdas subterráneas, centros de grandes ciudades, etc. El medidor tipo pinza mide la resistencia de puesta a tierra de una varilla o sistema de puesta a tierra simplemente abrazando el conductor de puesta a tierra o bajante como lo ilustra la figura 1-35.

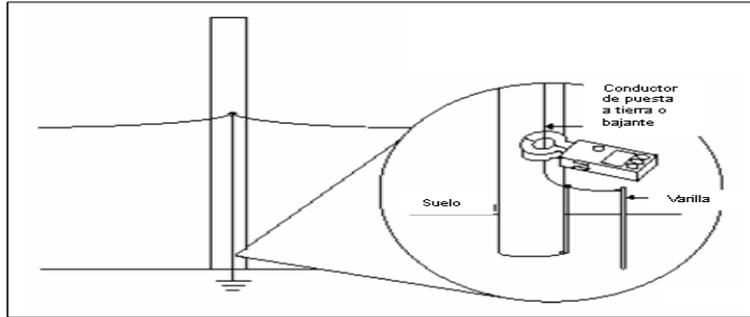


Figura 1-35. Medición de la RPT utilizando pinza.

El principio de operación es como sigue a continuación:

En primera instancia el neutro de un sistema multiterrizado puede ser representado como un circuito simple de resistencias de puesta a tierra en paralelo como se puede observar en la Figura 1-36.

Entonces si un voltaje “**E**” es aplicado al electrodo o sistema de puesta a tierra **R_x**, la corriente “**I**” resultante fluirá a través del circuito antes citado.

Se tendrá en cuenta que los instrumentos poseen un oscilador de voltaje a una frecuencia de 1.6 kHz y la corriente a la frecuencia generada es recolectada por un receptor de corriente. Un filtro interno elimina las corrientes de tierra y ruido de alta frecuencia.

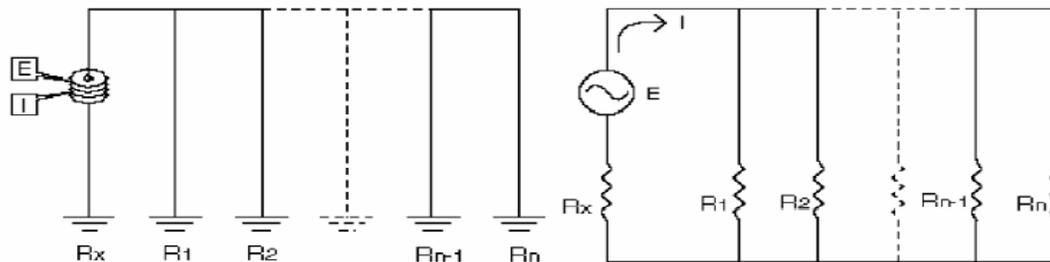


Figura 1-36. Circuito equivalente para un sistema multiterrizado.

Entre el voltaje y la corriente existe una relación la misma que es determinada por el instrumento y desplegada en forma digital. El método está basado en la suposición de que la impedancia del neutro del sistema multiterrizado, excluyendo el electrodo bajo medida, es muy pequeña y puede ser asumida igual a cero. La ecuación es la siguiente:

$$E/I = R_x + \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$$

En donde usualmente:

$$E/I = R_x + \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$$

Teniendo en cuenta esta suposición, la lectura indicada nos va a representar la resistencia de puesta a tierra del sistema o electrodo que se está midiendo.

Este método posee las siguientes limitaciones:

- La aplicación es limitada a electrodos conectados a sistemas multiterrizados de baja impedancia.
- Conexiones corroídas o partidas del neutro del sistema, pueden influenciar las lecturas.
- No es aplicable a sistemas de puesta a tierra aterrizados en múltiples puntos.
- El ruido de alta frecuencia en el sistema podría influenciar en las lecturas a tomarse.
- Podrían existir altas resistencias en las conexiones con el electrodo de puesta a tierra.

1.3.8 Seguridad

1.3.8.1 Consideraciones de Seguridad en los procedimientos de medida de la Resistencia de puesta a Tierra (RPT)

Cuando se esté efectuando el proceso de medición de la resistencia de puesta a tierra se podría quedar expuesto a gradientes de potencial letales que pueden existir entre la tierra a medir y la tierra remota.

Motivo por el cual es muy importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- No se deberán realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas.
- Debe estar la puesta a tierra desconectada de las bajantes de los pararrayos, del neutro del sistema y de las tierras de los equipos.
- Antes de efectuar la medición, debe medirse la tensión originada por corrientes expurgas, debiéndose tener muy en cuenta que si esta supera los 30 V, no debe medirse la resistencia y deberá localizarse la falla.
- Deberá el operario utilizar guantes aislados y calzado con suela dieléctrica.
- Principalmente uno de los objetivos de la medición es establecer la localización de la tierra remota tanto para los electrodos de potencial como de corriente, es así que de esta manera, las conexiones de estos electrodos deben ser tratados como una fuente de posible potencial entre los cables de conexión y cualquier punto sobre la malla.
- En ninguna circunstancia se deben tener las dos manos o partes del cuerpo humano que complete o cierre el circuito entre los extremos de posible diferencia de alto potencial.

1.3.8.2 Consideraciones de Seguridad en la medición de la Resistencia de Puesta a Tierra en Pararrayos:

Es muy importante tomar en cuenta que la medición de ésta RPT es de especial cuidado debido a que pueden aparecer, en el momento de la medida, corrientes extremadamente altas de corta duración producto de descargas atmosféricas por el funcionamiento propio del pararrayo.

En un pararrayos aislado y puesto a tierra, la bajante o conductor de puesta a tierra nunca debe ser desconectada para realizar la medición porque la base del pararrayos puede estar elevada al potencial de la línea.

La medición de la RTP debe ser efectuada cuando se tengan todas las precauciones de rigor.

1.4 ESTÁTICA Y PROTECCIÓN A TIERRA CONTRA RAYOS

El principal propósito de un esquema de protección contra rayo es blindar un edificio, sus ocupantes y el equipamiento, de los efectos adversos asociados con una descarga de rayo. Estos efectos de otra manera podrían provocar fuego, daño estructural e interferencia electromagnética - llegando a daño en el equipamiento o choque eléctrico. Para comportarse correctamente, el esquema de protección debe capturar el rayo, conducirlo en forma segura hacia abajo y luego dispersar la energía en el terreno. Los componentes utilizados para habilitar esto son terminaciones en aire, conductores de bajada y de conexión y la terminación de tierra (o electrodo).

1.4.1 La formación del rayo

El rayo se crea por una separación de cargas eléctricas debido a la turbulencia del aire. Se piensa que la separación de carga se debe a la integración de gotas de lluvia, copos de nieve y cristales de hielo. Las nubes que contienen humedad suben y se enfrían al subir. Si la tasa de subida es gradual, normalmente resulta neblina y lluvia. Sin embargo, si la tasa de subida es sobre un cierto nivel, el efecto de enfriamiento será acelerado. Esto puede provocar grandes gotas de lluvia o aún granizo. La mecánica de la lluvia o granizada ayuda a provocar separación de cargas, llegando a generar una carga negativa en la base de la nube y carga positiva en la parte superior de la nube o en las partículas de hielo. Las diferencias de potencial subsecuentes creadas entre nubes o nubes a tierra pueden ser suficientemente altas de modo que se produce un rayo de nube a nube o de nube a tierra (descarga de rayo).

Las descargas nube a nube pueden causar interferencia eléctrica y algunas veces un daño significativo, pero es la descarga a tierra generalmente la más destructiva. Cuando la diferencia de potencial entre la base de la nube y el plano tierra/aire inferior excede el valor de ruptura dieléctrica del aire en la vecindad inmediata, el aire se ioniza y empieza una descarga, viajando aproximadamente a 2 metros por microsegundo. Sigue una trayectoria aleatoria, generalmente hacia abajo, hecha de pequeños pasos. Hay algún debate respecto de la forma en que los pasos se producen y el punto en el cual comienza el arco real, pero eventualmente el líder cargado negativamente se aproximará a tierra. A su vez, en la superficie de la tierra se inducirá carga positiva y en particular en las estructuras elevadas. Si el potencial es suficientemente alto en la tierra (o estructura elevada), entonces comienza aquí la ionización del aire y se creará un líder ascendente, cargado positivamente. Eventualmente los líderes cargados positivos y negativos se encontrarán, a menudo vía una ruta que parece azarosa, y se producirá la descarga de alta corriente, de corta duración, acompañada por ruido (trueno) y un relámpago brillante.

La cantidad de actividad atmosférica no es igual en todas las zonas; varía de acuerdo a varios factores, incluyendo ubicación geográfica, altura, etc. La energía asociada con la

descarga también varía. Es necesario considerar estos y otros factores, para decidir si se necesita un esquema de protección contra rayo y la forma que debiera tomar.

1.4.2 Análisis para colocar un pararrayos, estimación de riesgo

Una estimación probabilística toma en cuenta los siguientes factores:

- Resistividad del suelo.

- Las dimensiones externas de la estructura y de cualquier estructura adyacente conectada eléctricamente.
- La longitud de los cables aéreos que salen de la estructura.

- La densidad de descargas en la localidad - asociada con el número de días de tormenta al año.

- El tipo de construcción -principalmente la altura, tipo de techo, y esquema de protección (si existe) en el lugar. En general, mientras más grande es, mayor es la probabilidad de ser impactada.

- Factores geográficos -la altura vertical sobre el nivel del mar y la relación con otra estructura, por ejemplo cuán cerca está de árboles altos.

- Perfil de tierra y terreno.

Estos factores toman en cuenta el área de exposición formada por la estructura y los cables conectados a ella y la metodología capacita para calcular el riesgo de impacto. Si el riesgo es menos que 1 en 100.000 entonces generalmente no se requiere protección. Sin embargo, con el propósito de realizar una estimación formal del riesgo, éste necesita estimarse en relación a las consecuencias de un impacto directo. Si el edificio está asociado con una

refinería de petróleo o depósito de explosivos, entonces se necesitará un esquema de protección contra descarga atmosférica que ofrezca el mayor grado posible de protección, aún si el riesgo de un impacto es pequeño.

1.4.3 Componentes de un sistema de protección contra descarga atmosférica

El diseño global está basado en el concepto de esfera rodante, que se aplica a la estructura para asegurar que todas las áreas expuestas son protegidas por el esquema. Las componentes individuales se describen abajo. Los materiales utilizados son generalmente cobre de alta pureza o aluminio (99% + de pureza) de un grado similar al empleado para conductores eléctricos. El sistema de protección contra rayo debe diseñarse para proporcionar una impedancia suficientemente baja de modo que la energía de la descarga siga la ruta ofrecida. Esto requiere un diseño integrado y uso de materiales con impedancia suficientemente baja. Los diversos componentes del sistema se describen con más detalle a continuación.

1.4.3.1 Terminaciones en aire

Estas consisten en varas verticales y/o una malla de conductores en el techo y bordes superiores de la estructura. Los conductores de la malla típicamente forman un enrejado de 10 m por 20 m, más pequeño en edificios de alto riesgo. A ella se conectan proyecciones metálicas, incluyendo varas. Una recomendación señala que todas las partes del techo estén a menos de 5 metros de un conductor de terminación en aire. Esta distancia se reduce a 2,5m en edificios de alto riesgo. Nuevamente el material más ampliamente usado es el cobre. Las varas tradicionalmente eran aguzadas, pero los diseños modernos normalmente tienen ahora una punta roma, alisada. Las varas, si se usan, están ubicadas cerca de aquellas posiciones donde es más probable el impacto, es decir, puntas de techo, esquinas de edificios, etc.

1.4.3.2 Conductores de bajada y de conexión

Se requiere que estos conductores proporcionen una trayectoria de baja impedancia hacia abajo de la estructura, de modo que minimice diferencias de potencial y corrientes inducidas. El arreglo ideal sería un edificio metálico, donde la corriente fluyera por una película exterior del edificio. El diseño para construcciones tradicionales apunta a usar las ventajas de esto, es decir, proporcionando diversas trayectorias paralelas para reducir la corriente de falla en cada una de ellas. Estas deberían estar simétricamente ubicadas alrededor del edificio, idealmente incluyendo las esquinas. El equipo electrónico sensible no debería ubicarse cerca de estas trayectorias de bajada en el interior del edificio, ya que existe un riesgo de interferencia inductiva. La corriente fluiría en todas las trayectorias, pero fluiría mayor corriente en la trayectoria más próxima al punto de impacto.

Se requiere que los conductores de bajada sean tan cortos y directos como sea posible, con cambios de dirección graduales en lugar de ser en ángulo recto. Deben ser de construcción robusta y fijados en forma segura con el propósito de soportar las fuerzas mecánicas significativas que acompañan el flujo de corrientes de rayo. Además de los conductores de bajada formales, se usan también vigas metálicas, blindajes metálicos y reforzados metálicos de la estructura.

Se usan conductores de enlace para conectar los conductores de bajada a cualquier estructura metálica expuesta sobre o cerca de la estructura. Esto es para asegurar que no ocurra una descarga secundaria. Cuando la corriente circula por el conductor de bajada, puede generarse un potencial. Si la estructura metálica (tal como ductos de calefacción central, tuberías, etc.) no estuviera conectada, podría inicialmente estar a un potencial próximo al de tierra y así podría ofrecer una trayectoria a tierra más atractiva. Si la diferencia de potencial excede el valor de ruptura del aire o del medio intermedio, entonces puede aparecer una descarga secundaria, acompañada de un daño severo.

El cobre y el aluminio son los materiales más ampliamente utilizados. Se prefiere normalmente el conductor en hebra en lugar de cinta ya que es más fácil de instalar y su efecto pelicular a altas frecuencias provoca un mejor comportamiento. El cobre se considera que es el más resistente a la corrosión en áreas con contenido de sal, aire húmedo, cerca de concreto, en corteza de árbol y donde hay contaminación ambiental. Algunas veces el cobre se recubre de plomo para mejorar su resistencia a la corrosión cuando se usa en chimeneas y cerca de otras estructuras de gases combustibles. Por razones estéticas se recubre algunas veces con mangas de PVC.

Cada conductor de bajada debe conectarse a una terminación de tierra y si éstas no están interconectadas, entonces los conductores de bajada deben interconectarse a través de un conductor horizontal en anillo instalado cerca del nivel de tierra. Se ajusta normalmente una tenaza de prueba para permitir la revisión de continuidad de conductores de bajada a nivel de suelo y proporcionar un medio de aislar el electrodo de tierra.

