

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**ESTUDIO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA  
MEDIANTE LA UTILIZACION DE ELECTRODOS DE  
GRAFITO**

**REALIZADO POR:**

**NELSON JOSÉ SÁNCHEZ CARABALLO**

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como Requisito  
Parcial para optar al Título de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Barcelona, Octubre de 2009.

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**ESTUDIO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA  
MEDIANTE LA UTILIZACION DE ELECTRODOS DE  
GRAFITO**

**REVISADO Y APROBADO POR:**

---

**Ing. Hernán Parra  
Asesor Académico**

---

**Ing. Eulogio Hernández  
Asesor Industrial**

Barcelona, Octubre de 2009.

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD**



**ESTUDIO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA  
UTILIZANDO ELECTRODOS DE  
GRAFITO**

**JURADO CALIFICADOR:**

El Jurado hace constar que ha asignado a esta Tesis la calificación de:

---

Ing. Hernán Parra  
**Asesor Académico**

---

Ing. Verena Mercado  
**Jurado Principal**

---

Ing. Luis Suarez.  
**Jurado Principal**

Barcelona, Octubre de 2009.

## **RESOLUCIÓN**

De acuerdo con el artículo 44 del reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados con otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”.

## **DEDICATORIA**

A Dios q guió mis pasos y siempre me dio la fuerza necesaria para salir adelante

A mi Madre Carmen Caraballo que con su ejemplo trabajo y constancia me mantuvo y enseñó los valores para ir viene en la vida

A mi Padre Nelson Sánchez

A mi Hermano

A mis Tíos en especial a mi tía Ameris que siempre me acompaño en los momentos especiales de mi vida.

A mis Abuelos que desde el cielo velan por mi

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios el arquitecto del mundo. El cual me dio la fuerza y capacidad y nunca me abandono en los momentos difíciles.

A mi madrecita linda que siempre me apoyo, instruyo y enseño a seguir buenos hábitos de vida.

A mi padre que todo el tiempo estuvo a mi lado, aconsejándome, dándome el apoyo para seguir adelante.

A todos mis compañeros, amigos y profesores que me acompañaron a lo largo de la carrera muy especialmente a Carlos Dos Santos, Virginia Sánchez, Daniela Pérez, Víctor Brito, Daniel Indriago( Culebra), Anyelo Prado(Regue), Sergio Mesa, Eimmi Mendosa, Jesús( Chuo), Antonio García, Reivis Valdivieso, J, Carlos Hernández (La perra), Jacky Barcos, Nelsis Gil, Carlos Trias,

## INDICE GENERAL

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
INDICE GENERAL .....	vii
INDICE DE TABLAS .....	xii
INDICE DE FIGURAS .....	xiii
RESUMEN .....	xv
CAPITULO I .....	17
INTRODUCCIÓN .....	17
1.1 El planteamiento del problema .....	17
1.2 Objetivos .....	18
1.2.1 Objetivo General .....	18
1.2.2 Objetivos Específicos .....	19
1.3 Generalidades de la empresa .....	19
1.3.1 Antecedentes de la empresa .....	19
1.3.2 Estructura organizativa .....	20
1.3.2.1 Presidente .....	20
1.3.2.2 Vicepresidente Ejecutivo .....	21
1.3.2.3 Gerencia de Red .....	21
1.3.2.4 Gerencia de Sistemas .....	23
1.3.2.5 Gerencia de Planificación .....	23
1.3.2.6 Gerencia de Servicios Compartidos .....	23
1.3.2.7 Gerencia de Unidades de Negocios .....	23
CAPITULO II .....	25
MARCO TEÓRICO .....	25

2.1. Antecedentes .....	25
2.2. Definiciones y conceptos básicos .....	26
2.2.1 Sistema de Puesta a Tierra.....	26
2.2.2 Propiedades o Atributos.....	27
2.2.3 Elementos .....	28
2.2.3 Tierra de servicios.....	29
2.2.4 Tierra de Protección.....	30
2.2.5. Tierra de Referencia .....	30
2.2.6. Electrodo de Tierra .....	30
2.2.8. Mallas de Tierra .....	30
2.2.9. Conexión a Tierra .....	30
2.2.10. Poner a Tierra .....	31
2.2.11 Resistividad de un Terreno .....	31
2.2.12 Gradiente Superficial .....	31
2.3. Objetivos del sistema de puesta a tierra .....	31
2.3.1 Diferencias entre la conexión de tierra y neutro.....	32
2.3.2 Tipos de sistemas de puesta a tierra .....	32
2.3.3 Puesta a tierra para sistemas eléctricos .....	32
2.3.4 Puesta a tierra de los equipos eléctricos.....	33
2.3.5 Puesta a tierra en señales electrónicas .....	33
2.3.6 Puesta a tierra de protección electrónica.....	34
2.3.7 Puesta a tierra de protección atmosférica.....	34
2.3.8 Puesta a tierra de protección electrostática .....	35
2.3.9 Puesta a tierra para sistemas eléctricos .....	35
2.4. Resistividad del terreno .....	36
2.5. Tipos de corrosión .....	38
2.5.1 Corrosión en aire .....	38
2.5.2 Corrosión Subterránea.....	38
2.5.3 Corrosión bimetálica .....	39

2.5.4 Corrosión Química .....	40
2.6 Resistencia a la corrosión .....	42
2.6.1 Oxidación atmosférica .....	42
2.6.2 Corrosión subterránea .....	42
2.7 Grafito .....	43
2.7.1 Estructura del grafito .....	44
2.7.2 Propiedades del Grafito .....	44
2.7.3 Aplicaciones del grafito .....	45
2.7.4 Compuestos de Intercalación de Grafito .....	46
2.7.5 Propiedades físicas del grafito .....	46
2.7.6 Propiedades químicas .....	47
2.8. Forma de presentarse el grafito .....	48
2.8.1. Origen del grafito .....	48
2.8.2 Localización del grafito .....	49
2.9. Sistema de puesta a tierra en comunicaciones.....	49
2.10. Aspectos técnicos .....	51
2.11 Tipos De Conexiones.....	53
2.12 Resistencia de puesta a tierra.....	54
2.13 Métodos de medición.....	55
2.13.1 Método Caída de Potencial de los Tres Terminales para medir la resistencia.....	55
2.13.2 Método de la caída de potencial .....	57
2.13.3 Método de la relación.....	58
2.13.4 Método de Los Cuatros Puntos o de Wenner para Medir la Resistividad.....	61
2.14. Perfil de resistividad.....	65
2.14.1. Capa superficial arcillosa y húmeda, capa inferior rocosa: perfil de resistividad ascendente .....	66

2.14.2. Capa superficial muy seca, capa inferior arenosa: perfil de resistividad descendente .....	66
2.14.3 Terreno rocoso y seco. Perfil de resistividad plano.....	67
2.14.4. Precauciones de seguridad para realizar la medición.....	68
CAPITULO III .....	69
DESARROLLO DE LAS PRUEBAS.....	69
3.1. Procedimiento.....	68
3.2. Inspección de las muestras utilizadas en las pruebas .....	72
3.3 Prueba en corriente alterna de cortocircuito .....	77
3.3.1. Procedimiento .....	77
3.3.2. Resultados de las pruebas.....	80
3.3.3. Conclusión de las pruebas.....	81
3.4. Prueba en corriente de impulso tipo rayo al electrodo de grafito .....	82
3.4.1 Procedimiento .....	82
3.4.2. Resultados de las pruebas.....	84
3.4.3. Conclusión de las pruebas.....	86
3.5. Electrodo de grafito y electrodos combencionales ventajas y desventajas .....	87
3.5.1. Electrodo de grafito.....	88
3.5.2. Electrodo quimico convencional.....	88
3.5.3. Prueba en campo, mediante realización de instalación sugerida por el fabricante .....	88
3.5.4. Procedimiento .....	89
3.5.5.Resultados de las pruebas.....	92
3.5.6. Resistencia de puesta a tierra.....	92
3.6. Prueba en corriente de impulso tipo rayo con el electrodo en estado húmedo .....	95
3.6.1 Procedimiento .....	95
3.6.2 Resultados .....	96

3.6.3. Registros antes de introducción del electrodo en el tanque de agua .	97
3.6.4. Aplicación de impulsos de corriente tipo rayo .....	99
3.6.5. Conclusión de la prueba .....	100
3.7. Prueba térmica.....	100
3.7.1 Procedimiento .....	100
3.7.2. Resultados .....	101
3.7.3.Conclusión de la prueba .....	104
3.8.Adicionalmente se le realizaron pruebas al material acondicionador para evaluar su comportamiento.....	104
3.8.1 Procedimiento .....	104
3.8.2. Resultados .....	106
CONCLUSIONES .....	112
RECOMENDACIONES .....	114
Bibliografía Citada.....	116
Bibliografía adicional.....	118
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	119

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores típicos de resistividad de diferentes suelos.....	36
Tabla 2.2. Propiedades físicas del grafito.....	47
Tabla 3.1 Calibracion.....	75
Tabla 3.2 Impulsos de corriente.....	81
Tabla 3.3 Impulsos tipo rayo.....	86
Tabla 3.4 Medición de resistencia.....	93
Tabla 3.5 Impulsos tipo rayo en estado húmedo el electrodo.....	99
Tabla 3.6 Medicion termica.....	101
Tabla 3.7 Medicion termica.....	102
Tabla 3.8. Evaluación del material acondicionador en seco, con contenido de sal. ....	109
Tabla 3.9. Evaluación del material acondicionador en seco, sin contenido de sal. ....	110

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura Organizativa de la Corporación CANTV .....	21
Figura 1.2. Organigrama de la Gerencia de Red. ....	22
Figura 2.1: Estructura atómica del grafito. ....	45
Figura 2.2. Método de las tres puntas.....	56
Figura 2.3.. Método de la caída de potencial. ....	57
Figura 2.4 Método de los tres terminales.....	59
Figura 2.5 Electrodo de tierra v resistencia.....	58
Figura 2.6 Resistencia Vs distancia entre los electrodos de prueba.....	60
Figura 2.7. Modelo del método de los 4 puntos .....	62
Figura 2.8. Arreglo típico de los 4 puntos .....	64
Figura 2.9. Perfil de resistividad.....	65
Figura 2.10. Perfil de resistividad ascendente. ....	66
Figura 2.11. Perfil de resistividad descendente .....	67
Figura 2.12. Perfil de resistividad plano. ....	67
Figura 3.1 Excavación de fosa.....	70
Figura 3.2. Fosa rellenas con material acondicionador.....	70
Figura 3.3. Electrodo de grafito de calibración.....	73
Figura 3.4 Electrodo de grafito.....	73
Figura 3.5.. Prueba de medición de resistencia longitudinal.....	75
Figura 3.6. Montaje para la prueba de la resistencia longitudinal. ....	75
Figura 3.7. Montaje y conexiones para la prueba de corriente AC de cortocircuito.....	78
Figura.3.8. Fotografía del montaje para la prueba de corriente alterna. ....	79
Figura. 3.9. Detalle del conexionado del electrodo a la fuente y al transformador de corriente.....	79
Figura 3.10. Montaje para la prueba de corriente de impulso tipo rayo. ....	83

Figura. 3.11. Esquema del montaje del electrodo para la prueba de corriente de impulso tipo rayo.....	84
Figura 3.12 Forma de onda de corriente aplicada al electrodo.....	85
Figura. 3.13. Apertura de una fosa circular de 50 cm de diámetro y 50 cm de profundidad.....	90
Figura 3.14 Fosa con material acondicionador .....	90
Figura 3.15 Recopilación del material acondicionador.....	91
Figura 3.16. Método de los cuatro electrodos para la medición de la resistividad del suelo.....	92
Figura. 3.17. Método de los tres electrodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo. ....	93
Figura 3.18 Electrodo de grafito introducido en un tanque de agua por 48 h	96
Figura 3.19 Forma de onda empleada para el ensayo de corriente de impulso. ....	97
Figura 3.20. Cambio de coloración en la parte superficial del electrodo de grafito.....	99
Figura 3.21 Resultados gráficos de la prueba térmica.....	103
Figura 3.22 Prueba normalizado de resistividad con caja de Miller. ....	105
Figura 3.23 Caja de Miller empleada para la medición de la resistencia del material acondicionador.....	105
Figura 3.24 Caja de Miller con alto contenido de sal .....	107
Figura3.25 Oxidación de las partes metálicas de la instalación, debido al gran contenido de sal del acondicionador.....	108

## RESUMEN

Los sistemas de puesta a tierra son de gran importancia para la protección y buen funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos teniendo también como función fundamental la seguridad del personal que trabaja con los mismos, evitando que una corriente de falla o descargas atmosféricas pueda dañarlos en este trabajo de grado se estudio un nuevo electrodo de puesta a tierra compuesto por grafito, el cual fue utilizado por la empresa CANTV, en la central de comunicaciones ubicada en el Pao Edo Bolívar, el material del electrodo no está catalogado en las normas y guías nacionales e internacionales que describen los procedimientos normales de prueba por ende, no existe un procedimiento de ensayo normalizado aplicable directamente al materia en cuestión. Sin embargo se contrato al laboratorio de alta tensión de la universidad Simón Bolívar para que realizara ciertas pruebas eléctricas que servirán como referencia técnica para conocer o caracterizar el material empleado como electrodo de puesta a tierra. Se logro obtener datos importantes del funcionamiento del electrodo bajo condiciones de falla que pueden ocurrir en una estación de comunicaciones.



# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Planteamiento del problema**

La Compañía Anónima Nacional Teléfonos de Venezuela (CANTV), una de las más grandes empresas en el área de comunicaciones a nivel nacional, posee una gran cantidad de equipos y sistemas digitales sumamente sofisticados en su concepción electrónica, pero muy susceptibles o vulnerables ante las interferencias a las que posiblemente están expuestas al tener presente agentes de naturaleza electrónica. Por lo tanto, es necesaria una debida protección eléctrica para así garantizar la seguridad tanto del personal que trabaja en ella como de los equipos.

Debido a la diversa cantidad de suelos que existen en el territorio nacional, cada uno de ellos posee una resistencia óhmica distinta y variable, en donde el estudio del mismo dicta el sistema de puesta a tierra que se debe utilizar.

CANTV en la búsqueda de soluciones y mejoras de los sistemas de puesta a tierra ha decidido instalar y estudiar el comportamiento de un nuevo electrodo de puesta a tierra compuesto de material de grafito. El grafito es una estructura tridimensional de átomos de carbono que forman capas paralelas apiladas unas a otras, al estar formado por carbono no es un elemento metálico por lo cual no sufre corrosión, esta estructura en capas hace que se formen bandas de conducción que conlleva a que se comporte como un conductor análogo a los metales, uno de los principales problemas que se enfrenta en la actualidad es la perdurabilidad de las instalaciones, ya

que los metales enterrados en mayor o menor grado, sufren corrosión sobre todo en terrenos de baja resistividad.

Esta innovación en tomas a tierras aporta soluciones al tratamiento del terreno ofreciendo mayor superficie de contacto, evitando alteraciones ante condiciones agresivas del terreno, altamente conductivo y no corrosivo, por lo tanto, minimiza los costos ya que requiere muy poco mantenimiento

Por lo tanto, el análisis de las características del electrodo de grafito se realizará mediante pruebas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Simón Bolívar permitiendo conocer que tan eficiente es el elemento y si puede soportar las descargas atmosféricas y las fallas a las cuales puede ser sometido.

La implementación de este nuevo material en el uso de las condiciones de puesta a tierra serán aplicadas en la central de comunicaciones ubicada en el Pao, Edo. Bolívar, debido a que en la actualidad, presenta mayor número de fallas porque los sistemas de puesta a tierra tradicionales no están acondicionados suficientemente para adaptarse a las condiciones agresivas del terreno.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Estudiar el sistema de puesta a tierra mediante utilización de electrodo de grafito.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información sobre los sistemas de puestas a tierras y los electrodos de grafito.
- Estudiar el comportamiento del electrodo de grafito en diferentes condiciones ambientales.
- Determinar Ventajas y desventajas de los sistemas de puesta a tierra tradicionales y los de electrodos de grafito mediante pruebas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Simón Bolívar
- Caracterizar el electrodo de grafito de acuerdo a sus propiedades.
- Evaluar el electrodo de grafito bajo diferentes condiciones eléctricas, mediante pruebas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Simón Bolívar

### **1.3 Generalidades de la empresa**

#### **1.3.1 Antecedentes de la empresa**

Fundada el día 20 de junio de 1930, cuando el comerciante Félix A. Guerrero, domiciliado en Caracas y dos socios, obtuvieron una concesión del Ministerio de Fomento para construir y explotar una red telefónica en el Distrito Federal y los demás estados del país. La naciente compañía fue registrada con un capital de 500.000 Bolívares, el cual equivaldría a varios millones de la actualidad y para iniciar sus operaciones adquirió la totalidad de las acciones de la empresa Telephone And Electrical Appliances

Company por la entonces increíble suma de 17.500.000 Bolívares, debiendo obtener el financiamiento para esta espectacular operación mediante una emisión de acciones por dicho valor.

