



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

PROPUESTA TECNOLÒGICA

CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTRODO ACTIVO Y
ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO.

Propuesta de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

Wilson Renato Bravo Villacres

Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo

Tutor:

Ing.MSc.Gabriel Napoleón Pesantez Palacios

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto – 2019



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Bravo Villacres Wilson Renato y Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTRODO ACTIVO Y ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO**”, siendo el Ing. MSc. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Bravo Villacres Wilson Renato

C.I: 180547595-9

Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo

C.I: 172010435-3



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Bravo Villacres Wilson Renato y Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo con el título de Propuesta Tecnológica: **“CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTRODO ACTIVO Y ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO”**. Han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Agosto 2019

Para constancia firman:

Lector 1

MSc. Jessica Castillo Fiallos

C.I: 0604590216

Lector 2

MSc. Marcos León Segovia

C.I: 050230540-2

Lector 1

MSc. Rommel Suarez Vinueza

C.I: 180416535-3



AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

En calidad de Tutor del Trabajo de la propuesta tecnológica sobre el título: **“CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTRODO ACTIVO Y ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO”**, de los señores Bravo **Villacres Wilson Renato y Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de la Propuesta que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero del 2019

TUTOR



Ing.MSc. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios

C.I: 030189388-9

AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de director de la carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** DE LA **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**, Certifico que mediante el proyecto de propuesta tecnológica “**CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTRODO ACTIVO Y ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO**” de los estudiantes de decimo ciclo de los señores **BRAVO VILLACRES WILSON RENATO Y REINOSO CHICAIZA EDWIN RICARDO** con C.I. **180547595-9** y **172010435-3** realizaron la entrega del electrodo activo prototipo para la **UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI EXTENSIÓN SALACHE** , trabajo que se implementó y se dejó en completo funcionamiento.

Es todo cuanto puedo cuantificar pudiendo hacer uso del mismo dentro de las leyes de la república y normas internacionales.

Latacunga, julio del 2019

Atentamente



PhD. Secundino Marrero Ramirez
C.I:1757107907
Director de la carrera de Ingeniería Eléctrica

AGRADECIMIENTO

A Dios por habernos brindados la salud y la vida, a nuestras madres quien con sus consejos y amor nos ha guiado siempre por el camino del bien y han hecho de nosotros personas de bien, a nuestros hermanos que siempre han confiado en nosotros y nos han brindado el apoyo económico y moral.

A nuestras compañeras de vida que siempre han estado alentándonos para ser hombre responsables e íntegros.

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, primordialmente a los docentes que forman parte de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, quienes han aportado con sus conocimientos para la realización de este proyecto.

Renato Bravo

Edwin Reinoso

DEDICATORIA

Dedico esta tesis principalmente a Dios, por haberme dado la vida y por permitirme haber llegado a estas instancias de mi vida profesional. A mi madre Juanita por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su apoyo y amor incondicional. A mi padre Joaquín (+) quien a pesar de nuestra distancia física, siento que estas siempre con migo y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido muy especial para el como lo es para mí. A mis hermanos Segundo, Rodrigo, Maritza y Lucia por todo ese apoyo moral que siempre me han brindado durante esta etapa de mi vida, a mi esposa Johanna por siempre confiar en mí y apoyarme a cumplir mis metas y a mi hijo Josué por llegar a llenar mi vida de felicidad.

Edwin Reinoso

Dedico mi tesis a mi madre: Teresa Villacres quien fue la única persona que confió en mí y me apoyado durante el transcurso de toda mi carrera universitaria tanto en la parte económica como en la emocional, a mi hermanas que siempre han estado allí para apóyame en todo momento y hacer de mi un hombre de bien.

Renato Bravo

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iii
AVAL DEL TUTOR DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA.....	iv
AVAL DEL IMPLEMENTACIÓN	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
INDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xvi
1. INFORMACION GENERAL.....	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	1
2.1. TÍTULO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	1
2.2. TIPO DE ALCANCE.....	1
2.3. AREA DE CONOCIMIENTO.....	1
2.4. SINOPSIS DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA	2
2.5. OBJETO DE ESTUDIO Y CAMPO DE ACCIÓN	2
2.5.1. Objeto de estudio.....	2
2.5.2. Campo de acción	2
2.6. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA Y PROBLEMA	2
2.6.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	2
2.6.2. PROBLEMA.....	3

2.7. HIPÓTESIS O FORMULACIÓN DE PREGUNTA CIENTÍFICA	3
2.8. OBJETIVOS.....	3
2.8.1. Objetivo general.....	3
2.8.2. Objetivos específicos.....	3
2.9. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS	4
3. MARCO TEORICO	5
3.1 Definiciones y conceptos básicos	5
3.2 Sistema de Puesta a Tierra.....	6
3.2.1. Función de un sistema de puesta a tierra	6
3.2.2. Objetivos de los sistemas de puesta a tierra.....	6
3.3. De acuerdo a su aplicación los sistemas de puesta a tierra.....	7
3.3.1. Puesta a tierra para sistemas eléctricos.....	7
3.3.2. Puesta a tierra de los equipos eléctricos	7
3.3.3. Puesta a tierra en señales electrónicas	8
3.3.4. Puesta a tierra de protección electrónica	8
3.3.5. Puesta a tierra de protección atmosférica	9
3.4. Componentes de un Sistema de Puesta a Tierra	9
3.4.1 Conductor de puesta a tierra de equipos.....	9
3.4.2. Conductor del electrodo de Puesta a Tierra.....	10
3.4.3. Ecuación para cálculo del conductor.....	11
3.4.4. Electrodo de puesta a tierra.....	11
3.4.5. Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra	12
3.5. Electrodo de puesta a tierra especialmente contruidos.....	13
3.5.1. Electrodo de varilla o tubería	13
3.5.2. Electrodo de placa.....	15
3.5.3. Estructuras metálicas enterradas	16
3.6. Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	16
3.6.1. Efectos del tipo de suelo sobre la resistividad del terreno.....	16

3.6.2. Efectos de la temperatura sobre la resistividad del terreno	17
3.6.3. Efectos de la humedad y sales disueltas sobre la resistividad del terreno.....	18
3.6.4. Efecto de la sal en la resistividad del terreno	18
3.6.5. Constitución del terreno	19
3.6.6. Efecto del PH	19
3.6.7. Composición del terreno.....	20
3.6.8. Estratigrafía.....	20
3.6.9. Granulometría	20
3.6.10. Estado higrométrico	21
3.6.11. Temperatura	21
3.6.12. Compactación	21
3.6.13. Corrosión en suelos	21
3.7. Métodos para medir la resistividad del terreno.....	22
3.7.1. Método con la aplicación de tres electrodos.....	22
3.7.2. Método con la aplicación de cuatro electrodos.....	23
3.7.3 Método por la configuración de Wenner.....	25
3.7.4. Método por la configuración de Schulumberger	26
3.7.5. Ventajas y desventajas de los métodos para la medición de resistividad.....	27
3.8. Medida de la resistividad aparente.....	27
3.8.1. Modelo de terrenos no uniformes	29
3.8.2. Modelos de dos capas.....	30
3.8.3. Valores Asociados.....	32
3.9. Geometría del sistema.	34
3.9.1. Superficie de separación tierra-aire.....	34
3.9.2. Electrodo Semiesférico.....	34
4. METODOLOGÍA	36
5. ANALISIS DE RESULTADO	37
5.1. Investigación de las características del terreno.....	37
5.1.1. Toma de mediciones de la resistividad del suelo	37
5.1.2. Parámetros del terreno que influyen en la resistividad del suelo	38

5.2. Calculo de los parámetros eléctricos en los Electrodo Activos	39
5.2.1. Corriente de falla en el lado secundario del transformador	39
5.2.1.1. Corriente de cortocircuito que circula por el electrodo activo	39
5.2.2. Modelo de dos capas para terreno no uniforme	39
5.2.2.1. Valor del potencial en la superficie del terreno	40
5.2.2.2. Tensión de paso a diferentes distancias	42
5.2.2.3. Resistividad aparente	44
5.2.2.4. Potencias del electrodo aparente	44
5.2.2.5. Resistencias del electrodo aparente	44
5.2.2.6. Tensión de contacto aparente	45
5.2.3. Análisis de los parámetros eléctricos en los electrodos activos	45
5.2.3. Análisis de los parámetros eléctricos en los electrodos activos	45
5.3. Análisis Económico de los electrodos activos	45
5.3.1. Análisis Económico de los Electrodo Activo Comercial	45
5.3.2. Análisis Económico de los Electrodo Activo- Prototipo	46
5.4. Resumen del Análisis Técnico - Económico realizado a los Electrodo Activos	48
6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTO	49
6.1 Presupuesto	49
6.2 Análisis de impacto	49
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
7.1 CONCLUSIONES	50
7. 2 RECOMENDACIONES	50
8. BIBLIOGRAFIA.....	51
ANEXOS	53

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Puesta a tierra de equipo electrónico.	8
Figura 3.2: Componentes de un sistema de puesta a tierra	13
Figura 3.3: Componentes de la resistencia de tierra en un electrodo de tierra.....	14
Figura 3.4: Electrodo activo con varilla copperweld	15
Figura 3.5: Electrodo activo de placas	15
Figura 3.6: Estructuras metálicas enterradas.....	16
Figura 3.7: Efectos de la temperatura en la resistividad del terreno	21
Figura 3.8: Medición de la resistividad de tres electrodos.....	23
Figura 3.9: Medición de la resistividad con cuatro electrodos.....	24
Figura 3.10: Medición de la resistividad por la configuración de Wenner.....	26
Figura 3.11: Medición de la resistividad por la configuración de Schullumberger.	26
Figura 3.12: Método Wenner	28
Figura 3.13: Distribución de potencia en el terreno	28
Figura 3.14 Modelo de dos capas	30
Figura 3.15: Electrodo semiesférico	31
Figura 3.16: Potencial en la superficie del terreno	32
Figura 3.17: Tensión de contacto	33
Figura 3.18: Tensión de paso	33
Figura 3.19: Electrodos semiesféricos	34
Figura 3.20: Distribución de potencial	35
Figura 3.21: Variación de potencial	35
Figura 5.1: Modelos de terreno de dos capas.....	40
Figura 5.2: Curva de potencial en la superficie a diferentes distancias.....	42
Figura 5.3: Curva de potencial de paso en la superficie del terreno.....	43

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Relación de Capacidad del Interruptor Automático del equipo	10
Tabla 3.2: Conductores para electrodos de puesta a tierra.....	11
Tabla 3.3: Dimensiones mínimas para los Electroodos.....	12
Tabla 3.4: Resistividad de diferentes suelos	17
Tabla 3.5: Efecto de la Temperatura en la Resistividad del Terreno.....	18
Tabla 3.6: Efecto de la Humedad en la Resistividad del Terreno	18
Tabla 3.7: Efecto de la Sal en la Resistividad del Terreno	19
Tabla 3.8: Resistividad de varios tipos de terreno	19
Tabla 3.9: Relación de la Corrosión con el pH.....	20
Tabla 3.10: Corrosión del Suelo de acuerdo de su resistividad presente.....	22
Tabla 3.11: Ventajas y desventajas de los métodos para la medición de la resistividad del terreno	27
Tabla 5.1: Resultados de resistividad del terreno a diferentes profundidades.....	37
Tabla 5.2: Constitución del terreno en el cual se Instalaran los Electroodos Activos.....	38
Tabla 5.3: Constitución del terreno en el cual se Instalaran los Electroodos Activos	45
Tabla 5.4: Costos anuales por concepto de Mantenimientos del Electrodo Químico Activo Comercial	46
Tabla 5.5: Costo total de Mantenimientos, Adquisición e Instalación del Electrodo Activo Comercial	46
Tabla 5.6: Costos anuales por concepto de Mantenimientos del Electrodo Activo-Prototipo.....	47
Tabla 5.7: Costo total por concepto Construcción de Electrodo Activo -Prototipo	47
Tabla 5.8: Costo total de Mantenimientos, Adquisición e Instalación del Electrodo Activo-Prototipo	48
Tabla 5.9: Análisis Técnico-Económico realizado a los Electroodos Activos	48
Tabla 6.1: Constitución del terreno en el cual se Instalaran los Electroodos Activos.....	49

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “Construcción de un Electrodo Activo y Análisis Técnico- Económico”

Autores: Bravo Villacres Wilson Renato
Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo

RESUMEN

Para el diseño y construcción del electrodo activo nos basamos en las normativas IEEE Std. 142-1991- BS 7430 1998 - NEC 6102410 que establecen las longitudes, materiales, tipos de suelda, químicos y los valores de resistencia (Ω) en los cuales debe estar operando el electrodo activo, lo cual es de vital importancia para salvaguardar la vida de los operadores y la protección de equipos eléctricos y electrónicos en caso que se produzcan sobre-corrientes o sobre-voltajes por cortocircuitos o descargas atmosféricas. El objetivo del diseño y construcción del electrodo activo es determinar su eficiencia mediante una comparación con un electrodo activo comercial, los cuales se instalaran en un terreno homogéneo que proporcione las mismas condiciones del suelo (humedad-temperatura-pH-granulometría- salinidad). Para el análisis técnico se realizó la medición de la resistividad del terreno y resistencia en los electrodos activos con el uso del teluometro SEW 4235. Para el análisis económico de los electrodos activos se tomó en cuenta el costo de construcción del electrodo activo-prototipo, químicos aplicados en su instalación y costo de mantenimiento anual durante su vida útil, en el caso del electrodo activo comercial se tomó en cuenta el costo de adquisición del mismo, químicos aplicados en su instalación y costo de mantenimiento anuales. Con los resultados del análisis técnico-económico de los electrodos activos se pudo constatar que el electrodo activo-prototipo presenta una mejor eficiencia técnica ya que presenta una resistencia considerablemente menor en comparación al electrodo comercial y los costos por concepto de mantenimiento anual son relativamente bajos en comparación con electrodo comercial, gracias a su diseño que encapsula los químicos provocando que su degradación sea mucho más tardía y prolongando su eficiencia por mucho más tiempo.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ACADEMIC UNIT OF ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED

TITLE: “Construction of an active electrode and Technical-Economic Analysis”

Authors: Bravo Villacres Wilson Renato

Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo

ABSTRACT

For the designing and construction of the active electrode relies on IEEE Std. 142-1991- BS 7430 1998 - NEC 6102410 regulations that establish lengths, materials, types of welding, chemicals and resistance values (Ω) in which it should be operate the active electrode, which has importance to safeguard the life of the operators and the protection of electrical and electronic equipment in case of overcurrents or overvoltages due to short circuits or atmospheric discharges. The objective of the designing and construction of the active electrode is to determine its efficiency through a comparison with a commercial active electrode, which will be installed in a homogeneous land that provides the same soil conditions (humidity-temperature-pH-granulometry-salinity). For technical analysis, the measurement of the resistivity of the ground and resistance in the active electrodes was made with the use of the SEW 4235 tellurometer. For economic analysis of the active electrodes, the construction consisted of the active electrode-prototype, applied chemicals In its installation and annual maintenance cost during its useful life, in the case of the commercial active electrode its acquisition cost, chemicals applied in its installation and annual maintenance cost were taken into account. With the results of the technical-economic analysis of the active electrodes was found that active-prototype electrode has better technical efficiency since it has a considerably lower resistance compared to the commercial electrode and the annual maintenance costs are relatively low in comparison with commercial electrode, thanks to its design that encapsulates chemicals causing its degradation later degradation and prolonging its efficiency longer.



CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal CERTIFICO que: la traducción del resumen del proyecto de Investigación al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de CIYA: **BRAVO VILLACRES WILSON RENATO** con C.I.180547595-9 y **REINOSO CHICAIZA EDWIN RICARDO** con C.I. 172010435-3, cuyo título versa “**CONSTRUCCIÓN DE UN ELETRODO ACTIVO Y ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO**” lo realizan bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Julio 2019

Atentamente,

Lic. MSc. Edison Marcelo Pacheco Pruna

DOCENTE DEL CENTRO DE IDIOMAS



1. INFORMACIÓN BÁSICA

PROPUESTO POR: Wilson Renato Bravo Villacres
Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo

TEMA APROBADO:

“CONSTRUCCIÓN DE UN ELETRODO ACTIVO Y ANÁLISIS TÉCNICO- ECONÓMICO”

Carrera: Ingeniería Eléctrica

Director de la propuesta tecnológica: Ing.MSc. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios

Equipo de trabajo:

Tutor: MSc. Napoleón Pesantez

Estudiantes: Wilson Renato Bravo Villacres
Reinoso Chicaiza Edwin Ricardo

Lugar de ejecución: Establo de Ordeño de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión Salache.

Tiempo de duración de la propuesta: Marzo-Agosto 2019

Fecha de entrega: 22/07/2019

Línea y sub-líneas de investigación asocia la propuesta tecnológica: Sistemas de protección eléctrica

Tipo de propuesta tecnológica: Prototipo

2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

2.1 TÍTULO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

Construcción de un electrodo activo y análisis técnico - económico.

2.2 TIPO DE ALCANCE

Emprendimiento: El proyecto se considera de emprendimiento ya que el objetivo principal es diseñar y construir un electrodo activo que ofrezca una mejor eficiencia técnica y económica ante los electrodos activos comerciales.

2.3 ÁREA DEL CONOCIMIENTO:

Ingeniería, industria y construcción

2.4. SINOPSIS DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

La construcción de un electrodo activo para sistemas de puesta a tierra tiene como objetivo mejorar el rendimiento del mismo en base a cálculos matemáticos y diversas pruebas con distintos materiales para así llegar a la máxima eficiencia, con el fin de proporcionar al sector eléctrico un electrodo activo, mucho más eficiente que los actuales a un precio menor.