1.4.3.3 Terminal de tierra

Este puede consistir de un anillo de cobre enterrado que rodea la estructura y/o barras de tierra verticales. Se requiere que la impedancia del terminal de tierra (es decir, después de una conexión de bajada) sea máximo de 10 Ohm. El aluminio no se permite para uso bajo tierra. Cada conductor de bajada debe tener su propio electrodo de tierra terminal y estos normalmente están conectados entre sí para formar un anillo, con electrodos horizontales usados para interconectarlos y ayudar a reducir la impedancia global. Los terminales de tierra más comunes son barras de al menos 1,5 m de longitud, con un mínimo para cada sistema de 9 m. El anillo ayuda a lograr una equalización de potencial en la superficie del suelo, además de controlar el potencial.

Esto último ayuda a reducir el voltaje de contacto que puede experimentar una persona en contacto con el conductor de bajada durante una descarga atmosférica. Aunque las otras partes del sistema de protección pueden diseñarse eléctricamente aisladas, el arreglo de

electrodos no debe serlo. La instalación completa debe subir conjuntamente su potencial, para evitar diferencias de voltajes excesivos y esto significa que el terminal de tierra debe ser conectado al resto de los electrodos de tierra y en lo posible diseñado como una entidad.

1.4.3.4 Dispositivos de protección de onda

Habiendo ya diseñado el sistema de protección contra descarga atmosférica, pueden identificarse rápidamente las áreas principales de riesgo y tomar precauciones adicionales, donde sea necesario, para proteger equipo electrónico. La puesta a tierra, el apantallamiento y la conexión equipotencial no pueden garantizar siempre inmunidad frente a una interferencia. Así, los dispositivos de protección de onda complementan esta protección donde sea necesario y forman la última parte de la defensa formal. Existe un amplio rango de dispositivos disponibles para este propósito. Generalmente, están diseñados para derivar la energía asociada con un sobre-voltaje hacia el sistema de puesta a tierra para evitar que éste provoque ruptura de la aislación en el interior de algún equipo.

El voltaje de operación está bajo el nivel al cual se puede producir daño al equipo protegido. Estos son dispositivos limitadores de voltaje, normalmente varistores de óxido metálico, que se conectan entre fase y tierra.

Otros dispositivos manejados por voltaje bruscamente cambian de alta a baja resistencia cuando se supera un voltaje umbral. Estos incluyen chisperos y tubos de descarga de gas. Otros dispositivos empleados incluyen filtros de atenuación de onda (para dar protección adicional a equipo electrónico sensible) y barreras de onda (donde penetran o salen cables de un edificio).

CAPITULO 2: LEVANTAMIENTO Y ANALISIS DE LOS SISTEMAS
ELECTRICOS EXISTENTES EN EL COLEGIO TECNICO
INDUSTRIAL GUALACEO

2.1 DATOS INFORMATIVOS DEL CTIG

Institución: Colegio Técnico Industrial Gualaceo (CTIG)

Parroquia: Gualaceo

Cantón: Gualaceo

Provincia: Azuay

Dirección: Dávila Chica s/n - barrio el Calvario

Teléfono: 2255060

Dirección electrónica: *www.tecniguala@easynet.net.ec*

Autoridades de la Institución:

Rector: Ing. Vicente Uzhca

Vicerrector: Lic. Fanny Campos

Inspector General: Lic. Luis Suárez

Supervisor: Dr. Carlos Reino

El Colegio Técnico Industrial Gualaceo es una comunidad educativa que fundamenta su accionar en los principios de unidad, equidad, respeto, solidaridad, practicando capacidades y competencias compartidas de consulta técnica y práctica, lo que garantizará el bienestar físico y emocional de sus actores, convirtiéndolos en gestores de sus aprendizajes con proyección social de servicio e inserción en la comunidad.

2.2 Antecedentes

En este capítulo la prioridad es realizar el reconocimiento eléctrico completo y el respectivo análisis de los diferentes sistemas eléctricos que conforman el Colegio Técnico Industrial Gualaceo, se han realizado los planos correspondientes a todo el plantel educativo ya que estos antes no existían, motivo por el cual este trabajo fue realizado efectuando una división por zonas en donde cada una está constituida por diferentes parámetros que más adelante se detallarán. Este establecimiento educativo al carecer de sistemas de puestas a tierra apoya la elaboración de este proyecto.

2.3 Disposición y distribución de las redes existentes de M.T. y B.T.

2.3.1 Línea de 22kV.

Esta línea es suministrada por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur a un nivel de media tensión de 22KV. Antes de iniciar con la descripción de todos los elementos que forman parte de la subestación principal, se describen a continuación en la tabla 2-1 los términos empleados en este capítulo y los planos correspondientes, (ver anexo Planos 1/4, 2/4, 3/4, 4/4).

TÉRMINOS	DESCRIPCION
S#	Seccionador Fusible tipo abierto
TR#	Transformador
TD#	Tablero de Distribución

Tabla 2-1

2.3.2 Acometida

Está tomada desde un poste principal de suministro de energía, ubicado a en la acera de la prolongación de la calle Cuenca s/n, de subida hacia la parroquia Bullzhún, desde allí va un seccionador fusible trifásico tipo abierto de 27 KV/40 A (S1), exterior, la acometida se lo realiza de manera aérea con el conductor 3x1/0 ACSR/25kV, de aquí ingresa hacia subestación principal.

2.3.3 Transformador TR1

Tomando en cuenta las características del Colegio Técnico Industrial Gualaceo, se tiene el valor de la potencia demandada por el establecimiento la misma que es de 67KVA, por lo tanto el transformador existente que es de 100 KVA suministra la potencia necesaria. En la Foto 2-1 se presenta el transformador que alimenta al CTIG.



Foto 2-1 Transformador de 100KVA del CTIG

Los datos de placa del transformador Trifásico son:

Marca: TRANSUNEL

Número: 2410

Frecuencia: 60 Hz

Serie: P22 741 3 02 Tipo: 6THC

Año de fabricación: 1982

Potencia: 100 KVA

Voltaje secundario: 220V

Corriente: P: 2,62A – 9,62A S: 262,4A

De acuerdo con: ASA- IEC

Aislamiento: BIL15 KV

Diagrama Vectorial: Yyn6 Dyn6

Aceite: 132 Kg

Peso Total: 499 Kg

2.3.4 Medición de la energía.

Se cuenta con una acometida en Media Tensión (22 KV), que alimenta a la cabina de transformación del CTIG. Tiene un sistema de medición al secundario a través de un medidor digital marca Elster serial # 04674510. La distribución interior se realiza a un nivel de 220V, 127V. Todo esto es suministrado por la E.E.R.C.S. En la Figura 2-2 se presenta el contador de energía.



Figura 2-2 Contador de energía existente en el C.T.I.G.

2.4 Tablero principal de barras de distribución existente en el CTIG

El tablero cuenta con un seccionador fusible trifásico NH general de 400A/600V, todo el armario de distribución está conformado por 17 fusibles NH de diferentes amperajes, separados de la siguiente manera como se muestra en la tabla 2-2, mediante los fusibles NH, se distribuyen las líneas a los diferentes tableros ubicados por zonas. (Ver anexo Planos)

<i>Fusibles</i>	<i>Descripción</i>	<i>Tableros</i>
<i>3x63A</i>	<i>Zona 1</i>	<i>TD01, TD02, TD03, TD04, TD05, TD6, TD7.</i>
<i>2x63A</i>	<i>Zona 2</i>	<i>TD09, TD10, TD11, TD12, TD13, TD14</i>
<i>3x200A</i>	<i>Zona 3</i>	<i>TD8</i>
<i>3x63A</i>	<i>Zona 4</i>	<i>TD15, TD16</i>
<i>3x80A</i>	<i>Zona 5</i>	<i>TD21, TD22, TD23</i>
<i>3x80A</i>	<i>Zona 6</i>	<i>TD17, TD18, TD19, TD20, TD24, TD25, TD26, TD27, TD28, TD29,TD30, TD31, TD32, TD33, TD34</i>

Tabla 2-2 Disposición de los fusibles NH a los tableros existentes en el CTIG

A continuación en la foto 2-3 se muestra la disposición de los fusibles NH en el armario de distribución del CTIG.



Foto 2-3 Armario de Distribución de los fisibles NH en el CTIG

2.4.1 Descripción de las zonas alimentadas por las diferentes instalaciones eléctricas existentes, en función de los tableros.

En la tabla 2-3 se presenta la descripción de los lugares, a los cuales los diferentes tableros alimentan, tomando en cuenta las instalaciones eléctricas existentes en las diferentes zonas que conforman el CTIG, (Ver anexo Planos)

<i>Fusible</i>	<i>Tablero</i>	<i>Descripción</i>
1	TD01	Taller Mecánica Automotriz, segundo de bachillerato
	TD02	Laboratorio de Mecatrónica
	TD03	Taller de Mecánica Automotriz tercero de bachillerato
	TD04	Taller de Opciones Prácticas de Mecánica Industrial
	TD05	Taller de Mecánica Industrial tercero de bachillerato
	TD06	Taller de Mecánica Industrial, Soldadura, Ajuste
	TD07	Taller de Opciones Prácticas de Mecánica
3	TD8	Taller de Mecánica Industrial, Soldadura, Torno, Fresadora, segundos de bachillerato
2	TD9	Taller de Opciones Prácticas Mecanizado
	TD10	Taller de Refrigeración segundo de bachillerato
	TD11	Taller de Aire Acondicionado y Refrigeración
	TD12	Taller de Refrigeración básico
	TD13	Taller de Electrónica segundo de bachillerato
	TD14	Taller de Electricidad tercero de bachillerato
4	TD15	Taller de Producción
	TD16	Coliseo en construcción
6	TD17	Aulas novenos años de educación básica
	TD18	Inspección General, Biblioteca
	TD19	Aulas octavos años de educación básica
	TD20	Aulas de octavos y primero de bachillerato
5	TD21	Taller de Electricidad básico
	TD22	Taller de Electricidad segundos de bachillerato
	TD23	Aulas terceros de bachillerato
6	TD24	Laboratorio de Química
	TD25	Aulas primeros de bachillerato
	TD26	Taller de Electrónica diversificado, DOBE, Bodega 1, Consultorios Médico y Odontológico
	TD27	Taller de Electricidad, Aulas segundo bachillerato
	TD28	Laboratorio de Física
	TD29	Bodega 2
	TD30	Aulas décimos años de educación básica
	TD31	Laboratorio de Computación 1
	TD32	Laboratorio de Computación 2
	TD33	Oficinas Administrativas
	TD34	Sala de Audiovisuales

Tabla 2-3 Detalle de alimentación de los tableros

2.5 Análisis de los sistemas eléctricos existentes en el CTIG

Como se ha podido observar en puntos anteriores, el CTIG cuenta con 34 tableros de distribución, los mismos que están designados para los diferentes circuitos eléctricos, tanto de iluminación como de fuerza, al visitar las diferentes zonas de estudio dentro del establecimiento, se pone de manifiesto que se encuentran en buen estado las instalaciones eléctricas existentes, sólo que en su mayoría carecen del tercer cable de conexión a tierra, por normativa color amarillo- verde, que posteriormente irá conectado al Sistema de Puesta a Tierra (SPT).

Es así que en esta institución, se trabajó en primera instancia colocando en donde hacía falta el tercer cable denominado de conexión hacia tierra, para desde los tableros principales partir con la construcción de los diferentes SPT debido a que estos actualmente no existen. La mayoría de la maquinaria pesada, en especial de los talleres en donde se consume gran cantidad de potencia, se ha podido observar que tienen en su propio sitio una conexión de carcasa hacia tierra para evitar contactos o descargas.

Una vez que se han efectuado los trabajos anteriores, el punto de partida para la elaboración de cada SPT, será desde los diferentes tableros hacia los Sistemas de Puesta a Tierra propiamente dichos, los mismos que se diseñarán y construirá en el Capítulo 3.

2.6 Designación de los diferentes SPT a construirse en función de los tableros

En este punto hay que mencionar que un Sistema de Puesta a Tierra puede servir como aterrizamiento de uno o un determinado número de tableros, todo esto dependiendo de sus funciones, la proximidad, el espacio, el sitio a ubicarse, debiendo tenerse muy en cuenta

que en una puesta a tierra la conexión entre el electrodo desnudo en contacto directo con el suelo permitirá la conducción y dispersión de las corrientes eléctricas.

El documento IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, *Standard 42-1991* y la normativa ANSI/IEEE Std. 81: 1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System, deja a consideración del diseñador, el aterrizar uno o varios sistemas eléctricos a un mismo Sistema de Puesta a Tierra, pero debe cumplir con los límites establecidos de resistencia de puesta a tierra, dependiendo de su aplicación.

Tomado muy en cuenta los fundamentos anteriores, se ha propuesto la construcción de trece SPT los mismos que se detallan a continuación en la tabla 2-4.

<i>Designación de elementos a aterrizar</i>	<i>Sistema de Puesta a Tierra</i>	<i>Especificaciones</i>
<i>TR1</i>	<i>SPT1</i>	<i>Posee un electrodo de puesta a tierra en mal estado, no cumple con la normativa por ende se construirá el nuevo SPT tipo malla</i>
<i>Tablero de Distribución General</i>	<i>SPT2</i>	<i>Tiene una malla de puesta a tierra mal conectada y en mal estado se le dará el respectivo mantenimiento correctivo</i>

<i>TD04, TD05, TD06, TD08</i>	<i>SPT3</i>	<i>Se realizará una malla de puesta a tierra, es necesario una RPT baja</i>
<i>TD12, TD13, TD14</i>	<i>SPT4</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD15, TD16</i>	<i>SPT5</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD17, TD30</i>	<i>SPT6</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD31, TD32</i>	<i>SPT7</i>	<i>Se realizará una malla de puesta a tierra, es necesaria una RPT baja.</i>
<i>TD18, TD19, TD34</i>	<i>SPT8</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD21, TD22, TD23, TD24</i>	<i>SPT9</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD25, TD26</i>	<i>SPT10</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD27, TD28, TD29</i>	<i>SPT11</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD1, TD2, TD3</i>	<i>SPT12</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>
<i>TD7, TD9, TD10, TD11</i>	<i>SPT13</i>	<i>aterrizamiento mediante electrodo vertical</i>

Tabla 2-4 Designación y Especificaciones de los SPT

En el siguiente capítulo se analizarán los parámetros correspondientes para el diseño y construcción de los Sistemas de Puesta a Tierra en el CTIG.