La Compañía progresivamente adquiere diferentes empresas telefónicas particulares, que funcionaban en todo el territorio nacional, convirtiéndose en un monopolio, figura jurídica que no estaba prohibida en la legislación venezolana de ese tiempo. En 1953, por recomendación de una comisión designada al efecto, el Estado compra la totalidad de las acciones de CANTV e inicia el proceso de nacionalización que concluye en 1973 con la adquisición de la última de las empresas de telefonía fija privada, ubicada en la ciudad de San Fernando de Apure. Desde sus inicios, la empresa se preocupó por la adquisición de recursos tecnológicos que condujeran a la modernización del servicio y por su masificación, lo que puso a la telefonía al alcance de la población venezolana.

### **1.3.2 Estructura organizativa**

La Compañía Anónima de Teléfonos de Venezuela (CANTV), se encuentra estructurada de la siguiente manera (**Figura 1.1**):

#### **1.3.2.1 Presidente**

Es el miembro principal de la corporación, el cual, es su deber cumplir y hacer cumplir las decisiones y actividades de la organización. Actualmente este cargo lo ocupa la Ing. Socorro Hernández.

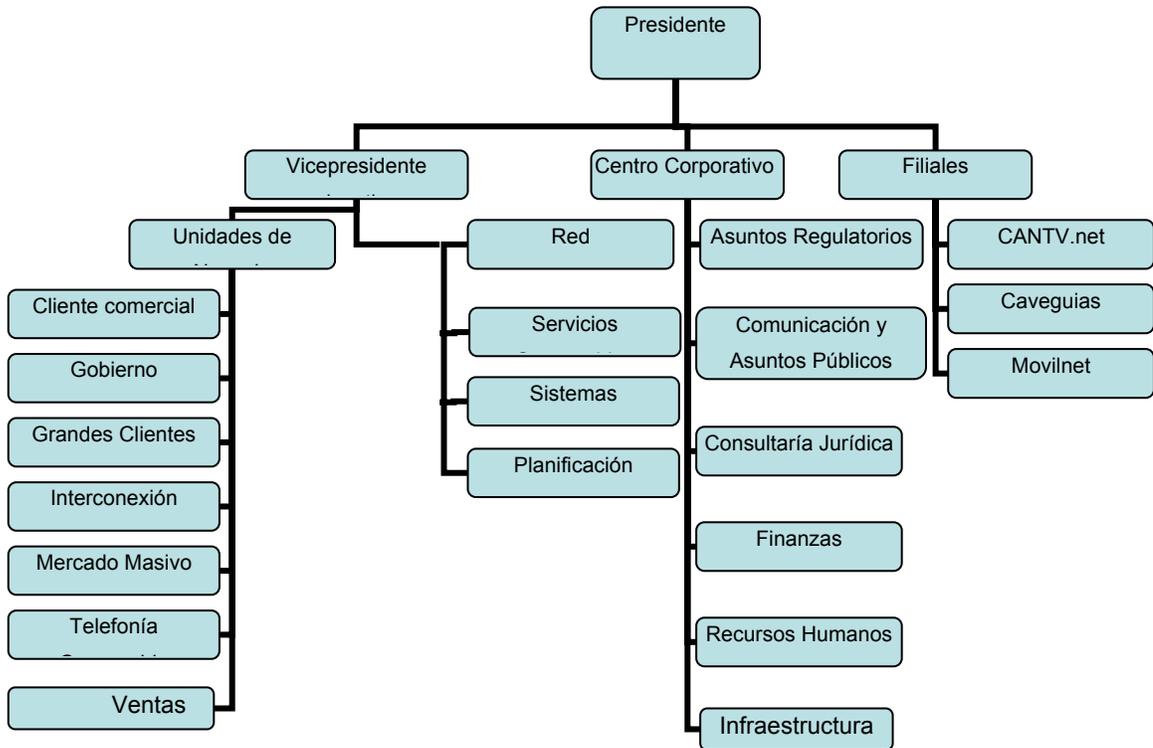


Figura 1.1.Estructura Organizativa de la Corporación CANTV

### 1.3.2.2 Vicepresidente Ejecutivo

Es aquel que coordina los trabajos correspondientes a la gerencia de planificación, empresas, instituciones públicas, residenciales, telecomunicaciones públicas, corporaciones y redes que le notifiquen directamente.

### 1.3.2.3 Gerencia de Red

Su área está conformada principalmente en la calidad del servicio telefónico, reducción de averías entre otros. Dicha gerencia se encuentra

subdividida en cuatro áreas: área de acceso, adecuación y presurización, área de conmutación y área de transmisión y datos (**Figura 1.2**).

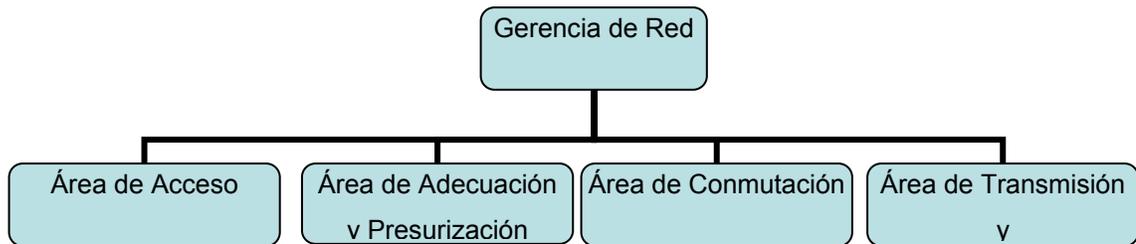


Figura 1.2. Organigrama de la Gerencia de Red.

**- Área de Red de Acceso**

Tiene como función instalar y reparar los teléfonos de los clientes.

**- Área de Adecuación y Presurización**

Maneja todo lo referente a la instalación de cables telefónicos, terminales, tanguillas telefónicas, entre otros.

**- Área de Conmutación**

Se encarga de mantener y operar todos los equipos de telecomunicación ubicados en centrales digitales (CD), Unidades Remotas Locales (URL), Digitales Mviles (DM).

**- Área de Transmisión y Datos**

Se encarga de mantener y operar todos los equipos de telecomunicación y transmisión en las instalaciones y repetidoras CANTV.

#### **1.3.2.4 Gerencia de Sistemas**

Abarca con todo lo que tenga que ver con la tecnología de información con la que cuenta la organización.

#### **1.3.2.5 Gerencia de Planificación**

Es el órgano encargado de organizar, dirigir y controlar las actividades de planificación, presupuesto, procesos y estadísticas con la intención de evaluar su impacto en la industria, el mercado y en la empresa. Así como proponer, impulsar y dirigir la implementación de las mejoras e innovaciones en el análisis de productos específicos adaptados a las necesidades del mercado actual.

#### **1.3.2.6 Gerencia de Servicios Compartidos**

Esta provee servicios internos con la más alta calidad posible y al menor costo. Cuenta con una Gerencia General al frente de todas sus actividades y operaciones dirigidas al gerente general.

#### **1.3.2.7 Gerencia de Unidades de Negocios**

Esta Gerencia abarca todas las unidades que prestan sus servicios directamente al cliente entre estos se tienen:

**Gobierno:** Esta unidad se dedica a ofrecer soluciones de comunicación a gran escala tanto para el sector industrial como el sector petrolero.

**Mercado Masivo:** Atiende a los clientes residenciales ofreciéndoles una amplia gama de productos y servicios aunado a la creación de diversas promociones para disminuir el costo de los mismos.

**Grandes Clientes:** Se encarga de planificar, estructurar y satisfacer los diversos requerimientos en el área de telecomunicaciones que comprenden desde compañías transnacionales a empresas nacionales tales como Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA) entre otras.

**Operadores de Telecomunicaciones:** Abarca todo aquello en lo que se refiere al tráfico internacional entrante, comercialización de las vías generales de telecomunicaciones y todo lo referente con los servicios de interconexión con otras operadoras.

**Telefonía Compartida:** Se encarga de ofrecer servicios de telecomunicación pública de calidad mundial dirigido a satisfacer necesidades de comunicación y, a su vez, ofrecer medios de pagos oportunos que faciliten a los clientes el uso de los servicios de telecomunicación con la mayor seguridad, calidad y disponibilidad.

**Cliente Comercial:** Tiene como objetivo el de facilitar soluciones en telecomunicaciones a miles de pequeñas y medianas empresas.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

En esta parte del proyecto se plasman hechos anteriores que guardan relación con el presente estudio, con el fin de aprovechar las teorías ya existentes, de tal manera que los investigadores puedan interpretar la problemática planteada con una mejor perspectiva y ampliar la información obtenida reforzando los conceptos.

- En el año 2000, el Ing. Lancruz Pérez, Ysmeri Sara realizó un trabajo de grado, el cual trata fundamentalmente de un sistema de elementos que desempeñan las siguientes funciones: evitar situaciones peligrosas para las personas, minimizar los daños provocados por condiciones anormales y aislar la zona donde aparece la falla de tal forma que el resto de la instalación continúe operando en las mejores condiciones posibles. **[1]**

- En el año 2007, el Ing. Arias Aparicio, José Damián desarrolló un trabajo de grado. Este trabajo consiste en una red de tierra adecuada que cumpla con la función de proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierras, ya sea que se deban a una falla de cortocircuito o a la operación de un pararrayos y evitar que, durante la circulación de corrientes, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación. **[2]**

- En el año 2006 el Ing. Luís Coa desarrollo un programa basado en la herramienta Matlab de Mathworks Inc., para el cálculo de sistemas de puesta a tierra para la empresa Inelectra CA. [3]

- En el año 2005 el Ing. Carlos Hernández desarrolló un trabajo en el cual presento el estudio sobre las condiciones del sistema de puesta a tierra de las subestaciones de distribución de Semda y mejoras del mismo. [4]

- En el año 2005 ing. José Peña presentó un trabajo de grado en el cual expuso la evaluación sobre las condiciones del sistema de puesta a tierra y protecciones de un taladro de perforación de petróleo de PDVSA y propuestas para mejoras del mismo. [5]

## **2.2. Definiciones y conceptos básicos**

### **2.2.1 Sistema de Puesta a Tierra**

Los Sistemas de Puesta a Tierra tienen como finalidad conseguir que en el conjunto de las instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan peligrosas diferencias de potencial, y al mismo tiempo permitir el paso a tierra de las corrientes de fallas ó las de descargas de origen atmosférico.

La puesta a tierra se establece principalmente para limitar la tensión que con respecto a tierra se puedan presentar en un momento dado en las partes metálicas que constituyen la instalación, asegurar el accionamiento de las protecciones y eliminar o disminuir el peligro que supone una falla en el aislamiento de la instalación.

Un sistema de protección eléctrica bien diseñado y debidamente ejecutado es necesario para disipar descargas a tierra antes de que entren a la instalación.

Aunque es prácticamente imposible evitar que parte de una descarga ingrese a la instalación, se puede garantizar que la mayor parte de la misma sea drenada a tierra.

Un Sistema de Puesta a Tierra mal diseñado pueden resultar en: Operaciones erráticas de los equipos, ruidos en las líneas y circuitos, fallas prematuras de componentes, problemas de seguridad eléctrica.

### **2.2.2 Propiedades o Atributos**

Un sistema de Puesta a Tierra bien diseñado, debe poseer las siguientes propiedades:

- Provee un punto común de referencia a tierra para la debida operación de los equipos.
- Controla diferencias de voltaje para reducir la posibilidad de “shock” eléctrico al personal.
- Reduce ruidos al establecer rutas de baja impedancia entre:
  - Bastidores
  - Tierra

- Componentes

- Provee un grado de estabilidad durante la vida útil de los equipos.
- Protege los equipos de daños e incendios al poner a tierra las sobrecorrientes de fallas.
- Resistencia de Aislamiento.
- Capacitancia.

### **2.2.3 Elementos**

Un Sistema de Puesta a Tierra tiene los siguientes elementos:

- Electrodo de puesta a tierra.
- Neutro del servicio eléctrico A.C.
- Tuberías metálicas de agua.
- Conductores de puenteo.
- Conductores a tierra para:
  - Electrodo
  - Equipos

Existen dos (2) tipos principales de Puestas a Tierra:

- 1) Puesta a tierra de protección.
- 2) Puesta a tierra de servicio.

La puesta a tierra de protección se instala para prevenir accidentes personales, en caso de contactos directos ó indirectos.

La puesta a tierra del servicio es la que pertenece al circuito de trabajo, es decir, el centro de estrella de generadores y transformadores.

En esta norma se tratará expresamente sobre la puesta a tierra de protección, al menos que se indique lo contrario.

Reglamentariamente se prescribe que los circuitos de puesta a tierra han de formar una línea eléctricamente continua, en la que no podrán incluirse en serie cargas ni elementos metálicos, cualesquiera que sean estos. En todos los casos, las conexiones de las cargas y los elementos metálicos al circuito de puesta a tierra se efectuarán en paralelo

### **2.2.3 Tierra de Servicios**

Los sistemas eléctricos se conectan a tierra con el fin de limitar la tensión que pudiera aparecer en ellos, por estar expuestos a descargas atmosféricas, por interconexión en casos de fallas con sistemas de conexiones superiores, o bien, para limitar el potencial máximo con respecta a tierra, producto por la tensión nominal del sistema. Este tipo de conexión se denominará Tierra de Servicio.

#### **2.2.4 Tierra de Protección**

Los equipos eléctricos se conectan a tierra para evitar que la carcasa o cubierta metálica de ellos represente un potencial respecto de tierra que pueda significar un peligro para el operario u usuario del equipo. Este tipo de conexión a tierra se denominará Tierra de Protección.

#### **2.2.5. Tierra de Referencia**

Se entiende por tierra de referencia a la tierra que se le asigna potencial.

#### **2.2.6. Electrodo de Tierra**

Se entiende por electrodo de tierra a un conductor (cable, barra, tubo, placa, etc.) enterrado en contacto directo con la tierra o sumergido en agua que este en contacto con la tierra.

#### **2.2.8. Mallas de Tierra**

Es un conjunto de electrodos unidos eléctricamente entre sí.

#### **2.2.9. Conexión a Tierra**

Es la conexión eléctrica entre una malla o electrodo en tierra y una parte exterior. Las partes de conexiones a tierra no aisladas y enterradas, se consideran como parte de la malla de electrodo.

### **2.2.10. Poner a Tierra**

Cuando un equipo o instalación está conectado eléctricamente a una malla o electrodo a tierra.

### **2.2.11 Resistividad de un Terreno**

Es la relación entre la tensión de la malla con respecto a tierra de referencia y la corriente que pasa a tierra a través de la malla.

### **2.2.12 Gradiente Superficial**

Es la diferencia de potencial que existe entre dos puntos de la superficie del terreno o del agua, distante entre sí en 1 m.

## **2.3. Objetivos del sistema de puesta a tierra**

- Habilitar la conexión a tierra en sistemas con neutro a tierra.
- Proporcionar el punto de descarga para las carcasas, armazón o instalaciones.
- Asegurar que las partes sin corriente, tales como armazones de los equipos, estén siempre a potencial de tierra, a un en el caso de fallar en el aislamiento.
- Proporcionar un medio eficaz de descargar los alimentadores o equipos antes de proceder en ellos a trabajos de mantenimiento.

### **2.3.1 Diferencias entre la conexión de tierra y neutro**

Un error común en la conexión de un equipo o en la transmisión de tensión en un conducto es la confusión entre tierra (GND) y neutro (N). Aunque idealmente estos dos terminan conectados en algún punto a tierra, la función de cada uno es muy distinta. El cable de neutro es el encargado de la transmisión de corriente y el conductor de tierra es una seguridad primaria de los equipos contra el shock eléctrico. Identificarlos como si cumplieran la misma función sería anular la seguridad de tierra contra el shock eléctrico. En el hipotético caso se tome el neutro y tierra como la misma cosa, cuando el cable de tierra se corte o interrumpa, la carcasa de los equipos que estén conectados a esta tierra-neutro tendrá el potencial de línea y así toda persona o ser que tenga contacto con ello estará expuesta a una descarga eléctrica.