2.5 OBJETO DE ESTUDIO Y CAMPO DE ACCIÓN

2.5.1 Objeto de estudio

Construir un prototipo de electrodo activo que presenta una mejor eficiencia y reducir los costos por concepto de mantenimientos durante su vida útil.

2.5.2 Campo de acción

Práctico: El Electrodo Activo-Prototipo permitirá realizar pruebas de resistencia aplicando diferentes métodos tales como: Configuración de Wenner y Schulumberger.

2.6.1 Situación problemática

Dentro de los sistemas de puesta a tierra, el electrodo es parte fundamental, están directamente en contacto con el terreno y debe proporcionar un medio para desviar cualquier corriente de fuga, por esta razón los electrodos deben tener propiedades mecánicas y eléctricas adecuadas para continuar respondiendo las requerimientos durante un periodo de tiempo relativamente largo, en el cual es difícil efectuar ensayos reales o inspección, además el material debe tener buena conductividad eléctrica y no corroerse dentro de un amplio rango de condiciones de suelo.

En el mercado hay diferentes tipos de electrodos y en distintas marcas, que cada una tiene sus composiciones, tamaños, longitudes y diámetros pero carecen de un mantenimiento relativamente conveniente en cierto tiempo y es difícil hacer arreglos en los daños que puedan haber, disminuyendo su vida útil y su eficiencia, pues la corrosión destruye las propiedades de los materiales que componen el electrodo, económicamente no es conveniente, ni técnicamente no es recomendable que haya un deterioro prematuro.

En los sistemas eléctricos, en la instalación de un sistema de puesta a tierra siempre se necesita lograr un ahorro económico y alcanzar todas las expectativas de seguridad, pero el costo de los elementos que conforman el sistema de puesta a tierra es elevado especialmente en la adquisición del electrodo dependiendo de cómo está construido y los materiales que lo componen.

2.6.2 Problema

El alto costo del electrodo activo comercial y su bajo rendimiento en sistemas de protección a tierra dio lugar a la construcción de un electrodo activo con un mejor rendimiento y un bajo costo para las diferentes aplicaciones en el sector eléctrico.

2.7 HIPÓTESIS O FORMULACIÓN DE PREGUNTA CIENTÍFICA

El presente trabajo tiene como fin dar una alternativa al constante problema que existe en los sistemas de puesta tierra debido a la alta resistividad del suelo existente algunos lugares, lo que afecta en forma significativa la resistencia final de la puesta a tierra clásicos. Por esta razón se pretende aprovechar las características constructivas del electrodo activo el cual presenta mejores características que un electrodo normal y por lo tanto se puede obtener mejores resistencias de puesta a tierra con menos electrodos por esta razón se pretende la construcción de un electrodo activo que permitirá mejorar las propiedades mecánicas y eléctricas, consiguiendo bajar la resistencia para evitar la circulación de corrientes fuga en los circuitos eléctricos y al mismo tiempo economizando en la implementación de elementos que constituyen un sistema aterrizad

2.8 OBJETIVO(S)

2.8.1 Objetivo general

- ✓ Construir un electrodo activo prototipo para un análisis de eficiencia técnica y económica.

2.8.2 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar un electrodo activo basándonos en la Normativa Ecuatoriana de Construcción -Instalaciones Electromecánicas.
- ✓ Analizar los parámetros eléctricos presentes en los electrodos activos para la determinación de su eficiencia.
- ✓ Evaluar económicamente los gastos generados por los electrodos activos durante su vida útil.

2.9. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS

OBJETIVO	ACTIVIDAD	RESULTADO	INSTRUMENTO
Diseñar un electrodo activo basándonos en la Normativa Ecuatoriana de Construcción - Instalaciones Electromecánicas.	Investigación las dimensiones y materiales empleados para la construcción de electrodos activos en diversas fuentes bibliográficas	Diseño preliminar del Activo-Prototipo	AutoCAD
2) Analizar los parámetros eléctricos presentes en los electrodos activos para la determinación de su eficiencia.	Análisis de resultados	Determinar que electrodo activo tiene una mejor eficiencia	Aplicación de Fórmulas para el cálculo de parámetros eléctricos
3) Evaluar económicamente los gastos generados por los electrodos activos durante su vida útil.	Análisis de resultados.	Conocer que electrodo activo genera un mayor gasto económico durante su vida útil.	Tabla de análisis económico(gastos por instalación y mantenimientos por 15 años)

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Definiciones y conceptos básicos

El sistema de puesta a tierra es la parte más importante de cualquier sistema eléctrico, y tiene como fin restringir la tensión (voltaje) que presentan las masas metálicas con relación a tierra. Éstos actúan desviando la energía de la sobretensión provocadas por cortocircuitos o descargas atmosféricas hacia la puesta a tierra, protegiendo de daños parciales o permanentes a equipos electrónicos y eléctricos.

Mallas de Tierra

La malla de tierra es la unión de varios conductores eléctricos que no presentan una cubierta protectora (desnudos) y se encuentran conectados eléctricamente entre sí para la protección de equipos eléctricos y electrónicos.

Conexión a Tierra

Es el enlace eléctrico que existe entre el sistema de puesta a tierra y el equipo a proteger de descargas atmosféricas o cortocircuitos.

Resistividad de un Terreno

Es la propiedad que presenta el terreno para conducir electricidad y su unidad de medida son los ohmios-metros.

Tierra de Servicio

Es una protección en la que intervienen la malla de puesta a tierra que se encuentra enterrada, en la cual el neutro de la instalación eléctrica que se encuentre consumiendo energía debe estar conectado a una puesta tierra de servicio.

Electrodo de Tierra

El electrodo de tierra es todo conductor tales como: cables, barras, tubos y placas que se encuentran enterrados y están directamente en contacto con la tierra.

Poner a Tierra

Se entiende como poner a tierra cuando el equipo o instalación eléctrica se encuentra conectado a un electrodo activo o a su vez a una malla de puesta a tierra

3.2 Sistema de Puesta a Tierra

Según la norma IEEE 80-2000 un sistema de puesta a tierra se define como la conexión conductora, ya sea intencional o accidental, en la cual un circuito eléctrico o equipo se conecta a la tierra o a algún cuerpo conductor de dimensión relativamente grande que cumple la función de la tierra. Se puede decir que un sistema de puesta a tierra se fundamenta en la conexión de equipos eléctricos y electrónicos a tierra, para evitar daños al equipamiento en caso de una corriente transitoria peligrosa, es decir, el objetivo principal de un sistema de puesta a tierra es el de brindar seguridad a las personas y proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección [1].

3.2.1. Función de un sistema de puesta a tierra

La función de un sistema de puesta a tierra de cualquier instalación eléctrica es, lograr la derivación al terreno de las corrientes de falla de cualquier naturaleza que se puedan originar tales como: corrientes de defecto de operación en equipos eléctricos, bajo frecuencia industrial, por fallas de aislamiento o descargas atmosféricas.

3.2.2. Objetivos de los sistemas de puesta a tierra

Los objetivos de una conexión a tierra son:

- ✓ Dar seguridad a las personas en caso de fallas en el sistema eléctrico
- ✓ Salvaguardar la vida de las personas, restringiendo la tensión de contacto durante condiciones en las cual se haya producido un cortocircuito.
- ✓ Impedir que produzcan tensiones (voltajes) de paso, transferidas y contacto, en gabinetes metálicos en los que se encuentran los equipos eléctricos.
- ✓ Proteger las instalaciones eléctricas y equipos en general.
- ✓ Disipar las sobre corrientes producidas por descargas atmosféricas.
- ✓ Disipar las cargas estáticas que se generan en el sistema eléctrico.

El sistema de puesta a tierra tiene como objetivo la disipación de las perturbaciones debido por lo cual precisa:

- ✓ La vía entre las corrientes que retornan causando perturbaciones en los equipos o sistemas eléctricos y electrónicos.
- ✓ La tensión que se toma como referencia para los dispositivos de protección como son los filtros entre otros.

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

- ✓ Puesta a tierra para sistemas eléctricos.
- ✓ Puesta a tierra para protección de equipos eléctricos.
- ✓ Puesta a tierra empleados en la protección de señales electrónicas.
- ✓ Puesta a tierra para protección electrónica
- ✓ Puesta a tierra para protección de descargas atmosféricas.
- ✓ Puesta a tierra de protección electrostática.

3.3.1. 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 [2].

- ✓ Los neutros de los transformadores, que lo requieren en instalaciones o redes de distribución con neutro a tierra de forma directa.
- ✓ El neutro presente en los alternadores y otros equipos eléctricos y electrónicos que lo requieran.
- ✓ Los sistemas eléctricos de baja tensión de transformadores de medida.
- ✓ Los limitadores, descargadores, auto válvulas, pararrayos, para eliminación de sobre tensiones (voltajes) o descargas atmosféricas.
- ✓ Los elementos de derivación de puesta a tierra de los seccionadores.

3.3.2. Puesta a tierra para protección de 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 sobre corriente 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].

3.3.3. Puesta a tierra en señales electrónicas.

Para evitar la inserción corriente parasitas en las señales en frecuencia, se instalan sistemas de puesta a tierra menores a 4Ω según la norma IEEE 80-2000.

3.3.4. Puesta a tierra de protección electrónica.

Para evitar el deterioro de los elementos conductores y semiconductores por sobre voltajes o sobre corrientes, se colocan elementos de protección de forma que puedan limitar las sobretensiones tensiones entre los conductores y tierra la tierra de referencia.

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 [3].

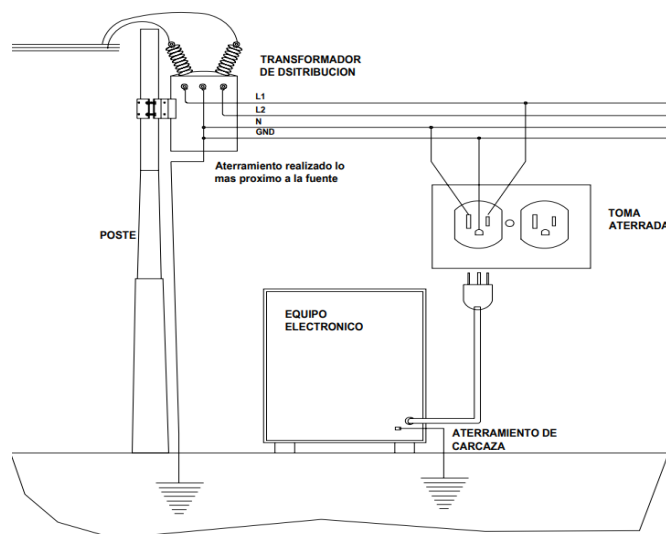


Figura 3.1: Puesta a tierra de equipo electrónico.

Fuente: [3]

3.3.5. 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 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 [4].

3.4. Componentes de un Sistema de Puesta a Tierra

Un sistema de puesta a tierra está formado por uno o varios electrodos activos enterrados (según lo requiera el sistema de puesta a tierra), y conductores de cobre llamados las líneas de tierra, estos conductores cumplen la función de interconectar electrodos a los equipos eléctricos que deben tener la referencia a tierra.

Los electrodos y conductores eléctricos son los elementos más significativos de un sistema de puesta a tierra, sin embargo, existen otros elementos que a su vez son de vital importancia para la correcta instalación del sistema.

Los componentes que constituyen de un sistema de puesta a tierra son:

- ✓ Conductor de puesta a tierra de los equipos.
- ✓ Conductor del electrodo de puesta a tierra.
- ✓ Electrodos.
- ✓ Conectores.
- ✓ Sueldas exotérmicas.
- ✓ Compuestos químicos.
- ✓ Barra de aterramiento.
- ✓ Caja de conexión.

3.4.1 Conductor de puesta a tierra de equipos

Estos conductores realizan la interconexión de la carcasa de los equipos instalados ya sean electrónicos o eléctricos al sistema de protección de puesta a tierra.

Para el cálculo calibre del conducto del sistema de puesta a tierra, se tomara como referencia la tabla 250_122 del NEC Internacional.

Tabla 3.1: Relación de Capacidad del Interruptor Automático del equipo.

Capacidad del Interruptor Automático	Calibre del conductor
15	14
20	12
30	10
40	10
60	10
100	8
200	6
300	4
400	3
500	2
600	1
800	1/0
1000	2/0
1200	3/0
1600	4/0
2000	250kcmil
2500	350kcmil
3000	400kcmil
4000	500kcmil
5000	700kcmil
6000	800kcmil

El criterio para la utilización de la tabla 1 se basa, en observar la capacidad de corriente del breaker principal de acometida y con este valor buscar en esta tabla el calibre del conductor de tierra de los equipos.

3.4.2. Conductor del electrodo de Puesta a Tierra

Es todo conductor que se conecta intencionalmente a la tierra, este conductor se convierte en un camino de escape, para la corriente no deseada la cual debe ser desviada hacia la tierra y a su vez une el sistema de puesta a tierra con la barra principal de puesta a tierra mediante un tipo de suelda especial del mismo material (cobre) o conectores (bronce), para facilitar la selección de este componente se debe utilizar la **Tabla 3.2** de la NEC internacional [5].

Tabla 3.2: Conductores para electrodos de puesta a tierra

Conductor de Cobre	(CU)
# 2 ó más pequeño	8
#1 ó #1/0	6
#2/0 ó #3/0	4
En General #3/0 a través de #350 kcmil	2
En General #350 kcmil a través de #600 kcmil	1/0
En General #600 kcmil a través de #1100 kcmil	2/0
En General #1100 kcmil	3/0

Fuente: [5]

Para la utilización de los datos proporcionados por la **tabla 3.2**, es indispensable saber el calibre (mm) de los conductores empleados en la acometida principal que alimentara a las carga.

3.4.3. Ecuación para cálculo del conductor

Esta ecuación que se incluye a continuación es utilizada para el cálculo del diámetro del conductor del electrodo de puesta a tierra.

Cálculo del Conductor

$$A_{mm^2} = \frac{IK_f \sqrt{t_c}}{1,9737} \quad (3.1)$$

A_{mm^2} =Sección del conductor en [mm^2].

I = Corriente de falla a tierra en [*Amperios*].

K_f =Es la constante en Tablas para diferentes materiales y valores de T_m .

T_m =Es el límite de temperatura que soporta el conductor al paso de la corriente.

T_c = Tiempo en el cual se despeja la falla en [*segundos*].

3.4.4. Electrodo de puesta a tierra

Es un conductor desnudo, este a su vez puede ser una varilla, un tubo de cobre mayor a 20 mm, un fleje, un cable, o una placa que va enterrado de acuerdo a las mediciones de resistividad que presente el terreno, su objetivo es establecer el contacto con la tierra física de referencia y proteger a los técnicos operarios, equipos eléctricos y electrónicos que están conectadas al sistema eléctrico en caso que se produzcan corrientes de falla (cortocircuitos) o descargas atmosféricas.

Tabla 3.3: Dimensiones mínimas para los Electroodos

Tipo de Electrodo	Dimensiones Mínimas				
	Materiales	Diámetro(mm)	Área mm^2	Espesor mm	Recubrimiento μm
Varrilla	Cobre	12,7			
	Acero Inoxidable	10			
	Acero Galvanizado en acero	16			70
	Acero con recubrimiento Electro depositado en cobre	14			100
	Acero con recubrimiento total en cobre	15			2000
Tubo	Cobre	20		2	
	Acero Inoxidable	25		2	
	Acero Galvanizado en caliente	25		2	55
Fleje	Cobre		50	2	
	Acero Inoxidable		90	2	
	Cobre cincado		50	2	40
Cable	Cobre con estaño	1,8 para cada hilo	50		
	Acero Galvanizado en caliente	1,8 para cada hilo	70		
Placa	Cobre		20000	1,5	
	Acero Inoxidable		20000	6	

Fuente: [6]

3.4.5. Resistencia de un Sistema de Puesta a Tierra

La resistencia presente al paso de la corriente eléctrica en caso de fallas eléctricas que es disipada a través del electrodo posee tres componentes.

- ✓ Resistencia en el electrodo: Presenta una resistencia relativamente baja por la constitución propia del material (Cobre).
- ✓ Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo: esta resistencia se puede depreciar en el caso que el electrodo activo se encuentre cubierto en su totalidad por el químico protector que lo aislé de las propiedades corrosivas del terreno.
- ✓ Resistencia de la tierra circundante: ésta es una de las componentes más importantes ya que determina el valor de la resistencia presente en un sistema de puesta a tierra y depende principalmente de la resistividad presente en el suelo.

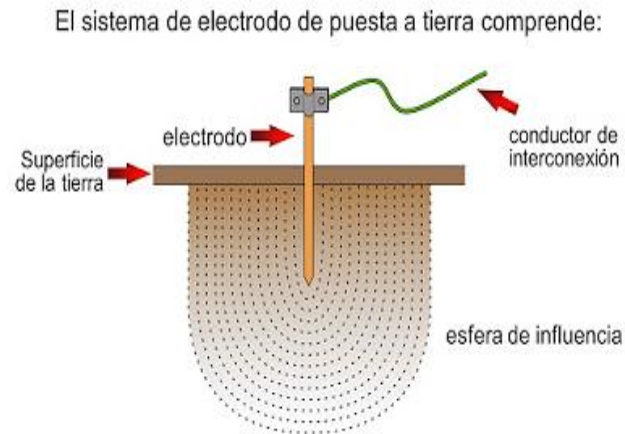


Figura 3.2: Componentes de un sistema de puesta a tierra
Fuente: [7]

Alrededor del electrodo de puesta a tierra, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias serie de las celdas concéntricas o esferas de influencia que se forman alrededor del electrodo. Localizadas progresivamente hacia fuera del electrodo como se ilustra en la **figura 3.2**, a medida que aumenta la distancia, las capas del suelo presentan una mayor área transversal a la corriente y por tanto una menor resistencia. Se sigue entonces que la resistencia de puesta a tierra reside esencialmente en las capas de suelo más próximas al electrodo. Normalmente para una varilla de 2.4 metros, el 90% del valor de la resistencia de puesta a tierra se encuentra dentro de un radio de 3.0 metros [7].