CAPITULO 3: MEMORIA TECNICA DESCRIPTIVA DEL DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA EL COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL GUALACEO

3.1 Finalidad del diseño constructivo de puestas a tierra en el Colegio Técnico Industrial Gualaceo (CTIG)

De los conceptos analizados e información encontrada en los capítulos uno y dos, es importante entender que una puesta a tierra, es la conexión de un conductor eléctrico (electrodo) enterrado en el suelo cuya finalidad es dispersar las corrientes y captar el potencial de referencia cero.

El motivo primordial por el cual diseñarán y se construirán las puestas a tierra, es para la protección del personal del plantel, protección de laboratorios, aulas y de la maquinaria de los diferentes talleres asegurando su correcto funcionamiento.

Para la obtención de una resistencia mínima en una puesta a tierra, influye mucho la naturaleza del terreno, el tipo de electrodo a utilizarse los aditivos químicos para mejorar la calidad de terreno y otros componentes como el calibre del conductor de conexión desde el tablero de distribución hasta la puesta a tierra, los conectores y las uniones. A lo largo de este capítulo se analizarán todos estos parámetros.

3.2 Norma IEEE 80-2: Guía para mediciones del Sistema de Puesta a Tierra (SPT)

Propósito:

El propósito de esta norma enfocado a este proyecto de tesis es presentar los métodos de instrumentación práctica que pueden ser usados para la medición de la impedancia de la tierra, potenciales de toque y paso, y distribuciones de corriente de sistemas de tierra largos o extensos.

El método a utilizarse para la medición del terreno en el CTIG es el de Wenner que radica su funcionalidad en el principio de la caída de potencial, debido a su simplicidad y eficacia a lo largo de este estudio se lo utilizará.

3.2.1 Precauciones generales:

- No hacer mediciones al SPT durante periodos de actividad de tormenta o relámpagos en áreas comprendidas en la estación a ser medida o en la red de potencia conectada a esta.
- No conectar las puntas de prueba a líneas de transmisión fuera de servicio durante estos periodos.
- En el caso de que aparezcan tormentas o relámpagos en la zona, cuando las pruebas se estén haciendo, se deben suspender las mediciones, abrir las conexiones y aislar de la malla los conductores instalados.

3.2.2 Seguridad en la preparación de las pruebas

- Cuando se manipulen altos voltajes, usar botas y guantes aislantes, protección para los ojos, y cascos.
- Evitar tener contacto sin la debida seguridad entre el equipo y las puntas de prueba.
- Es recomendable que las personas que vayan a trabajar en las mediciones entiendan bien su parte correspondiente en la prueba.

3.3 Análisis matemático para la determinación de la resistividad eléctrica de los suelos en el CTIG

En nuestro estudio para determinar las condiciones eléctricas bajo las cuales ocurre la conducción de corriente en el suelo, se establece un modelo matemático a partir de:

- Una porción de suelo de sección (Δs), longitud (Δr) y resistividad (ρ).
- Una diferencia de potencial (ΔV) en sus extremos, que hace circular una corriente (ΔI).

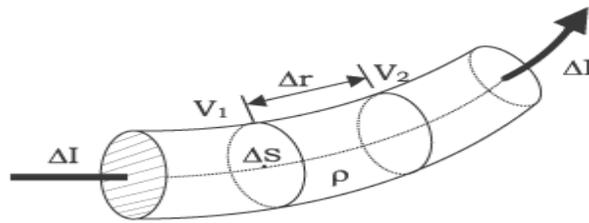


Figura 3-1 Modelo analítico de un suelo conductor de resistividad (ρ) homogénea

Los suelos en el CTIG son muy homogéneos motivo por el cual la aplicabilidad de este análisis es correcto. Entonces la resistencia (R) de un segmento de suelo (Δr) que se toma como conductor, al ser recorrido por una corriente (ΔI) está dada por la resistividad (ρ) del material que lo constituye y la geometría del conductor en la siguiente relación

$$R = \rho \frac{\Delta r}{\Delta s}$$

Por otro lado, según la Ley de Ohm la resistencia (R) para el mismo segmento, también estará dada por:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Igualando ambas expresiones de (R) e intercambiando términos se tiene:

$$\frac{\Delta V}{\Delta r} = \rho \frac{\Delta I}{\Delta s}$$

De esto, se obtiene que la intensidad del campo eléctrico (E) en la dirección (r) del suelo se comporta de la misma forma que en el aire o en el vacío; es decir, es conservativo y por lo tanto inversamente proporcional a la superficie de dispersión (ds) de la corriente (dI).

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

A partir de este análisis se concluye que las siguientes ecuaciones son válidas para su aplicación en cualquier material puesto que existe un campo conservativo.

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad σ como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material.

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad:

$$\rho = \frac{R * s}{l}$$

Donde $l = \Delta r$ es la longitud del segmento de suelo que se está analizando. La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega \cdot m$). La conductividad se define como el inverso de la resistividad.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

La unidad de conductividad en el Sistema Internacional es el siemens (S).

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales. Además, su valor depende de diversos factores como la temperatura, humedad, salinidad y presión.

3.3.1 Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos

En la tabla 3.1 se puede apreciar los valores de resistividad designados para los suelos naturales genéricos, esto nos será de muy valiosa importancia dentro de nuestro estudio.

Tipo de suelo	ρ (Ohm-m)
Limos, arcillas, suelo vegetal y de cultivo	10 - 100
Tierra fina, turbas, concreto húmedo (suelo)	100 - 300
Tierra aluvial, arenas firmes, suelo seco	300 - 800
Arena eólica, lecho de río, cascajo	800 - 3000
Rocas estratificado, fracturadas, monolíticas	3000 - 10000
Suelos de feldespatos, micas, cuarzos	5000 - 30000
Concreto normal exterior (seco)	10000 - 50000

Tabla 3.1 Resistividades referenciales de suelos naturales genéricos Fuente: Justo Yanque M. www.procobreperu.org/publicaciones.htm

3.3.2 Análisis de Humedad en el CTIG

EL CTIG cuenta con un terreno de tipo homogéneo, en algunos lugares designados para efectuar los SPT hay la presencia de humedad este será un factor muy importante a tomar en cuenta en el transcurso de nuestro estudio y de las respectivas mediciones, la humedad es inversamente proporcional a la resistividad. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar con mayor facilidad mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darán lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo. La humedad facilita la disociación de las sales en iones, que transportan la corriente eléctrica a través del terreno. Si hay más humedad, hay más disociación y mayor movilidad de estos elementos dentro del terreno. La resistividad de las rocas puede variar en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución. En la tabla 3.2 se presentan los valores de referencia de la resistividad del agua según su procedencia.

Tipo de agua	ρ (ohm-m)
Meteóricas (lluvia atmósfera limpia)	800 – 1200
Meteóricas (lluvia atmósfera industrial)	30 – 400
Superficiales puras (filtraciones del suelo)	≈ 3000
Superficiales salobres (mar y minerales)	≈ 0.1
De anomalías geotérmicas	0.03 - 0.3
Subterráneas	1 - 20
Estancadas	30 – 150
Filtraciones rocosas	30 – 1000

Tabla3.2 Valores de referencia de la resistividad del agua según su procedencia Fuente: Justo Yanque M.

www.procobreperu.org/publicaciones.htm

3.3.3 Análisis de Temperatura

La resistividad del terreno a medirse en el CTIG también dependerá de la temperatura, pues esta influye notablemente en la resistividad de los fluidos que hay en los poros del suelo y de las rocas. Un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico mal conductor debido a que esta pasa al estado sólido, evitando de esta manera la disociación de las sales y el movimiento de los electrolitos.

La temperatura del terreno es directamente proporcional a la temperatura exterior, pero también depende de la profundidad a la que midamos y del tiempo que permanezcan las bajas temperaturas, puesto que el terreno es un gran almacén de calor y tiene una gran inercia térmica, en nuestra región sierra la temperatura varía debido a nuestras dos estaciones, pero en nuestro medio no hay un punto tal de congelamiento ni un punto de calor excesivo motivo por el cual se tomará una temperatura ambiente de 18°C.

3.3.4 Análisis de Salinidad en el CTIG

A lo largo de los apartados anteriores, se ha visto la gran influencia que tienen las sales sobre el terreno, varían considerablemente la resistividad aparente y llegan incluso a convertir terrenos malos conductores en buenos conductores.

Para mejorar la calidad de nuestros terrenos en análisis, se utilizará un sistema muy eficaz para disminuir la resistividad del terreno, esto es añadir sales o gel y posteriormente regar.

Los aditivos químicos utilizados para el cumplimiento de nuestros objetivos en este proyecto son; la sal industrial que multiplica la conductividad del terreno, combinada en capas con carbón que conserva el nivel de humedad ayudando a descender al agua a niveles más bajos, siendo esto una fórmula clásica. También serán utilizados los productos denominados sales higroscópicas o gel; en nuestro caso se utilizará el gel Benzoelectric,

debido a que las sales higroscópicas, como lo indica su nombre, tienen la cualidad de conservar una mayor cantidad de humedad en el volumen en que están contenidas.

3.4 Medición de la resistividad del terreno en los diferentes puntos designados para la construcción de las puestas a tierra en el CTIG

La medición de la resistividad del terreno es el punto de partida más importante para el diseño sistemas de puesta a tierra. La resistividad será un factor determinante en el valor de resistencia a tierra que pueda tener un electrodo enterrado, puede determinar a qué profundidad debe ser enterrado el mismo para obtener un valor de resistencia bajo. La resistividad puede variar ampliamente en terrenos que tengan las mismas características, su valor cambia con las características de nuestro medio. La misma es determinada grandemente por el contenido de electrolitos, el cual consiste de humedad, minerales y sales disueltas. Un suelo seco tendrá entonces un alto valor de resistividad si no contiene sales solubles. La resistividad es también influenciada por la temperatura, todos estos apartados se explicaron anteriormente y serán claves en nuestras mediciones, posteriormente analizadas.

3.4.1 Criterios que se tomaron en cuenta al medir la resistividad del terreno en el CTIG para la elaboración de los Sistemas de Puesta a Tierra (SPT).

Los siguientes criterios y conceptos fueron tomados muy en cuenta para realizar el análisis y la medición de la resistividad en el CTIG, siendo estos:

- a.* La profundidad de los electrodos no debe sobrepasar los 30 cm.
- b.* Es conveniente que se realicen mediciones en diferentes direcciones para un mismo sondeo, por ejemplo de Norte a Sur y de Este a Oeste, debido a las diferentes características constitutivas de los suelos.

- c. Al elegir la profundidad de exploración no se recomiendan profundidades mayores a los 6 metros puesto que es muy difícil poder llegar con las tomas de tierra hasta esos niveles.
- d. No es conveniente que las mediciones se realicen donde existan tomas de tierra o tuberías, puesto que las mismas provocan que la corriente que se inyecta en el terreno tome otra trayectoria no deseada perturbando así el resultado.
- e. Si se quiere conocer la resistividad existente en una puesta a tierra, es obligatorio realizar la medición en una zona cercana a la misma, con características similares y con la misma conformación geológica, a una separación igual o mayor a tres veces la separación de los electrodos.
- f. Al realizar las mediciones en las diferentes direcciones (Norte-Sur)(Este-Oeste), los valores de resistencia obtenidos para cada separación entre electrodos (a) pueden ser promediados, no pueden ser promediados valores obtenidos con diferentes (a).

3.4.2 Procedimiento utilizado para la medición de la resistividad del terreno en el CTIG, aplicación del método de Wenner basado en la caída de potencial.

Para medir la resistividad por el método de Wenner se siguió la siguiente configuración y el siguiente procedimiento:

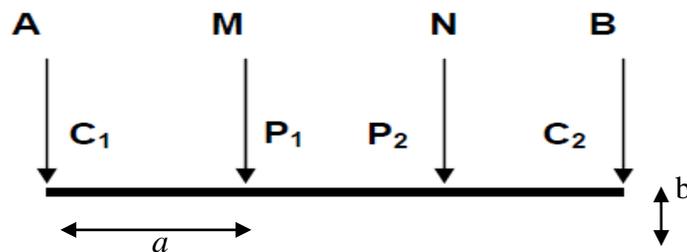


Figura 3-2 Disposición de los electrodos para el Método de Wenner

- Se clavarón cuatro electrodos, separados por una distancia “a” (0,75m) y a una profundidad $b = 15$ cm.
- Por medio de los electrodos extremos se inyectó corriente, mientras que en los electrodos intermedios se midió potencial (en función de la resistencia), utilizando el megger.
- El terreno se dividió mediante dos líneas ortogonales sobre las cuales se hizo pasar el arreglo de electrodos.
- Para asegurar la medición de resistividad del terreno se hizo pasar dos líneas a 45° de las primeras sobre las cuales también se hizo pasar el arreglo de electrodos.

Nuestra medición de resistividad, siguiendo los pasos anteriores, en los puntos designados para los diferentes SPT, se realizará de manera superficial.

Los valores que se obtengan una vez efectuado la medición respectiva de resistencia, serán sustituidos en la expresión (3-1) obteniéndose un valor promedio de resistividad aparente a una profundidad equivalente a la distancia " a " entre los electrodos:

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

(Expresión 3-1)

Donde:

a : Distancia entre electrodos en metros

b : Profundidad del electrodo en metros

R : Valor de resistencia de puesta a tierra obtenido en la medición (Ω)

Si $a > 20b$ la expresión anterior se puede aproximar a:

$$\rho = 2\pi aR$$

(Expresión 3-2)

Con el proceso anterior se van a obtener como resultado los diferentes valores propios de resistividad, que al final nos darán un valor promedio de resistividad total para cada punto, los mismos que se citarán en las diferentes tablas que inician desde la 3-3 hasta la 3-16.