### **2.3.2 Tipos de sistemas de puesta a tierra**

De acuerdo a su aplicación los sistemas de puesta a tierra son:

- Puesta a tierra para sistemas eléctricos.
- Puesta a tierra de los equipos eléctricos.
- Puesta a tierra en señales electrónicas.
- Puesta a tierra de protección electrónica.
- Puesta a tierra de protección atmosférica.

### **2.3.3 Puesta a tierra para sistemas eléctricos**

El propósito de poner a tierra los sistemas eléctricos es limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o de

contactos no intencionales con cables de voltajes más altos. Esto se realiza mediante un conductor apropiado a la corriente de falla a tierra total del sistema, como parte del sistema eléctrico conectado al planeta tierra.

#### **2.3.4 Puesta a tierra de los equipos eléctricos**

Su propósito es eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro la vida y las propiedades, de forma que operen las protecciones por sobrecorriente de los equipos. Utilizado para conectar a tierra todos los elementos de la instalación que en condiciones normales de operación no están sujetos a tensiones, pero que pueden tener diferencia de potencial con respecto a tierra a causa de fallas accidentales en los circuitos eléctricos, así como los puntos de la instalación eléctrica en los que es necesario establecer una conexión a tierra para dar mayor seguridad, mejor funcionamiento y regularidad en la operación y en fin, todos los elementos sujetos a corrientes eléctricas importantes de corto circuito y sobretensiones en condiciones de falla. Generalmente la resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 Ohms. Para la conexión a tierra de los equipos, se instalan en los edificios, una barra de cobre electrolítico de dimensiones adecuadas, instaladas a unos 60 cm sobre el nivel de piso con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de fuerza en las concentraciones de tableros de cada piso.

#### **2.3.5 Puesta a tierra en señales electrónicas**

Para evitar la contaminación con señales en frecuencias diferentes a la deseada. Se logra mediante blindajes de todo tipo conectados a una referencia cero o a tierra.

### **2.3.6 Puesta a tierra de protección electrónica**

Para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por sobre voltajes, se colocan dispositivos de protección de forma de limitar los picos de sobre tensión conectados entre los conductores activos y tierra. La puesta a tierra de los equipos electrónicos y de control, consta de una serie de electrodos instalados remotamente al edificio. En el interior se instala una barra de cobre electrolítico de dimensiones adecuadas montada a 2.60 metros sobre nivel de piso terminado con una leyenda indicativa, que es de uso exclusivo para el sistema de electrónica. La resistencia a tierra máxima en este sistema debe ser de unos 2 Ohms, cuando no se alcanza la resistencia deseada, se instala algún elemento químico para reducir la resistividad del terreno y alcanzar así, la resistencia a tierra requerida.

### **2.3.7 Puesta a tierra de protección atmosférica**

Como su nombre lo indica, se destina para drenar a tierra las corrientes producidas por descargas atmosféricas (RAYOS) sin mayores daños a personas y propiedades.

Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger o se conforma con electrodos tipo copperweld y cable tipo pararrayos de cobre Clase 1 de 27 hilos. La distancia del edificio con respecto al sitio donde se entierre el electrodo, no debe ser inferior a 2,50 metros y debe quedar totalmente aislado de los sistemas de tierras para fuerza y para electrónica. La resistencia a tierra en cualquier punto del sistema, no debe ser mayor a 10 ohms, para lo cual en caso necesario, se implementarán arreglos de

electrodos en Delta y/o un agregado de elementos químicos para reducir la resistividad del terreno, recomendados por el CEN en el artículo 250-83.

### **2.3.8 Puesta a tierra de protección electrostática**

Sirve para neutralizar las cargas electroestáticas producidas en los materiales dieléctricos. Se logra uniendo todas las partes metálicas y dieléctricas, utilizando el planeta tierra como referencia de voltaje cero. Como se pudo apreciar anteriormente cada sistema de tierras debe cerrar únicamente el circuito eléctrico que le corresponde.

### **2.3.9 Puesta a tierra para sistemas eléctricos**

Los sistemas eléctricos se conectan a tierra con el fin de limitar la tensión que pudiera aparecer en ellos, por estar expuestos a descargas atmosféricas, por interconexión en casos de fallas con sistemas de conexiones superiores, o bien, para limitar el potencial máximo con respecto a tierra, producto por la tensión nominal del sistema. Este tipo de conexión se denominará Tierra de Servicio. Se conectarán a tierra los elementos de la instalación necesarios como son:

- Los neutros de los transformadores, que lo precisan en instalaciones o redes con neutro a tierra de forma directa o a través de resistencias o bobinas.
- El neutro de los alternadores y otros aparatos o equipos que lo precisen.
- Los circuitos de baja tensión de transformadores de medida.

- Los limitadores, descargadores, autoválvulas, pararrayos, para eliminación de sobretensiones o descargas atmosféricas.
- Los elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

## 2.4. 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.

Debido a que la resistividad del terreno es un factor de suma importancia en el comportamiento de electrodos de tierra, necesita discutirse en más detalle. La resistividad del terreno se expresa en [ohm-metro]. Esta unidad es la resistencia entre dos caras opuestas de un cubo de 1 metro por lado de tierra homogénea. El valor obtenido así es:

Tabla 2.1 Valores típicos de resistividad de 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

Los dos factores principales que afectan el valor de resistividad de suelo son la porosidad del material y 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.

Como se mencionó previamente, es muy poco frecuente encontrar terreno que puede describirse como terreno uniforme para propósitos de puesta a tierra. Estamos interesados en el terreno hasta una cierta profundidad, que corresponde a 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. La temperatura y el contenido de agua 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. Minerales y sales disueltas en el agua pueden ayudar 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. Aún cuando existe información respecto del efecto que éste tiene en barras individuales, no se puede aún garantizar el efecto en grandes

subestaciones que abarcan una gran área. La resistividad tan alta del hielo (tabla 6-1) comparada con la del agua muestra por qué es necesario instalar los electrodos bajo la línea de congelamiento, en zonas heladas. Esta línea puede estar más profunda que los 0,6 metros típicos, en zonas montañosas.

## **2.5. Tipos de corrosión**

### **2.5.1 Corrosión en aire**

En el aire, la corrosión es causada normalmente ya sea por reacción química con soluciones en agua de lluvia que ha disuelto gases presentes en el aire o por partículas de polvo de procesos industriales. También puede ocurrir corrosión debido a conexiones bimetálicas no apropiadas o contacto con otros materiales. Este tipo de corrosión es la menos problemática y generalmente puede ser controlada por buenas prácticas de construcción, incluyendo selección de materiales. Las normas indican la guía necesaria para esto. Por ejemplo, selección y adaptación de conexiones bimetálicas, incluyendo la orientación física, cómo excluir el agua, los materiales de contacto necesarios, etc. Las normas también incluyen una guía para colocación de conductores de tierra, por ejemplo la norma británica BS 7430 señala que los conductores de aluminio no deben ser instalados directamente en estructuras de concreto, debido al riesgo de corrosión.

### **2.5.2 Corrosión Subterránea**

La corrosión subterránea toma lugar generalmente como una combinación de dos formas: la corrosión general uniforme que avanza hacia una pérdida total en peso del componente y la corrosión de desgaste en

áreas pequeñas, selectivas. Este último tipo de corrosión puede ser seria para tubos pero menos importante para planchas o cintas de puesta a tierra. También es importante considerar que hay otros equipos presentes en el área y que ellos pueden influenciar en el riesgo de corrosión. Por ejemplo, una tubería cercana puede ser instalada con un esquema de protección catódica de corriente impresa que puede interactuar con los nuevos sistemas de puesta a tierra. También puede existir un voltaje residual permanente en la instalación eléctrica que puede ya sea afectar la tasa de corrosión (influenciada por corriente alterna) o causar acción electrolítica en el entorno (influenciada por corriente continua).

Hay dos fuentes de corrosión general, que son la corrosión bimetalica y la corrosión química.

### **2.5.3 Corrosión bimetalica**

Cuando se unen metales diferentes en el interior de un fluido eléctricamente conductivo, tal como ocurre en la mayoría de las situaciones bajo tierra, existe la posibilidad de corrosión bimetalica. El metal corroído preferencialmente será el metal más susceptible. Este efecto de sacrificio se explota en muchas técnicas para reducir la corrosión. El metal más susceptible será aquel que es menos “noble”. La Tabla 11-1 muestra la escala de los metales más comunes en orden descendiente de nobleza. En presencia de un electrolito, el metal más noble se convierte en catódico respecto del metal de orden inferior, que se convierte en anódico. El metal anódico se corre. El diseño debiera considerar que las componentes más pequeñas sean más nobles que las más grandes. La regla de las “áreas” proporciona un método para estimar el riesgo de corrosión galvánica. Para aplicarla, el área anódica (por ejemplo del acero) se divide por el área

catódica (por ejemplo de cobre). A medida que la razón entre las áreas anódicas y catódicas disminuye, la tasa de corrosión se incrementa drásticamente. Por ejemplo si una tubería de acero se une a una gran tubería de cobre, la razón de las áreas es pequeña y en condiciones apropiadas ocurre una rápida corrosión. Puede experimentarse un problema adicional, la corrosión severa en una junta entre metales diferentes, por ejemplo cobre y aluminio o cobre y acero. En aquellas partes donde la unión no esté protegida y sea accesible a la humedad, puede ocurrir un alza significativa en la resistencia de contacto eléctrico. La importancia de este tipo de corrosión, es que debe tenerse cuidado para asegurar compatibilidad entre diferentes metales empleados, es decir, el potencial eléctrico (indicado en la serie galvánica) entre ellos debe mantenerse en un mínimo para prevenir la acción galvánica. Un caso particular es la combinación de barras de tierra galvanizadas y barras de tierra de cobre cobrizadas. La capa de zinc en las barras galvanizadas se comporta como el ánodo para el más noble cátodo de cobre. Puede entonces presentarse corrosión en la capa de zinc, dejando expuesto al núcleo de acero de la barra galvanizada, el cual a su vez ofrecerá una relativamente baja resistencia a la corrosión al suelo que los rodea. Note también que algunas veces la capa de zinc puede ser removida debido a la corrosión "general" del suelo (por ejemplo, en suelos con alto contenido de cloruro).

#### **2.5.4 Corrosión Química**

El suelo puede ser neutro, ácido o alcalino; el estado relativo de un suelo se representa en la escala pH como sigue:

Índice pH 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

La acción química tomará lugar entre el metal y cualquier ácido o alkali en solución en el suelo. La tasa de corrosión será influenciada por la nobleza del metal, es decir, menor su nobleza, más rápidamente se corroe.

Nuevamente las normas dan una guía; el material que rodea el electrodo es conveniente que sea relativamente neutro. Otros aspectos de la corrosión que debieran considerarse son:

- Corrosión por fatiga (esfuerzos internos). Pueden encontrarse fallas por fatiga bajo condiciones de sollicitación menos severa de la que podría esperarse cuando el efecto es agravado por la presencia de líquido o atmósfera corrosiva. Puede verse acentuada en ambientes corrosivos especialmente en presencia de tensiones internas retenidas, causadas por trabajo en frío.

- Corrosión por grietas. Cuando se forma una grieta, como puede suceder en los pequeños espacios entre ambas partes de una pestaña o de juntas, puede formarse donde el agua es estática y probablemente llega a ser anaeróbica. Esto puede acelerar la corrosión en algunos metales, especialmente en el acero inoxidable común donde sus condiciones superficiales llegan a ser activas más bien que pasivas. Como se muestra en la Tabla 11-1, esto alterará su posición en la serie electroquímica. Además, este tipo de corrosión puede afectar a las barras recubiertas con cobre. Si la capa de cobre se desgasta y remueve del núcleo de acero, la corrosión será más probable.

- Descomposición de materia orgánica. Esto implica el crecimiento de musgo, liquen y materias similares. El cobre no es afectado por esto y es inhóspito para el crecimiento de organismos.

## **2.6 Resistencia a la corrosión**

Aunque la resistencia a la corrosión no es tan fácil de cuantificar, como muchas otras propiedades mecánicas, afecta los costos de vida útil, por ejemplo una buena resistencia a la corrosión resulta en menores costos por falla del servicio. Esta es una de las muchas razones porque el cobre tan frecuentemente se selecciona como un material de ingeniería.

### **2.6.1 Oxidación atmosférica**

El cobre forma dos óxidos, ambos conductores. En aire húmedo se forma primero óxido cuproso y luego gradualmente oscurece hacia el pardo a negro del óxido cúprico. Cuando el cobre se calienta, el óxido de cobre se forma más rápidamente y puede perderse por templado en agua.

Cuando el cobre se encuentra a la intemperie y expuesto al agua de lluvia que contiene dióxido de carbono disuelto, se forma la típica pátina verde protectora.

La pátina o los óxidos que se forman son relativamente delgados y forman una capa que inhibe la corrosión posterior.

### **2.6.2 Corrosión subterránea**

Muchas de las aplicaciones del cobre y sus aleaciones se fían en la buena resistencia a la corrosión particularmente en muchos ambientes acuosos, químicos y subterráneos. Se han descubierto objetos que datan de antes de 4.000 A.C., en buenas condiciones, después de haber quedado enterrados por inundaciones en los tiempos de Mesopotamia. Los egipcios

usaron extensamente cobre en la arquitectura, incluso fabricaban tuberías de agua enrollando cintas de cobre. Secciones de tuberías de agua que fueron enterradas en yeso 5.000 años atrás, han sido recuperadas en condiciones utilizables. Implementos de cobre que datan de antes del 2.500 A.C., se han encontrado enterrados en varias partes de las islas británicas.

El uso del cobre para puesta a tierra es más reciente y se ha comportado bien en la mayoría de las condiciones de suelo. La experiencia ganada con las tuberías de cobre enterradas es una manera útil de ilustrar esto y permite efectuar comparaciones.

Los aceros inoxidable comunes se muestran con valores para condiciones de exposición pasiva normal, junto con las condiciones de superficie activa encontradas a menudo en grietas. El cobre está hacia el rango más noble de la serie, pero tiene un precio significativamente menor que la mayoría de los metales nobles, lo cual nuevamente explica su uso para propósitos bajo tierra.

Es interesante indicar que además de sus buenas propiedades anti-corrosivas, el cobre es un elemento esencial en la dieta de humanos y animales y esencial en el crecimiento de la mayoría de las plantas. No se le considera normalmente como un metal tóxico nocivo.

## **2.7 Grafito**

El grafito es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono junto al diamante y los fullerenos. A presión atmosférica y temperatura ambiente es más estable el grafito que el diamante, sin embargo la descomposición del diamante es tan extremadamente lenta que

sólo es apreciable a escala geológica. Fue nombrado por Abraham Gottlob Werner en el año 1789 y el término grafito deriva del griego γραφειν (graphein) que significa escribir. También se denomina plumbagina y plomo negro.

El grafito se encuentra en yacimientos naturales y se puede extraer, pero también se produce artificialmente. El principal productor mundial de grafito es China, seguido de India y Brasil.

### **2.7.1 Estructura del grafito**

En el grafito los átomos de carbono presentan hibridación  $sp^2$ , esto significa que forma tres enlaces covalentes en el mismo plano a un ángulo de  $120^\circ$  (estructura hexagonal) y que un orbital perpendicular a ese plano quede libre (estos orbitales deslocalizados son fundamentales para definir el comportamiento eléctrico del grafito). El enlace covalente entre los átomos de una capa es extremadamente fuerte, sin embargo las uniones entre las diferentes capas se realizan por fuerzas de Van der Waals e interacciones entre los orbitales, y son mucho más débiles.

Esta estructura laminar hace que el grafito sea un material marcadamente anisótropo.

### **2.7.2 Propiedades del Grafito**

Es de color negro con brillo metálico, refractorio y se exfolia con facilidad. En la dirección perpendicular a las capas presenta una conductividad de la electricidad baja y que aumenta con la temperatura, comportándose pues como un semiconductor. A lo largo de las capas la

conductividad es mayor y disminuye al aumentar la temperatura, comportándose como un conductor semimetálico.

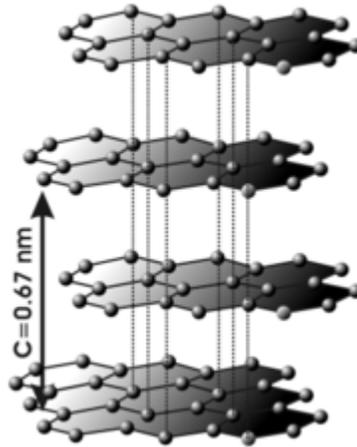


Figura 2.1: Estructura atómica del grafito.