3.5. Electrodo de puesta a tierra especialmente contruidos.

Son aquellos que se construyen con una configuración de acuerdo a l tipo de terreno y se emplean químicos especiales para su instalación.

- a) Electrodo de tipo Varilla o Tubería.
- b) Electrodo de tipo Placa.
- c) Estructuras metálicas subterráneas.

3.5.1. Electrodo de varilla o tubería

De acuerdo con la NEC (Normativa Ecuatoriana de Construcción-Instalaciones Electromecánicas) los electrodo de varilla y tubo, no deben tener menos de 2,40 m de longitud y deben instalarse de tal modo que por lo menos 2,40 m de su longitud esté en contacto directo con la tierra, las varillas de metales no ferrosos deben estar protegidas con un químico com propiedades conductivas presentes y tener un diámetro mayor a 13 mm, y las demás de por lo menos 16 mm. Las tuberías deben tener un diámetro no inferior a 19 mm, y si son de hierro,

deben tener una protección contra corrosión en su superficie, hay que notar que la varilla de 5/8" comercial mide 14,7 mm de diámetro y que la varilla con protocolos de CFE 16 mm. Las varillas de acero con un recubrimiento de cobre (copperweld) de 10 milésimas dura un promedio de 35 años en un suelo promedio; si tiene un recubrimiento de 13 milésimas dura hasta 45 años. En cambio, una varilla de acero galvanizado tiene una vida estimada de 15 años. Estos electrodos se aplican al suelo mediante percusión hasta que alcanzan la profundidad adecuada. En caso de terrenos rocosos. Las varillas no pueden meterse de esa manera; se doblan o solamente no pueden entrar. Ocasionalmente se ha sabido de casos donde las varillas han sido regresadas hacia la superficie después de haber tratado de clavarlas en terrenos rocosos, cuando la roca está a menos de 2,40 m, estos electrodos pueden meterse en diagonal hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical [7].

Pero, si el terreno presenta gran cantidad de rocas que imposibilitan la instalación vertical del electrodo, se deben enterrar horizontales en una trinchera abierta para el caso a 80 cm de profundidad por lo mínimo.

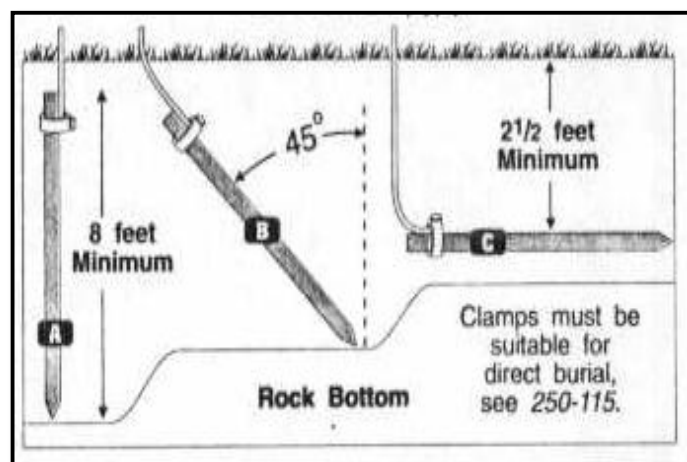


Figura 3.3: Componentes de la resistencia de tierra en un electrodo de tierra.

Fuente: [7]

Esta varilla debe ser instalada en forma vertical a una profundidad de por lo mínimo de 1.80m a 2.40m, como se observa en la **figura 3.3**. La norma también permite que la varilla de cobre puede ser instalada en forma horizontal o con un ligero ángulo de inclinación siempre que la misma se instale a una profundidad de por los menos 0.80 m de profundidad como mínimo y cumpla las normas para su instalación. La varilla Copperweld no tiene mucha área transversal de contacto, pero gracias a su longitud, hace que pueda tener un contacto con diferentes capas presentes en el terreno como se muestra en la **figura 3.4**.

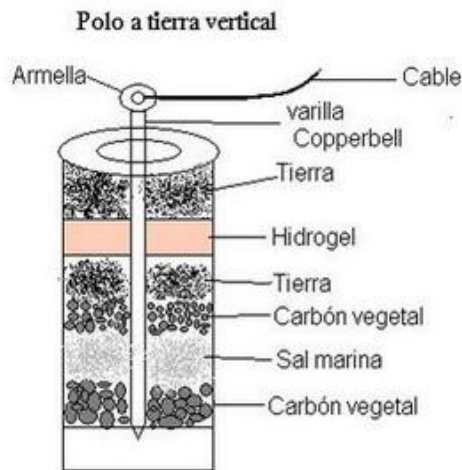


Figura 3.4: Electrodo activo con varilla copperweld.

Fuente: [8]

La resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(4 \cdot \frac{L}{r} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

L = es el largo de la varilla en (m).

r = es el radio de la varilla en (m)

ρ = es la resistividad del terreno en (ohm – m).

3.5.2. Electrodo de placa

Los electrodos de tipo placa deberán tener por lo menos de 20 centímetros cuadrados que este en contacto directo con el suelo. En el caso de las placas de acero o hierro deberán tener por lo menos 6,4 mm de espesor. Si los materiales empleados en las placas son no ferroso deberán tener por lo menos 1,52 mm de espesor.

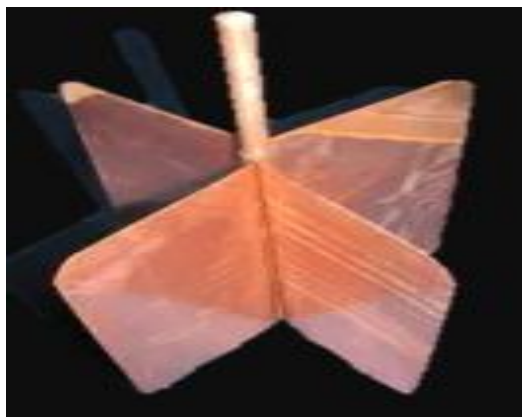


Figura 3.5: Electrodo activo de placas

3.5.3. Estructuras metálicas enterradas

La NOM menciona la puesta a tierra mediante sistemas de tuberías o tanques enterrados. Pero, puede ser cualquier clase de estructura metálica subterránea. Las normas americanas MIL-STD-1542B, MIL-HDBK-419 y MIL-STD-188-124 no recomiendan el uso de los ademes de pozos para lograr una baja impedancia a tierra. Las normas mencionadas hacen énfasis en que los ademes presentan muy baja resistencia a tierra en contacto directo., pero no reducen la impedancia en corriente alterna, y, mencionan que si los ademes metálicos son utilizados como parte del sistema de tierras, no deben ser los únicos elementos en contacto con el suelo [9].

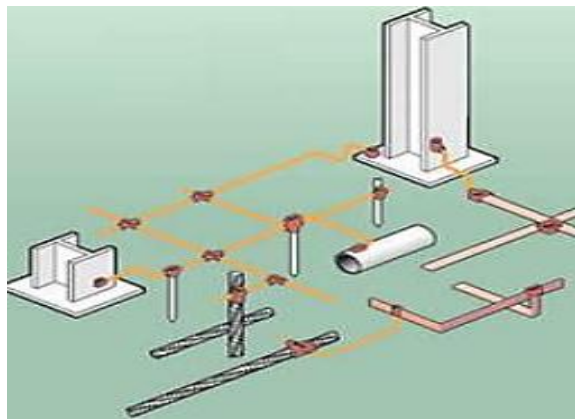


Figura 3.6: Estructuras metálicas enterradas
Fuente: [9]

3.6. Factores que influyen en la resistividad del terreno

La medición de los parámetros del terreno tiene como fin obtener datos de la composición del lugar donde se vaya a instalar el electrodo activo los cuales son: Composición propia temperatura, humedad y pH (medida de acidez del terreno a instalar el electrodo), Sales solubles, del terreno, Estratigrafía Granulometría, Estado higrométrico y la compactación que son factores muy importantes ya que de ellos depende que tipo de tratamiento se debe realizar al terreno antes de instalar el sistema de puesta a tierra.

3.6.1. Efectos del tipo de suelo sobre la resistividad del terreno.

Ya se trate de un suelo mayormente arcilloso o muy arenoso, la resistividad de la tierra puede cambiar mucho. No es fácil definir exactamente a un suelo dado; la arcilla puede cubrir a una amplia variedad de suelos de tal manera que no podemos decir que cualquier suelo dado tiene una resistividad de tantos ohms-cm acompañando la **tabla 3.4** desde dos libros de referencia

diferentes se muestra el amplio rango en valores. Nótese también la variedad de valores para los mismos tipos generales de suelos.

Tabla 3.4: Resistividad de diferentes suelos

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD DEL TERRENO EL OHMIOS/METRO
Terrenos pantanosos	30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceo	200 a 3 000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1 500 a 3 000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1 000 a 5 000
Calizas agrietadas	500 a 1 000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1 500 a 10 000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2 000 a 3 000
Basalto o grava	3 000 a 5 000

3.6.2. Efectos de la temperatura sobre la resistividad del terreno.

Con respecto a la temperatura presente en el terreno no se ha obtenido mucha información sobre sobre su efecto en la resistividad del terreno. Pero a su vez dos resultados conducen a la conclusión que un incremento en la temperatura del suelo disminuirá considerablemente la resistividad.

- ✓ A mayor presencia de agua la resistividad tiende a disminuir.
- ✓ El incremento en la Temperatura del terreno disminuirá la resistividad.

En la **Tabla 3.5: Efecto de la Temperatura en la Resistividad del Terreno** los resultados confirman que el incremento de la temperatura en el terreno reduce la resistividad presente en el mismo. En el caso congela el agua presente en el terreno, la resistividad se ve incrementada considerablemente; el hielo presente en el terreno una resistividad alta. La resistividad continúa incrementándose conforme se reduce la temperatura por debajo del nivel de congelación.

Tabla 3.5: Efecto de la Temperatura en la Resistividad del Terreno

EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO		
TEMPERATURA		RESISTIVIDAD
°C	°F	OHM-CM
20	68	7,200
10	50	9,900
0 0-5	32(agua)	13,800
0 0- 5	32(hielo)	30,000
-15	14	330,000

3.6.3. Efectos de la humedad y sales disueltas sobre la resistividad del terreno

Efecto de la humedad en la resistividad del Terreno, se exhiben los efectos típicos del agua sobre el terreno dependiendo las estaciones climáticas a la que esté sometido , en la tabla se puede observar que al estar secos en ambos tipos de terreno las resistividades son alrededor de 1000 Mega ohm -cm, siendo buenos aislantes. Con un contenido de humedad del 30% en el terreno, se aprecia un decrecimiento drástico en la resistividad (ohmios por metro) del terreno que se puede determinar por un factor de alrededor de 100,000 veces del valor original ya que la resistividad del terreno está ligado directamente a la humedad a la que se encuentre como lo muestra la **Tabla 3.6.** [10].

Tabla 3.6: Efecto de la Humedad en la Resistividad del Terreno

EFECTOS DE LA HUMEDAD EN LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO		
CONTENIDO DE HUMEDAD % POR PESO RESISTIVIDAD OHM- CM	TERRENO SUPERFICIAL	ARCILLA ARENOSA
0.0	1,000 x 10 ⁶	1000 x 10 ⁶
2.5	250.000	150,000.0
5.0	165.000	43.000
10	53.000	22.000
15	21.000	13.000
20	12.000	10.000
30	10.000	8.000

3.6.4 Efecto de la sal en la resistividad del terreno.

En ella para un 0% de sal la resistividad es de unos 1 0,7 Kilo ohm-cm, se aprecia un decrecimiento drástico en la resistividad del terreno que se puede determinar por un factor de alrededor de 1000 veces del valor original cuando el terreno tiene un porcentaje del 20%. Este efecto puede ser útil para proporcionar un buen electrodo de baja resistencia, en lugar de un sistema de electrodos elaborado y caro [10].

Tabla 3.7: Efecto de la Sal en la Resistividad del Terreno

Efectos de la sal en la resistividad del terreno	
% De sal agregada por peso de humedad	Resistividad (Ω -cm)
0.0	10,700
0.1	1,800
1.0	460
5.0	190
10	130
20	100

3.6.5. Constitución del terreno

En la constitución del terreno, se toma en cuenta la cantidad minerales en porcentaje (%) presentes en el terreno con el fin de conocer como afectaran en su resistividad. Los terrenos lluviosos que en su constitución presentan diferentes capas tales como humos, son aquellos que poseen resistividades más bajas y su resistividad no tiende a variaren en el tiempo como se muestra en la **Tabla 3.8**.

Tabla 3.8: Resistividad de varios tipos de terreno.

Tipo de terreno	Resistividad del terreno (Ω -cm)	Resistencia de la puesta a tierra					
		Profundidad del electrodo de puesta a tierra(metros)			Cinta de puesta a tierra(metros)		
		3	6	10	5	10	20
Terreno muy húmedo, pantanoso.	30	10	5	3	12	6	3
Terreno de cultivo agrícola,terrenos fértiles y arcillosos	100	33	17	10	40	6	3
Terreno arcilloso arenoso	150	50	25	15	60	30	15
Terreno arenoso húmedo	250	66	33	20	80	40	20
Hormigón 1:5	400	-	-	-	160	80	40
Grava húmeda	500	160	80	48	200	100	50
Terreno arenoso seco	1000	330	165	100	400	200	100
Grava seca	1000	330	165	100	400	200	100
Terreno pedregoso	30000	1000	500	250	1200	600	250
Roca	10^7	-	-	-	-	-	-

3.6.6. Efecto del PH

La naturaleza del suelo no sólo depende de la composición de la roca original, sino de otros factores tales como presencia de materia orgánica, abonos químicos, contaminación industrial o doméstica, etc., con lo cual las características primitivas de un suelo pueden cambiar extraordinariamente. En muchos casos su presencia condiciona una alta corrosividad, como por

ejemplo un suelo pantanoso, ácido, con mucha materia orgánica, o bien suelos muy alcalinos que atacan metales como Zn, Al, Pb. Por todo ello, la medida del pH del suelo también proporciona un criterio de selección de su agresividad [11].

Tabla 3.9: Relación de la Corrosión con el pH.

RELACION DE LA CORROSIÓN CON EL pH			
pH	Medio	Corrosividad	Proteccion catódico
< 4.0	Ácido muy fuerte	Muy agresivo	Si
4.0 - 4.5	Muy Ácido	Muy agresivo	Si
4.5-5.0	Ácido	Muy agresivo	Si
5.0-6.0	Moderadamente Ácido	Muy agresivo	Si
6.0-6.5	Poco Ácido	Agresivo	Si
6.5-7.5	Neutro	No agresivo	Depende
7.5-8.5	Poco Alcalino	No agresivo	Depende
>8.5	Muy Alcalino	Condicionado	Depende

3.6.7. Composición del terreno

La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500 ohm-m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 ohms respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible [12].

3.6.8. Estratigrafía

La resistividad de un terreno es el resultado de las diferentes capas presentes en el mismo. Puede ocurrir que la primera capa presente una resistividad relativamente baja y la segunda capa presente una resistividad alta, estos datos no ayudan a dimensionar la longitud de los electrodos que debe ser instalado.

3.6.9. Granulometría

Es una prueba que se realiza al terreno con el fin de conocer la porosidad y el poder retenedor de humedad de los materiales que influyen en la calidad del contacto del suelo con los electrodos. Al realizar esta prueba se pretende retirar las partículas que presente una dimensión mayor a 2 mm, con el objetivo poder realizar una buena compactación y reducir la resistividad del terreno.

3.6.10. Estado higrométrico

El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos [12].

3.6.11. Temperatura

A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° c, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra [13].

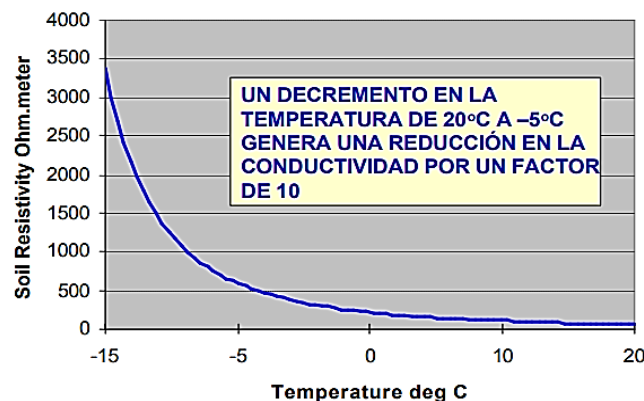


Figura 3.7: Efectos de la temperatura en la resistividad del terreno.
Fuente: [13]

3.6.12. Compactación

La resistividad del terreno tiende a reducir al realizar una compactación, tomar en cuenta que se debe tamizar el área del terreno antes de realizar la compactación del lugar donde se va a realizar la instalación del sistema del electrodo.