3.4.2.1 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 1 correspondiente al aterrizamiento del Transformador de 100 KVA que alimenta al CTIG

Este punto está situado acorde al respectivo plano en donde se designa el sector elegido para elaborar el sistema de puesta a tierra de funcionamiento del transformador que alimenta al CTIG, se procedió a la medición respectiva, y se obtuvo los siguientes resultados:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)	Dirección noreste- suroeste (Ω)	Dirección noroeste- sureste (Ω)
89	91	92	86
86	89	89	89
88	92	93	92
89	90	90	91
$\rho_m = 88 \Omega * m$	$\rho_m = 91 \Omega * m$	$\rho_m = 91 \Omega * m$	$\rho_m = 90 \Omega * m$

Tabla3.3 Valores de resistividad para el STP1

La resistividad por el método de Wenner, se determina por el promedio de las resistividades:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{88 + 91 + 91 + 90}{4} = 90 \Omega * m$$

Es muy lógico obtener este resultado de resistividad igual a $90 \Omega * m$ debido a que se trata de un suelo tipo arcilloso y de cultivo por ende su valor de resistividad está comprendido entre: $10 - 100 \Omega * m$.

3.4.2.2 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 2 perteneciente al aterrizamiento del tablero de distribución general del CTIG

En este punto se utilizó el mismo procedimiento anterior dándonos como resultado los siguientes datos:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)	Dirección noreste- suroeste (Ω)	Dirección noroeste- sureste (Ω)
91	85	93	92
94	88	89	88
87	92	92	86
89	90	91	91
$\rho_m = 90 \Omega * m$	$\rho_m = 88 \Omega * m$	$\rho_m = 91 \Omega * m$	$\rho_m = 89 \Omega * m$

Tabla3.4 Valores de resistividad para el STP2

La resistividad en este punto es determinada por el promedio de las resistividades:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{90 + 88 + 91 + 89}{4} = 89,5 \Omega * m$$

Se obtiene un resultado de resistividad $\rho = 90 \Omega * m$, en este punto analizado para el SPT2. Hay que tener en cuenta que este valor es igual al de la resistividad del terreno designado para el SPT 1, debido a que se trata del mismo tipo de suelo con las mismas características, su valor es correcto ya que para este tipo de suelo arcilloso y de cultivo el valor se encuentra entre los rangos $10 - 100 \Omega * m$, según la tabla 3.1.

3.4.2.3 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 3 perteneciente al aterrizamiento de los Talleres de Mecánica Industrial y Opciones Prácticas

El SPT 3 en este punto será elaborado para tres talleres de mecánica industrial y uno de opciones prácticas, entonces en primera instancia se procedió a la medición de la resistividad del terreno dándonos los siguientes resultados:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)	Dirección noreste- suroeste (Ω)	Dirección noroeste- sureste (Ω)
95	89	93	92
92	89	88	89
89	91	96	90
93	93	91	94
$\rho_m = 92 \Omega * m$	$\rho_m = 90 \Omega * m$	$\rho_m = 92 \Omega * m$	$\rho_m = 92 \Omega * m$

Tabla3.5 Valores de resistividad para el STP3

La resistividad promedio es:
$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{92 + 90 + 92 + 92}{4} = 91,5 \Omega * m$$

Se obtiene un resultado de resistividad $\rho = 92 \Omega * m$, para el SPT 3, el terreno en este punto es un poco seco de ahí es lógico comprender el aumento de resistividad en el suelo analizado.

3.4.2.4 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 4 perteneciente a los talleres de Electricidad y Electrónica y Refrigeración

El SPT 4 comprende un taller de electricidad del tercero de bachillerato, un taller de electrónica del segundo de bachillerato, y un taller de refrigeración del segundo de bachillerato, para su elaboración en primera instancia se realizará la medición de la resistividad del suelo en este punto designado para el SPT 4.

Mediante la práctica realizada, esta nos da sus resultados en la siguiente tabla:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)	Dirección noreste- suroeste (Ω)	Dirección noroeste- sureste (Ω)
86	88	91	89
87	89	88	87
85	89	87	85
88	91	86	87
$\rho_m = 87 \Omega * m$	$\rho_m = 89 \Omega * m$	$\rho_m = 88 \Omega * m$	$\rho_m = 87 \Omega * m$

Tabla3.6 Valores de resistividad para el STP4

El promedio de las resistividades es:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{87 + 89 + 88 + 87}{4} = 87,75 \Omega * m$$

Se obtiene un resultado de resistividad $\rho = 88 \Omega * m$, la resistencia disminuyó con respecto al análisis en los puntos anteriores, debido a que en este punto el terreno conserva humedad.

3.4.2.5 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 5 perteneciente al aterrizamiento del Coliseo y Producción

El SPT 5 comprende el aterrizamiento tanto del coliseo en construcción (este no se encuentra terminado al 100% solo posee una construcción del 50%), y también comprende el taller para producción, no se tiene suficiente espacio para la medición de la resistividad del suelo en este punto, siendo esto algo incómodo, motivo por el cual se medirá solo en dos direcciones y se realizarán tres mediciones, a continuación se presentan los datos obtenidos en la siguiente tabla:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
92	92
93	90
91	92
$\rho m = 92 \Omega * m$	$\rho m = 91 \Omega * m$

Tabla3.7 Valores de resistividad para el STP5

El promedio de las resistividades es:

$$\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{92 + 91}{2} = 91,5 \Omega * m$$

Se obtiene un resultado de resistividad $\rho = 92 \Omega * m$, debido a que este suelo es algo seco el valor encontrado de resistividad se incrementó con respecto a los puntos anteriores analizados.

3.4.2.6 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 6 perteneciente al aterrizamiento del pabellón de aulas de los tres segundos, los tres terceros de educación básica e inspección

El SPT 6 está comprendido para el aterrizamiento de la planta baja y la primera planta alta de los pabellones de aulas de los tres segundos y los tres terceros años de educación básica, más la oficina de inspección.

Con la práctica realizada para la determinación de la resistividad del suelo, esta nos da los siguientes resultados:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)	Dirección noreste- suroeste (Ω)	Dirección noroeste- sureste (Ω)
86	85	90	88
89	86	89	86
86	89	87	84
88	89	86	87
$\rho_m = 87 \Omega * m$	$\rho_m = 87 \Omega * m$	$\rho_m = 88 \Omega * m$	$\rho_m = 86 \Omega * m$

Tabla3.8 Valores de resistividad para el STP6

El promedio de las resistividades es:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{87 + 87 + 88 + 86}{4} = 87 \Omega * m$$

La resistividad del suelo obtenida es $\rho = 88 \Omega * m$, con respecto al análisis en los puntos anteriores aquí la resistividad del suelo es más baja debido a que se trata de una tierra de cultivo que conserva su humedad.

3.4.2.7 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 7 perteneciente al aterrizamiento de los Laboratorios de Computación

El SPT 7 está designado para el aterrizamiento de los dos laboratorios de computación el terreno analizarse para efectuar este aterrizamiento está comprendido en gran espacio verde, su suelo está constituido por terreno de cultivo arcilloso (tierra negra) se espera un valor bajo de resistividad, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)	Dirección noreste- suroeste (Ω)	Dirección noroeste- sureste (Ω)
85	85	87	87
86	86	87	85
87	86	86	88
86	88	85	86
$\rho_m = 86 \Omega * m$	$\rho_m = 86 \Omega * m$	$\rho_m = 86 \Omega * m$	$\rho_m = 87 \Omega * m$

Tabla3.9 Valores de resistividad para el STP7

El promedio de las resistividades será:

$$\rho = \frac{\rho_{m1} + \rho_{m2} + \rho_{m3} + \rho_{m4}}{4} = \frac{86 + 86 + 86 + 87}{4} = 86,25 \Omega * m$$

En este punto el análisis nos va un valor de resistividad $\rho = 86 \Omega * m$, con respecto al análisis en los puntos anteriores es notoria la baja resistividad, esto es debido al tipo de suelo y a la humedad que este posee.

3.4.2.8 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 8 que correspondiente al aterrizamiento de audiovisuales, biblioteca, aulas de los octavos años de básica

El SPT 8 está designado para el aterrizamiento de la sala de audiovisuales, biblioteca y las aulas de los octavos años de educación básica, para efectuar este aterrizamiento hay que mencionar que el sitio está comprendido en un gran espacio verde correspondiente a la extensión del terreno analizado para el SPT7, debido a poseer las mismas características se espera tener la misma resistividad por ende se efectuarán las mediciones únicamente en dos sentidos: norte – sur y este – oeste

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
86	85
85	87
$\rho m = 86 \Omega * m$	$\rho m = 86 \Omega * m$

Tabla3.10 Valores de resistividad para el STP8

El promedio de las resistividades es: $\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{86 + 86}{2} = 86 \Omega * m$

Tenemos como valor promedio de resistividad $\rho = 86 \Omega * m$, este valor es igual al del SPT 7 debido a que es una extensión del su terreno ya analizado, a una distancia considerable, con las mismas características y propiedades geológicas.

3.4.2.9 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 9 correspondiente al aterrizamiento de los talleres de electricidad y aulas.

El SPT 9 está comprendido para el aterrizamiento de los talleres de electricidad del ciclo básico, del segundo de bachillerato y aulas correspondientes. El terreno tiene las mismas características geológicas de lo analizado para el SPT 1 siendo este tipo arcilloso de cultivo, por tal motivo se efectuarán dos mediciones en dos sentidos. Entonces con la percepción que se tiene se espera hallar una resistividad similar a la encontrada en el punto 3.4.2.1, los valores se muestran en la siguiente tabla:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
91	90
89	88
$\rho m = 90 \Omega * m$	$\rho m = 89 \Omega * m$

Tabla3.11 Valores de resistividad para el STP9

El promedio de las resistividades será:

$$\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{90 + 89}{2} = 89,5 \Omega * m$$

Como se esperaba la resistividad del suelo obtenida es $\rho = 90 \Omega * m$, con este análisis se puede expresar que en los terrenos de similares características geológicas (homogéneos) la resistividad es igual, siempre y cuando los factores externos sean iguales.

De aquí en adelante para el resto de mediciones de resistividad, debido a las similares características geológicas que posee el terreno de todo el CTIG se medirán únicamente en dos sentidos, según la IEEE al encontrarse con un valor incoherente este será nulado y se tomará una nueva medición que sea coherente.

3.4.2.10 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 10 correspondiente al aterrizamiento de los departamentos médico, dental, DOBE, laboratorio de electrónica, bodega y aulas.

El SPT 10 comprende los departamentos médico, dental, DOBE, aulas correspondientes a los primeros de bachillerato y la bodega 1, se inicia el análisis manifestando que el terreno en donde se efectuará las mediciones es tipo tierra de cultivo arcilloso y tiene humedad, los valores de resistividad medidos se ilustran en la siguiente tabla:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
87	89
87	86
$\rho m = 87 \Omega * m$	$\rho m = 88 \Omega * m$

Tabla3.12 Valores de resistividad para el STP10

$$\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{87 + 88}{2} = 87,5 \Omega * m \quad \text{El valor de resistividad es } \rho = 88 \Omega * m$$

3.4.2.11 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 11 perteneciente al aterrizamiento del taller de electricidad, laboratorio de física, bodega 2, aula.

El taller de electricidad para opciones prácticas, laboratorio de física, bodega 2 y una aula, como se puede observar en el plano pertinente, corresponden al SPT 11.

En este punto el terreno es de características similares y posee la misma constitución geológica que para el SPT 10.

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
87	87
86	88
$\rho m = 87 \Omega * m$	$\rho m = 88 \Omega * m$

Tabla3.13 Valores de resistividad para el STP11

$$\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{87 + 88}{2} = 87,5 \Omega * m \quad \text{El valor de resistividad es } \rho = 88 \Omega * m$$

3.4.2.12 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 12 correspondiente al aterrizamiento de los talleres de Mecánica Automotriz y Mecatrónica

El SPT 12, está conformado por los talleres de mecánica automotriz y mecatrónica, el terreno en donde se realizó la medición, es de tipo cultivo una pequeña capa de cascajo. Los valores de resistividad medidos se presentan en la tabla 3-14:

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
91	88
89	92
$\rho m = 90 \Omega * m$	$\rho m = 90 \Omega * m$

Tabla3.14 Valores de resistividad para el STP12

El valor promedio será: $\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{90 + 90}{2} = 90 \Omega * m$

El valor de resistividad encontrada en este punto es $\rho = 90 \Omega * m$

3.4.2.13 Medición de la resistividad del terreno designado para el SPT 13 correspondiente al aterrizamiento de los talleres de refrigeración y un taller de mecánica automotriz

Dos talleres de refrigeración y un taller de mecánica automotriz para opciones prácticas conforman el SPT 13, el terreno en este punto tiene las mismas características del punto 3.4.2.4 debido a que el terreno conserva humedad.

Dirección norte-sur (Ω)	Dirección este-oeste (Ω)
89	87
88	87
$\rho m = 89 \Omega * m$	$\rho m = 87 \Omega * m$

Tabla3.15 Valores de resistividad para el STP13

El valor promedio será:

$$\rho = \frac{\rho m1 + \rho m2}{2} = \frac{89 + 87}{2} = 88 \Omega * m$$

En este punto es el valor de resistividad es $\rho = 88 \Omega * m$

3.4.3 Resumen de Valores de Resistividad del terreno obtenidos en cada uno de los SPT proyectados en el CTIG

A continuación en la tabla 3-16 se muestra el resumen de los valores de resistividad totales, encontrados mediante el promedio de los valores medidos en cada punto designado para los sistemas de puesta a tierra (SPT):

Sistemas de Puesta a Tierra	Resistividad del terreno ρ ($\Omega * m$)
STP1	90
STP2	90
STP3	92
STP4	88
STP5	92
STP6	87
STP7	86
STP8	86
STP9	90
STP10	88
STP11	88
STP12	90
STP13	88

Tabla3.16 Resumen de los valores de resistividad obtenidos para los sistemas de puesta a tierra proyectados

3.5 Diseño de los Sistemas de Puesta a Tierra a construirse en el CTIG

Con los datos de la tabla 3-16 es lógico mencionar que estos valores de resistividad deben ser disminuidos hasta entrar en los rangos permitidos para los diferentes tipos de aterrizamiento. Motivo por el cual en algunas zonas que comprenden un SPT dependiendo de sus características, ubicación y espacio correspondiente, los SPT serán desarrollados para satisfacer sus necesidades.