### 2.7.3 Aplicaciones del grafito

- El grafito es un material refractario y se emplea en ladrillos, crisoles, etc.
- Al deslizarse las capas fácilmente en el grafito, resulta ser un buen lubricante sólido.
- Se utiliza en la fabricación de diversas piezas en ingeniería, como pistones juntas, arandelas, rodamientos, etc.

- Este material es conductor de la electricidad y se usa para fabricar electrodos. También tiene otras aplicaciones eléctricas.
- Se emplea en reactores nucleares, como moderadores y reflectores.
- El grafito mezclado con una pasta sirve para fabricar lápices.
- Es usado para crear discos de grafito parecidos a los discos de vinilo salvo por su mayor resistencia a movimientos bruscos de las agujas lectoras.
- Se puede crear Grafeno, el material más conductor y resistente que existe, futuro sustituto del silicio en la fabricación de chips.

#### **2.7.4 Compuestos de Intercalación de Grafito**

Distintas moléculas o iones pueden penetrar en las capas del grafito. Por ejemplo el potasio puede ceder un electrón al grafito, quedando el ion de potasio,  $K^+$ , entre las capas. Este electrón contribuye a aumentar la conductividad que presentaba el grafito.

Se pueden preparar diferentes compuestos de intercalación con distintas estequiometrías y distintas especies. En algunos casos la conductividad resultante es mayor, como en el caso del potasio, y es lo que ocurre generalmente, pero en otros, como por ejemplo con flúor, es menor.

#### **2.7.5 Propiedades físicas del grafito**

- **Sistema:** Hexagonal.

- **Hábito:** se encuentra en forma de pequeños cristales hexagonales y forma agregados compactos, escamosos, terrosos y esféricos.
- **Dureza:** 1.
- **Densidad:** 2,2.
- **Color:** Gris metálico.
- **Raya:** negra brillante.
- **Brillo:** submetálico. Deja pasar las radiaciones infrarrojas, y en general es buen conductor del calor y de la electricidad.

Tabla 2.2. Propiedades físicas del grafito.

<b>Color:</b>	Gris.
<b>Raya:</b>	Negra.
<b>Brillo:</b>	Metálico o térreo.
<b>Dureza:</b>	1 o 2
<b>Densidad:</b>	2.23 g/cm <sup>3</sup>
<b>Óptica:</b>	Opaco. Color gris azul oscuro, fuertemente pleocroico y anisótropo.
<b>Otras:</b>	Muy blando y pinta el papel.

#### 2.7.6 Propiedades químicas

Formula química: C

- **Clase:** Elemento nativo

- **Subclase:** No metálico
- **Etimología:** Deriva del término griego "grafein" que significa escribir.
- **Sistema y clase:** Hexagonal 6/m2/m2/m
- **Grupo espacial:**  $P6_3/mmc$   $a = 2.46 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.74 \text{ \AA}$ ,  $\gamma = 120^\circ$ ;  $Z = 4$
- **Líneas de DRX(intensidades)** d's: 3.36(10) - 2.03(5) - 1.675(8) - 1.232(3) - 1.158(5).

El grafito es carbono puro, aunque puede venir acompañado por óxido de hierro. Inatacable por ácidos.

## 2.8. Forma de presentarse el grafito

Cristales aciculares o fibrosos, siendo frecuentes masas hojosas, escamosas, radiadas o granulares.

El grafito es la forma más estable del carbono. Es la modificación hexagonal del carbono y según los estudios de su estructura, pertenece a la clase dipiramidal dihexagonal.

### 2.8.1. Origen del grafito

Las formaciones de grafito hay que referirlas, en gran parte, a depósitos carbonosos sedimentarios transformados por el metamorfismo; en otros casos revelan origen inorgánico, puesto que se explican por ser el carbono

(C) procedente acaso de carburos o de combinaciones carbonílicas ascendentes. Su origen es metamórfico de contacto, metamórfico en los mármoles, gneis y esquistos cristalinos, durante el metamorfismo de las hullas.

### **2.8.2 Localización del grafito**

Hasta el momento, en Venezuela, sólo se han ubicado manifestaciones de grafito de alta calidad, potencialmente económicas, en la Península de Paraguaya en el Estado Falcón: el grafito se presenta con diseminaciones y masas en secuencias gnéisicas y graníticas, asociada a una zona hidrotermal extensa, caracterizada por un alto contenido de seriecita, Pirita, Grafito y Feldespato. Aún cuando la región no ha sido investigada geoeconómicamente, la extensa superficie mostrando grafito de alta calidad, hace suponer la existencia de reservas.

## **2.9 Sistemas De Puesta a Tierra En Comunicaciones**

En esta etapa se obtuvo la información referente a las funciones de los sistemas de puesta a tierra, su utilidad e importancia, conocer como ayudan a prevenir las fallas y evitar que las instalaciones, equipos y personal sufran daños. Presentando una propuesta nueva e innovadora, los electrodos de grafito surgen como una nueva alternativa de sistemas de puesta a tierras, por sus características y propiedades.

Anteriormente a los Sistemas de Puesta a Tierra no se le daba la importancia requerida. Hoy en día, el rápido avance de la tecnología en el ámbito de las telecomunicaciones ha permitido la aparición e implantación de

equipos y sistemas digitales sumamente sofisticados en su concepción electrónica, y por el contrario, muy vulnerables ante las posibles interferencias a que pueden estar expuestos al coexistir con agentes de naturaleza electromagnéticas.

Por ello, se hace necesario la implantación de un sistema adecuado de protección eléctrica, a fin de garantizar la seguridad tanto del personal que labora en la Planta Telefónica como de los equipos asociados, al mismo tiempo contribuye a la disminución del ruido, mejorando así la calidad del servicio.

El presente proyecto establece los Sistemas de Puesta a Tierra a ser utilizados en las instalaciones de la administración telefónica, a fin de que los usuarios del mismo tengan una herramienta útil para realizar los proyectos de Ingeniería, Adecuaciones, Inspección y Mantenimiento de estos sistemas de protección en las diferentes Centrales Telefónicas y Estaciones de Transmisión.

Los procedimientos aquí descritos son aplicables en las áreas de Ingeniería, Operación y Mantenimiento de la Planta Interna, y se presenta como un instrumento práctico de las Normas de protección eléctrica.

Es importante mencionar, que lo establecido en esta Norma está basado en las Prácticas GTE de Sistemas de Puesta a Tierra, aplicables a las instalaciones de CANTV.

Los materiales, equipos y herramientas utilizados en este tipo de instalación de Sistemas de Puesta a Tierra, deben ser los estandarizados por CANTV.

En el presente proyecto de investigación se tomaron como normas de Sistemas de Puesta a Tierra, los siguientes:

- a.- IEEE Std. 4-2001. IEEE standard techniques for high voltage testing.
- b.- Norma COVENIN 200 – 2004. Código Eléctrico Nacional. Artículo 250.
- c.- IEEE Std 80 – 2000. Guide for safety in AC substations grounding.
- d.- IEC 62305-2006-1. Protection against lightning. Part 1. General principles.
- e.- UNE-EN 50164-2-2002. Componentes de protección contra el rayo. Parte 2: Requisitos para conductores y electrodos de tierra.
- f.- NFPA 780-2004. Standard for the Installation of Lightning Protection Systems.
- g.- NEMA GR 1-2001. Grounding Rod Electrodes and Grounding Rod Electrode Couplings.

## **2.10 Aspectos técnicos**

Las Centrales Telefónicas, equipos y redes de planta externa deben estar protegidas para:

- Prevenir daños a los clientes, empleados y público en general.
- Disminuir ruidos por inducción, daños a la propiedad y a los equipos.

Las fuentes más dañinas de perturbaciones eléctricas en un Centro de Telecomunicaciones y sus equipos asociados son:

a) Las descargas atmosféricas (Rayos), las cuales afectan fundamentalmente a:

- Equipos terminales.
- Cables y equipos que constituyen la Planta Interna.
- Centrales Fijas, Centrales Móviles, U.R.L y Estaciones de Transmisión.

b) Los Sobrevoltajes en las líneas de suministro de energía eléctrica, las cuales pueden ser producidas por:

- Descargas eléctricas que viajan en las líneas de alta tensión.
- Fallas de fase a tierra.
- Fallas entre fases.
- Desconexiones de fases.

c) Acoplamiento de los circuitos, los cuales son producidos por:

- Conducción (influencia de los campos eléctricos).
- Inducción (influencia de los campos magnéticos).

Las protecciones eléctricas para un Centro de Telecomunicaciones y sus equipos asociados no se pueden implementar al azar, sino que deben ser estrictamente planificadas con la finalidad de garantizar:

- Seguridad a los operadores de los equipos y/o plantas.

- Proveer una baja impedancia, para que en el momento de presentarse una perturbación eléctrica ella tenga un camino directo, rápido y expedito para que drene a tierra.
- Proveer la existencia de un punto o vía común de referencia para poder medir con precisión y exactitud la resistencia de protección.
- Reducción de las magnitudes de sobrevoltajes que viajan por las líneas de alta tensión hacia la red de alimentación.

## **2.11 Tipos De Conexiones**

Existen tres (3) tipos de conexiones para un Sistema Puesta a Tierra:

Compresión:

- Producen buenas conexiones ya que presentan alta conductividad.
- Proveen baja impedancia.
- Son de larga duración.
- Se puede utilizar con conductores sólidos o trenzados.

Soldaduras Exotérmicas:

- Presentan una altísima conductividad ya que el paso de la corriente se produce sin discontinuidad eléctrica.
- Proveen muy baja impedancia.
- De 20 a 30 años de garantía por conexión.
- Se pueden usar entre conductores y barras de diferentes calibres.

- Bajo mantenimiento.

Mecánicas:

- Son conexiones poco confiables ya que presentan baja conductividad.
- Proveen alta impedancia en comparación con las de compresión.
- Son de corta duración.
- Necesitan ser ajustados.
- Requieren de mantenimiento frecuente.

Para garantizar una buena conexión en un sistema de puesta a tierra, los estándares internacionales para el área de protecciones eléctricas en un Centro de Telecomunicaciones y sus equipos asociados recomiendan el uso de sólo dos tipos de conexiones, las cuales son:

- a) Compresión.
- b) Soldadura Exotérmica.

## **2.12 Resistencia de puesta a tierra**

La resistencia de un sistema de puesta a tierra viene definida fundamentalmente por tres (3) factores:

- a) La resistencia eléctrica propia de los materiales conductores que constituyen la instalación.
- b) La resistencia de contacto entre el electrodo y el terreno circundante a él.
- c) La resistividad del terreno que rodea al electrodo.

A Continuación, se presentan los valores de resistencia de puesta a tierra. Basado en la norma de CANTV para sistemas de puesta a tierra:

Central Telefónica Digital: (3) Ohm.

Central Telefónica Analógica: (5) Ohm.

Estaciones de transmisión: (2) Ohm.

Redes de Planta Externa: (25) Ohm.

Estación Protectora y FXB: No requiere valor de la resistencia de puesta a tierra; sólo requiere la presencia y conexión del electrodo.

### **2.13 Métodos de medición**

Entre los métodos de medición más utilizados tenemos el método de winer y el método de los 3 puntos:

#### **2.13.1 Método Caída de Potencial de los Tres Terminales para medir la resistencia**

Consiste en enterrar tres electrodos (A, B, X), se disponen en forma de triángulo, tal como se muestra en la figura 3.1 y medir la resistencia combinada de cada par:  $X+A$ ,  $X+B$ ,  $A+B$ , siendo X la resistencia de puesta a tierra buscada y A y B las resistencias de los otros dos electrodos conocidas.

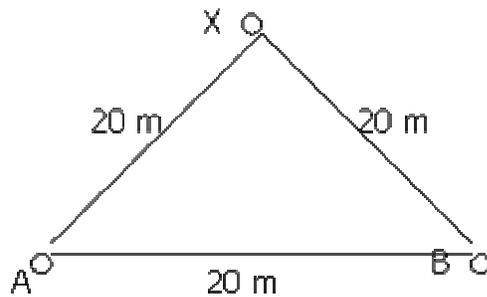


Figura 2.2. Método de las tres puntas.

Las resistencias en serie de cada par de puntos de la puesta a tierra en el triángulo serán determinadas por la medida de voltaje y corriente a través de la resistencia. Así quedan determinadas las siguientes ecuaciones:

$$R1= X+A \quad (\text{Ec.2.1})$$

$$R2= X+B \quad (\text{Ec.2.2})$$

$$R3= A+B \quad (\text{Ec.2.3})$$

De donde

$$X= (R1+R2-R3)/2 \quad (\text{Ec.2.4})$$

Este método es conveniente para medidas de resistencias de las bases de las torres, tierras aisladas con varilla o puesta a tierra de pequeñas instalaciones. No es conveniente para medidas de resistencia bajas como las de mallas de puesta a tierra de subestaciones grandes. El principal problema de este método es que A y B pueden ser demasiado grandes comparadas con X (A y B no pueden superar a 5X), resultando poco confiable el cálculo.

### 2.13.2 Método de la caída de potencial

Es el método más empleado, los electrodos son dispuestos como lo muestra la figura 2.3; E es el electrodo de tierra con resistencia desconocida; P y C son los electrodos auxiliares colocados a una distancia adecuada ( $\rho$ ). Una corriente ( $I$ ) conocida se hace circular a través de la tierra, entrando por el electrodo E y saliendo por el electrodo C. La medida de potencial entre los electrodos E y P se toma como el voltaje  $V$  para hallar la resistencia desconocida por medio de la relación  $V/I$ .

La resistencia de los electrodos auxiliares se desprecia, porque la resistencia del electrodo C no tiene determinación de la caída de potencial  $V$ . La corriente  $I$  una vez determinada se comporta como constante. La resistencia del electrodo P, hace parte de un circuito de alta impedancia y su efecto se puede despreciar.

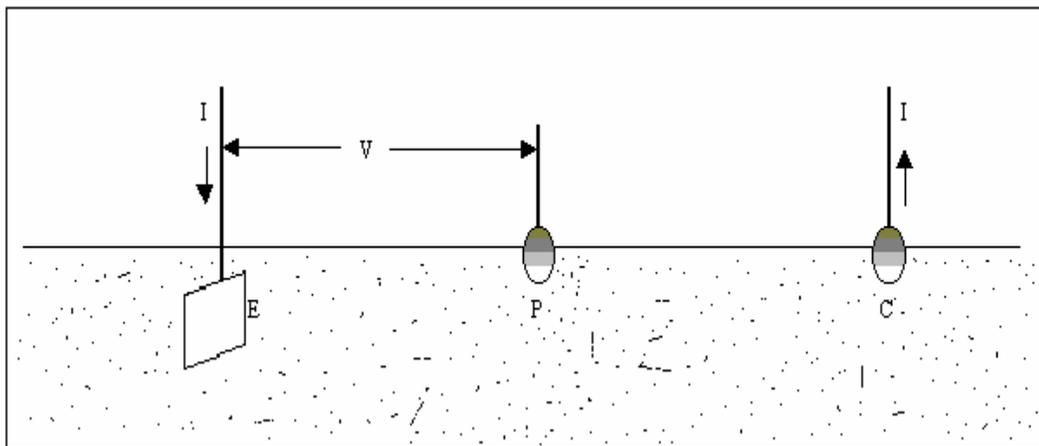


Figura 2.3. Método de la caída de potencial.

### 2.13.3 Método de la relación

En este método la resistencia a medir, es comparada con una resistencia conocida, comúnmente usando la misma configuración del electrodo como en el método de la caída de potencial. Puesto que este es un método de comparación, las resistencias son independientes de la magnitud de corriente de prueba.

La resistencia en serie  $R$  de la tierra bajo prueba y una punta de prueba, se mide por medio de un puente el cual opera bajo el principio de balance a cero.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Paso 1: Use el electrodo de corriente auxiliar (C2) para suministrar corriente al suelo.

Nota: La corriente sale de C2 y entra por los electrodos C1 y P1 previamente puenteados.

Paso 2: Mida el potencial a través del electrodo bajo prueba, sin que la resistencia del suelo del electrodo de potencial auxiliar P2, afecte la lectura. Véase la figura 3.3.

Paso 3: Use la ley de Ohm para calcular la resistencia partiendo de:

- a) Potencial medido.
- b) Corriente aportada.

**Paso 4:** Considere la descarga entre electrodos.

Nota: Si el electrodo P2 está muy cerca al electrodo de tierra en la prueba, solo parte de la caída de voltaje entre el electrodo a prueba y el suelo será registrado

**Paso 5:** Coloque el terminal C2 en la tierra remota que (para un solo electrodo) está a cinco veces la profundidad del electrodo.