3.6.13. Corrosión en suelos

La corrosión en suelos es asombrosamente variable, el desgaste de los metales enterrados puede ser despreciable para suelos con poca humedad y porosos, o bien puede ser muy importante en suelos húmedos con gran salinidad y con un alto contenido de bacterias. La corrosión que se da

en estos casos, está entre la corrosión atmosférica y la corrosión en inmersión en una solución acuosa; el que se aproxime más a uno u otro extremo depende de diversos factores, como textura, porosidad, resistividad, pH, acidez o alcalinidad total, potencial red-ox, salinidad, materia orgánica presencia de sulfuros y de la humedad del suelo. En suelos totalmente carentes de humedad no tendría lugar el proceso corrosivo. Sin embargo en suelos arcillosos y húmedos, como los que se encuentran en México, el proceso corrosivo es un factor de suma importancia, sobre todo para las industrias que tienen grandes necesidades de emplear sistemas de tuberías enterradas, como las de gas, oleoductos. La corrosión en suelos es de tipo electroquímico por lo que la resistividad del terreno está íntimamente ligada con la corrosividad de la forma que se señala en la tabla [13].

Tabla 3.10: Corrosión del Suelo de acuerdo de su resistividad presente.

Resistividad	Grado de Agresividad
< 9	Muy Corrosivo
9 a 23	Bastante Corrosivo
23 a 50	Moderadamente Corrosivo
50 a 100	Ligeramente Corrosivo
> 100	Muy Ligeramente Corrosivo

3.7. Métodos para medir la resistividad del terreno

Todos métodos de medición de resistividad del terreno tienen como objetivo identificar el tipo de terreno en el cual se instalara el sistema de puesta a tierra y a que distancia es conveniente enterrar los electrodos [14].

Por el número de electrodos utilizados:

- ✓ Método con la aplicación de tres electrodos.
- ✓ Método con la aplicación de cuatro electrodos.
- ✓ Método por la configuración de Wenner.
- ✓ Método por la configuración de Schulumberger.

3.7.1. Método con la aplicación de tres electrodos

Básicamente consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo de dimensiones conocidas, enterrado en un terreno cuya resistividad se desea conocer. El cálculo de la resistividad aparente a una profundidad dada, puede ser realizada utilizando cualquiera de las

tres ecuaciones a, b, c; aunque se puede recomendar el uso de la ecuación “c” a partir de la cual se obtiene [15].

$$\rho a = \frac{2\pi \cdot L \cdot R}{\left(\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1\right)} \quad (3.3)$$

Ecuaciones:

$$(a) R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{2L}{a}\right) \quad (3.4)$$

$$(b) R = \frac{\rho}{2\pi L} \text{Arc. sen. } h\left(\frac{L}{a}\right) \quad (3.5)$$

$$(c) R = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \left(\ln\frac{4L}{a} - 1\right) \quad (3.6)$$

Dónde:

ρa : Resistividad aparente para una profundidad L ($\Omega \cdot m$)

L: Longitud del electrodo enterrado en contacto con el suelo (metros)

2r: Diámetro del Electrodo (metros)

R: Valor medido de la resistencia (ohmios).

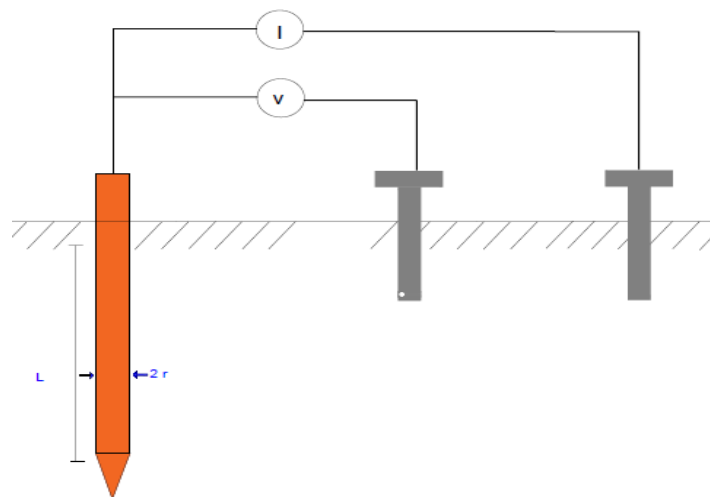


Figura 3.8: Medición de la resistividad de tres electrodos.

3.7.2. Método con la aplicación de cuatro electrodos.

El principio de este método está basado en la medición de la diferencia de potencial entre dos de los electrodos, luego de haber inyectado al terreno una corriente a través de los otros dos, La

corriente empleada puede ser corriente continua o a su vez corriente alterna que presente baja frecuencia (menores de 200 Hz) por razones de acoplamiento entre los conductores [16].

La ecuación fundamental para la medición de resistividad mediante cuatro electrodos es:

En donde:

$$\rho = \frac{2.\pi.V}{I} * \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)} \quad (3.7)$$

Donde:

V: Diferencia de potencial entre dos electrodos

I: Corriente inyectada

r1= Distancia entre la picas a y b.

r2= Distancia entre la picas b y d.

r3= Distancia entre la picas a y c.

r4=Distancia entre la picas c y d.

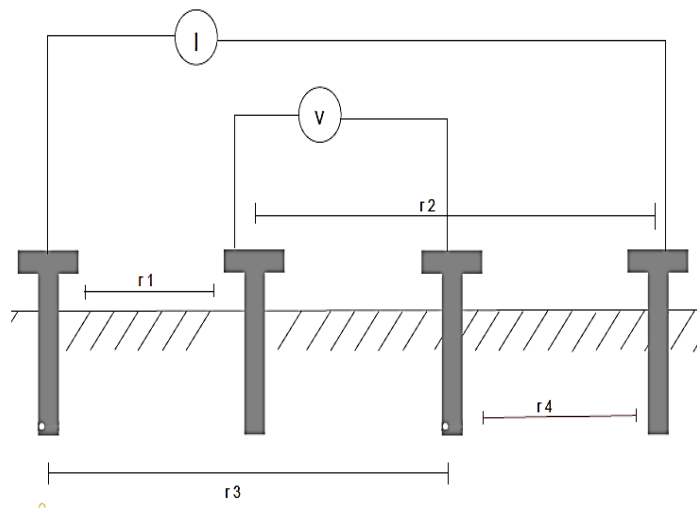


Figura 3.9: Medición de la resistividad con cuatro electrodos.

Si el terreno considerado es homogéneo, el valor de la resistividad medida por este método corresponderá al valor único de resistividad presente en el terreno; pero sí no es homogéneo, entonces el valor obtenido será ficticio, llamándose resistividad aparente y se designa por ρ_a .

Existen varias configuraciones clásicas de este método, dependiendo de la forma relativa en que se ubiquen los electrodos [16].

3.7.3 Método por la configuración de Wenner.

Para esta configuración, los cuatro electrodos se colocan en una línea recta, con igual separación y profundidad de penetración en el terreno, El método de medición está basado en la ecuación que se muestra desarrollada por el Dr. Frank Wenner, donde los electrodos 1 y 4 (externos) se utilizan para inyectar la corriente y los electrodos 2 y 3 (centrales) sirven para medir la diferencia de potencial que al dividirse por la corriente inyectada da un valor de resistencia [17].

Luego:

$$\rho = \frac{4\pi.a.R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2+4b^2}}} \quad (3.8)$$

Donde:

$$\rho = \frac{4.\pi.a.R}{n} \quad (3.9)$$

ρ : Resistividad del terreno (ohmio – metro)

R: Resistencia medida (ohmios)

a: Distancia entre electrodos (metros)

b: Profundidad de penetración de los electrodos (metros)

n: Factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2 (depende de la relación b/a).

La segunda ecuación puede aproximarse a:

$$\rho = 2\pi a R \text{ en el caso de que } 20b < a \quad (3.10)$$

$$\rho = 4\pi a R \text{ en el caso de que } 20b > a \quad (3.11)$$

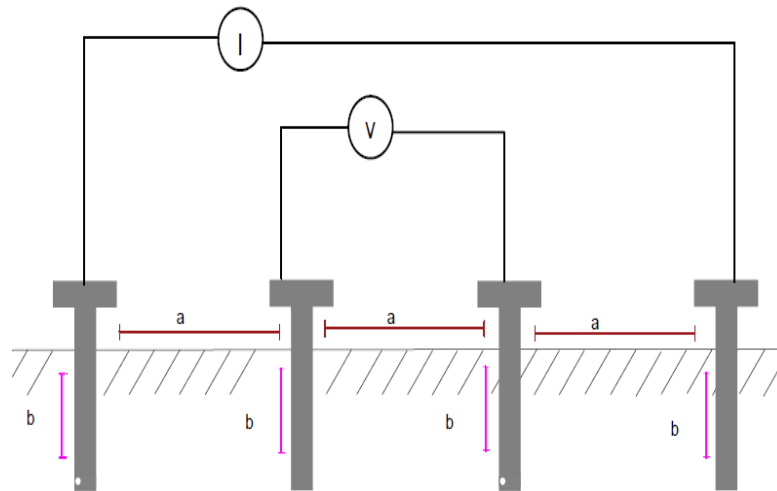


Figura 3.10: Medición de la resistividad por la configuración de Wenner.

3.7.4. Método por la configuración de Schulumberger.

Para esta configuración los cuatro electrodos se colocan también en línea recta, manteniendo la separación entre electrodos centrales o de potencial (a) constante; mientras que los electrodos exteriores varían su separación a partir de los electrodos interiores, a distancias múltiples (na) de la separación base de los electrodos centrales (a), La ecuación fundamental para este caso es [18].

$$\rho = \pi \cdot R \cdot n(n + 1)a \quad (3.12)$$

Algunas de las ventajas de esta configuración son la rapidez con que se realizan las mediciones y la menor sensibilidad a las variaciones laterales del terreno, debido principalmente a que sólo se desplazan los electrodos de corriente, permaneciendo en su lugar los de potencial.

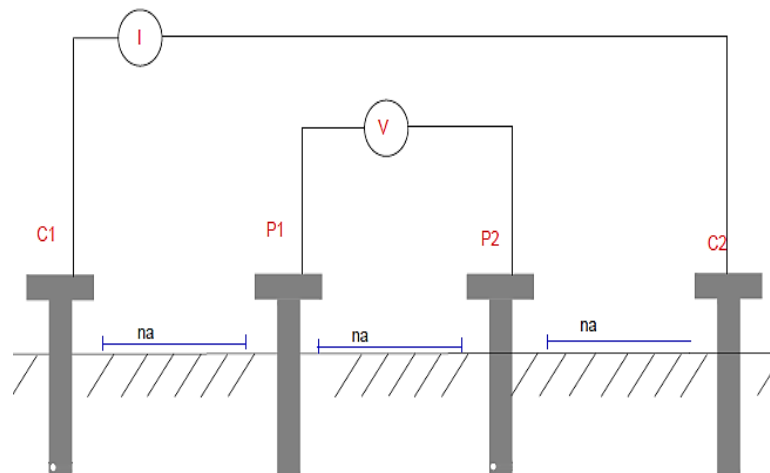


Figura 3.11: Medición de la resistividad por la configuración de Schulumberger.

3.7.5. Ventajas y desventajas de los métodos para la medición de resistividad.

Tabla 3.11: Ventajas y desventajas de los métodos para la medición de la resistividad del terreno.

Configuraciones para medición de la Resistividad	Ventajas	Desventajas
Configuración de tres electrodos	Se puede realizar las mediciones de la resistividad con solo dos picas.	Resultados obtenidos de resistividad poco exactos y además se debe tener valores de longitud y diámetro de electrodo de referencia.
Configuración de cuatro electrodos	Para las pruebas de resistividad se puede emplear una corriente continua o a su vez corriente alterna que presente baja frecuencia (menores de 200 Hz) por razones de acoplamiento entre los conductores y además se obtienen resultados más exactos de resistividad.	Si el terreno no es homogéneo, entonces el valor obtenido será ficticio, llamándose resistividad aparente.
Configuración de Wenner.	Se puede obtener el resultado de la resistividad a diferentes profundidades (1m-4m) lo cual nos ayuda a saber que longitud de electrodo nos conviene instalar en el terreno.	Las picas deben estar exactamente separadas y enterradas para obtener un resultado de resistividad lo más exacto posible.
Configuración de Schulumberger.	La rapidez con que se realizan las mediciones y la menor sensibilidad a las variaciones laterales del terreno, debido principalmente a que sólo se desplazan los electrodos de corriente, permaneciendo en su lugar los de potencial.	Solo se recomienda realizar las mediciones de resistividad a 90° para que no resulten afectada las lecturas por motivo de estructuras subterráneas.

3.8. Medida de la resistividad aparente

La medida se realiza a través del *método Wenner*, **Figura 3.12**, disponiendo cuatro electrodos (1, 2, 3, 4), de unos 20 cm de longitud, alineados y separados unos de otros por la misma distancia a . A través de los electrodos exteriores (1 y 4) se inyecta una corriente I , que crea un campo eléctrico en el terreno; por medio de los electrodos interiores (2 y 3) se mide la diferencia de potencial que se produce entre ellos. La distribución de potencial que se tiene en el terreno está representada en la **Figura 3.13**, donde V_{ii} es el potencial en el electrodo i creado por el paso de la corriente por el electrodo i , y V_{ji} es el potencial en el electrodo j creado por el paso de la

corriente por el electrodo i . Las distribuciones son iguales y de signo contrario, por ser los electrodos iguales y circular la corriente I en sentido contrario en los electrodos 1 y 4 respectivamente [19].

✓ *Voltímetro*: el valor viene dado por variación de los potenciales de los electrodos 2 y 3, $(V_2 - V_3)$

$$V_2 = V_{21} + V_{24} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{24}} \right] \quad (3.13)$$

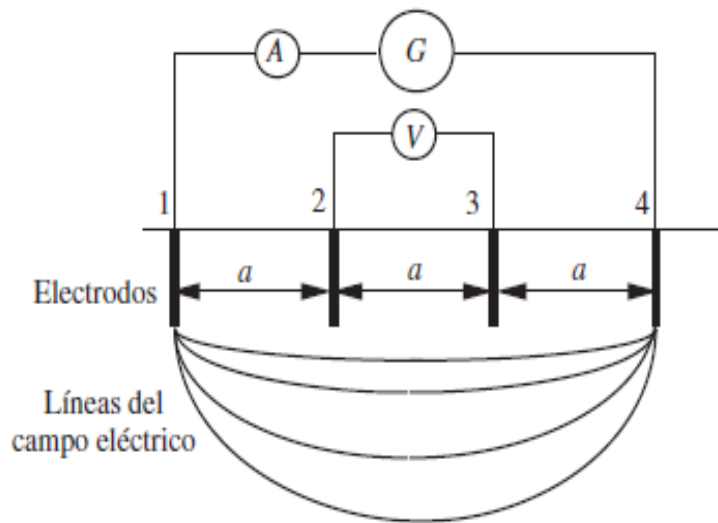


Figura 3.12: Método Wenner
Fuente: [19]

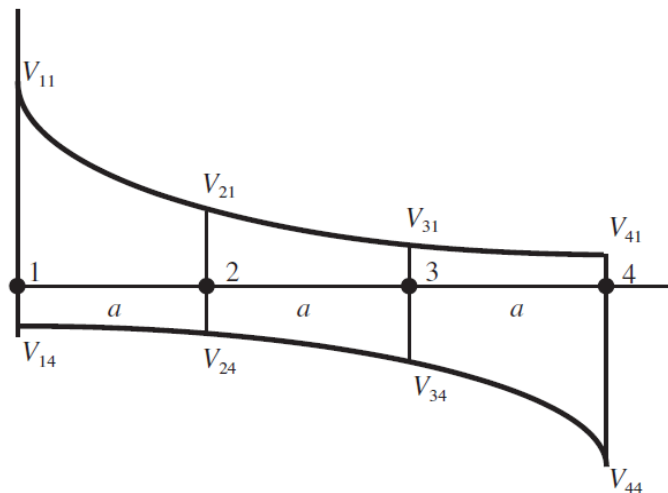


Figura 3.13: Distribución de potenciales en el terreno
Fuente: [19]

$$V_3 = V_{31} + V_{34} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{31}} + \frac{1}{r_{34}} \right] \quad (3.14)$$

$$V = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{24}} - \frac{1}{r_{31}} + \frac{1}{r_{34}} \right] \quad (3.15)$$

Sustituyendo $r_{21} = a$, $r_{24} = 2a$, $r_{31} = a$, el valor de la lectura del voltímetro es:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (3.16)$$

Y el de la resistividad del terreno

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} = 2\pi a \cdot R \quad (3.17)$$

Expresándose r en $\Omega \cdot m$, a en metros y R en Ω .

El valor así obtenido es un valor medio (resistividad aparente) de la resistividad del terreno a la profundidad $\approx 0,75a$, por lo que, midiendo a distintas distancias a , se obtienen valores de la resistividad, que pueden ser horizontales (terreno homogéneo), crecientes o decrecientes (terreno no homogéneo, con capas inferiores, menos o más conductoras que la superior).

3.8.1. Modelos de terrenos no uniformes

Dada la variedad de los elementos que forman el terreno, este no puede tratarse como una masa homogénea, pudiendo haber variaciones de su estructura con la profundidad, por lo que la inspección visual es un criterio escaso. Teniendo en cuenta que de la estructura del terreno depende su resistividad y el comportamiento de la instalación de puesta a tierra, es aconsejable, para cualquier instalación, realizar un cateo de la resistividad aparente del terreno a distintas profundidades conforme se va variando la distancia a entre los electrodos. La distribución del potencial, debida a la difusión de una corriente eléctrica en un terreno, responde a la ecuación de Laplace, cuya solución permite conocer el potencial en un punto cualquiera del terreno y de su superficie. Si el terreno no es homogéneo se ajustan los valores de la resistividad aparente obtenidos a modelos matemáticos que consideran. El terreno formado por n estratos homogéneos, de espesores h_i y resistividades uniformes r_i , salvo el último, cuyo espesor es infinito (modelo

multicapas), adaptándose para las aplicaciones de la ingeniería eléctrica el correspondiente al de dos capas. Las condiciones de contorno que se consideran para la resolución de la ecuación de Laplace en los modelos multicapas [19].