3.5.1 Valores mínimos de resistencia de puesta a tierra

Aplicación	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra
Estructuras de líneas de transmisión	20Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión	1 Ω
Subestaciones de media Tensión	15 Ω
Protección contra rayos	10 Ω
Neutro de acometida en baja tensión	25 Ω
Laboratorios y Cómputo	15 Ω

Tabla 3-17 Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra. Fuente: ANSI/IEEE 80

3.5.2 Cálculo y diseño de mallas para los SPT1, SPT3, SPT7.

Actualmente el transformador cuenta con un sistema de puesta a tierra, el cual no cumple con las características establecidas por la norma IEEE, motivo por el cual se elaborará una malla de puesta a tierra debido a que se trata de la subestación que alimenta al CTIG, en la tabla 3-17 se observa que para subestaciones de media tensión es necesario tener menos de 15 Ω, motivo por el cual la IEEE recomienda la elaboración de mallas para poder tener una

baja resistividad. A continuación se indica el procedimiento que se siguió para el cálculo las mallas teniendo en cuenta que el valor la resistividad del terreno se midió en estado natural es decir sin un tratamiento para disminuir su resistividad, posteriormente se tratará químicamente el terreno para disminuir la resistividad que será fundamental para determinar la resistencia de puesta a tierra final.

Como metodología de cálculo de la malla para suelos uniformes se utilizará la propuesta por la IEEE Std-80 2000:

a) Determinación de la corriente de corto circuito de falla a tierra:

Para la determinación de las corrientes de corto circuito, se utilizo como potencia de cortocircuito 40 MVA, trifásico, en cada una de las acometidas de la subestación.

$$I_{cc} = \frac{MVA}{\sqrt{3} \times KV}$$

Donde:

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en Amp.

MVA = Potencia de cortocircuito trifásica en MVA (40MVA para un transformador de 100KVA)

KV = Tensión de suministro en KV.

Para nuestras condiciones tenemos:

$$I_{cc} = \frac{40MVA}{\sqrt{3} * 22KV} = 1050A$$

b) Ajuste de la corriente de falla.

Cualquier ampliación que sufra este sistema posterior a lo considerado, será en forma de transformadores independientes, por lo que este factor es igual a uno ($A = 1$).

Por tiempo de duración de la falla.

Se considera que al ocurrir una falla a tierra, los interruptores operan eliminando la falla del sistema, lógicamente tendremos un tiempo de duración de la falla menor a 0.1 segundos que equivale a 6 ciclos, por esta razón aplicaremos un factor de 1.25 ($D = 1.25$) según la tabla 3-18:

Duración de la Falla (ciclos)	Factor de Decremento (D)
0.5	1.65
6	1.25
15	1.10
30 ó más	1.10

Tabla 3-18 Fuente IEEE Std.80

Entonces la corriente de falla quedará:

$$I_{cc} = I_{cc} * A * D$$

Donde:

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en A.

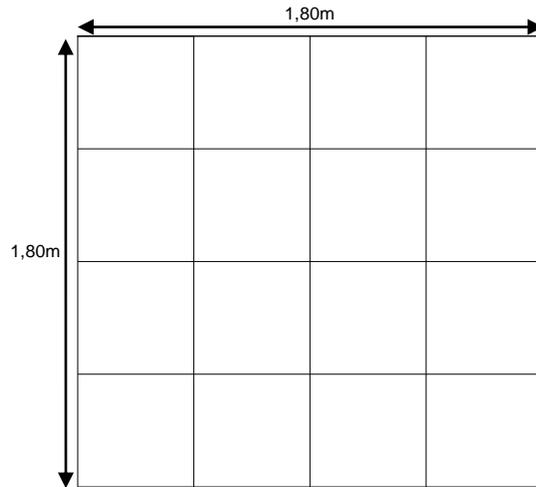
A = Factor de seguridad

D = Factor de decremento.

Para nuestras condiciones tenemos:

$$I_{cc} = 1050 * 1,0 * 1,25 = 1312,5A$$

c) Diseño de malla propuesto



Cable de cobre desnudo recomendado por la IEEE Cal. 2/0 AWG, para construir mallas

Electrodo de tierra 10 mm de diámetro

L = Longitud de conductor a utilizarse (L) = 25,2 m

Profundidad de enterramiento = 1,80 m

Área (A) = ancho x largo = 4 m²

Número de conductores transversales (N) = 6

Radio Equivalente (r)

$$r = \sqrt{\frac{Ar}{\pi}}$$

Donde:

r = Radio equivalente en m.

Ar = Área total encerrada por la malla propuesta (3,24 m²)

Con nuestros datos proyectados tenemos:

$$r = \sqrt{\frac{4}{\pi}} = 1,128m$$

$$r = 1,128m$$

Resistencia esperada en la malla:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

Donde:

R = Resistencia de la malla esperada en Ω .

r = Radio equivalente en m.

ρ = Resistividad del terreno $\Omega * m$

L = Longitud del conductor en m.

En nuestro caso tenemos:

$$R = \frac{90\Omega * m}{4(1,128m)} + \frac{90\Omega * m}{25,2m} = 23,5\Omega$$

$$R = 23,5\Omega$$

d) Cálculo de la Sección del Conductor:

De la tabla de Onderdonk, considerando que para la construcción de las mallas se utilizarán conexiones soldables (autógena) y una falla con duración menor a los 0.1 segundos, tenemos que el calibre mínimo recomendado para evitar la fusión del cable se determina con la constante 6.5 C.M./Amp, por lo que la sección mínima del conductor será:

$$S = I_{CC} \times K_{ON}$$

Donde:

S = Sección del conductor en mm^2 .

KON = Constante de Onderdonk.

Entonces tendremos:

$$S = 1312,5 * 6,5$$

$$S = 8,531MCM$$

Equivale a un cable de sección = 4,333 mm² perteneciente a un cable #10AWG

Debido a la exigencia de la norma IEEE el cable mínimo a colocarse será el de cobre desnudo # 2AWG, este cable será utilizado a su vez para la construcción de las mallas SPT3 y SPT7.

Partiendo de la formula:

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

Se justifica también el uso del conductor #2AWG debido a que al aumentar la sección disminuye la resistencia, lo cual es muy importante para poder despejar de una manera más eficiente la corriente de falla.

Cálculo de la longitud necesaria de conductor:

La longitud se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$L = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{cc} \times \sqrt{t}}{116 + 0.17 \times \rho_s}$$

Donde:

L = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

km = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

K_i = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

r = Resistividad del terreno.

t = Duración máxima de la falla.

r_s = Resistividad en la superficie del terreno.

Cálculo de k_m .

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{D^2}{16hd} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3 \times 5 \times 7 \times \dots \times (2n-3)}{4 \times 6 \times 8 \times \dots \times (2n-2)} \right)$$

Donde:

K_m = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

d = Diámetro de los conductores.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

Para nuestras condiciones tenemos:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{(0,45m)^2}{16 * 1,80m * 0,008m} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3 * 5 * 7}{4 * 6 * 8} \right) = 0,024$$

Cálculo de K_i :

$$k_i = 0.65 + 0.172n$$

Donde:

K_i = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

n = Número de conductores transversales paralelos.

Para nuestras condiciones tenemos:

$$Ki = 0,65 + 0,172(3) = 1,166$$

La longitud mínima de cable enterrado debe ser:

$$L = \frac{0,024 * 1,166 * 90 * 1312,5 * \sqrt{0,1}}{116 + 0,17 * 90} = 25,17m \text{ (Se justifica la longitud del cable planteada)}$$

e) Cálculo del potencial tolerable.

Máximo aumento de potencial E en la red.

$$E = I_{cc} \times R$$

Donde:

E = Potencial máximo de la malla.

I_{cc} = Corriente de corto circuito trifásica en A.

R = Resistencia de la malla esperada en Ohms.

Para nuestro cálculo tenemos:

$$E = 1312,5 * 23,5 = 30843,75V$$

Potencial soportable por el cuerpo humano Voltaje de paso

$$E_{PT} = \frac{116 + 0,7\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

EPT = Voltaje de paso tolerable para el cuerpo humano

t = Duración máxima de la falla.

ρ_s = Resistividad en la superficie del terreno

$$EPT = \frac{116 + 0,7 * 90}{\sqrt{0,1}} = 566,047V$$

Potencial soportable por el cuerpo humano Voltaje de contacto

$$E_{cr} = \frac{116 + 0,17\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Donde:

ECT = Voltaje de contacto tolerable para el cuerpo humano.

t = Duración máxima de la falla.

ρ_s = Resistividad en la superficie del terreno.

De las condiciones del problema tenemos:

$$ECT = \frac{116 + 0,17(90)}{\sqrt{0,1}} = 415,207V$$

f) Cálculo del potencial de contacto o de malla.

Emplearemos la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{k_m \times k_i \times \rho \times I_{cc}}{L_T}$$

Donde:

VC = Voltaje de contacto o de malla.

LT = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

km = Factor que depende del dimensionamiento de la malla.

Ki = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

ρ = Resistividad del terreno.

Icc = Corriente de corto circuito trifásica en A.

$$V_c = \frac{0,024 * 1,166 * 90 * 1312,5}{25,2} = 131,175V$$

g) Cálculo del potencial de paso:

$$V_p = \frac{k_s \times k_i \times \rho \times I_{cc}}{L_T}$$

Donde:

VP = Voltaje de paso o de malla:

LT = Longitud de conductor enterizado para mantener el voltaje de malla dentro de los límites de seguridad.

ks = Factor de dimensionamiento.

ki = Factor de corrección por irregularidad del flujo de corriente a tierra.

r = Resistividad del terreno.

Icc = Corriente de corto circuito trifásica en A.

Cálculo de Ks :

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{2D} + \dots + \frac{1}{(n-1)D} \right]$$

Donde:

ks = Factor que.

D = Espaciamiento entre conductores en la malla.

h = Profundidad de enterramiento del conductor.

n = Número de conductores transversales paralelos.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(1,80)} + \frac{1}{0,45 + 1,80} + \frac{1}{2(0,45)} \right] = 0,583$$

$$V_p = \frac{0,583 * 1,166 * 90 * 1312,5}{25,2} = 3186,45V$$

Número mínimo de varillas requerido:

$$N_v = 0.60 \times \sqrt{A_r}$$

Donde:

A_r = Área total encerrada por el la malla propuesta m²

N_v = Número mínimo de varillas

$$N_v = 0,60 * \sqrt{4} = 1,2$$

$N_v = 1$ *(Se necesita una varilla de Cu, para hacerse de electrodo principal, el mismo que se conectará con la malla construida con el conductor de cobre #2AWG.*

3.5.2.1 Resultados obtenidos, luego del cálculo para el dimensionamiento de mallas a tierra, utilizados para el aterrizamiento de los SPT1, SPT3, SPT7, con el terreno en estado natural.

Debido a las condiciones de resistividad del terreno por su homogeneidad y a los buenos resultados obtenidos del cálculo anterior, las tres mallas a construirse tanto para el SPT1, SPT3 y SPT7, tendrán las mismas dimensiones y características para su elaboración por ende se seguirá el mismo cálculo recomendado por la IEEE Std-80 2000. El motivo por el cual se construyen estas tres mallas es debido que en estos puntos se requieren valores de Resistencia de Puesta a Tierra bajos.

3.5.2.2 Análisis para el mantenimiento del SPT2

Actualmente existe un SPT2 para la protección del tablero general de distribución de la subestación del CTIG, el terreno en donde se encuentra construido este sistema tiene una resistividad de $90\Omega * m$, obtenido de las mediciones del punto 3.4.2.2. Aquí al medir la

resistencia de puesta a tierra esta tiene un valor de 25Ω , que es muy aceptable, ahora para cumplir con los valores de referencia para resistencia de puesta a tierra en subestaciones (15Ω , ver tabla 3-17 fuente: ANSI/IEEE 80) se procederá a darle un tratamiento químico y adición de gel al terreno con esto se consigue reducciones en la resistencia de puesta a tierra que van de 40% al 85% del valor original sin tratamiento, con esto se disminuirá aún más su resistencia de puesta a tierra y por ende cumplir los rangos establecidos, este valor será medido, anotándose más adelante a lo largo de este estudio en donde se esperan excelentes resultados.

3.5.3 Cálculo y diseño del electrodo de puesta a tierra para los SPT en el CTIG

El electrodo a elegirse para construir los sistemas de puesta a tierra debe tener propiedades mecánicas y eléctricas tales que sean apropiadas para responder de manera satisfactoria las solicitaciones que los afectan, el material a utilizarse en este diseño será básicamente las varillas de Copperweld de 1,8 metros de longitud, 5 milímetros de radio. Este arreglo será utilizado para los SPT que comprendan la protección de talleres, bodegas, oficinas, consultorios y aulas.

Para determinar la resistencia de puesta a tierra de una barra vertical de radio a (m) y longitud l (m), enterrada desde la superficie en un terreno de determinada resistividad equivalente (ρ_e), se utilizará la siguiente fórmula para los cálculos en los diferentes SPT:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{4l}{a}\right) - 1 \right] \quad (\Omega)$$

3.5.3.1 Tabla de resultados obtenidos, luego del cálculo de resistencia a tierra de los diferentes electrodos, utilizados para el aterrizamiento de los SPT4, SPT5, SPT6, SPT8, SPT9, SPT10, SPT11, SPT12, SPT13, con el terreno en estado natural.

Sistema	Resistividad del terreno $\rho_e (\Omega)$	Longitud de la varilla $l (m)$	Radio de la varilla $a (m)$	Resistencia de puesta a tierra R (Ω)
SPT4	88	1,80	0,005	56,58
SPT5	92	1,80	0,005	59,15
SPT6	87	1,80	0,005	55,93
SPT8	86	1,80	0,005	55,29
SPT9	90	1,80	0,005	57,86
SPT10	88	1,80	0,005	56,58
SPT11	88	1,80	0,005	56,58
SPT12	90	1,80	0,005	57,86
SPT13	88	1,80	0,005	56,58

Tabla 3-18 Valores de resistencia de puesta a tierra calculados para los diferentes SPT

3.6 Mejoramiento del terreno para disminuir la resistencia de puesta a tierra en los diferentes SPT

Los cálculos establecidos en los puntos 3.5.2 y 3.5.3 han sido efectuados con un valor de resistividad del terreno en estado natural, entendiéndose que este no posee ningún tratamiento químico, el objetivo en este punto es disminuir la resistividad de los SPT, mediante la adición de sales, carbón y gel, posteriormente se determinará la efectividad de estos procesos cuando se mida la resistencia de puesta a tierra en cada punto designado.