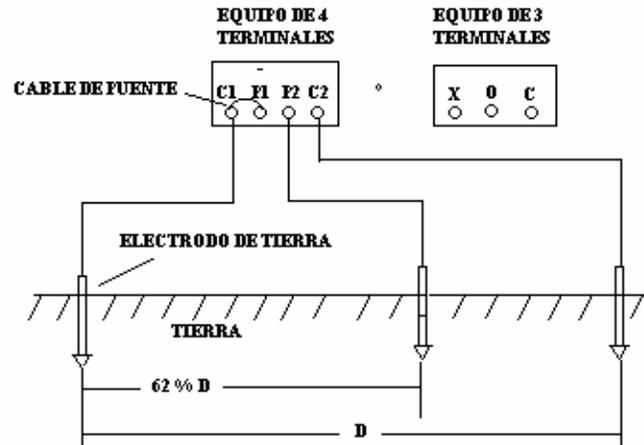


Figura 2.4. Método de los tres terminales

**Paso 6:** Ponga el terminal P2 a 62% de la distancia del C2, tal como se observa en la figura 2.5.

**Paso 7:** Mueva el terminal P2 cerca del electrodo a prueba.

**Paso 8:** Haga otra medida de resistencia.

**Paso 9:** Compare el valor de resistencia.

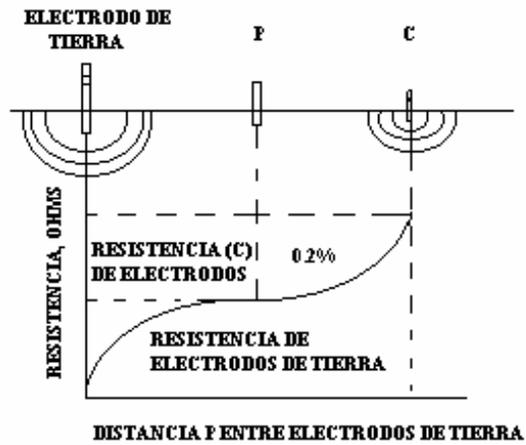


Figura 2.5. Electrodo de tierra vs resistencia

NOTA: El valor debe estar dentro de los 0,5 Ohm si P2 y C2 están colocados a distancias apropiadas. En la figura 3.5 se muestra lo que puede estar mal.

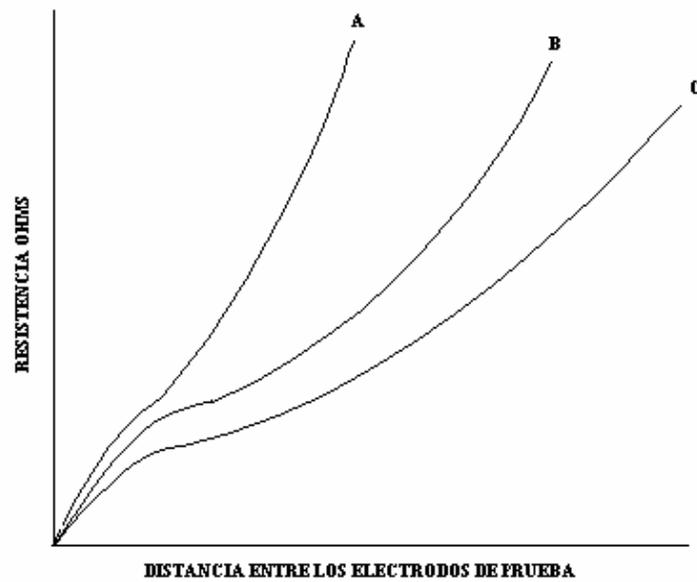


Figura 2.6. Resistencia Vs distancia entre los electrodos de prueba

Las curvas A y B son equivocaciones del perfil de resistencia donde el terminal C2 ha sido puesto a una distancia equivocada.

Si hay alguna duda con respecto a la profundidad del electrodo, diagrame un perfil de curvas de la resistencia, usando el método Caída de Potencial. El resultado deberá ser igual a la curva C de la figura anterior.

NOTA: Las curvas mostradas en la figura anterior son el resultado de tener los terminales C2 y P2 en la misma dirección (alineados).

#### **2.13.4 Método de Los Cuatros Puntos o de Wenner para Medir la Resistividad**

En 1915, el Dr. Frank Wenner del U.S. Bureau of Standards desarrolló la teoría de este método de prueba, y la ecuación que lleva su nombre.

Con objeto de medir la resistividad del suelo se hace necesario insertar los 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno, y por el contrario no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón  $V/I$  es conocida como la resistencia aparente. La resistividad

aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

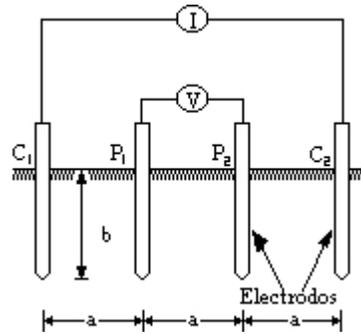


Figura 2.7 Modelo del método de los 4 puntos

En la figura 3.6 se observa esquemáticamente la disposición de los electrodos, en donde la corriente se inyecta a través de los electrodos exteriores y el potencial se mide a través de los electrodos interiores. La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho := \frac{4\pi \cdot A \cdot R}{\left[ 1 + \left[ \frac{2 \cdot A}{(A^2 + 4B^2)^{0.5}} \right] - \frac{2 \cdot A}{(4A^2 + 4B^2)^{0.5}} \right]} \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde

- $\rho$  : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m
- A : Distancia entre electrodos en metros.
- B : Profundidad de enterrado de los electrodos en metros
- R : Lectura del terrómetro en ohms.

Si la distancia enterrada (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A). O sea  $A > 20B$ , la siguiente fórmula simplificada se puede aplicar:

$$\rho := 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R \quad (\text{Ec. 2.6})$$

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio de terreno de un radio igual a la separación de los electrodos.

Como ejemplo, si la distancia entre electrodos A es de 3 metros, B es 0.15 m y la lectura del instrumento es de 0.43 ohms, la resistividad promedio del terreno a una profundidad de 3 metros, es de 8.141 ohm-m según la fórmula completa y de 8.105 ohms-m según la fórmula simplificada.

Se recomienda que se tomen lecturas en diferentes lugares y a 90 grados unas de otras para que no sean afectadas por estructuras metálicas subterráneas. Y, que con ellas se obtenga el promedio

El Método de los Cuatro Puntos es el más preciso para la medición de grandes volúmenes de suelo no perturbado.

NOTA: El Método de los Cuatro Puntos también es conocido como Método de Wenner. El primer paso para obtener un buen sistema de puesta a tierra es determinar la característica de la resistividad del suelo.

La ilustración mostrada en la figura 2.8 describe el arreglo típico para el Método de los Cuatro Puntos.

Para la medición de la resistividad del suelo, deberá utilizarse el procedimiento indicado a continuación. Se recomienda realizar como mínimo tres mediciones.

NOTA: En la escala de algunos instrumentos se lee hasta un valor de 1000, mientras que en otros se puede leer solamente hasta 999.

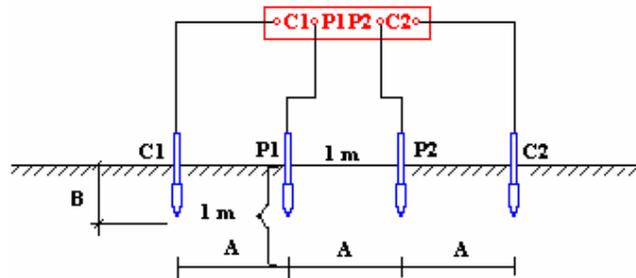


Figura 2.8 Arreglo típico de los 4 puntos

**Paso 1:** Colocar el electrodo de prueba en una línea recta de forma que:

A: Sea la separación entre dos electrodos adyacentes.

B: Sea la profundidad de cada electrodo.

**Paso 2:** Hacer circular una pequeña corriente ( $I$ ) entre los dos electrodos exteriores marcados como C1 y C2.

**Paso 3:** Utilizar un voltímetro de alta impedancia para medir el potencial ( $V$ ) entre los dos electrodos interiores marcados como P1 y P2.

**Paso 4:** Registrar la lectura del medidor ( $R$ ) en ohm.

**Paso 5:** Calcular la resistividad utilizando la fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

NOTA: Si el valor de B es 0,1 A, asumir B = 0 y la fórmula queda como:

$$\rho = 2 \pi A R \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Esta fórmula da el valor promedio de la resistividad del suelo para una profundidad igual a "A".

Paso 6: Hacer varias mediciones con separación y ubicación diferentes para obtener una indicación de las diversas capas de suelos o rocas.

## 2.14 Perfil de resistividad

Para obtener el perfil de resistividad en un punto dado, se utiliza el Método de Wenner con espaciamentos entre electrodos de prueba cada vez mayores. Por lo general, para cada espaciamiento se toman dos lecturas de resistividad en direcciones perpendiculares entre sí.

La figura 2.9 resultante de trazar el promedio de las mediciones de resistividad (R) contra distancia entre electrodos (a) se denomina perfil de resistividad aparente del terreno.



Figura 2.9 Perfil de resistividad.

### 2.14.1 Capa superficial arcillosa y húmeda, capa inferior rocosa: perfil de resistividad ascendente

En la figura 2.10 se muestra el perfil de resistividad ascendente de la parte norte de la zona urbana de León, Guanajuato. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.



Figura 2.10 Perfil de resistividad ascendente.

### 2.14.2 Capa superficial muy seca, capa inferior arenosa: perfil de resistividad descendente

En la figura 2.11 se muestra el perfil de resistividad descendente de la Zona urbana de Aguascalientes, Ags. Para simular su comportamiento se requiere de por lo menos utilizar los valores de 2 capas.



Figura 2.11 Perfil de resistividad descendente

### 2.14.3 Terreno rocoso y seco. Perfil de resistividad plano

En la figura 2.12 se muestra el perfil de resistividad plano de la zona del cerro de la Bufa en Zacatecas, Zacatecas. Para simular su comportamiento se puede utilizar la resistividad promedio.



Figura 2.12 Perfil de resistividad plano.

### **2.15 Precauciones de seguridad para realizar la medición**

- Manejar el instrumento de medición con sumo cuidado al realizar la medición, ya que los electrodos tienen tensiones altas y frecuencias elevadas que oscilan entre 70 y 110 Hz.
- Realizar las mediciones en días con cielo despejado, ya que cuando está nublado existe la posibilidad de ocurrencia de descargas atmosféricas creando perturbaciones al equipo de medición y la tensión de paso en la persona.
- Utilizar los implementos de seguridad: botas con suela de goma y guantes de goma para protegerse de los potenciales de 1 KV a 10 KV que puedan desarrollarse.
- Utilizar herramientas cubierta de goma.
- La persona que realiza la medición no puede tener un alto grado de sudoración corporal, debido a que la resistencia corporal disminuye.
- No permita que ninguna parte de su cuerpo complete el circuito entre puntos que presentan una alta diferencia de potencial.

## CAPITULO III

### DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

#### 3.1 Procedimiento

En la central de comunicaciones de la CANTV ubicada en el Pao se presentan inconvenientes y fallas ya que el sistema de puesta a tierra no cumplía con la normativa de CANTV ( $R < 5\text{ohm}$ ). Dicho sistema de puesta a tierra estaba conformado por dos barras químicas separadas a 6 metros una de la otra. Debido a esto se decidió instalar un sistema de puesta a tierra adicional conformado por electrodos de grafito de 1 m de longitud, e interconectar los dos sistemas, llevándose a cabo este proceso.

Se excavaron a mano dos fosas con dimensiones 1,20mts de largo, 0,40mts de ancho y 0,60mts de profundidad como se muestra en la figura 3.1 y 3.2 para colocar el núcleo de grafito de los electrodos y para la unión de ambos con un conductor se construyó una zanja que comunica las 2 fosas, las dimensiones de la zanja son 8mts de longitud por 0,20mts ancho y 0,20 mts de profundidad.

El calibre del conductor a utilizado fue el numero 2/0 AWG unidos mediante soldadura exotérmica.

Se realizaron varias mediciones de resistividad para identificar el área de terreno adecuado con menor resistividad. Estas medidas se realizaron utilizando un megger y el método aplicado fue el de los 4 puntos dando como resultado una resistividad de 2000 ohm metros.



Figura 3.1 Excavación de fosa



Figura 3.2 Fosa rellenas con material acondicionador

Una vez terminada la instalación de los electrodos se procedió a realizar las mediciones de resistencia al sistema de puesta a tierra conformado por los dos electrodos de grafito dio como resultado  $0,60\omega$ . Valor que está por debajo de lo exigido por la norma de CANTV, mientras que el sistema de puesta a tierra conformado por la torre, barras químicas, cerca y todo lo existente en la estación ofrece como resultado  $12,4 \omega$ . valor que está por encima de la norma de CANTV

Con el fin de equipotencial ambos sistemas de puesta a tierra se interconectaron entre si, a una distancia aproximada de 30 metros uno del otro al realizar la medición para ver el comportamiento del sistema completo dio como resultado de  $0.55 \text{ ohm}$  cumpliendo así con una buena holgura la normativa de CANTV, por consiguiente una vez concluido el proceso las fallas no se presentaron nuevamente.

El sistema de puesta a tierra compuesto de los electrodos de grafito mejoro sustancialmente el comportamiento eléctrico del sistema, sin embargo, este esquema de construcción no se encuentra normalizado dentro de los montajes típicos de la empresa, por lo que se hace necesario una justificación y evaluación del mismo para que la empresa lo acepte como montaje valido para futuras aplicaciones. Entre las justificaciones a considerar esta demostrar que el tipo se sistema de puesta a tierra va a conservar sus características en el tiempo de duración de la instalación sin grandes inconvenientes.

En esta sección del trabajo se muestran los resultados de la evaluación eléctrica realizada al electrodo de puesta a tierra de grafito y material acondicionador, cuya aplicación corresponde a sistemas de puesta a tierra. Las muestras de dicho electrodo, fueron suministradas por la empresa

fabricante y las pruebas realizadas fueron solicitados por la empresa CANTV, a fin de verificar el comportamiento de este tipo de materiales ante esfuerzos eléctricos típicos en una instalación de comunicaciones.

El material del electrodo bajo prueba no está catalogado en las normas y guías nacionales e internacionales que describen los procedimientos normales de prueba; por ende, no existe un procedimiento de prueba normalizado aplicable directamente al material en cuestión. Sin embargo, el laboratorio de alta tensión de la USB (Universidad Simón Bolívar) sugirió ciertas pruebas eléctricas que servirán como referencia técnica para conocer o caracterizar al material empleado como electrodo de puesta a tierra. Adicionalmente, se incorporó dentro de las pruebas, el material de relleno o acondicionador que recomienda el fabricante para ser instalado junto con el electrodo.

Las evaluaciones realizadas comprenden las siguientes pruebas eléctricas:

1. Inspección visual, dimensional y medición de la resistencia longitudinal del electrodo empleado (ver figuras 3.5 y 3.6)
2. Prueba en corriente alterna de cortocircuito.
3. Prueba en corriente de impulso tipo rayo con el electrodo en estado seco.
4. Prueba en corriente de impulso tipo rayo con el electrodo en estado húmedo.
5. Prueba térmico.
6. Prueba en campo, mediante realización de instalación sugerida por el fabricante.
7. Prueba sobre el material acondicionador.

Cada una de las pruebas propuestas, persigue imitar una condición anormal de operación probable, a fin de establecer la respuesta y comportamiento del material evaluado, previendo posibles problemas que pudieran surgir durante su vida útil en una instalación de comunicaciones. La descripción particular de cada uno de los ensayos en cuanto al procedimiento seguido, se desarrolla en el presente capítulo.

### **3.2 Inspección de las muestras utilizadas en las pruebas**

Para llevar a cabo las pruebas se tomaron 6 electrodos de grafito como muestra, uno para cada prueba propuesta además del material acondicionador para la séptima prueba.

#### **a.- Características Físicas y dimensionales del electrodo de grafito:**

El electrodo de grafito tiene una aplicación muy específica en sistema de puesta a tierra está compuesto constructivamente por dos elementos básicos:

- El electrodo.
- El terminal metálico para la unión soldada al sistema de puesta a tierra.

Para el caso particular de los ensayos planteados, era imprescindible que el electrodo tuviera en vez de uno, dos terminales metálicos (uno en cada extremo), a fin de poder hacer la inyección controlada de corrientes y la medición directa de los parámetros eléctricos (ver figura 3.3).