- ✓ El terreno está formado por n capas de resistividad uniforme ($r_1, r_2, r_3...$) y espesores ($h_1, h_2, h_3...$, teniendo la última capa espesor infinito).
- ✓ La componente vertical de la densidad de corriente es cero en la superficie del terreno.
- ✓ En las proximidades del punto de difusión de la corriente el potencial tiende al valor que corresponde a un electrodo semiesférico situado en la primera capa.
- ✓ A profundidad infinita el potencial tiende a cero.

3.8.2. Modelo de dos capas

Este modelo está planteado para considerar terrenos que estén formados por dos capas homogéneas, la superior de resistividad r_1 - espesor h , y la segunda de resistividad r_2 = espesor infinito como se muestra a continuación.

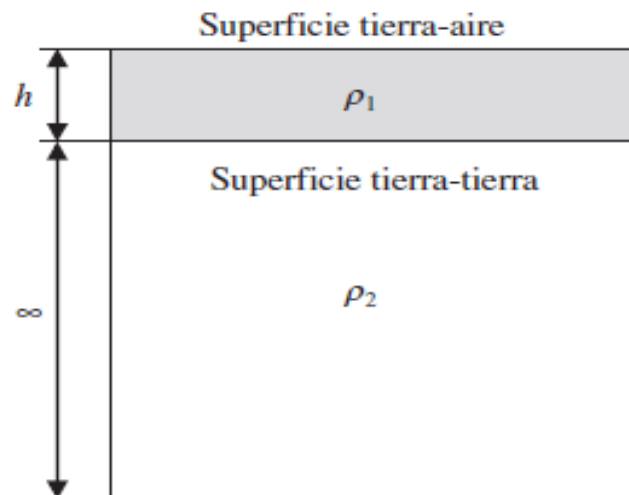


Figura 3.14: Modelo de dos Capas

Fuente: [19]

El valor del potencial en la superficie del terreno (V_{1s}) viene dado por la siguiente expresión:

$$V_{1s} = \frac{\rho_1 * I}{2 * \pi} * \left(\frac{1}{r} + 2 * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2 * n * h)^2}} \right) \quad (3.18)$$

r = distancia punto de corriente y referencia

K = coeficiente de reflexión entre capas

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.19)$$

$K = -1$ terrenos con la capa inferior perfectamente conductora ($\rho_2 = 0$);

$K = 0$ terrenos homogéneos ($\rho_1 = \rho_2$)

$K = 1$ terrenos con la capa superior perfectamente conductora $\rho_2 = 0$

El valor de la resistividad aparente $r(a)$ se obtiene a partir del método Wenner, teniendo en cuenta que en la Figura 15, el valor de V viene dado por la siguiente expresión.

$$V = V_2 - V_3 = 2 * V(a) - 2 * V(2a) \quad (3.20)$$

La ecuación corresponde a una hipérbola equilátera, cuyos valores dependen de la resistividad del terreno (r), de la intensidad de la corriente que difunde (I) y de la distancia al eje del electrodo (r).

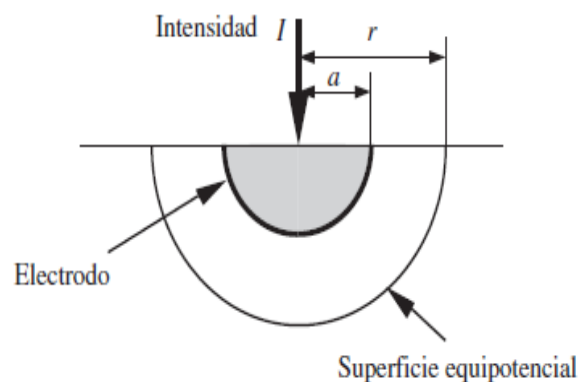


Figura 3.15: Electrodo semiesférico
Fuente: [19]

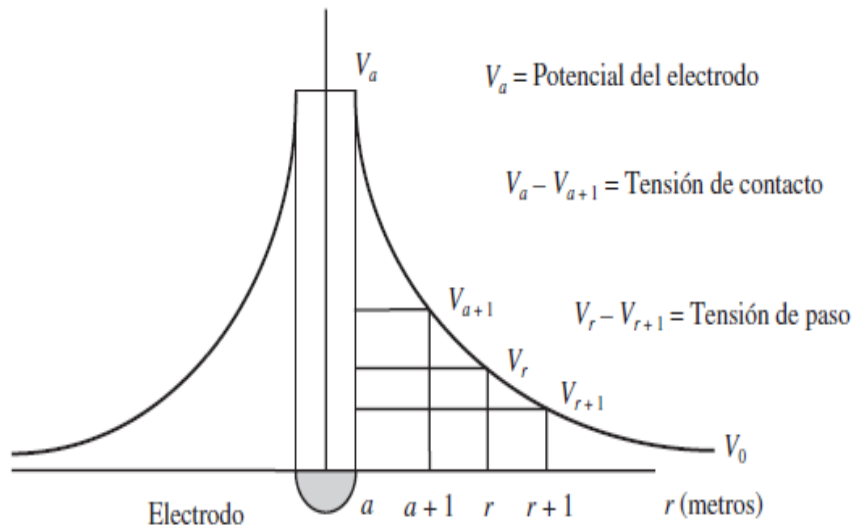


Figura 3.16: Potencial de la superficie del terreno
Fuente: [19]

3.8.3. Valores asociados:

- ✓ Potencial del electrodo

$$V_a = \frac{\rho \cdot I}{2\pi a} \quad (3.21)$$

- ✓ Resistencia del electrodo

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (3.22)$$

- ✓ Tensión de contacto

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por un paso (aproximadamente un metro), en la dirección del gradiente de tensión máximo [20].



Figura 3.17: Tensión de contacto
Fuente: [20]

Y se expresa con la siguiente formula

$$V_a = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+1} \right) \quad (3.23)$$

- ✓ Tensión de paso a una distancia d del electrodo

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se puede alcanzar al extender un brazo [20].

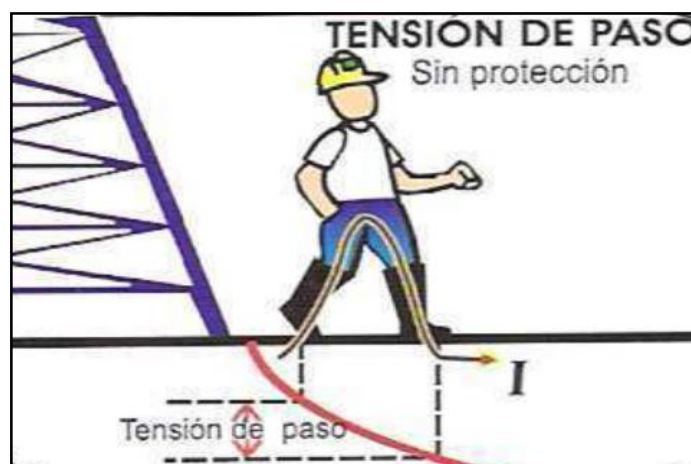


Figura 3.18: Tensión de paso
Fuente: [20]

Y se expresa con la siguiente formula

$$V_p = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a+d} - \frac{1}{a+d+1} \right) \quad (3.24)$$

3.9. Geometría del sistema

3.9.1. Superficie de separación tierra-aire

La difusión de la corriente eléctrica en el terreno a través del electrodo se produce con la presencia de la superficie de separación tierra-aire, que distorsiona la distribución del campo eléctrico, respecto a la que habría si se considera todo el medio homogéneo. La solución del problema se obtiene mediante la teoría de las imágenes, suprimiendo la línea de discontinuidad tierra-aire y colocando en la mitad superior que corresponde al aire, y a una distancia igual a la profundidad a la que está enterrado el electrodo, un electrodo idéntico y que difunde la misma corriente que el que está instalado en el terreno [21].

$$I_2 = I_1 * \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.25)$$

Teniendo en cuenta que la resistividad del aire es muy alta respecto a la del terreno ($\rho_2 = \infty$).

3.9.2. Electrodo semiesférico

El caso del electrodo ideal semiesférico, de radio a , que difunde una corriente de I amperios, enterrado en un terreno de resistividad r , y a ras de la superficie, puede estudiarse, de acuerdo con la teoría de las imágenes, como un electrodo.

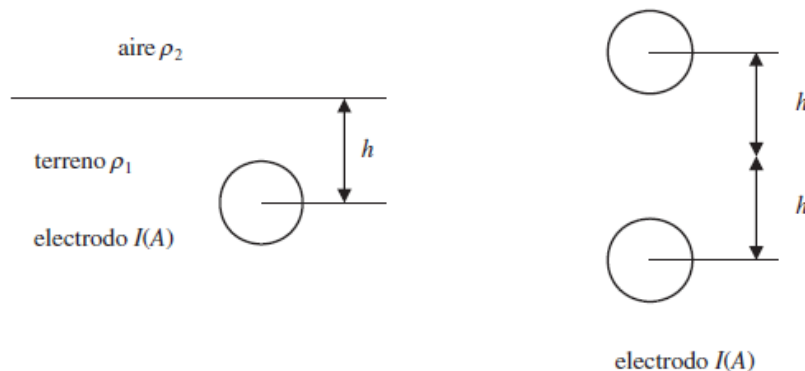


Figura 3.19: Electrodo semiesféricos

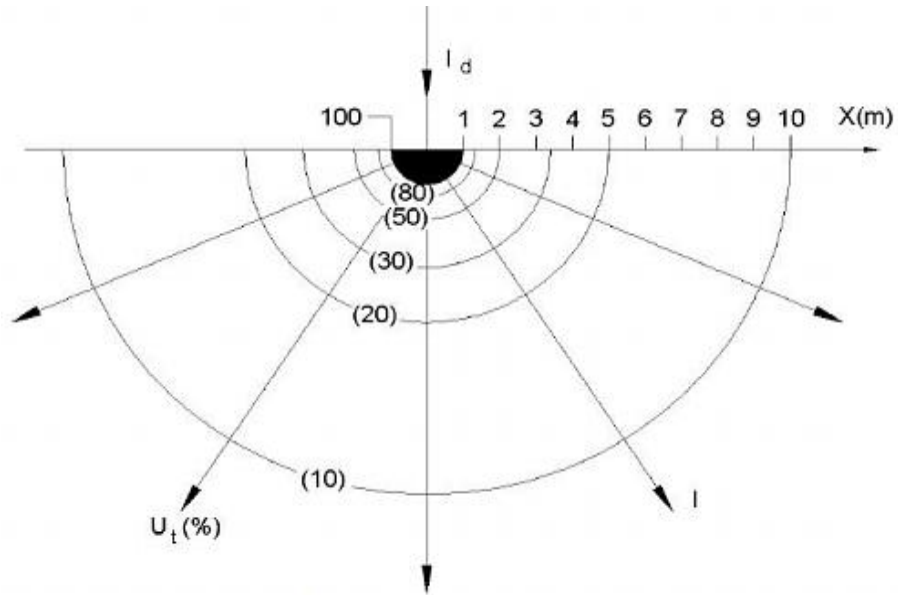


Figura 3.20: Distribución de potencial

Variación del potencial en la superficie del terreno.

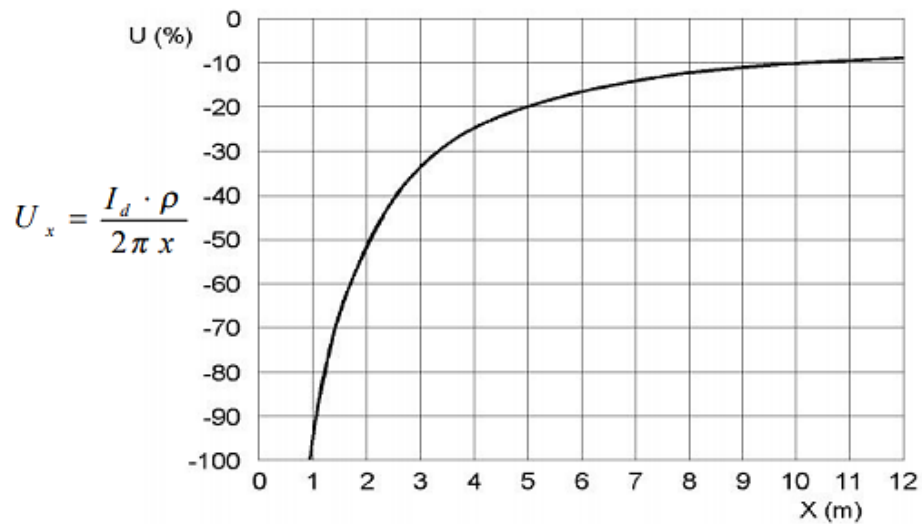


Figura 3.21: Variación del potencial

Considerando para $r = \infty$, $V_r = 0$ ($C = 0$), el potencial a una distancia r del eje del electrodo viene dado por la expresión.

$$V_r = \frac{\rho_1}{2\pi r} \quad (3.26)$$

4. METODOLOGÍA

OBJETIVOS ESPECIFICOS	VARIABLES	DIMENCION	INDICADORES
Diseñar un electrodo activo basándonos en la Normativa Ecuatoriana de Construcción – Instalaciones Electromecánicas.	Independiente: Electrodo Activo	Características y parámetros de la resistencia del suelo y electrodos.	Resistencia de los electrodos activos y resistividad del suelo.
Analizar los parámetros eléctricos presentes en los electrodos activos para la determinación de su eficiencia.	Dependiente: Análisis Técnico-Económico.	Tipos de Electrodos y suelos	Tensión de paso y contacto generada por los electrodos activos.
Evaluar económicamente los gastos generados por los electrodos activos durante su vida útil.			Beneficio técnico y económico de los Electrodo Activos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Investigación de las características del terreno

5.1.1. Toma de mediciones de la resistividad del suelo para la Instalación de los electrodos activos.

- ✓ **Equipo:** TELUROMETRO -SEW 4235 ER EARTH RESISTANCE TESTER (Anexo 1).
- ✓ Especificaciones técnicas del equipo (Anexo 2).

Resultado de las pruebas de resistividad del terreno

Tabla 5.1: Resultados de resistividad del terreno a diferentes profundidades.

PRUEBAS	RESISTIVIDAD $\Omega \cdot m$
Prueba 1: Resistividad del terreno a una distancia de 1 metro (Anexo3).	79.57 $\Omega \cdot m$
Prueba 2: Resistividad del terreno a una distancia de 2 metros (Anexo4).	62.18 $\Omega \cdot m$
Prueba 3: Resistividad del terreno a una distancia de 3 metros (Anexo 5).	87.09 $\Omega \cdot m$
Prueba 4: Resistividad del terreno a una distancia de 4 metros (Anexo 6).	113.38 $\Omega \cdot m$

Mediante Telurometro SW 4235 se pudo realizar las pruebas de resistividad del terreno a diferentes distancias con el fin evaluar el perfil (**Anexo 13**) de resistividad en las cuales se instalaran los electrodo activos.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de resistividad del terreno se pudo constatar que a una profundidad entre 1 y 2 metros la resistividad ($\Omega \cdot m$) del terreno disminuye considerablemente lo cual nos confirma que se puede instalar verticalmente los electrodos activos con una longitud entre 1 - 1.80 metros y obtener resultados óptimos .

Pero a diferencia de los datos obtenida a una profundidad de 3 y 4 metros se pudo constatar que la resistividad se incrementa gradualmente, lo cual nos ayuda a confirmar que no es necesario instalar electrodos activos mayores a 1.80 metros para obtener una mejor eficiencia, además con los resultados obtenidos de la resistividad a diferentes distancias (1-2-3-4 metros) se determinó la Naturaleza del Terreno (Humus 10- 150 $\Omega \cdot m$).

5.1.2. Parámetros del terreno que influyen en la resistividad

El análisis de los parámetros del terreno tiene como objetivo identificar las condiciones actuales del suelo en el cual se instalarán los electrodos activos, este tipo de análisis a su vez nos ayuda a determinar si el terreno requiere o no un tratamiento adicional con mejoradores químicos.

Tabla 5.2: Constitución del terreno en el cual se Instalarán los Electrodo Activos

Parámetros	Datos Obtenidos	
Tipo de Terreno	Humus(Tierra blanca lodosa)	
Temperatura	19°C - 62.6°F (7200Ω/cm)	
Humedad	Normal (28,3%)	
pH(grado de acidez)	8.28 (Alcalino)	
Salinidad(meq/100 ml)	16.77%	
Granulometría en 300 gramos de tierra	Tamaño (mm) % en gramos	
	1 mm	24.90
	2 mm	28,43
	4 mm	26,57
	7 mm	9,27
	10 mm	10.83

Fuente: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias

- ✓ El **tipo de terreno** en el cual se instaran los electrodos activos (prototipo -comercial) según las pruebas realizadas de resistividad a diferentes distancias lo ubican en la **tabla 3.4** con una naturaleza de terreno llamado **Humus** que está en un rango de resistividad 10 a 150 Ω*m.
- ✓ La **Temperatura** que presenta el terreno es de 19°C - 62.6°F que lo ubican en una resistividad de 7,200 Ω *cm aproximadamente según la **tabla 3.5**.
- ✓ El pH (**medida de alcalinidad**) presente en el terreno tiene un valor 8.82 que lo ubica según la **tabla 3.6** en un medio muy alcalino, esto significa que la corrosividad afectara a ciertos metales tales como Zn, Al, Pb, pero este grado alcalinidad no afectara a los electrodos activos que se instalarán ya que está fabricado de cobre (categoría k)
- ✓ La **Salinidad**(meq/100 ml) presente en el terreno es de 16.77% que lo ubican según la **tabla 3.7** en una resistividad aproximadamente 83.85 Ω *cm lo cual se considera bueno ya que a mayor presencia de sal, el terreno puede retener una mayor cantidad de agua teniendo como resultado valores de resistividad bajos.