Se conoce que con el tratamiento químico del terreno se consigue reducciones en la resistencia de puesta a tierra de electrodos que van del 40% al 85% del valor original sin tratamiento, luego de elaborar los respectivos cálculos y el diseño ahora se procederá a la construcción de los diferentes SPT en el CTIG.

3.6.1 Tratamiento químico del suelo mediante la adición de Gel

El tratamiento químico del suelo surge como un medio para mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del SPT sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos.



Foto 3-1 Gel Benzolectric utilizado en el CTIG para elaborar los SPT

El Gel Benzolectric (Foto 3-1) utilizado para la construcción de los diferentes SPT en el CTIG, cumple los siguientes factores:

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

El gel aplicado al terreno, en el desarrollo de este proyecto posee las siguientes características:

- Higroscopicidad - Alta capacidad de Gelificación
- No es corrosivo - Alta conductividad eléctrica

- Químicamente estable en el suelo
- No es tóxico - Inofensivo para la naturaleza

El tratamiento consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel mejoran la conductividad de la tierra y retiene la humedad en el pozo por un periodo prolongado de manera que se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima. La cantidad de dosis por metro cúbico de tierra del SPT, varía de 1 a 3*, y está en función a la resistividad natural del terreno. En la tabla 3-19 se presentan algunos valores de dosificación en función de la resistividad del terreno.

Resistividad ($\Omega * m$)	Dosificación
de 50 a 200	1 dosis x m ³
de 200 a 400	2 dosis x m ³
de 400 a mas	3 dosis x m ³

Tabla 3-19 Dosificación en función de la resistividad. Fuente: Gel Benzoelectric

A continuación en la tabla 1-20 se presentan los resultados de reducción de la resistencia de al aplicar el Gel Benzoelectric, los valores vienen especificados en el manual de la marca utilizada, dirigido al usuario, los resultados detallados en la tabla, han sido obtenidos con la aplicación de una sola dosis de 5 Kilos.

Resistencia Inicial (Ω)	% de Reducción	Resistencia Final (Ω)
300	85	45
100	70	30
50	60	20
20	50	10
10	40	6

Tabla 3-20 Resultados de disminución de resistividad al aplicar una sola dosis de 5Kilosde gel. Fuente: Gel Benzoelectric

Al final de la construcción de los SPT se procederá a medir la resistencia de puesta a tierra, en donde será notable el decremento resistivo, así estaremos bajo los rangos de resistencia establecidos en el punto 3.5.1.

3.7 Materiales requeridos para la elaboración de los diferentes SPT en el CTIG

En la tabla 3-21 se citan los materiales a utilizarse en la construcción de los diferentes SPT en el CTIG

Item	Cantidad	Descripción
1	30	Varillas de Cu. 1,80x5/8
2	80 m	Cable de Cu desnudo #2/0
3	200 m	Cable de Cu THHN #8 (7hilos)
4	100 m	Cable de Cu THHN #10 (7hilos)
5	150 m	Manguera plástica de 1/2"
6	100 m	Manguera plástica de 3/4"
7	100	Abrazaderas EMT 1/2"
8	50	Abrazaderas EMT 3/4"
9	200	Tacos fisher
10	200	Tornillos de cabeza exagonal
11	5 (sacos de 12 Kg)	Gel para tierra (Benzoelectric)

Tabla 3-21 Listado de materiales a utilizarse para la construcción de los SPT

3.8 Construcción del SPT1

Para poder apreciar la ubicación de los diferentes SPT a construirse, se presentan los respectivos planos (Anexo #1 ver planos 1/4, 2/4). El SPT1 comprende la protección del Transformador de 100KVA que alimenta al CTIG, debido a que se trata de una subestación el valor máximo que debe tener su puesta a tierra es de 15Ω , motivo por el cual se conoce que para obtener valores bajos de Resistencia de Puesta a Tierra (RPT) se debe elaborar una malla. La resistividad del suelo es el punto de partida en la elaboración de la malla, el mismo se analizó en el punto 3.4.2.1, para construir este sistema de puesta a tierra se siguió

el cálculo y el diseño de malla del punto 3.5.2 que serán los puntos de partida para el dimensionamiento práctico, se espera mediante este diseño una RPT de $23,5 \Omega$, pero con la adición de gel al tratar químicamente al terreno, se espera una resistividad por debajo de los 15Ω lo cual justifica este estudio.

- a) En primera instancia y con lo mencionado anteriormente se procede a efectuar el pozo que tiene las siguientes dimensiones: 2m de largo, 2m de ancho y 1,8m de profundidad. En las fotos 3-2 (a,b) se aprecia su elaboración



Foto 3-2 (a) Proceso de excavación del pozo para el SPT1



Foto 3-2 (b) Pozo para el SPT1

- b) Ahora con el diseño y los cálculos obtenidos se procede a construir la malla correspondiente, las varillas utilizadas son de Cu. 1,80x5/8, los conductores transversales paralelos son elaborados con cable desnudo de Cu #2/0, se utilizará soldadura autógena para efectuar las uniones y estas a su vez serán recubiertas con una capa de electrodo autofundente al 10% de Ag. En las fotos 3-3 (a,b,c) se ilustra este procedimiento:

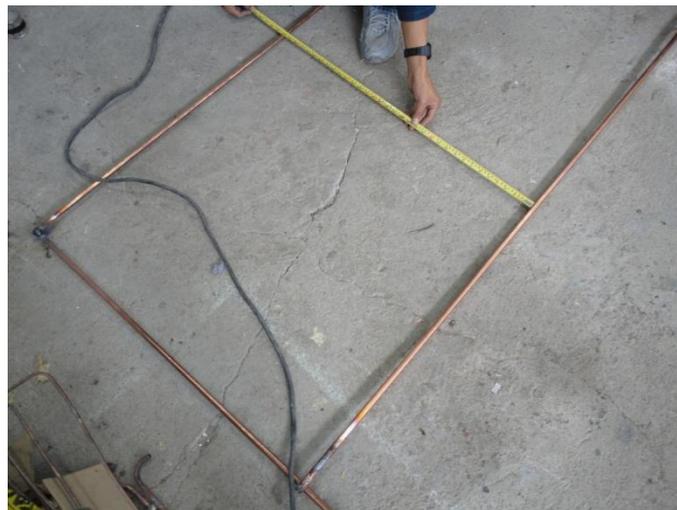


Foto 3-3 (a) Inicio de la construcción de la malla para el SPT1



Foto 3-3 (b) Realización de las uniones de la malla mediante soldadura autógena



Foto 3-3 (c) Recubrimiento a los puntos de suelda con autofundente al 10% de Ag

- c) En este punto se le da el tratamiento químico al terreno que corresponde al pozo del SPT1, entonces se forma una primera capa con una primera dosis de gel, esto se puede apreciar en la fotos 3-4 (a,b)



Foto 3-4 (a) Preparación del Gel Benzoelectric



Foto 3-4 (b) Adición del gel al terreno

- d) Aquí en este punto se coloca la malla en el pozo que ha sido tratado químicamente, en las fotos 3-5 (a,b) se puede observar cómo se colocó la malla que posee un electrodo de conexión vertical, rodeado de una espiral de 15cm de diámetro esto con el objetivo de disminuir aún más la RPT debido a que se incrementa el diámetro del electrodo y su interacción, esta disposición de espiral o muelle se detalló en el Capítulo 1.



Foto 3-5 (a) Ubicación de la malla en el pozo



Foto 3-5 (b) Enterrado de la malla con tierra de cultivo tamizada

- e) En este punto se muestra mediante la foto 3-6 la adición de una segunda dosis de gel al SPT1, formando una segunda capa, la misma que se distribuye en el terreno de forma uniforme, luego se le aplica agua en gran cantidad. Una dosis de sal en grano se colocará al pozo como última capa de relleno.



Foto 3-6 Adición de una segunda dosis de gel

- f) Ahora se puede apreciar mediante las Foto 3-7 el resultado final del SPT1, aquí se conecta la línea de tierra proveniente del transformador de 100KVA



3-7 Resultado final del SPT1

3.9 Mantenimiento del SPT 2

El SPT2 está designado para la protección del tablero general de las barras de distribución (ver plano 1/4), en este punto existe una malla elaborada para la protección, al efectuar la medición de la RPT de este SPT2, esta sobrepasa el límite establecido en la tabla 3-17, motivo por el cual el trabajo en este punto, será darle el tratamiento químico correspondiente y adecuado al terreno. El procedimiento se ilustra a continuación:

- a) En primera instancia siguiendo la línea del neutro que va desde el tablero de distribución hasta el pozo se reconoce el área que cubre la malla, posteriormente se realiza la excavación para adicionar la dosis de gel, y adicionar agua esto se puede observar en las fotos 3-8 (a,b).



Foto 3-8 (a) SPT2 a tratarse químicamente



3-8 (b) Adición de la dosis de gel al terreno del SPT2

b) Ahora se comienza a rellenar el pozo, con tierra de cultivo tamizada, posteriormente se le da una segunda dosis de gel, y la última capa superficial tiene una adición de sal en grano como relleno. En las fotos 3-9 (a,b) se muestran los resultados obtenidos.



Foto 3-9 (a) Adición de una segunda dosis de gel al SPT2



Foto 3-9 (b) Resultado final del mantenimiento al SPT2

3.10 Construcción del SPT 3

Este sistema de puesta a tierra está designado para la protección de los equipos electrónicos sensibles de los talleres de mecánica (ver plano 1/4). Debido a que se necesita un valor relativamente bajo de RPT se elaboró una malla para satisfacer estas necesidades. El procedimiento se muestra a continuación:

- a) Se inicia con la excavación del pozo correspondiente como se puede observar en las fotos 3-10 (a,b).



Foto 3-10 (a) Excavación para el SPT3

Foto 3-10 (b) Pozo terminado para el SPT3

- b) Se elabora la malla correspondiente según el cálculo y el diseño del punto 3.5.2, utilizando los mismos materiales y elementos de soldadura que para el SPT1, se lo ha efectuado de esta manera debido a los buenos resultados obtenidos, esto se muestra en las fotos 3-11 (a,b)



Foto 3-11 (a) Construcción de la malla para el SPT3



Foto 3-11 (b) Malla del SPT3 terminada

- c) En esta instancia se le da el tratamiento químico al terreno con una primera dosis de gel, y se procede al montaje de la malla, esto se observa mediante las fotos 3-12 (a,b)



Foto 3-12 Adición de la dosis de gel correspondiente al SPT3



Foto 3-12 (b) Montaje de la malla del SPT3

- d) Una vez realizados los pasos anteriores se procede a enterrar la malla utilizando tierra de cultivo tamizada, se le da una segunda dosis de gel, en la última capa superficial se le agrega una pequeña dosis de sal en grano y se obtiene el resultado final esto se aprecia en las fotos 3-13 (a,b)



Foto 3-13 (a) Adición de una segunda dosis de gel al SPT3



Foto 3-13 (b) SPT3 finalizado

3.11 Construcción del SPT7

El SPT7 está destinado a la protección de los laboratorios de computación del CTIG, motivo por el cual se necesita tener una baja RPT en este punto, la misma que deberá estar acorde con los establecido en la tabla 3-17, para lo cual es necesario la construcción de una nueva malla, la misma que se elabora tomando como referencia, los materiales, el mismo cálculo y el diseño aplicado en los SPT1 y SPT3

- a) Se inicia entonces con la excavación del pozo designado para el SPT7 (ver la ubicación en el plano 2/4), el mismo que se puede observar en las foto 3-14



Foto 3-14 Pozo para el SPT7

- b) Luego del procedimiento anterior ahora se elabora la malla correspondiente como se muestra en las siguientes fotos 3-15 (a,b)



Foto 3-15(a) Inicio de construcción de la malla del SPT7



Foto 3-15 (b) Malla para el SPT3

- c) En este punto al terreno del pozo del SPT7 se le da una dosis de gel, formando una primera capa, luego se procede al montaje de la malla para posteriormente enterrarla, y darle una segunda dosis de gel, esto se puede ver en las siguientes fotos 3-16 (a,b,c,d)



Foto 3-16 (a) Aplicación de la primera dosis de gel al pozo



Foto 3-16 (b) Ubicación de la malla del SPT7



Foto 3-16 Malla ubicada en el pozo



Foto 3-16 Proceso de rellenado del pozo

- d) En la siguiente foto 3-17 se muestra el SPT7 terminado, el mismo que en su última capa superficial posee una cantidad pequeña de sal en grano, la línea de tierra de los laboratorios de computación se conectan a este sistema. Es importante mencionar que tanto para los SPT1, SPT3, SPT7, el cable de tierra conectado a los diferentes SPT es el THHN #8 (7hilos), ajustado por el respectivo conector, este cable va adentro de la manguera anillada, y todo esto enterrado debidamente a una profundidad de 15cm.



Foto 3-17 SPT7 terminado

3.12 Construcción de los SPT4, SPT5, SPT6, SPT8, SPT9, SPT10, SPT11, SPT12, SPT13, mediante la utilización de electrodo vertical

Estos nueve sistemas (ver planos 1/4, y 2/4) constituyen las protecciones del neutro de las acometidas en baja tensión, de los diferentes pabellones de aulas, oficinas, talleres, entonces según la tabla 3-17 (*Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.*

Fuente: ANSI/IEEE 80), el valor de la RPT en estos sistemas debe estar por debajo de los 25Ω , lo cual se puede conseguir con la utilización, de una barra o electrodo vertical de Cu de 1,80m x 5/8, dispuesto de manera vertical en cada sistema, al mismo que se le adicionará una dosis de gel, para disminuir aún más su resistencia, algunos tableros se interconectan al mismo SPT, por proximidad y en función de sus cargas.

El procedimiento para elaborar estos sistemas es el siguiente:

- En el lugar designado se efectúa una excavación en forma de un pequeño pozo que tenga por dimensiones: 30cm de profundidad y 20cm de diámetro, removiendo la tierra, en este espacio se colocará una dosis de gel para mejorar la calidad del terreno, posteriormente se coloca el electrodo verticalmente y se lo clava hasta dejarlo a nivel de la superficie, aquí se conectan las líneas de tierra provenientes de los tableros. El resultado final de la RPT obtenido al medir cada electrodo, se anotará más adelante.