Figura 3.3. Electrodo de grafito de calibración.



Figura 3.4 Electrodo de grafito

#### Inspección visual:

Todos los electrodos suministrados tenían un terminal adicional. El material es de color gris oscuro y de consistencia maciza.

No se detectaron rayones, golpes, rajaduras o daños superficiales en las muestras suministradas.

#### Evaluación dimensional:

Todos los electrodos poseían una longitud de  $50 \text{ cm} \pm 0.5\%$ .

Un diámetro de 4.95 cm  $\pm$  1 %.

Y un peso promedio (con accesorios) de 1.96 kg.

#### **b.- Características Eléctricas:**

A todos los electrodos suministrados, se les midió la resistencia longitudinal en DC, mediante el método de los cuatro electrodos (ver figuras 4. 5). Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 3.1 Calibración

<b>Electrodo de grafito</b>	<b>Residencia (m<math>\Omega</math>)</b>
Calibración Prueba 1.-	3,912
Empleado para prueba 2.-	2,699
Empleado para prueba 3.-	4,391
Empleado para prueba 4.	3,332
Empleado para prueba 5	2,916

Se observó una gran diversidad de valores entre el rango de 2,7 – 4,4 m $\Omega$ . Esta disparidad fue debida a la diferencia en el torque de ajuste, realizado a mano, del espárrago metálico de los terminales. Se recomendó al fabricante para evitar estos problemas, establecer un torque o dato que permitiera realizar la instalación de los terminales, de forma adecuada que

garantice su efectividad y el menor valor de resistencia de contacto entre terminal y electrodo.

Este hecho perturbó el análisis de la variable a lo largo de los ensayos eléctricos que serán detallados a continuación, ya que la simple manipulación del terminal afectó el valor medido de resistencia.

Al final de los ensayos se realizaron ajustes similares en los terminales de todas las muestras y un análisis más detallado permitió establecer que no existían variaciones apreciables antes y después de las sollicitaciones eléctricas. El valor promedio obtenido para estos casos, osciló en  $2,9 \text{ m}\Omega$ .

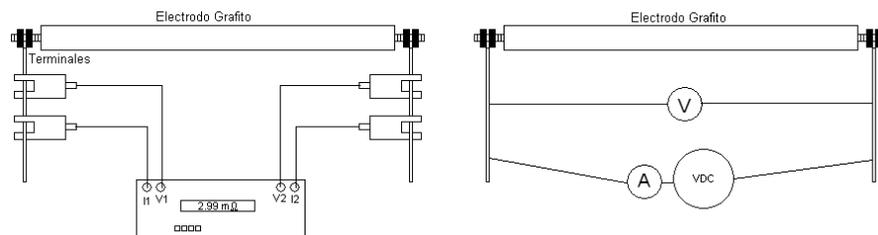


Figura 3.5. Prueba de medición de resistencia longitudinal.



Figura 3.6. Montaje para la prueba de la resistencia longitudinal.

### 3.3 Prueba en corriente alterna de cortocircuito

El objetivo de la prueba es someter al electrodo de grafito a una corriente AC de magnitud y duración típica de cortocircuito en un sistema eléctrico de potencia. Como valores referenciales, se tomaron 10 kA efectivos y 1 s de duración.

Dado el funcionamiento de la fuente empleada (el valor final de la corriente depende de la impedancia del objeto de prueba), el ensayo se limita a inyectar el equivalente  $I^2 \cdot t$  que corresponda al base 10 kA – 1s, es decir, se suministra a la muestra independientemente del valor efectivo de la corriente un  $I^2 \cdot t = 100 \text{ M A}^2\text{-s}$ .

Ante esta prueba, se espera que el electrodo no alcance temperatura de daño o sufra algún tipo de resquebrajamiento mecánico por el esfuerzo.

#### 3.3.1 Procedimiento

El procedimiento seguido se resume en los siguientes aspectos:

- a.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal.
- b.- Repetición de cinco (5) inyecciones de corriente de falla durante el tiempo de duración establecido en el procedimiento de calibración. Se registran los valores de Temperatura en el electrodo (punto más caliente superficial), corriente efectiva y tiempo de duración de la aplicación de la corriente. El ciclo se repite las cinco veces, con un intermedio de un (1) minuto.
- c.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal final.

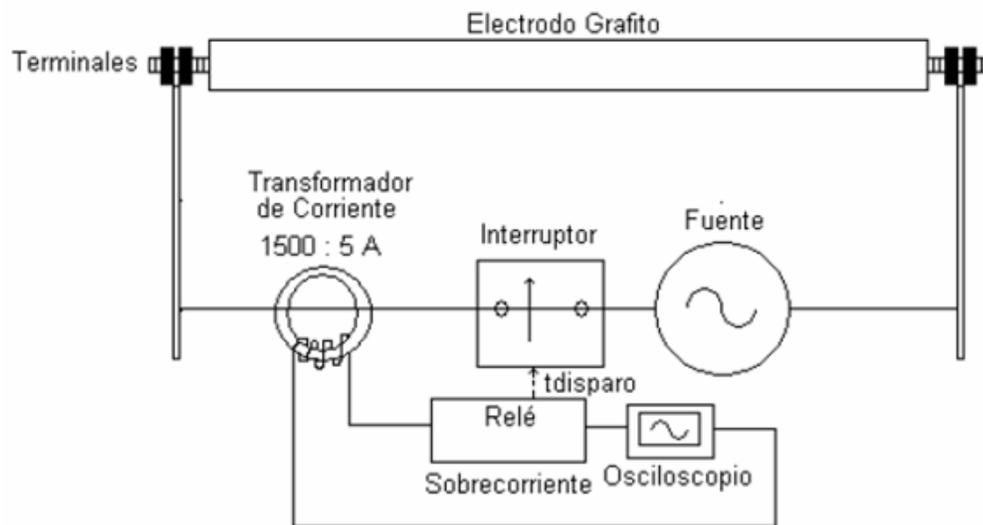


Figura 3.7. Montaje y conexiones para la prueba de corriente AC de cortocircuito

El montaje como es representado en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9, está compuesto por:

- Fuente de corriente hasta 20 kA (depende de la impedancia de prueba), marca MultiAmp. El ajuste es a máxima tensión de salida.
- Conductores y conectores para mínima distancia e impedancia entre fuente y objeto de prueba. Realizado con barras de cobre de 30 x 3 mm<sup>2</sup>.
- Transformador de corriente de relación 1500/5 A. Su uso es para poder conectar un relé de protección de sobrecorriente tiempo definido y el registrador de la forma de onda.
- El relé de protección de tiempo definido, sirve para ajustar con precisión el tiempo de aplicación de la corriente de cortocircuito al electrodo.

Una vez contabilizado el tiempo de ajuste, éste dispositivo ordena la apertura del interruptor, despejando la falla.

- Osciloscopio. Es empleado para el registro de las formas de onda aplicadas al objeto de prueba. El osciloscopio es marca Tektronix TDS3032B de 300 MHz.



Figura.3.8. Fotografía del montaje para la prueba de corriente alterna.



Figura. 3.9. Detalle del conexionado del electrodo a la fuente y al transformador de corriente.

### 3.3.2 Resultados de las pruebas

a.- Condiciones ambientales:

Temperatura ambiental = 21,3 °C.

Humedad relativa = 72,1 %.

b.- Calibración:

En el proceso de calibración de las pruebas, se determinó que la máxima corriente efectiva obtenida con el montaje señalado anteriormente, fue de 4,921 kA.

Esto implica que es inferior a 10 kA. Para tener el mismo efecto térmico sobre el electrodo, se derivó que el tiempo de aplicación de 4,921 kA, debe ser 4,13 s.

Se ajustó el tiempo de disparo del relé de sobrecorriente de tiempo definido a dicho valor.

En la tabla 4.2, se colocan los valores de corriente, tiempo de actuación del relé y temperatura máxima alcanzada por el electrodo, para cada uno de los cinco intervalos de corriente de falla aplicados.

Se puede observar en la tabla 4.2, que la corriente fue aumentando en cada uno de los intervalos de ensayo. Esto se debe a que la resistencia del electrodo de grafito, al contrario que un conductor metálico, disminuye su resistencia longitudinal con la temperatura. Esto quiere decir que es más

conductor a medida que está más caliente. Este hecho se corroborará en el ensayo térmico realizado posteriormente.

Tabla 3.2 Impulsos de corriente

<b>Intervalo de aplicación</b>	<b>Corriente efectiva (A)</b>	<b>Tiempo de aplicación (s)</b>	<b>Temperatura en electrodo (°C)</b>
1	4987	4.08	169
2	5026	4.06	242
3	5244	4.05	308
4	5323	4.05	353
5	5363	4.05	401

Por otro lado, en la evaluación visual del objeto, no se observó ningún daño ni fenómeno relevante durante y posterior al ensayo.

Adicionalmente, no hubo variación entre la resistencia longitudinal medida antes y después de la prueba (dejado enfriar el electrodo a temperatura ambiente). La variación observada fue debida a la manipulación del ajuste de los terminales, lo cual fue comentado en el desarrollo y análisis.

### **3.3.3 Conclusión del ensayo**

Según los resultados obtenidos, el electrodo APROBÓ la prueba de corriente alterna de cortocircuito.

Nota: Según reporte informal del fabricante, la temperatura de daño del grafito es 500°C.

### **3.4 Prueba en corriente de impulso tipo rayo al electrodo de grafito**

El objetivo del ensayo que se realiza a continuación, es observar el comportamiento del electrodo de grafito al ser sometido a una corriente de impulso con forma de onda normalizada tipo rayo, de 10 kA de valor pico.

#### **3.4.1 Procedimiento**

El procedimiento seguido se resume en los siguientes aspectos:

- a.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal.
- b.- Repetición de cinco (5) inyecciones de corriente de impulso tipo rayo con forma de onda 8/20  $\mu$ s y valor pico de 10 kA. Se registran los valores de Temperatura en el electrodo (punto más caliente superficial), y forma de onda de la corriente drenada a tierra a través del electrodo. El ciclo se repite las cinco veces, con un intermedio de dos (2) minutos.
- c.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal final.

El montaje para la prueba se muestra en las figura 3.10.

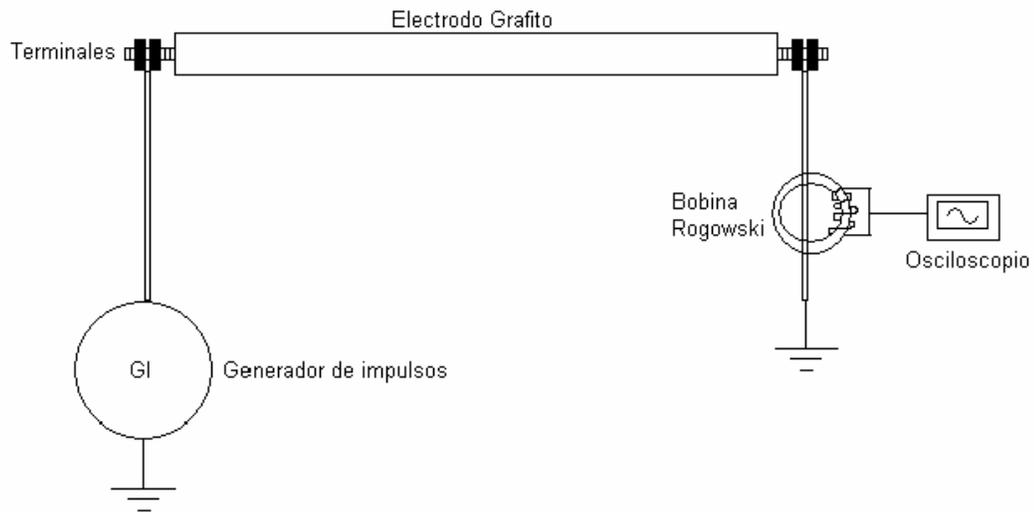


Figura 3.10. Montaje para la prueba de corriente de impulso tipo rayo.

El montaje como es representado en la figura 3.10, está compuesto por:

- Generador de impulsos 2,4 MV en conexión para corriente, con cuatro etapas conectadas en paralelo. Además se le adicionó una inductancia serie para el control de la forma de onda de 35  $\mu\text{H}$  y una resistencia de 2,2  $\Omega$ .
- Trasductor de corriente tipo Rogowski para el registro en osciloscopio de la forma de onda del impulso aplicado.
- Osciloscopio. Es empleado para el registro de las formas de onda aplicadas al objeto de prueba. El osciloscopio es marca Tektronix TDS3032B de 300 MHz.



Figura. 3.11. Esquema del montaje del electrodo para la prueba de corriente de impulso tipo rayo.

### 3.4.2 Resultados de las pruebas

a.- Condiciones ambientales:

Temperatura ambiental = 23.2 °C.

Humedad relativa = 62.3 %.

b.- Calibración:

La calibración se refiere en este caso, a la obtención de tres parámetros importantes en la forma de onda de la corriente de impulso aplicada (para definiciones ver IEEE Std 4 ó IEC 60060):

- Tiempo de frente:  $8 \mu\text{s} \pm 10\%$  ( $7.2 - 8.8 \mu\text{s}$ )
- Tiempo de semiamplitud:  $20 \mu\text{s} \pm 10\%$  ( $18 - 22 \mu\text{s}$ )
- Valor pico:  $10 \text{ kA} \pm 10\%$  ( $9 - 11 \text{ kA}$ )

El ajuste para obtener estos valores, es mediante los parámetros del circuito generador de impulsos (tensión de carga, valor de la capacitancia total del arreglo, valor de las resistencias internas del generador y valor de los ajustes adicionales externos, como inductancia y resistencia).

En la figura 3.12, se muestra el registro de calibración de la forma de onda, obteniéndose:

- Tiempo de frente:  **$7.6 \mu\text{s}$** .
- Tiempo de semiamplitud:  **$19.4 \mu\text{s}$** .
- Valor pico:  **$9.72 \text{ kA}$** .

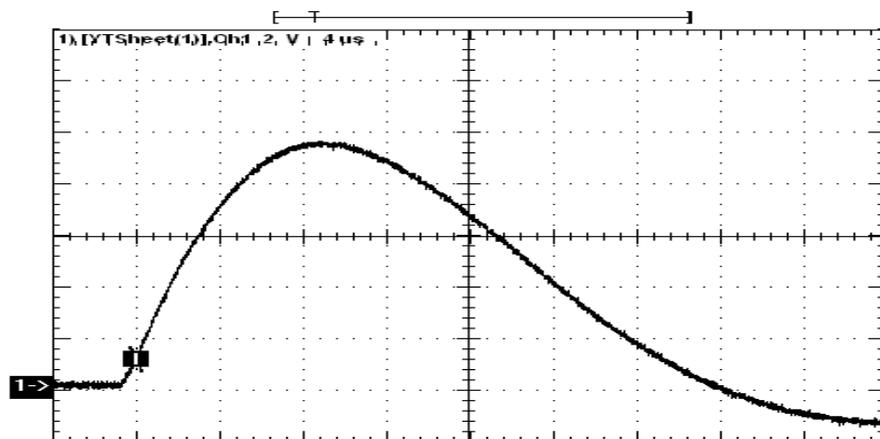


Figura 3.12 Forma de onda de corriente aplicada al electrodo.

c.- Resultados de la prueba:

En la tabla 3.3, se muestran los resultados obtenidos, en cuanto al valor pico de la corriente drenada por el electrodo de grafito a tierra y la temperatura más elevada registrada.

Tabla 3.3. Impulsos tipo rayo

<b>Impulso</b>	<b>Ipico(KA)</b>	<b>Temperatura(°c)</b>
1	9,69	22,90
2	9,72	22,90
3	9,72	22,90
4	9,75	22,90
5	9,70	22,90

Como se puede observar en la tabla anterior, se aplicaron los cinco impulsos de corriente y no se obtuvieron elevaciones de temperatura en el electrodo.

No se evidenciaron daños visuales sobre el electrodo de grafito.

Adicionalmente, no hubo variación entre la resistencia longitudinal medida antes y después del ensayo.

### **3.4.3 Conclusión de la prueba**

Según los resultados obtenidos, el electrodo APROBÓ la prueba de corriente de impulso tipo rayo.