- ✓ Para la realización de la prueba de **Granulometría** se tomó varias muestra de 300 gramos a diferentes profundidades(0.30m-0.50m-1m) del terreno , con el fin de obtener un promedio de los diferentes tamaños de las partículas de conforma el suelo, como resultados de las prueba realizada se pudo constatar que existe un 53.33 % de partículas que no exceden los 2 mm de espesor y un 46,67% que excede los 4 mm de espesor, gracias a estos datos obtenido se determinó que se debe realizar un tamizado que separa las partículas que sean mayores a 4mm, con el objetivo de reducir su resistividad y mejorar la humedad del terreno.

5.2. Cálculo de los Parámetro Eléctricos en los Electrodo Activos.

5.2.1. Corriente de falla en el lado secundario del transformador

$$I_{FL-N} = \frac{\text{Potencia del transformador en kVA}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje en el lado secundario del transformador en kV}} \quad (3.27)$$

$$I_{f L-N} = \frac{45 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 0.22 \text{ kV}}$$

$$I_{f L-N} = 118.09 \text{ (A)}$$

5.2.1.1. Corriente de Cortocircuito que circula por ele electrodo

$$I_g = I_{f L-N} * Z \quad (3.28)$$

$$I_g = 118.09 * 0.03$$

$$I_g = 3.54 \text{ (A)}$$

5.2.2. Modelo de dos capas para terrenos no uniformes.

Este modelo se emplea en terrenos formados por dos capas homogéneas donde:

ρ_1 = Resistividad superior

h = Espesor

ρ_1 = Resistividad superior

∞ = Espesor infinito

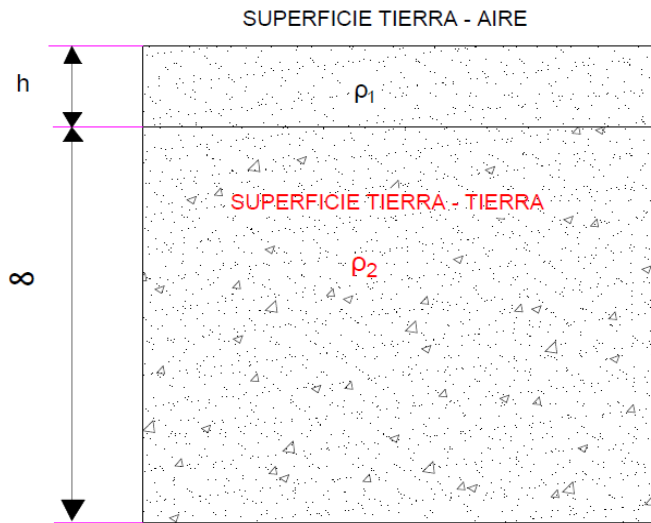


Figura 5.1: Modelo de terreno de dos capas

5.2.2.1 Valor del potencial en la superficie del terreno

r = distancia punto de corriente y referencia

K = coeficiente de reflexión entre capas

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.29)$$

$$K = \frac{62.18 \Omega * m - 79.57 \Omega * m}{62.18 \Omega * m + 79.57 \Omega * m}$$

$$K = 0.12$$

$$V_{1s} = \frac{\rho_1 * I}{2 * \pi} * \left(\frac{1}{r} + 2 * \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2 * n * h)^2}} \right) \quad (3.30)$$

$$V_{1s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * \left[\frac{1}{1} + 2 * \frac{(0.12)^1}{\sqrt{(1m)^2 + (2 * 1 * 0.75)^2}} + \frac{(0.12)^2}{\sqrt{(1m)^2 + (2 * 2 * 0.75)^2}} \right]$$

$$V_{1s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * [1.137]$$

$$V_{1s} = 51.28 (V)$$

$$V_{2s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * \left[\frac{1}{2} + 2 * \frac{(0.12)^1}{\sqrt{(2m)^2 + (2 * 1 * 0.75)^2}} + \frac{(0.12)^2}{\sqrt{(2m)^2 + (2 * 2 * 0.75)^2}} \right] \quad (3.31)$$

$$V_{2s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * [0.604]$$

$$\mathbf{V_{2s} = 27.12 (V)}$$

$$V_{3s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * \left[\frac{1}{3} + 2 * \frac{(0.12)^1}{\sqrt{(3m)^2 + (2 * 1 * 0.75)^2}} + \frac{(0.12)^2}{\sqrt{(3m)^2 + (2 * 2 * 0.75)^2}} \right] \quad (3.32)$$

$$V_{3s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * [0.412]$$

$$\mathbf{V_{3s} = 18.48 (V)}$$

$$V_{4s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * \left[\frac{1}{4} + 2 * \frac{(0.12)^1}{\sqrt{(4m)^2 + (2 * 1 * 0.75)^2}} + \frac{(0.12)^2}{\sqrt{(4m)^2 + (2 * 2 * 0.75)^2}} \right] \quad (3.34)$$

$$V_{4s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * [0.3119]$$

$$\mathbf{V_{4s} = 14.00 (V)}$$

$$V_{5s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * \left[\frac{1}{5} + 2 * \frac{(0.12)^1}{\sqrt{(5m)^2 + (2 * 1 * 0.75)^2}} + \frac{(0.12)^2}{\sqrt{(5m)^2 + (2 * 2 * 0.75)^2}} \right] \quad (3.35)$$

$$V_{5s} = \frac{79.57 \Omega * m * 3.54}{2 * \pi} * [0.25]$$

$$\mathbf{V_{5s} = 11.26 (V)}$$

Mediante el cálculo del potencial en la superficie del terreno a diferentes distancias se pudo obtener el comportamiento de voltaje al inyectar una corriente en el electrodo como lo muestra la **figura 5.2**.

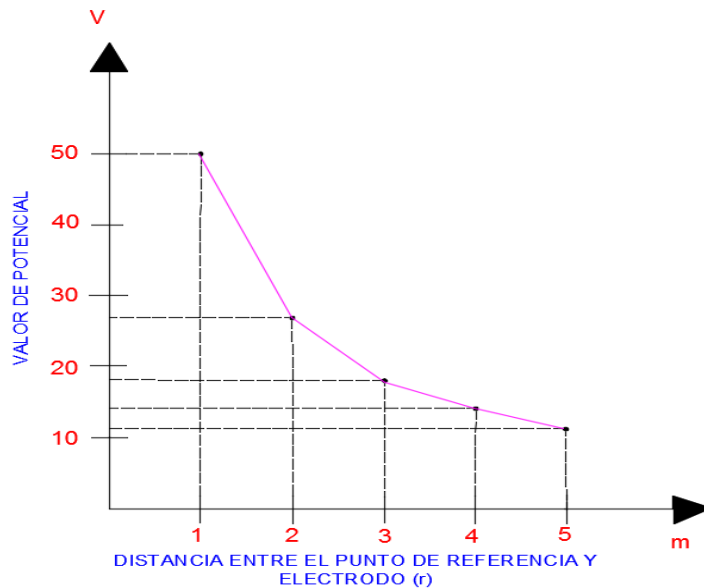


Figura 5.2: Curva superficie del

diferentes distancias

de potencial en la terreno a

En la curva de potencial se puede evidenciar un decremento del voltaje, lo cual es provocado al incrementar la distancia entre el punto de inyección de corriente y el punto de referencia, este decremento de potencial nos ayuda a determinar los niveles de voltaje que se presentarían a diferentes distancias en la superficie del terreno al producirse una corriente de falla (cortocircuito), además nos ayuda a concluir que no existiría ningún riesgo de consideración en los operadores en caso de trabajar en equipos conectados al electrodo activo según el **Anexo 20** de la norma IEEE 80-2000 .

5.2.2.2. Tensiones de paso diferentes distancias

- ✓ Tensión de paso a una distancia 1 metro del electrodo

$$V_p = \frac{\rho * I}{2\pi} \left(\frac{1}{a+d} - \frac{1}{a+d+1} \right) \quad (3.36)$$

$$V_p = \frac{85.65(\Omega * m) * 3.54(A)}{2\pi} \left(\frac{1}{1m + 1m} - \frac{1}{1m + 1m + 1} \right)$$

$$V_p = 8.04 (V)$$

- ✓ Tensión de paso a una distancia 3 metro del electrodo

$$V_p = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a+d} - \frac{1}{a+d+1} \right) \quad (3.37)$$

$$V_p = \frac{85.65(\Omega * m) * 3.54(A)}{2\pi} \left(\frac{1}{1m + 3m} - \frac{1}{1m + 3m + 1} \right)$$

$$V_p = 2.41 (V)$$

- ✓ Tensión de paso a una distancia 5 metros del electrodo

$$V_p = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a+d} - \frac{1}{a+d+1} \right) \quad (3.38)$$

$$V_p = \frac{85.65(\Omega * m) * 3.54(A)}{2\pi} \left(\frac{1}{1 + 5m} - \frac{1}{1m + 5m + 1} \right)$$

$$V_p = 1.14 (V)$$

- ✓ Tensión de paso a una distancia 10 metros del electrodo

$$V_p = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a+d} - \frac{1}{a+d+1} \right) \quad (3.39)$$

$$V_p = \frac{85.65(\Omega * m) * 3.54(A)}{2\pi} \left(\frac{1}{1 + 10m} - \frac{1}{1m + 10m + 1} \right)$$

$$V_p = 0.36 (V)$$

Mediante el cálculo las tensiones de paso a diferentes distancias se logró obtener el comportamiento del voltaje que se produciría al circular una corriente de falla y esta es disipada por el electrodo activo como se muestra la **figura 5.3**

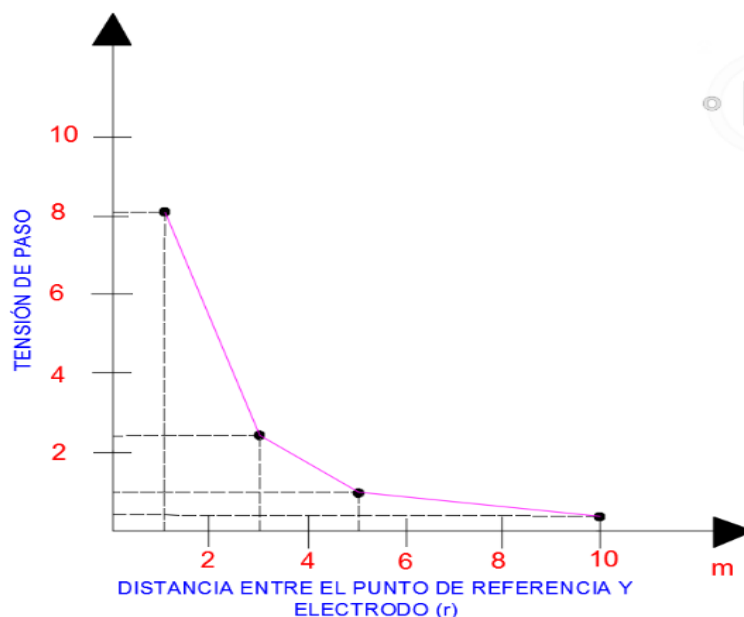


Figura 5.3: Curva de potencial de paso en la superficie del terreno.

En la curva de potencial de paso se puede evidenciar un decremento del voltaje, lo cual es provocado al incrementar la distancia entre el punto de inyección de corriente y el punto de referencia, este decremento de potencial nos ayuda a determinar los niveles de voltaje que se presentarían a diferentes distancias en la superficie del terreno al producirse una corriente de falla, además nos ayuda a concluir que no existiría ningún riesgo de consideración en los operadores en caso que se encuentre trabajando cerca del electrodo activo según el **Anexo 20** de la norma IEEE 80-2000 .

5.2.2.3 Resistividad aparente

$$\rho(a)1m = \rho_1 \left(1 + 4 * \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1+(2*n*\frac{h}{a})^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4+(2*n*\frac{h}{a})^2}} \right) \quad (3.40)$$

$$\rho(a) = (79.57\Omega * m) \left(1 + 4 * \frac{0.12^1}{\sqrt{1+(2*1*\frac{0.75}{1m})^2}} - \frac{0.12^1}{\sqrt{4+(2*1*\frac{0.75}{1m})^2}} + \frac{0.12^2}{\sqrt{1+(2*2*\frac{0.75}{1m})^2}} - \frac{0.12^2}{\sqrt{4+(2*2*\frac{0.75}{1m})^2}} \right)$$

$$\rho(a)1m = 85.65 \Omega * m$$

5.2.2.4. Potencial del electrodo aparente

$$V_a = \frac{\rho * I}{2\pi a} \quad (3.41)$$

$$V_a = \frac{85.65(\Omega * m) * 3.54(A)}{2\pi * 1m}$$

$$V_a = 48.25$$

5.2.2.5. Resistencia del electrodo aparente

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (3.42)$$

$$R_a = \frac{85.65}{2\pi(1m)}$$

$$R_a = 13.63\Omega$$

5.2.2.6. Tensión de contacto aparente

$$V_a = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+1} \right) \quad (3.43)$$

$$V_a = \frac{85.65(\Omega * m) * 3.54(A)}{2\pi} \left(\frac{1}{1m} - \frac{1}{1m + 1} \right)$$

$$V_a = 24.12 V$$

5.2.3. Análisis de los parámetros eléctricos de los Electrodo Activos

Comparación de los resultados cálculos y medidos por el Teluometro a los Electrodo Activos Prototipo y Comercial

Tabla 5.3: Constitución del terreno en el cual se Instalaran los Electrodo Activos

Parámetro	Calculado	Medido por el Teluometro	Error %
Resistividad del terreno (1 m)	85,65 Ω *m	79,57 Ω *m	7,09%
Resistencia del Electrodo Activo-Prototipo	13,63 Ω	12,30 Ω (Anexo 19)	9,75%
Resistencia del Electrodo Activo-Comercial	13,63 Ω	20,7 Ω (Anexo 18)	31,85%

En la **Tabla 5.3** se puede evidenciar los resultados obtenidos mediante los cálculos y mediciones realizadas con el teluometro al terreno y a los electrodo activos instalados dando como conclusión, que el electrodo activo-prototipo presenta una mejor eficiencia para la disipación de corrientes de falla a diferencia del electrodo activo comercial ya que este presenta una menor resistencia.

5.3. Análisis Económico de los Electrodo Activos

5.3.1. Análisis Económico de Electrodo Activo Comercial

Para el Análisis Económico del **Electrodo Activo Comercial** se tomara en cuenta el costo anual de mantenimiento del electrodo activo en el cual se emplea por cada año de funcionamiento un Agregado Electrolítico que es un producto que viene en una presentación de estado líquido y que es elaborado para cumplir funciones de activación y mantenimiento de los electrodo químicos activos y varillas (copperweld). El objetivo de este químico es inyectar al suelo el agregado electrolítico preciso, para así disminuir la resistencia (Ω) eléctrica de contacto permitiendo aumentar la eficiencia en la eliminación de corrientes de falla durante un periodo de 15 años (garantía que ofrece el fabricante) y el costo de adquisición del mismo.

Tabla 5.4: Costos anuales por concepto de Mantenimientos del Electrodo Químico Activo Comercial.

Numero de Mantenimientos	Fecha de Mantenimiento	Costo por Mantenimiento
1	31/05/2019	22,93
2	31/06/2020	22,93
3	31/06/2021	22,93
4	31/06/2022	22,93
5	02/06/2023	22,93
6	31/06/2024	22,93
7	03/06/2025	22,93
8	31/06/2026	22,93
9	04/06/2027	22,93
10	31/06/2028	22,93
11	05/06/2029	22,93
12	31/06/2030	22,93
13	06/06/2031	22,93
14	31/06/2032	22,93
15	07/06/2033	22,93
TOTAL EN DOLARES		343,95

Tabla 5.5: Costo total de Mantenimientos, Adquisición e Instalación del Electrodo Activo Comercial

Precio del Electrodo Activo Comercial	204,06
Costo de Instalación del Electrodo Activo	50
Costo por concepto de sales Minerales	35,6
Costo por concepto de mejoradores de terreno(bentonita sódica)	22,99
Costos por Mantenimiento(Agregado Electrolítico) del Electrodo Activo Comercial por 15 años	343,95
TOTAL EN DOLARES	656,6

5.3.2. Análisis Económico de Electrodo Activo-Prototipo

Para el Análisis Económico de **Electrodo Activo-Prototipo** se tomara en cuenta el costo anual de mantenimiento del electrodo activo en el cual se emplea por cada dos años de funcionamiento un Agregado Electrolítico que es un producto que viene en una presentación de estado líquido y que es elaborado para cumplir funciones de activación y mantenimiento de los electrodos químicos activos y varillas (copperweld). El objetivo de este químico es inyectar al suelo el agregado electrolítico preciso, para así disminuir la resistencia (Ω) eléctrica de contacto permitiendo aumentar la eficiencia en la eliminación de corrientes de falla durante un periodo de 15 años tiempo en el cual el tubo de cobre(categoría k) pierde sus propiedades conductivas y el costo de adquisición del mismo.