En las siguientes fotos se presentan los diferentes Sistemas de Puesta a Tierra construidos en el CTIG, utilizando la disposición de electrodo vertical con una adecuada dosis de gel, la ubicación de estos sistemas y su interconexión se pueden apreciar en los planos 1/4 y 2/4.

Sistema de Puesta a Tierra 4



Foto 3-18 SPT 1

Sistema de Puesta a Tierra 5



Foto 3-19 SPT5

Sistema de Puesta a Tierra 6



Foto 3-20 SPT6

Sistema de Puesta a Tierra 8



Foto 3-21 SPT8

Sistema de Puesta a Tierra 9



Foto 3-22 SPT9

Sistema de Puesta a Tierra 10



Foto 3-23 SPT10

Sistema de Puesta a Tierra 11



Foto 3-24 SPT11

Sistema de Puesta a Tierra 12



Foto 3-25 SPT 12

Sistema de Puesta a Tierra 13



Foto 3-26 SPT 13

3.13 Medición de la Resistencia de Puesta a Tierra (RPT)

Para medir la RPT se utilizó el método de la caída de potencial, citado en el capítulo 1 sección 1.3.3, se utiliza para la medición la configuración de la figura 1-30.

La medida de la RPT en los en los diferentes SPT construidos en el CTIG, se realiza por las siguientes razones:

- Confrontar su valor, posteriormente a la instalación y previo a la conexión del equipo, contra las especificaciones de diseño.
- Como parte del mantenimiento de rutina, para confirmar que su valor no ha aumentado sustancialmente respecto del valor medido originalmente o de su valor de diseño.

En este caso, es normalmente suficiente un medidor portátil de resistencia a tierra (Figura 3-3), también usado para medida de resistividad de terreno, con dos terminales de potencial, P1 y P2 y dos terminales de corriente, C1 y C2.



Figura 3-3 Medición de la RPT de los diferentes SPT construidos en el CTIG

3.14 Tabla de valores de las RPT, medidos en cada uno de los Sistemas de Puesta a Tierra construidos en el CTIG

En la siguiente tabla 3-22 se presentan los valores finales de resistencia obtenidos al medir cada sistema de puesta a tierra construido en el CTIG

Sistema	RPT final con terreno tratado (Ω)
SPT1	12
SPT2	13
SPT3	12
SPT4	21
SPT5	21
SPT6	22
SPT7	12
SPT8	21
SPT9	22
SPT10	21
SPT11	22
SPT 12	21
SPT13	21

Tabla 3-22 Valores de RPT en los SPT construidos en el CTIG

3.15 Análisis de resultados

Al concluir este capítulo, los resultados obtenidos son notorios y satisfactorios, se inicia fundamentándonos teóricamente en el Capítulo 1, posteriormente en el Capítulo 2 adentrándonos en los sistemas eléctricos existentes en el CTIG y en el Capítulo 3 se diseña y construye los diferentes sistemas de puesta a tierra propicios para la institución.

Los resultados de cada una de las RPT en cada SPT construido (valores citados en la tabla 3-22), tienen un valor por debajo de los límites establecidos en la tabla 3-17 (en donde se indican los valores de referencia para resistencia de puesta a tierra. Fuente: ANSI/IEEE 80) motivo por el cual este proyecto se termina con éxito, cumpliendo y respetando la normativa IEEE citadas en el capítulo 1 sección 1.2.1.1.

En la siguiente tabla 3-23 se hace una comparación y análisis de resultados entre los valores de RPT calculados, esperados con el terreno en estado natural, y los valores finales obtenidos luego de realizar el debido tratamiento químico con la adición de gel al terreno designado para cada SPT construido en el CTIG.

Sistema	RPT calculada con terreno en estado natural (Ω)	RPT final medida con terreno tratado (Ω)
SPT1	23	12
SPT2	23	13
SPT3	23	12
SPT4	57	21
SPT5	59	21
SPT6	56	22
SPT7	23	12
SPT8	55	21
SPT9	58	22
SPT10	57	21
SPT11	57	22
SPT 12	58	21
SPT13	57	21

Tabla 3-23 Comparación de los valores de RPT en los SPT construidos en el CTIG

CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES:

- Mediante la elaboración de este proyecto de tesis se presento una formulación de procedimientos claros y sencillos para el análisis diseño y construcción de puestas a tierra, basado tanto en los conocimientos adquiridos a lo largo del proceso de formación superior y en función de la aplicabilidad de las normas IEEE, a fin de establecer los criterios, metodología, procesos y especificaciones que se debe seguir.
- Contar con estudios de ingeniería realizados de manera técnica, y con el uso de herramientas modernas (computadoras y programas especializados), nos da una visión clara de la situación del sistema eléctrico, permitiéndonos detectar problemas. También nos permite establecer un orden de prioridades para la corrección de los problemas. En general nos dan un panorama para prevenir fallas y accidentes, a un costo mucho menor que el que se hace para corregir los problemas después de que causaron destrozos a la propiedad.
- Con la aplicación de las correspondientes dosificaciones de gel al terreno para disminuir su resistividad, a lo largo de este estudio y mediante la práctica constructiva, se comprobó que influye de manera notable y positiva en los resultados finales ya que se obtiene una disminución del 60% de la resistencia de puesta a tierra final, con respecto al mismo caso pero con el terreno no tratado químicamente.
- En la construcción de las diferentes mallas, el uso de un conductor ubicado de manera espiral tipo muelle en el electrodo de conexión contribuye a disminuir la resistencia de puesta a tierra, ya que se aumenta el área de sección efectiva en

contacto entre el conductor y el terreno, lo cual permite una distribución más eficiente de la corriente de falla.

- Con la aplicabilidad de las normas IEEE, se construyó el presente trabajo con total éxito, en beneficio del Colegio Técnico Industrial Gualaceo, lo cual está certificado por el rector del establecimiento, (ver Anexo).

4.2 RECOMENDACIONES:

Con la realización de este proyecto y con un conocimiento más real y ampliado se recomienda:

- Estudiar el comportamiento del suelo, como conductor eléctrico, a partir de su composición mineralizada y sus contenidos de sales y humedad, incluyendo las tablas referenciales que ayudan a una identificación preliminar de su resistividad.
- Utilizar el método de la caída de potencial (Wenner) para determinar la resistividad cualquier tipo de suelo estratificado, debido a su sencillez, buena resolución y mínimo error.
- Verificar la medida de la resistencia de la puesta a tierra, debiéndose realizar medidas en diferentes sentidos y distancias para los circuitos (I) y (V) donde la mayor resistencia obtenida será reconocida y aceptada como referencial, a menos que se haga una tercera medida que dé un valor promedio.
- Monitorear el sistema de puesta a tierra, para verificar su estado y asegurarse que tiene el valor correcto de resistencia para el cual fue diseñado, esto se deberá efectuar periódicamente.

- La elección del conductor de los equipos; sus protecciones, y la asociación de productos, deben estar basadas en consideraciones y en las recomendaciones enunciadas en los catálogos de los productos a emplearse, para realizar el ajuste final de las protecciones en condiciones de utilización.
- Con el afán de disminuir la resistencia de puesta a tierra se recomienda realizar un tratamiento químico al terreno con sales minerales o la adición de gel, esto ayuda a mejorar la conductividad del terreno de manera notable.
- Se debe verificar que las sales minerales o los químicos a utilizarse para el mejoramiento de terreno sean inofensivos para el medio ambiente y no sean corrosivos con los materiales que confirman el sistema de puesta a tierra.
- Siempre compactar el terreno que ocupa la puesta a tierra, con el fin de mejorar el contacto entre el conductor y el terreno propiamente dicho.
- Mantener siempre con humedad el terreno que conforma el SPT, de esta manera se evitarán incrementos de la resistencia de puesta a tierra
- Se recomienda elaborar para cada punto de puesta a tierra, un pozo de revisión, el cual permite la verificación y mantenimiento de la puesta a tierra ubicada en el terreno, debiendo construirse con hormigón dotado de una tapa y su respectiva señalización.

BIBLIOGRAFIA

- IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, *Standard 42-1991*
- ANSI/IEEE Std. 80: 1986, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- ANSI/IEEE Std. 81: 1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System.
- IEEE Practice for Grounding of Industrial Power Systems, IEEE *Green book, Std. 141-1993*.
- IEEE Standards Interpretation for IEEE Std 80-1986. *www.ieee.org* Oct. 2002.
- ANSI C114.1-1973 / IEEE *Standard 142-1972*
- *Brescolí, A. Sistema de medida de la resistividad eléctrica del suelo. Proyecto Fi de Carrera ETSETB, UPC. 1995.*
- *Métodos de medición de SPAT.pdf*
- *http://www.procobre.org.*
- *http://www.plantaexterna.cl/tierras/resistiv.htm. Nov. 2002. Forma práctica de medir los sistemas de aterrizamiento*
- *http://www.iee.org*

ANEXOS



COLEGIO TECNICO INDUSTRIAL "GUALACEO"

FUNDADO EL 16 DE NOVIEMBRE DE 1961

TELEFONOS: 2 255060 - 2 256875

BACHILLERATO TECNICO EN:

- * Mecánica Automotriz
- * Mecánica Industrial
- * Electricidad
- * Electrónica

Ing. Vicente Uzhca Cárdenas, Rector (e) del Plantel, a petición verbal de parte interesada,

CERTIFICA

Que el Sr. Pablo Gómez Aguilar, ha realizado el **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PUESTAS A TIERRA** en el Colegio Técnico Industrial Gualaceo, en forma eficiente y satisfactoria, proyecto que beneficia a nuestra Institución.

Es todo cuanto informo en honor a la verdad.

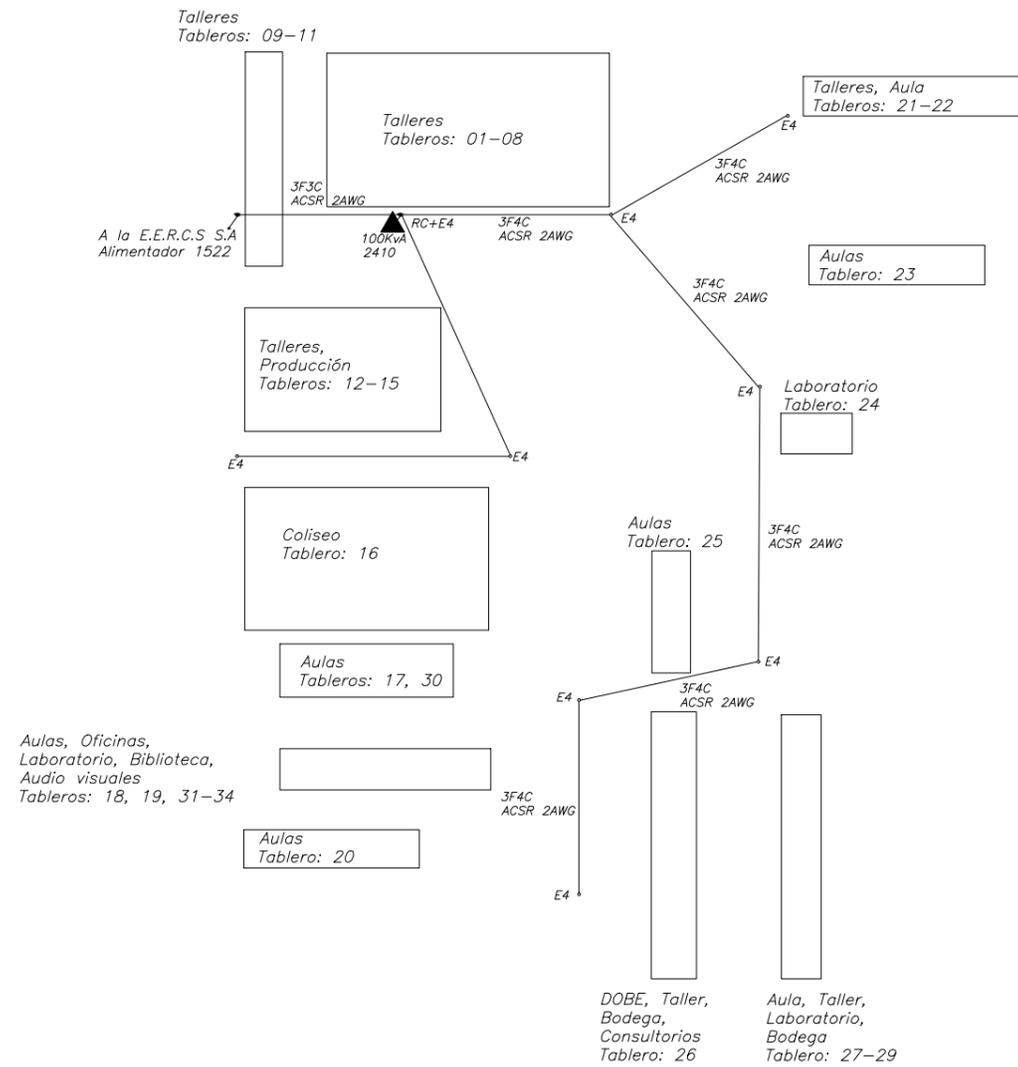
Gualaceo, junio 21 de 2010

Ing. Vicente Uzhca C.