### 3.5 Electrodo de grafito y electrodos convencionales ventajas y desventajas

- Un electrodo de grafito con un núcleo de altura=50cm, nos da un área de contacto a tierra de 96cm<sup>2</sup>
- Un electrodo químico convencional de altura=3m, nos da un área de contacto a tierra de 61cm<sup>2</sup>
- Por lo que un electrodo de grafito de altura=50cm, nos ofrece 57% más de área de contacto a tierra que un electrodo químico convencional de h=3m
- En consecuencia un electrodo de grafito de altura=1m, da un área de contacto a tierra de 176 cm<sup>2</sup>, lo que equivaldría a 2.88 electrodos químicos metálicos de altura=3m
- En terrenos altamente resistivos, muy lavados con pocos minerales, se le puede incluir grandes cantidades de sales minerales para mejorar la conductividad eléctrica sin comprometer la vida útil del electrodo por efectos de corrosión.
- Ahorros significativos en mantenimientos y compras
- Facilidad de instalación, con solo cavar un hueco de aproximadamente 0.66 m<sup>3</sup> o 1.66m<sup>3</sup> de volumen, para los electrodos de 50 o 100cm respectivamente en cualquier tipo de suelo, podremos obtener una baja resistencia.

### **3.5.1 Electrodo de grafito**

- No exige excavaciones a gran profundidad.
- No exige mantenimiento.
- Perdura por décadas.
- Bajo costo beneficio.

### **3.5.2 Electrodo químico convencional**

- Requiere una excavación mínima de h=3m de profundidad
- Exige un alto mantenimiento.
- Vida útil limitada.
- Alto costo beneficio

### **3.5.3 Prueba en campo, mediante realización de instalación sugerida por el fabricante**

El objetivo de esta prueba es la instalación real del arreglo electrodo de grafito – acondicionador, tal como lo recomienda el fabricante y compararlo con los registros de resistencia de dos electrodos convencionales tipo Cooperweld de 5/8” de diámetro. Para ello, se realizará la instalación en un área experimental de la Universidad Simón Bolívar, libre de objetos

enterrados y con suficiente superficie para las mediciones convencionales sugeridas por la normativa internacional aplicable para la medición de resistividad de suelos y resistencia de puesta a tierra (IEEE Std 81).

El registro de los datos debe ser representativo temporalmente, para poder realizar una comparación entre los dos tipos de soluciones.

#### **3.5.4 Procedimiento**

El procedimiento seguido para la realización de esta fase de investigación, se muestra o resume en los siguientes pasos:

a.- Selección del lugar e instalación de un electrodo de grafito con su acondicionador en un hoyo circular de 50 cm de diámetro y 50 cm de profundidad como se muestra en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15. Para ello, el fabricante e instalador, realizaron la apertura de la fosa, colocaron el electrodo de 50 cm de longitud, lo fijaron al centro mediante elementos metálicos y posteriormente vaciaron el acondicionador que se encontraba previamente en estado líquido, hasta cubrir completamente la fosa. El mismo día de la instalación, se registraron las variables de interés: resistividad del suelo circundante y resistencia de puesta a tierra.

A continuación se muestran algunas fotografías reportadas durante el proceso de instalación.



Figura. 3.13. Apertura de una fosa circular de 50 cm de diámetro y 50 cm de profundidad.



Figura 3.14. Fosa con material acondicionador



Figura 3.15. Recopilación del material acondicionador

b.- Una vez instalado el electrodo de grafito a 7 m de distancia , se hincó una barra Cooperweld de 5/8" de diámetro y 50 cm de longitud y a 7 m de distancia hacia el Oeste, se instaló una barra Cooperweld de 5/8" de diámetro y 2.4 m de longitud (jabalina convencional de puesta a tierra).

c.- Una vez instalados los sistemas para la comparativa, se llevó un registro de los parámetros importantes (resistividad y resistencia de puesta a tierra), durante tres semanas consecutivas.

### 3.5.5 Resultados de las pruebas

Se debe indicar previamente a los resultados, los métodos de medición empleados para el registro (todos ellos recomendados por la norma IEEE Std 81).

Se empleó el método de Wenner o de los cuatro electrodos (ver figura 3.16), seleccionando como apertura de electrodos: 1, 3, 6, 9 y 12 m, respectivamente y empleando un equipo digital con filtrado de ruido, marca LEM GeoX.

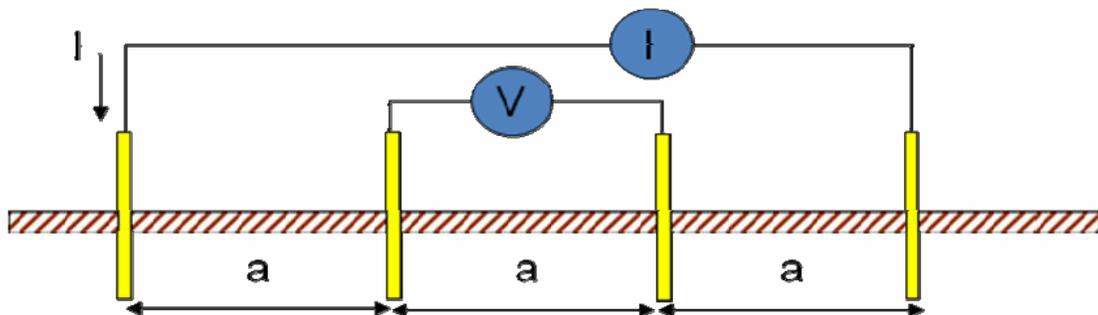


Figura 3.16. Método de los cuatro electrodos para la medición de la resistividad del suelo.

### 3.5.6 Resistencia de puesta a tierra

Se empleó el método de la caída de potencial o de los tres electrodos (figura 3.17), seleccionando una distancia para la colocación del electrodo de corriente, de 32 m. Los datos fueron procesados en una hoja de cálculo, para obtener el valor de la resistencia de puesta a tierra del electrodo en evaluación.

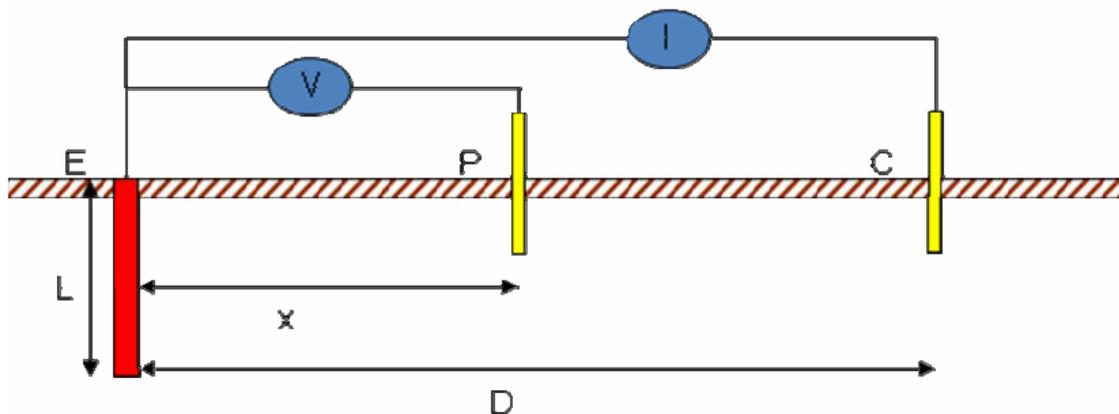


Figura. 3.17. Método de los tres electrodos para la medición de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo.

Adicionalmente se registraron los datos ambientales del día y hora que se efectuó la medición.

Los resultados de la evaluación por cuestión de espacio y simplicidad para el análisis se resumen en la tabla 3.4:

Tabla 3.4 Medición de resistencia

<b>Día</b>	<b>Rgrafito(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R1(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2(<math>\Omega</math>)</b>
11/03/2009	610		
13/03/2009	442		
17/03/2009	387	3880	
19/03/2009	378	1750	348
24/03/2009	368	1800	233
26/03/2009	363	4070	246
01/04/2009	355	4170	278

Se puede observar en la tabla que los valores de resistencia de puesta a tierra del electrodo de grafito fueron descendiendo con el tiempo, alcanzando un valor final aproximado de 360  $\Omega$ . En el caso del electrodo convencional cooperweld de 50 cm, se observó una gran variabilidad entre sus datos, especialmente debido a la poca profundidad de localización y al método de hinchamiento. Por esa razón, se instaló un electrodo convencional de 2.4 m de longitud y este tiene una resistencia menor que la del electrodo de grafito.

Durante las mediciones efectuadas, se observa que el electrodo de grafito alcanza rápidamente un valor reducido de su resistencia de puesta a tierra. También, se puede indicar su gran estabilidad a pesar de las variaciones de resistividad obtenidas, debido a la gran cantidad de días en los que no se presentó lluvia. Incluso más estable que el electrodo convencional, el cual por su contacto con el suelo, es mucho más sensible a variar su resistencia con el cambio de resistividad, como se observa en las mediciones efectuadas, incrementando el valor de sus resistencia en los últimos días de del registro

Se debe indicar que el valor de la resistencia de puesta a tierra del electrodo de grafito con su acondicionador es muy elevado e incluso mayor que el de una jabalina de 2.4 m de longitud y menor que el de una jabalina de 0.5 m de longitud. Esto demuestra en la práctica que el problema de las puestas a tierra es geométrico y son las dimensiones y la superficie de contacto las que arrojan el valor final de resistencia y los acondicionadores cumplen la función de ayudar a aumentar dicha superficie y a mejorar temporalmente las condiciones del entorno.

### **3.6 Prueba en corriente de impulso tipo rayo con el electrodo en estado húmedo**

En esta prueba en particular, persigue dos objetivos claros: el primero es observar el grado de absorción de humedad del electrodo de grafito al estar inmerso en agua destilada por 48 h y el segundo es ver si esta humedad absorbida tiene algún efecto durante la descarga de una corriente tipo rayo de 10 kA pico, a través del electrodo.

#### **3.6.1 Procedimiento**

El procedimiento seguido se resume en los siguientes aspectos:

- a.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal de la muestra antes de ser introducida en el tanque de agua destilada.
- b.- Introducción de la muestra en un tanque de agua con conductividad controlada de 100  $\Omega$ - cm, durante 48 h.
- c.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal de la muestra después de transcurridas 48 en el tanque de agua.
- d.- Repetición de cinco (5) inyecciones de corriente de impulso tipo rayo con forma de onda 8/20  $\mu$ s y valor pico de 10 kA. Con un procedimiento similar al seguido en el ensayo anterior.
- e.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal final.

El tanque de agua, con la muestra introducida en éste, se puede observar en la figura 3.18.



Figura 3.18 Electrodo de grafito introducido en un tanque de agua por 48 h

### 3.6.2 Resultados

a.- Condiciones ambientales:

Temperatura ambiental = 23,1 °C.

Humedad relativa = 63,0 %.

Conductividad del agua: (inicial = 99,3  $\Omega$ -cm; final= 100,8  $\Omega$ -cm). Valor obtenido con conductímetro con un error de 0,5% y corrección automática por temperatura.

b.- Calibración:

Es la misma del ensayo anterior para el generador de impulso y se resumen los resultados obtenidos para la muestra en húmedo.

En la figura 3.19, se muestra el registro de calibración de la forma de onda, obteniéndose:

- Tiempo de frente: **7.7  $\mu\text{s}$** .
- Tiempo de semiamplitud: **19.4  $\mu\text{s}$** .
- Valor pico: **9.8 kA**.

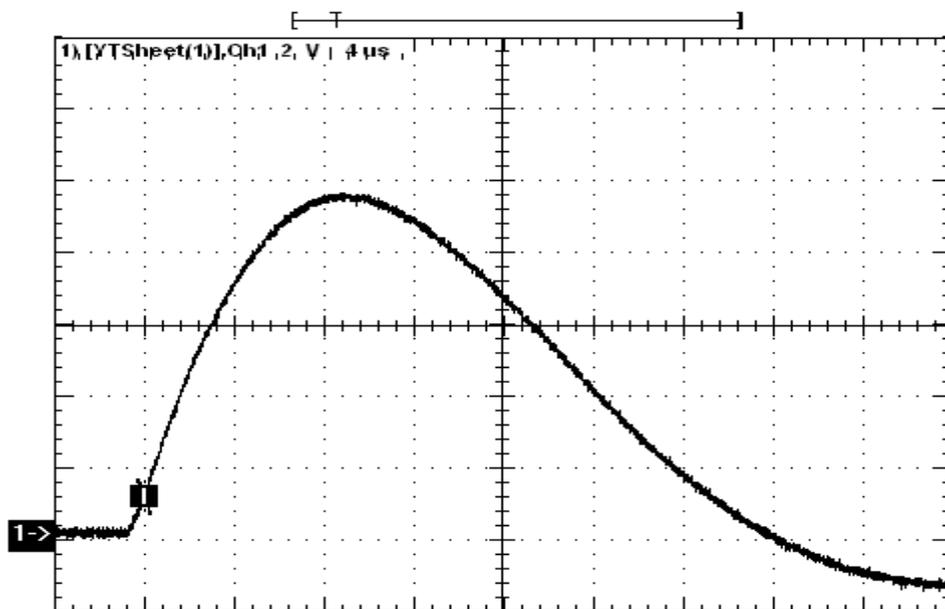


Figura 3.19 Forma de onda empleada para la prueba de corriente de impulso.

c.- Resultados de la prueba:

### 3.6.3 Registros antes de introducción del electrodo en el tanque de agua

Peso = 1,965 kg.

Resistencia longitudinal = 3,332 m $\Omega$ .

En esta prueba el registro del peso del electrodo es muy importante, ya que se va a determinar el grado o porcentaje de absorción de humedad, en función de la variación del peso antes y después de ser introducido en el tanque. El peso se registra en una balanza comercial con error de 5 g.

#### **3.6.4 Registros después de 48 h de introducido en el tanque:**

Peso = 2,010 kg.

Resistencia longitudinal = 3,3712 mΩ.

Se puede observar un incremento marginal del peso del electrodo de 45 g, representando un ingreso de 2,3% de humedad.

La variación de la resistencia puede deberse al ajuste de los terminales y al hecho de que el agua que ha penetrado posee una mayor resistividad que la del propio compuesto de grafito.

La absorción de humedad observada, indica que el electrodo es muy compacto y no posee porosidades significativas que faciliten el ingreso del agua a su interior. También se soporta la idea que el grafito no es un material hidrófilo, así que no facilita la absorción de humedad.

En esta parte del ensayo, se observó un fenómeno llamativo y es que sobre las caras superficiales del electrodo se presentó un cambio de coloración (rojizo), como se muestra en la siguiente



Figura 3.20. Cambio de coloración en la parte superficial del electrodo de grafito.

### 3.6.5 Aplicación de impulsos de corriente tipo rayo

En la tabla 4,4 se muestran los resultados obtenidos, en cuanto al valor pico de la corriente drenada por el electrodo de grafito a tierra y la temperatura más elevada registrada.

Tabla 3.5. Impulsos tipo rayo en estado húmedo el electrodo

<b>Impulso</b>	<b>Ipico(KA)</b>	<b>Temperatura(°c)</b>
1	9,78	23,1
2	9,74	23,1
3	9,74	23,1
4	9,78	23,1
5	9,74	23,1

Como se puede observar en la tabla anterior, se aplicaron los cinco impulsos de corriente y no se obtuvieron elevaciones de temperatura en el electrodo. No se evidenciaron daños visuales sobre el electrodo de grafito.

Adicionalmente, no hubo variación representativa entre la resistencia longitudinal medida antes y después del ensayo.

### **3.6.6 Conclusión de la prueba**

Según los resultados obtenidos, el electrodo APROBÓ el ensayo de corriente de impulso tipo rayo, estando el objeto de prueba húmedo.

## **3.7 Prueba térmica**

El objetivo de este ensayo es conocer la variación de la resistencia longitudinal del electrodo de grafito con la temperatura.

### **3.7.1 Procedimiento**

El procedimiento seguido se puede resumir en los siguientes pasos:

a.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal de la muestra antes de ser introducida en el horno para su calentamiento.

b.- Introducción de la muestra en un horno por 24 h a 150 °C.

c.- Inspección visual y medición de la resistencia longitudinal de la muestra después de transcurridas las 24 horas y repitiendo las mediciones a lo largo del tiempo que transcurrirá hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Los montajes empleados para esta prueba ya han sido detallados con anterioridad en este reporte de pruebas.

### 3.7.2 Resultados

Los resultados importantes de esta prueba se pueden resumir en la tabla 3.6 y la gráfica 3.21 que se muestran a continuación.

Tabla 3.6. Medición térmica del electrodo

<b>Temperatura(°c)</b>	<b>Resistencia(mΩ)</b>
127	2,726
124,80	2,784
118,30	2,759
112,80	2,784
107,60	2,805
103,10	2,826
98,70	2,854
94,70	2,863
86,50	2,899
83,80	2,914
79,60	2,936
76,40	2,952
72,80	2,97
69,20	2,992
66,40	3,008
62,60	3,029

Tabla 3.6. Continuacion.