Tabla 5.6: Costos anuales por concepto de Mantenimientos del Electrodo Activo-Prototipo.

Numero de Mantenimientos	Fecha de Mantenimiento	Costo por Mantenimiento
1	31/05/2019	4,65
2	31/06/2020	4,65
3	31/06/2021	4,65
4	31/06/2022	4,65
5	02/06/2023	4,65
6	31/06/2024	4,65
7	03/06/2025	4,65
8	31/06/2026	4,65
9	04/06/2027	4,65
10	31/06/2028	4,65
11	05/06/2029	4,65
12	31/06/2030	4,65
13	06/06/2031	4,65
14	31/06/2032	4,65
15	07/06/2033	4,65
TOTAL EN DOLARES		69,75

Tabla 5.7: Costo total por concepto Construcción de Electrodo Activo -Prototipo

Precio de Construcción de Electrodo Activo-Prototipo			
Material	Cantidad	Precio	Total
Tubo de Cobre de 2"(Categoría k)	1 m	38,73	38,73
Cable desnudo de cobre AWG 1/0	1m	5,57	5,57
Conector rosca exterior de cobre 2"	1	12	12
Tapón de cobre 2"	1	8	8
Tapón macho PVC con rosca 2"	1	4,25	4,25
Suelda de Bronce al 95%(95% cobre y 5% de estaño)	3	4,25	12,75
TOTAL EN DOLARES			81,3

Tabla 5.8: Costo total de Mantenimientos, Adquisición e Instalación del Electrodo Activo-Prototipo

Precio del Electrodo Activo-Prototipo	81,3
Costo de Instalación del Electrodo Activo	50
Costo por concepto de Sales Minerales	35,6
Costo por concepto de mejoradores de terreno(bentonita sódica)	22,99
Costos por Mantenimiento (Agregado Electrolítico) por un periodo de 15 años (tiempo estimado de vida útil del tubo de cobre categoría k).	69,75
TOTAL EN DOLARES	259,64

Comparación de Costos durante la vida útil de los Electrodos Activos (Prototipo vs Comercial)

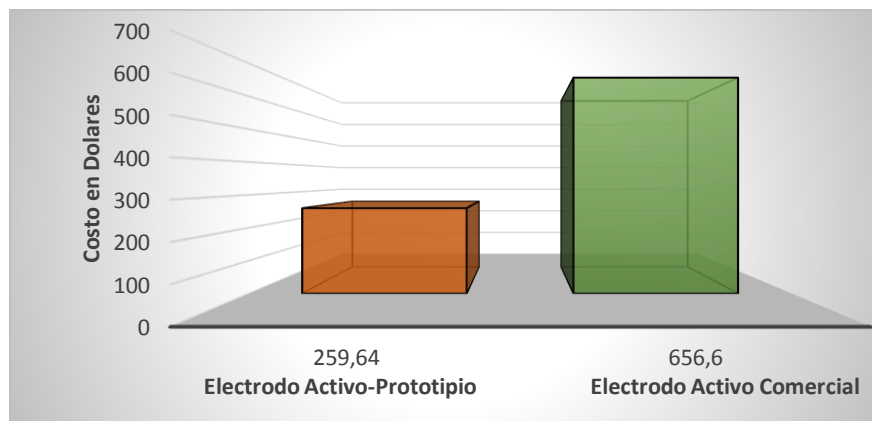


Figura 5.4: Comparación de Costos durante la vida útil de los Electrodos Activos.

Con los datos obtenidos de análisis económico realizado a los electrodos activos durante su vida útil se puede evidenciar que el electrodo activo-prototipo presenta un 60.45 % de menor inversión económica gracias a su diseño y configuración mecánica.

5.4. Resumen del Análisis Técnico-Económico realizado a los Electrodos Activos (Comercial y Prototipo)

Tabla 5.9: Análisis Técnico-Económico realizado a los Electrodos Activos

Electrodos Activos	Eficiencia(Ω)	Error (%)	Costos por Vida Útil del Electrodo(Dólares)
Electro Activo Prototipo	12,3 Ω	9,75	256,64
Electro Activo Comercial	20,7 Ω	31,85	656,60

En la **Tabla 5.9** se muestra los datos obtenidos del Análisis Técnico-Económico realizado a los Electrodos Activos (Comercial y Prototipo) en el cual se puede demostrar que el electrodo activo prototipo presenta una mejor eficiencia y un costo de mantenimiento mucho menor que electrodo comercial.

6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS

6.1. Presupuesto

Tabla 6.1: Presupuesto para la Instalación de Electrodo Activos

PRESUPUESTO PARA LAS INSTALACIÓN DE LOS ELECTRODOS ACTIVOS			
GASTOS DIRECTOS-MATERIALES EMPLEADOS			
Material	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Electrodo Activo Comercial	1	204,06	204,06
Tubo de Cobre de 2"(Categoría k)	1 m	38,73	38,73
Cable desnudo de cobre AWG 1/0	1m	5,57	5,57
Conector rosca exterior de cobre 2"	1	12	12
Tapón de cobre 2"	1	8	8
Tapón macho PVC con rosca 2"	1	4,25	4,25
Suelda de Bronce al 95%(95% cobre y 5% de estaño)	3	4,25	12,75
TOTAL EN DORALES DE LOS MATERIALES			285,36
GASTOS INDIRECTOS-VIÁTICOS-EVENTUALIDADES			
Actividad	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Transporte	15	2,4	36
Alimentación	15	2,5	37,5
Mano de Obra	2	50	100
Eventualidades	10	5	50
TOTAL EN DORALES DE VIÁTICOS-EVENTUALIDADES			223,5
TOTAL EN DORALES EMPLEADOS EN LA INSTALACIÓN DE LOS ELECTRODOS ACTIVOS			508,86

6.2. Análisis de Impactos

El Electrodo Activo-Prototipo es un dispositivo que tiene la función de disipar las corrientes de falla que se puedan generar en el sistema eléctrico, estas fallas son generadas por descargas atmosféricas, fallas en la operación de equipos eléctricos o suministro eléctrico, el dispositivo permite salvaguardar la integridad de los equipos eléctricos y electrónicos prolongando su vida útil, con la construcción de este Electrodo Activo-Prototipo de se puede obtener una mejor eficiencia (resistencias más bajas) y menor gasto por concepto de mantenimiento durante su vida útil, a diferencia de los Electrodo Activos Comercial los cuales presentan una baja eficiencia y los gastos por concepto de mantenimiento son relativamente altos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- ✓ Mediante la Normativa Ecuatoriana de Construcción 11-Instalaciones Electromecánicas se logró construir un electrodo activo que cumple todos los parámetros mecánicos y eléctricos.
- ✓ Con el análisis técnico realizado a los Electroodos Activos se determinó que el Electrodo Activo-Prototipo presenta una mejor eficiencia para la disipación de corrientes de falla al presentar una resistencia mucho menor que el Electrodo Activo Comercial.
- ✓ Con los datos obtenidos de análisis económico realizado a los Electroodos Activos durante su vida útil se puede evidenciar que el electrodo activo-prototipo presenta un 60.45 % de menor inversión económica gracias a su diseño y configuración mecánica.

7.1 RECOMENDACIONES

- ✓ Para la construcción del electrodo activo se recomendable utilizar materiales 100 % de cobre con el fin de mejorar la conductividad, agregar resistencia mecánica y evitar el rápido deterioro del mismo.
- ✓ Realizar varias mediciones de resistencias a los electrodos activos durante un periodo mayor a 30 días con el fin de obtener una lectura con el mejor error posible y así poder determinar los posibles mantenimientos-
- ✓ Para la realización de del análisis económico en los Electroodos Activos tomar en cuenta los gastos realizados en el mantenimiento de los mismos va depender propiamente de su eficiencia, ya que existe electrodo que requerirán más de un mantenimiento por año.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Q. V. C. ORLANDO, «Bibdigital,» 1 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7398/1/CD-5555.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2019].
- [2] I. G. Rojas, «Hugarcapella,» 14 Marzo 2012. [En línea]. Available: <https://hugarcapella.files.wordpress.com/2010/03/manual-de-puesta-a-tierra.pdf>. [Último acceso: 1 Febrero 2019].
- [3] A. M. Arone, «Academia,» 14 Agosto 2015. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/7425576/PROTECCION_MEDIANTE_UN_SISTEMA_PUESTA_A_TIERRA. [Último acceso: 12 Febrero 2019].
- [4] C. Alberto, «Repositorio,» 11 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2970/Mamani%20Huayane.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 15 Enero 2019].
- [5] bibdigital, «Gualotuna Marcelo,» 14 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7398/1/CD-5555.pdf>. [Último acceso: 5 Enero 2019].
- [6] REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE), «Servicios.Minminas,» 22 Agosto 2013. [En línea]. Available: <http://servicios.minminas.gov.co/documents/10180/712360/Anexo+General+del+RETIE+2013.pdf/14fa9857-1697-44ed-a6b2-f6dc570b7f43>. [Último acceso: 13 Diciembre 2019].
- [7] I. S. Martinez, «Sistema Puesta Tierra,» 14 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://sistemapuestatierra.blogspot.com/2009/07/constitucion-de-una-puesta-tierra.html>. [Último acceso: 14 Marzo 2019].
- [8] R. PARDO, «POLOS A TIERRA,» 13 Octubre 2008. [En línea]. Available: <https://rgpm.blogspot.com/>. [Último acceso: 17 Febrero 2019].
- [9] Ruelisa, «SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA,» 11 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://www.ruelisa.com/notas/tierras/pe80.html>. [Último acceso: 14 Enero 2019].
- [10] PROYECTOS S.A.C, «Edpproyectos,» 2 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.edpproyectos.com/mediciones-de-resistividad-del-terreno>. [Último acceso: 14 Marzo 2019].
- [11] R. F. Romero, «dspace,» 2 Marzo 2010. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2096/12/UPS-GT000149.pdf>. [Último acceso: 10 Junio 2019].
- [12] R. Ruelas, «Academia,» 3 Septiembre 2015. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/36838918/Medici%C3%B3n_de_Resistividad. [Último acceso: 22 Abril 2019].

- [13] Y. Silva, «ISSUU,» 20 Junio 2016. [En línea]. Available: https://issuu.com/yanmirsilva8/docs/la_resistividad_del_suelo_1_. [Último acceso: 25 Junio 2019].
- [14] R. G. Rentería, «SCRIBD,» 5 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/407977808/metodos-para-medir-la-resistividad-de-puesta-a-tierra>. [Último acceso: 12 Junio 2019].
- [15] M. D. Pomatoca, «dspace,» 13 Abril 2010. [En línea]. Available: <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/618/1/38T00232.pdf>. [Último acceso: 2 Mayo 2019].
- [16] F. Ruben, «dspace,» 12 Agosto 2011. [En línea]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/710/1/te304.pdf>. [Último acceso: 16 Abril 2019].
- [17] R. D. C. VALVERTH, «Academia,» 15 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.academia.edu/9305003/53165077-Metodos-de-Medicion-de-Sistemas-de-Puesta-a-Tierra>. [Último acceso: 3 Marzo 2019].
- [18] I. B. S. A, «Course Hero,» 16 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.coursehero.com/file/p1c7unf4/El-principio-de-este-m%C3%A9todo-est%C3%A1-basado-en-la-medici%C3%B3n-de-la-diferencia-de/>. [Último acceso: 5 Junio 2019].
- [19] J. A. M. VELASCO, Coordinación de aislamiento, Madrid-España: MC Graw Education Hill, 2017.
- [20] M. V. C. Curillo, «dspace,» 1 Mayo 2012. [En línea]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/694/1/te326.pdf>. [Último acceso: 14 Marzo 2019].
- [21] UNIVERSIDAD POLITECNICA MADRID, «UPM,» 26 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.upm.es/sfs/Rectorado/Gerencia/Prevencion%20de%20Riesgos%20Laborales/Informacion%20sobre%20Prevencion%20de%20Riesgos%20Laborales/Manuales/folleto%20laboratorios%20el%C3%A9ctricos%2021nov2006.pdf>. [Último acceso: 17 Febrero 2019].

ANEXOS

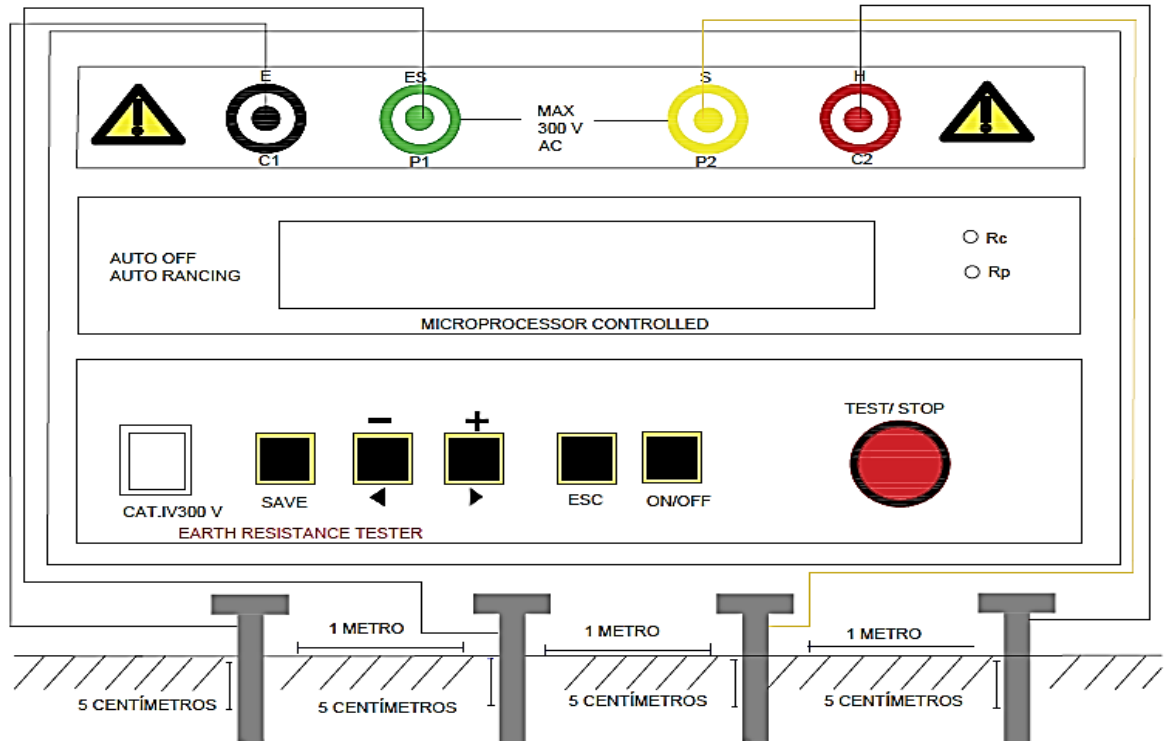
Anexo 1: TELUOMETRO -SW 4235 ER EARTH RESISTANCE TESTER.