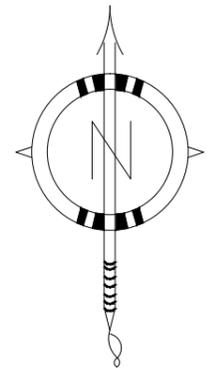
Rector (e)

Colegio Téc. Industrial
"Gualaceo"
R E C T O R A D O

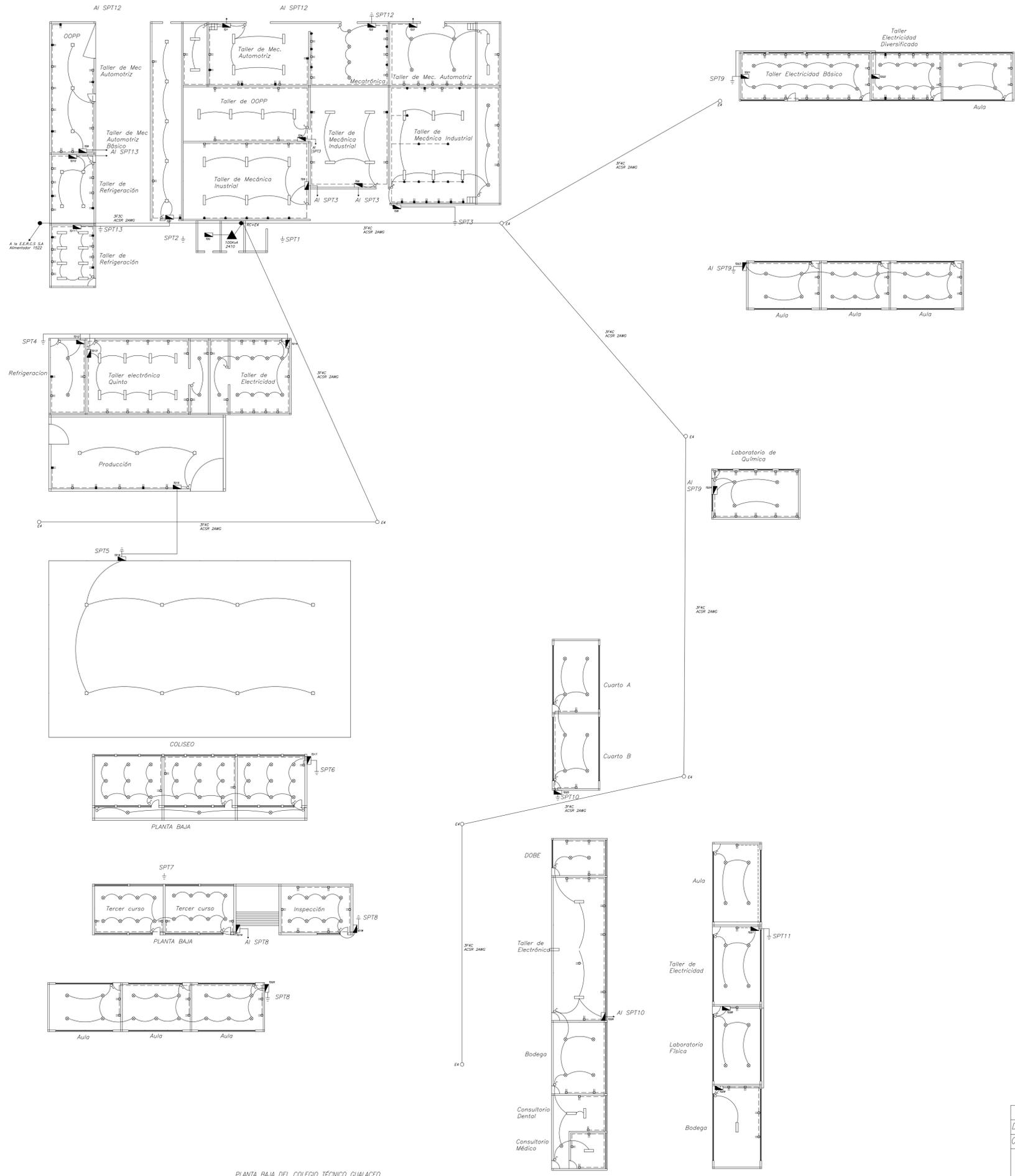
DIAGRAMA DE BLOQUES DEL COLEGIO TÉCNICO GUALACEO



CROQUIS DE UBICACIÓN DEL COLEGIO TÉCNICO GUALACEO



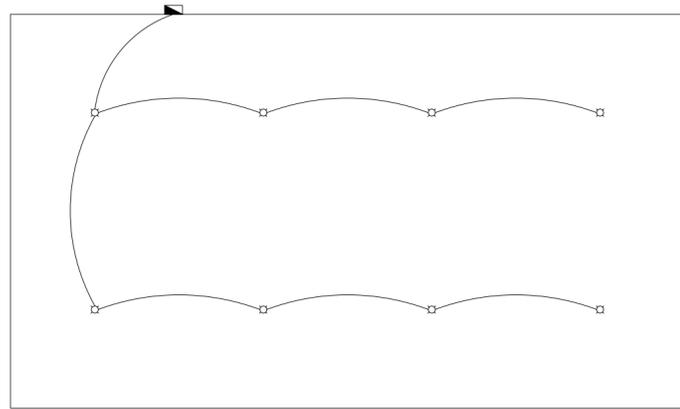
	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA
Dibujado	14-07-2010	Pablo Gómez	
Comprobado	19-07-2010	Pablo Gómez	
ESCALA: 1:1	DIAGRAMA DE BLOQUES Y UBICACIÓN DEL COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL GUALACEO		Carrera de Ingeniería Eléctrica Lámina N°3 de 4



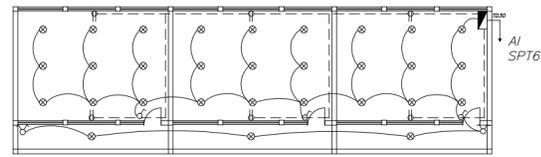
SIMBOLOGÍA	
	Transformador Trifásico
	Tablero de Distribución
	Poste de HA 11m
	Poste de HA 9m
	Foco incandescente
	Lámpara fluorescente 2x40 w
	Lámpara de vapor de mercurio 400w
	Interruptor simple
	Conmutador
	Tomacorriente monofásico
	Tomacorriente bifásico
	Tomacorriente trifásico
	Conductor 2 x 14 AWG
	Conductor 3 x 12 AWG
	Puesta a tierra

	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA
Dibujado	31-05-2010	Pablo Gómez	
Comprobado	2-06-2010	Pablo Gómez	
ESCALA:	LEVANTAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO EXISTENTE EN EL COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL GUALCEO		Carrera de Ingeniería Eléctrica
1:150			Lámina Nº1 de 4

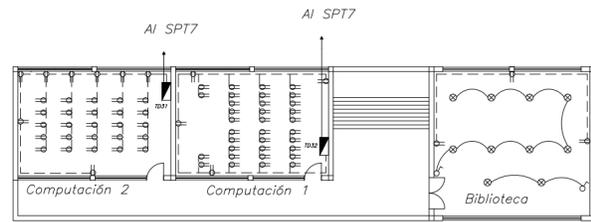
PLANTA BAJA DEL COLEGIO TÉCNICO GUALCEO



COLISEO

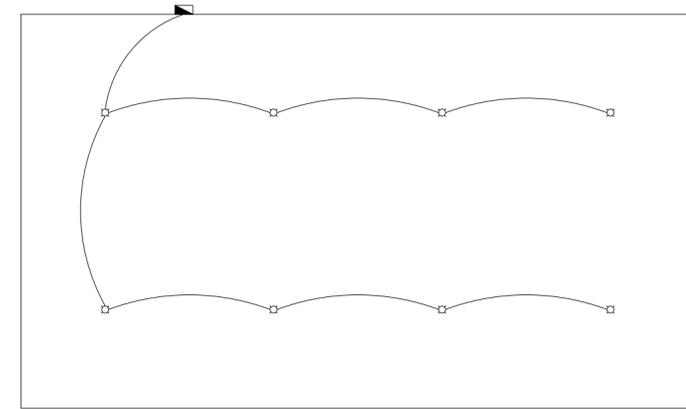


PRIMERA PLANTA ALTA

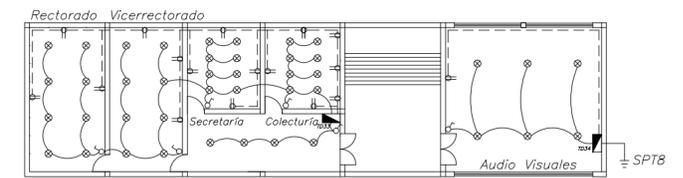


PRIMERA PLANTA ALTA

PRIMERA PLANTA ALTA DEL COLEGIO TÉCNICO GUALACEO



COLISEO

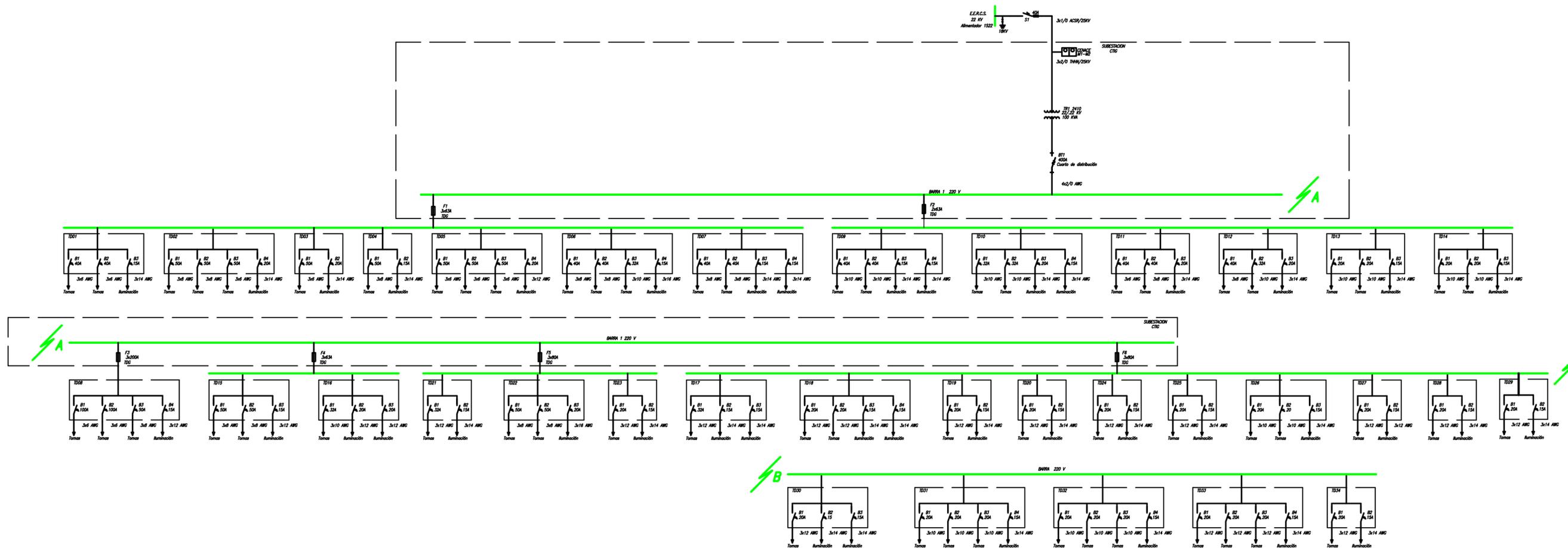


SEGUNDA PLANTA ALTA

SEGUNDA PLANTA ALTA DEL COLEGIO TÉCNICO GUALACEO

	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA
Dibujado	31-05-2010	Pablo Gómez	
Comprobado	2-06-2010	Pablo Gómez	
ESCALA: 1:150	LEVANTAMIENTO DEL SISTEMA ELÉCTRICO EXISTENTE EN EL COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL GUALACEO		Carrera de Ingeniería Eléctrica Lámina N°2 de 4

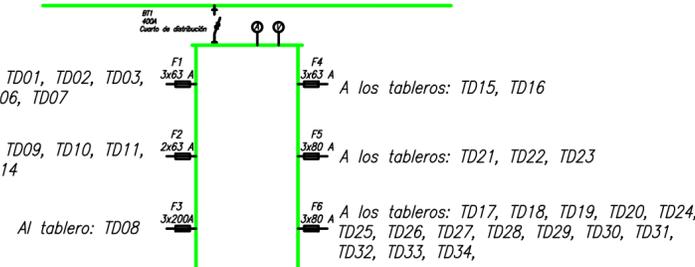
DIAGRAMA UNIFILAR DEL CIRCUITO ELÉCTRICO DEL COLEGIO TÉCNICO GUALACEO



CUADRO DE TABLEROS

SUBESTACIÓN	TABLERO	UBICACIÓN DE LOS TABLEROS
F1	TD01	Taller Mecánica Automotriz Segundo de Bachillerato
F1	TD02	Taller de mecatrónica
F1	TD03	Taller Mecánica Automotriz Tercero de Bachillerato
F1	TD04	Taller de Opciones Prácticas de Mecánica Industrial
F1	TD05	Taller de Mecánica Industrial Tercero de Bachillerato
F1	TD06	Taller de Mecánica Industrial, Soldadura, Ajuste
F1	TD07	Taller de Opciones Prácticas de Mecánica
F3	TD08	Taller de Mecánica Industrial, Soldadura, Torno, Fresadora Segundos de Bachillerato
F2	TD09	Taller de Opciones Prácticas Mecanizado
F2	TD10	Taller de Refrigeración Segundo de Bachillerato
F2	TD11	Taller de Aire acondicionado y Refrigeración
F2	TD12	Taller de Refrigeración Básica
F2	TD13	Taller de Electrónica Segunda de Bachillerato
F2	TD14	Taller de Electricidad Tercero de Bachillerato
F4	TD15	Taller de Producción
F4	TD16	Coliseo en construcción
F6	TD17	Aulas novenos años de Educación Básica
F6	TD18	Inspección general, Biblioteca
F6	TD19	Aulas octavos años de Educación Básica
F6	TD20	Aulas de Octavo y Primero de Bachillerato
F5	TD21	Taller de Electricidad Básico
F5	TD22	Taller de Electricidad Segundos de Bachillerato
F5	TD23	Aulas Tercero de Bachillerato
F6	TD24	Laboratorio de Química
F6	TD25	Aulas primero de Bachillerato
F6	TD26	Taller de Electrónica diversificado, DOBE, Bodega 1, Consultorios Médico y Odontológico
F6	TD27	Taller de Electricidad, Aulas Segundo de Bachillerato
F6	TD28	Laboratorio de Física
F6	TD29	Bodega 2
F6	TD30	Aulas Décimos años de Educación Básica
F6	TD31	Laboratorio de Computación 1
F6	TD32	Laboratorio de Computación 2
F6	TD33	Oficinas Administrativas
F6	TD34	Sala de Audio Visuales

DISPOSICIÓN FÍSICA EN EL TABLERO



SIMBOLOGÍA	
	Seccionador MT
	Contador de energía
	Seccionador Fusible
	Fusible
	Termomagnético
	Transformador Trifásico
	Puesta a tierra
	Voltímetro
	Amperímetro

Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE MATRIZ CUENCA
Dibujado 31-05-2010	Pablo Gómez	
Comprobado 2-06-2010	Pablo Gómez	
ESCALA: 1:150	DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA ELÉCTRICO EXISTENTE EN EL COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL GUALACEO	Carrera de Ingeniería Eléctrica Lámina N°4 de 4