59,60	3,047
56,60	3,065
54,40	3,079
52,60	3,089
49,10	3,114
47,50	3,126
46,30	3,134
44,20	3,148
42,50	3,160
40,50	3,176
38,80	3,192
37	3,205
35,60	3,216
34,30	3,226
32,70	3,24
31	3,257
30,20	3,266
25,60	3,335

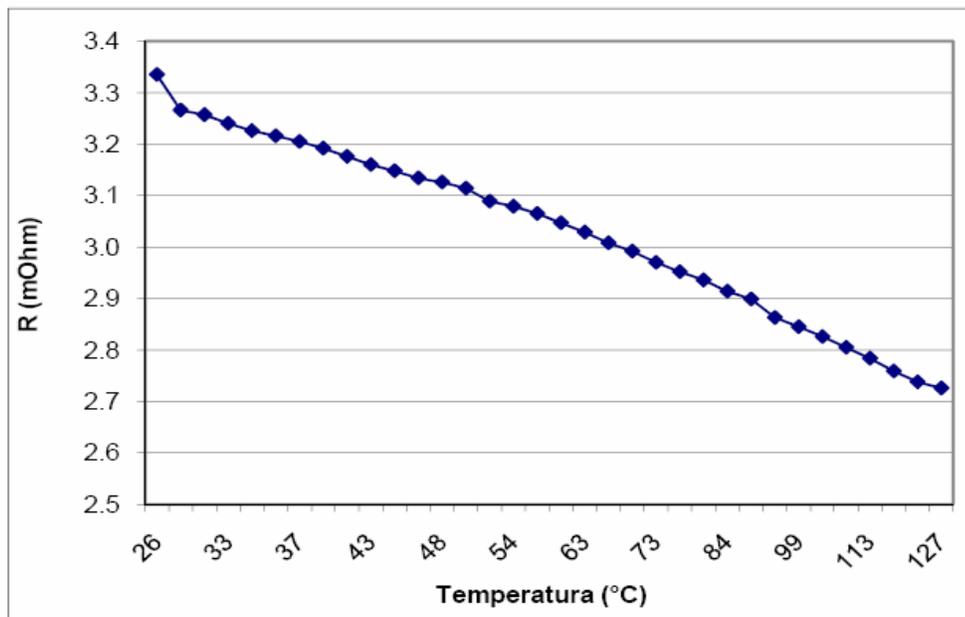


Figura 3.21. Resultados gráficos de la prueba térmica.

Como se puede observar en la tabla 3.6, la resistencia varía con la temperatura en una relación máxima de 18% y a mayor temperatura menor resistencia longitudinal. Este comportamiento es diferente al de los conductores metálicos (cobre, aluminio, acero), los cuales aumentan su resistencia con la temperatura y en relaciones de más de un 50% entre éstos extremos de temperatura de  $T_a$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . Esto implica que a pesar de existir una variación de resistencia con la temperatura en el electrodo de grafito, la misma no es significativa, pudiendo considerarse constante para una aplicación práctica como sistema de puesta a tierra. No se evidenciaron daños visuales sobre el electrodo de grafito. Adicionalmente, no hubo variación representativa entre la resistencia longitudinal medida antes y después de la prueba.

### **3.7.3 Conclusión de la prueba**

Según los resultados obtenidos, el electrodo **APROBÓ** la prueba térmico sin daños detectables en los registros realizados.

### **3.8 Adicionalmente se le realizaron pruebas al material acondicionador para evaluar su comportamiento**

Como último punto a destacar dentro de la evaluación realizada, se llevaron a cabo una serie de ensayos que permitirán caracterizar el acondicionador empleado y recomendado por el fabricante para su uso en conjunto con el electrodo de grafito. Los ensayos realizados consisten básicamente en la medición de su resistividad como material conductor y su PH.

#### **3.8.1 Procedimiento**

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Medición de las variables ambientales (temperatura y humedad)
- Medición de la resistividad del material acondicionador, empleando una caja de Millar normalizada (ver figuras 3.22 y 3.23) según norma ASTM G-57-06. “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method” 2006.
- Observaciones.

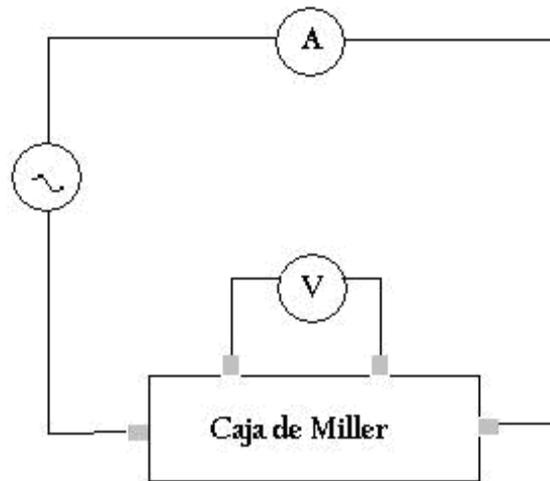


Figura 3.22. Prueba normalizado de resistividad con caja de Miller.



Figura 3.23. Caja de Miller empleada para la medición de la resistencia del material acondicionador.

### 3.8.2 Resultados

Los resultados se dividen en dos partes. La primera, empleando el material líquido acondicionador que fue obtenido durante la instalación del electrodo de grafito en el campus de la Universidad Simón Bolívar. La segunda, con varias muestras en seco, suministradas por el fabricante, posteriormente.

a.- Muestra extraída de la instalación del electrodo de grafito:

La muestra extraída en campo, se encontraba previamente mezclada con agua y sal por parte del fabricante, de manera de facilitar su manejo y colocación en la fosa que había sido realizada. Esa muestra fue colocada en la caja de Miller como se muestra en la figura 20 y se midió la resistividad y se corrigió por temperatura a 20°C.

El resultado obtenido, fue:

$$\rho_{\text{material}} = 7,42 \Omega\text{-cm.}$$

Posteriormente y empleando la norma ASTM y un medidor calibrado de PH, se determinó el valor del potencial de hidrógeno sobre la muestra recién extraída de campo. El resultado obtenido corregido por temperatura a 20°C, fue:

$$\text{PH} = 8,8.$$

En general, el resultado obtenido de la evaluación indica en referencia con otros productos comerciales, un valor bajo de resistividad a pesar de no estar compactado y con una gran cantidad de agua.

Para estudiar el efecto de la variación de la resistividad con el contenido de humedad, se dejó secar el material sobre la caja, durante 48 h. Tras ese período de tiempo, se evaluó y se encontró que la caja de Miller presentaba problemas de corrosión y una gran cantidad de sal generada en el proceso de secado, como se observa en las figuras 3.24 y 3.25.



Figura 3.24. Caja de Miller con alto contenido de sal

Este hecho llamó la atención y se le solicitó una aclaratoria al fabricante, el cual indicó la presencia significativa de sal en el acondicionador para buscar un menor valor de resistencia de puesta a tierra en el corto plazo. Si bien ese contenido de sal no altera al electrodo de grafito, si causa problemas sobre las conexiones metálicas (sulfatadas) y problemas graves

de corrosión a las estructuras o instalaciones vecinas, no recomendándose su uso en cantidades tan apreciables (IEEE std 80)



Figura 3.25. Oxidación de las partes metálicas de la instalación, debido al gran contenido de sal del acondicionador.

Para evaluar este hecho, se le solicitó al fabricante, el suministro del material acondicionador en seco, con sal y sin sal, a fin de evaluar el efecto de ésta sobre la resistividad.

b.- Muestras de material acondicionador en seco:

b.1.- Con contenido de sal.

En principio si el material se encuentra seco, la sal sin humedad posee una alta resistividad, lo que podría perjudicar a la medición.

Se realizó la medición de este producto a varios niveles de compactación manual del material en la caja y los resultados se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Evaluación del material acondicionador en seco, con contenido de sal.

<b>Condición</b>	<b>Resistividad(<math>\Omega</math>-cm)</b>	<b>Peso(g)</b>
<b>No compacto(solo vaciado)</b>	41,8	475
<b>Compactado manualmente</b>	4,11	525

Se puede observar que tan solo con un 10% de compactación respecto al simple vaciado del material, representa la disminución de un orden de magnitud en la resistividad del material. El valor final de resistividad obtenido, es bastante bajo y comparable al obtenido de la muestra extraída de campo con humedad.

b.2.- Sin contenido de sal:

Para evaluar las diferencias y demostrar que el grafito no necesita del añadido de sal para dar un valor de resistividad bajo y que por tanto el uso de este producto adicionado causa más desventajas que ventajas, se solicitó al fabricante una muestra del acondicionador sin ningún tipo de sal añadida. Los resultados se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Evaluación del material acondicionador en seco, sin contenido de sal.

<b>Condición</b>	<b>Resistividad(<math>\Omega</math>-cm)</b>	<b>Peso(g)</b>
<b>No compacto(solo vaciado)</b>	103	411
<b>Compactado manualmente</b>	2.38	510

Se puede observar que el valor final de resistividad con el material compactado manualmente, es incluso inferior que el obtenido para el caso “con sal”. En general, se puede concluir lo siguiente:

- Añadir sal de manera significativa al agregado acondicionador no es recomendable a pesar de que mejore la resistividad inmediata del suelo circundante y logre temporalmente un menor valor de resistencia de puesta a tierra, por las consecuencias posteriores de su uso.
- El material acondicionador evaluado, incluso sin sal, arrojó valores de resistividad bajos, siendo por tanto un buen material que puede ser empleado para mejorar las prestaciones de un sistema de puesta a tierra, bien sea con un electrodo de grafito o un electrodo convencional.

Resumen de las pruebas:

Se puede observar que los electrodo de grafito, pasaron todas las pruebas al cual fue sometido sin alterar sus características físicas eléctrica, al realizar la mediciones de resistencia en los electrodos se pudo notar que el

troqué del Terminal influye directamente en la resistencia. Por tal motivo se le recomendó al fabricante ajustarla, para obtener una medición más real; Todos los electrodos estudiados tienen las mismas dimensiones de longitud, diámetro y peso

Como consecuencia de la innovación en el uso de electrodos de grafito en lo que a puesta a tierra se refiere, fue necesario justificar que los mismos se mantendrían estables en el tiempo y frente a condiciones adversas de operación, a fin de demostrar su equivalencia con las puesta a tierras diseñadas con barras copperweld. Para ello se realizaron los ensayos solventes.

## CONCLUSIONES

Los electrodos de grafito pueden ser utilizados en sistemas de puesta a tierra.

Un electrodo de grafito presenta una área de contacto con tierra mayor que los electrodos formados por barras copperweld.

El electrodo conserva sus características físicas bajo condiciones adversas de operación.

Todos los electrodos suministrados poseen los accesorios solicitados. El material es de color gris oscuro y de consistencia maciza. No se detectaron rayones, golpes, rajaduras o daños superficiales en las muestras suministradas.

Todos los electrodos poseen una longitud de  $50 \text{ cm} \pm 0.5\%$ . un diámetro de  $4.95 \text{ cm} \pm 1 \%$ . y un peso promedio (con accesorios) de 1.96 kg.

Al variar el torque en los espárragos de los terminales del electrodo de grafito afecta directamente la resistencia del mismo en un rango aproximado de 2 miliohmio a 4 miliohmio.

El electrodo de grafito al calentarse disminuye su resistencia al paso de la corriente comportándose al contrario de los electrodos metálicos como la barra copperweld.

El electrodo de grafito no se corroe por lo tanto tiene una larga vida útil en ambientes corrosivos o salinos tales como estaciones cerca de la playa.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda el uso de electrodos de grafito en la construcción de sistemas de puesta a tierra.

Ajustar a un torque fijo los terminales del espárragos para obtener la mejor medición y colocarle grasa de contacto para eliminar las espacios vacíos.

Los electrodos de grafitos deben ser tratados con cuidados ya que físicamente son frágiles y se parten con facilidad

Eliminar el contenido de sal que posee el acondicionador ya que se comprobó que su efecto es corrosivo y no aporta valor para disminuir la resistencia en el acondicionador

Implementar en áreas de espacio reducidos, lugares rocosos donde la resistividad del suelo sea muy alto o difícil de excavar.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- [1] Lancruz, Y. **“Análisis del Sistema de Puesta a Tierra y Protección de los Equipos de Comunicación Asociados al Despacho de Carga Oriental Cadafe ”**. Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz (2000).
- [2] Arias, J. **“Diseño del Sistema de Puesta a Tierra para Protección contra Sobretensiones de una Subestación Eléctrica de 15 MVA a los Niveles de 13.8/4.16 ”**. . Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz (2007).
- [3] Coa, L. **“Diseño de un Programa Computacional para el Cálculo de Sistemas de Puesta a Tierra”**. Tesis no publicada. Universidad de Oriente - Núcleo de Anzoátegui (2006)
- [4] Peña, J. **“Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra y Protección Contra Descargas Atmosféricas en el Sistema Eléctrico de un Taladro de Perforación de Petróleo”**. Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz (2007).
- [5] Hernández, C. **“Evaluación de los Sistemas de Puesta a Tierra de las Subestaciones de Distribución de SEMDA”**. Trabajo de grado, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz (2005).

## BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

BRICEÑO J : “Manual para las mediciones de resistencias a tierras”.  
Taller de publicaciones de la facultad de ingeniería, Universidad de los  
Andes, Mérida, Venezuela.

EATON R.:”Sistema de transmisión de energía eléctrica” Ediciones del  
Castillo, Madrid, 1975

Norma de Puesta a Tierra en Planta Externa, CANTV, Cód: GSIPE-012,  
Enero 1997.

Protección de Puesta a Tierra en Planta Externa, CANTV, Cód: 3-8-024,  
Mayo 1994.

Seminario de Sistema de Puesta a Tierra, CANTV, Octubre 1996.

Protección de Planta Externa, Consideraciones Generales, Práctica  
GTE 903-020-070 Vz, Enero 1996.

Protección Electromagnética en las Instalaciones Telefónicas, Planta  
Exterior(I), Colección Técnica AHCJET.

## METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

<b>TÍTULO</b>	<b>Estudio de sistema de puesta a tierra mediante la utilización de electrodo de grafito</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

### AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
Nelson José Sánchez Caraballo	<b>CVLAC:</b> 17.235.554 <b>E MAIL:</b> Nelson.pons17@hotmail.com
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

### PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Puesta a tierra  
Medición  
Grafito

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencia Aplicadas	Ingeniería Eléctrica

**RESUMEN (ABSTRACT):**

Los sistemas de puesta a tierra son de gran importancia para la protección y buen funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos teniendo también en función fundamental en la seguridad del personal que trabajo con ello evitando que una corriente de falla o descargas atmosféricas pueda dañarlos en este trabajo de grado se estudio un nuevo electrodo de puesta a tierra compuesto por grafito, el cual fue utilizado por la empresa CANTV el material del electrodo no está catalogado en las normas y guías nacionales e internacionales que describen los procedimientos normales de prueba por ende, no existe un procedimiento de ensayo normalizado aplicable directamente al material en cuestión. Sin embargo se contrato al laboratorio de alta tensión de la universidad Simón Bolívar para que realizara ciertas pruebas eléctricas que servirán como referencia técnica para conocer o caracterizar el material empleado Como electrodo de puesta a tierra

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Hernán Parra	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	17.235.554			
	E_MAIL	Sescalante@anz.udo.edu.ve			
	E_MAIL				
Ing. Verena Mercado	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL	mbermudez@anz.udo.edu.ve			
	E_MAIL				
Ing. Luis Suarez	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL	prodriguez@anz.udo.edu.ve			
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2009 AÑO	10 MES	08 DÍA
-------------	-----------	-----------

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS. Sistema de puesta a tierra.doc	Application/Microsoft Word

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E  
F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s  
t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** \_\_\_\_\_ (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Electricista  
\_\_\_\_\_

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado  
\_\_\_\_\_

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Electricidad  
\_\_\_\_\_

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente / Núcleo Anzoátegui  
\_\_\_\_\_

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:****DERECHOS**

De acuerdo al artículo N° 44 del Reglamento de Trabajo de Grado: “Los trabajos de Grado son exclusivamente propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”.

Nelson José Sánchez Caraballo

**AUTOR**

Hernán Parra

**TUTOR**

Verena Mercado

**JURADO**

Luis Suarez

**JURADO**

Verena Mercado

**POR LA SUBCOMISION DE TESIS**