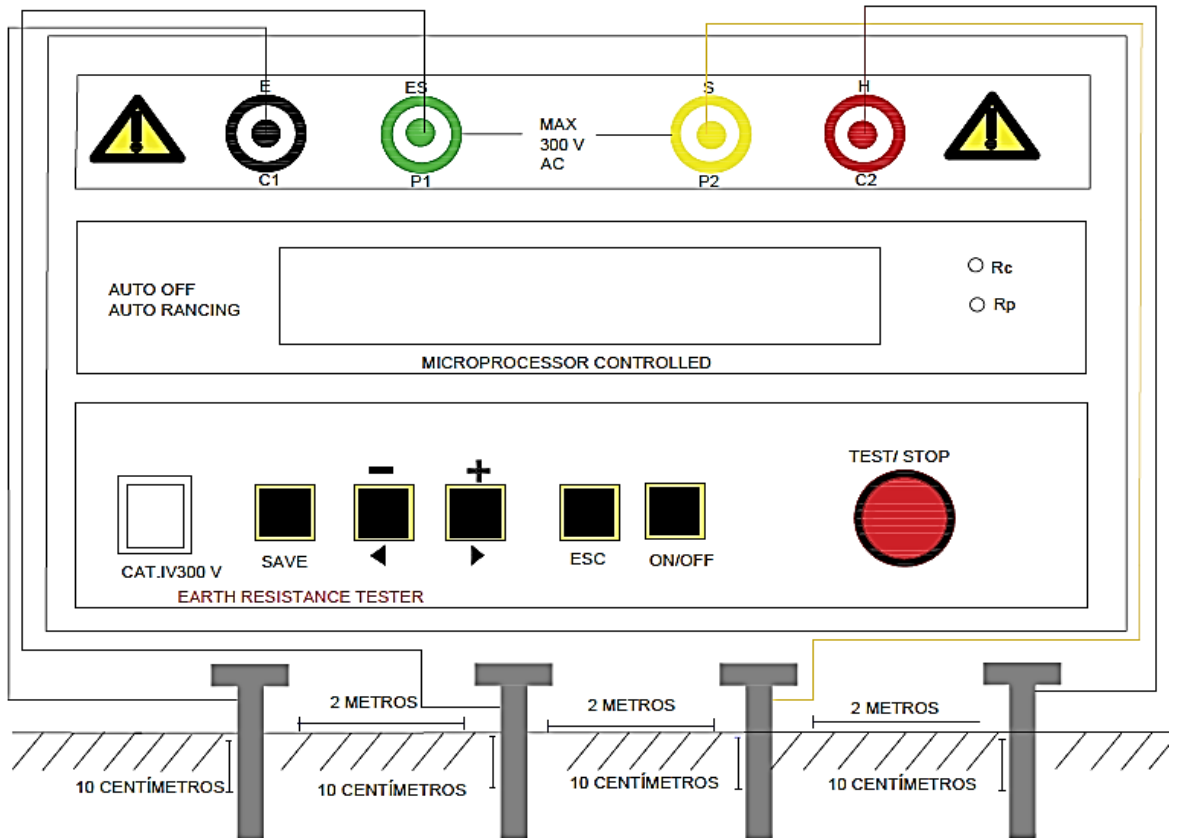
Anexo 2: Especificaciones técnicas del Teluometro -SW 4235 ER

Rangos de medición	<p>Voltaje en tierra: 0~300.0V AC</p> <p>Resistencia en tierra: 0~20Ω / 0~200Ω / 0~2000Ω</p> <p>Resistividad en tierra: 0.06~6.28 kΩ.m-0.62~62.8 kΩ.m-6.28~628 kΩ.m</p> <p>• $(\rho = 2 \times \pi \times L \times R)$</p>
Precisión	<p>Resistencia a tierra: $\pm(2\%rdg+3dgt)$</p> <p>Medición de voltaje a tierra: $\pm(2\%rdg+3dgt)$</p>
Resolución para mediciones a tierra	<ul style="list-style-type: none"> • 0~20Ω: 0.01Ω • 0~200Ω: 0.1Ω • 0~2000Ω: 1Ω
Sistema de Medición	Resistencia de tierra por un inversor de corriente constante 820Hz aprox. 2mA
Temperatura y Humedad Relativa	<p>Operación 0 °C - 50 °C y ≤ 80 %HR</p> <p>Almacenamiento -10 °C - 60 °C y ≤ 80 %HR</p>
Normas de Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • EN 61010-1 CAT IV 300V • IEC 61557-1 IEC 61557-5 • EN 61326-1

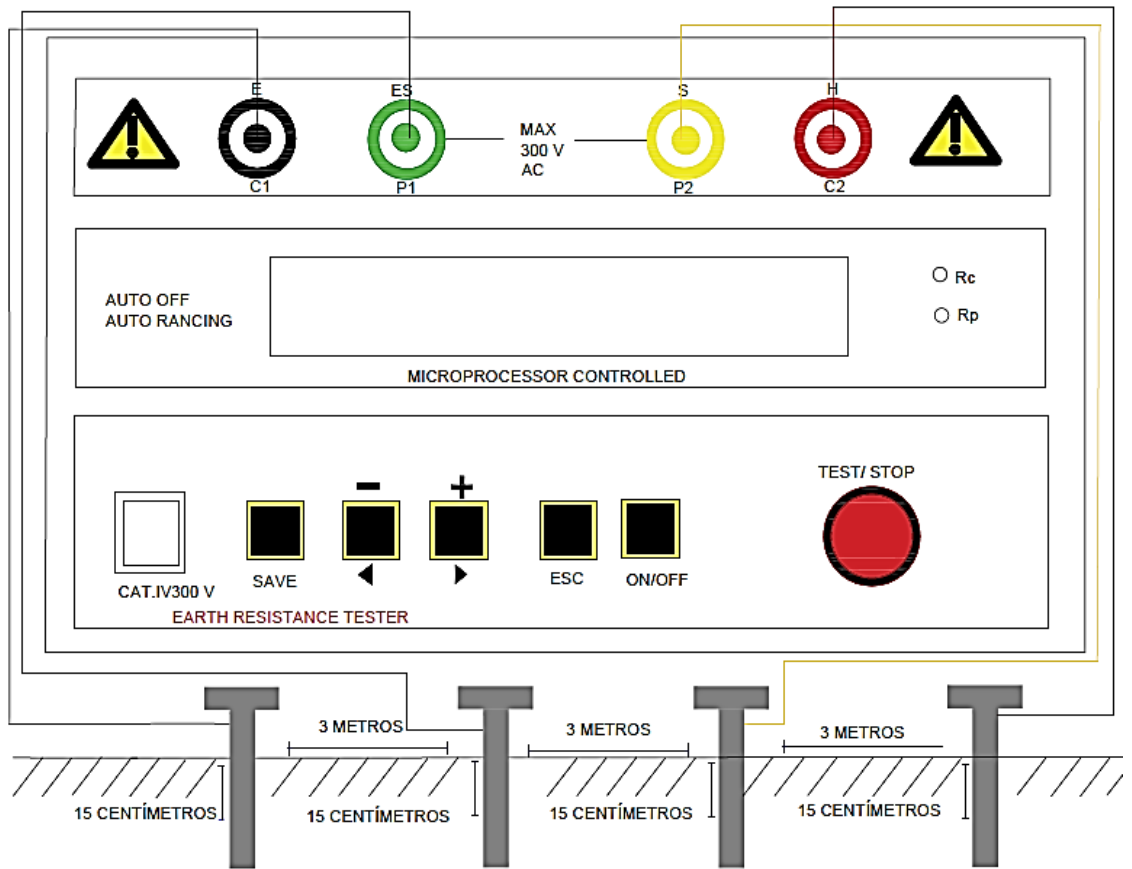
Anexo 3: Prueba 2 de resistividad del terrero a 1m de separación y 0.05 m de profundidad de las picas



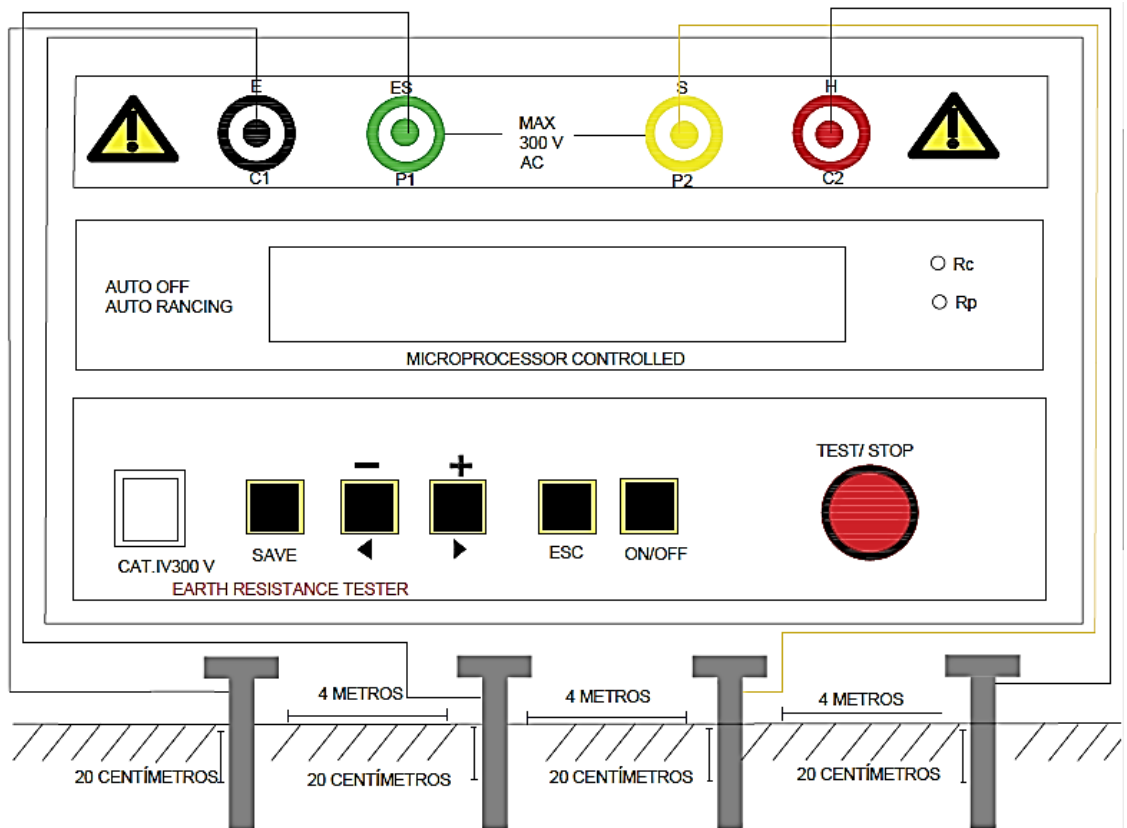
Anexo 4: Prueba 2 de resistividad del terrero a 2m de separación y 0.10 m de profundidad de las picas.



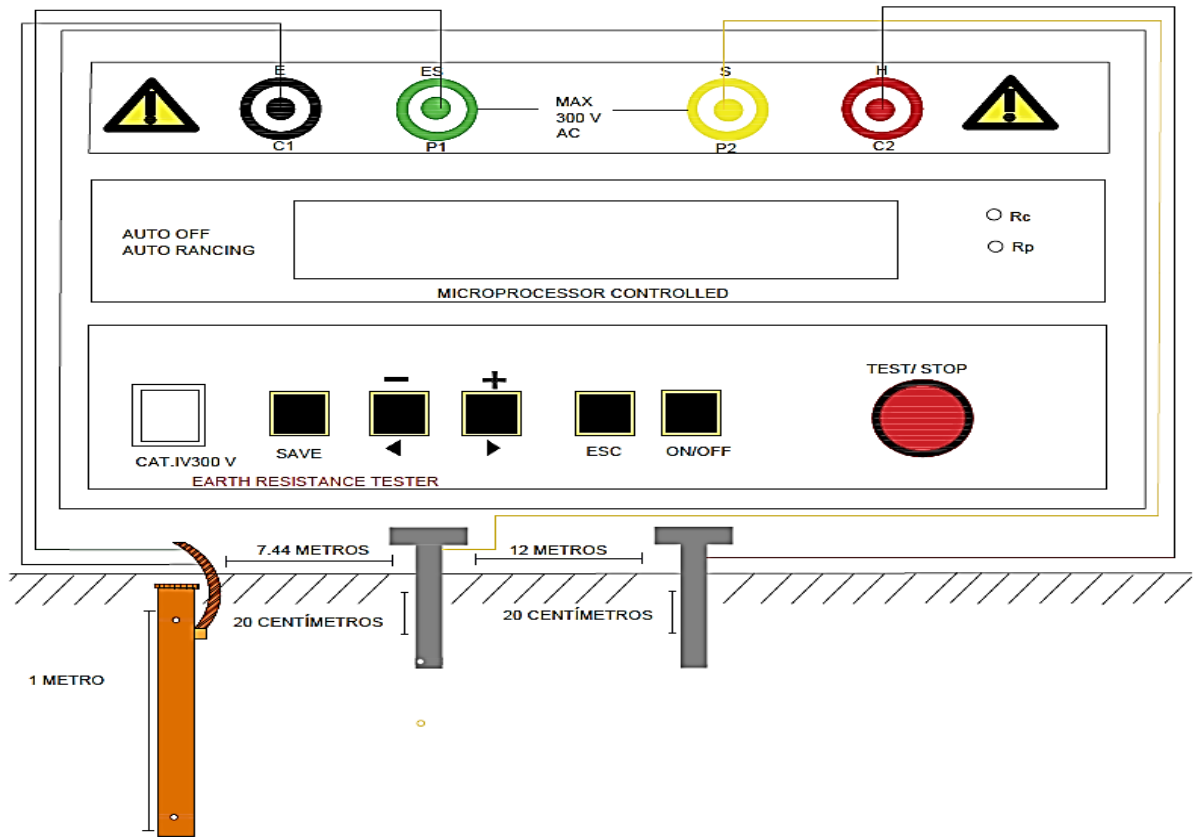
Anexo 5: Prueba 3 de resistividad del terrero a 3m de separación y 0.15 m de profundidad de las picas.



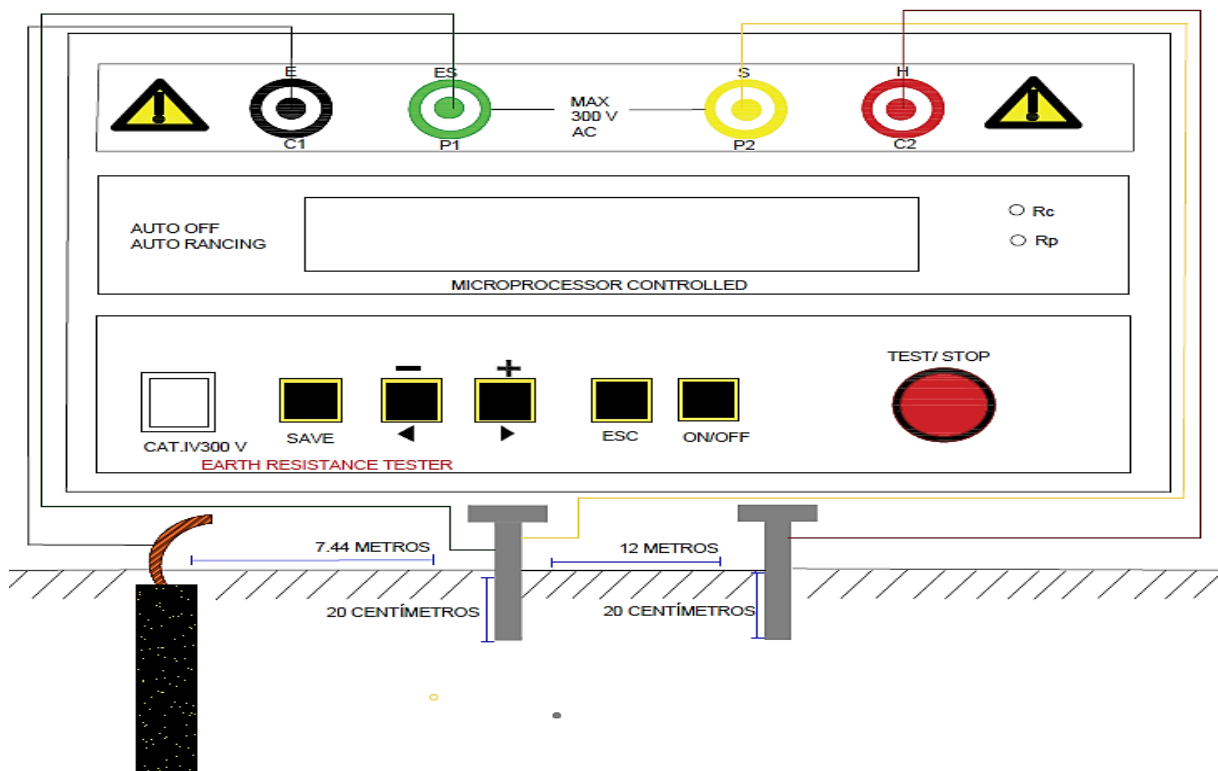
Anexo 6: Prueba 3 de resistividad del terrero a 4m de separación y 0.20 m de profundidad de las picas.



Anexo 7: Prueba 1 de Resistencia del Electrodo Activo Prototipo (1 METRO).



Anexo 8: Prueba 2 de Resistencia del Electrodo Activo Comercial (1 METRO).



Anexo 9: Electrodo Activo Comercial (1 METRO)



Anexo 10: Electrodo Activo-Prototipo (1 METRO)



Anexo 11: Medición de resistividad en el terreno.



Anexo 12: Especificaciones Técnicas del Electrodo Activo Comercial.

Color	Negro
Longitud	1 metro
Diámetro	4 pulgadas
Tipo	Químico Activo
Cable de Conexión	Cobre desnudo AWG 1/0
Material	Agentes conductivos a base de GRAFITO
Peso	15 kg
Normativa de Construcción	NEC15.1.10(Normativa Ecuatoriana de Construcción)

Anexo 12: Especificaciones Técnicas del Electrodo Activo –Prototipo

Color	Rojizo con brillo metálico
Longitud	1 metro
Diámetro	2 pulgadas
Tipo	Químico Activo
Cable de Conexión	Cobre desnudo AWG 1/0
Material	Tubo de Cobre categoría k y GEM
Peso	2.71 kg
Normativa de Construcción	NEC 15.1.10(Normativa Ecuatoriana de Construcción)

Anexo 13: Perfil de resistividad del terreno.



Anexo 14: Instalación del Electrodo Activo-Prototipo.



Anexo 15: Instalación del Electrodo Activo Comercial.



Anexo 16: Medición de Resistencia del electrodo activo comercial.



Anexo 17: Medición de Resistencia del Electrodo Activo Prototipo.



Anexo 18: Medición de Resistencia del Electrodo Activo Comercial.

Medición de Resistencia del Electrodo Activo Comercial	
Fecha de Medición	Resistencia(Ω)
14/05/2019	21,4
21/05/2019	22,1
28/05/2019	21,5
04/06/2019	20
11/06/2019	20,09
18/06/2019	20,12
02/07/2019	20,6
09/07/2019	20,8
14/07/2019	20,7

Anexo 19: Medición de Resistencia del Electrodo Activo Prototipo.

Medición de Resistencia del Electrodo Activo-Prototipo.	
Fecha de Medición	Resistencia(Ω)
14/05/2019	11,95
21/05/2019	11,9
28/05/2019	12,06
04/06/2019	12,8
11/06/2019	12,13
18/06/2019	12,02
02/07/2019	12,01
09/07/2019	12,1
14/07/2019	12,3

Anexo 20: Tensión de contacto y paso admisible para el cuerpo humano según la norma IEEE 80-2000.

Duración de la Corriente de falla(I)	Tensión de contacto aplicada admisible(V)	Tensión de paso aplicada admisible(V)
0,05	735	7350
0,10	633	6330
0,20	528	5280
0,30	420	4200
0,40	310	3100
0,50	204	2040
1,00	107	1070
2,00	90	900
5,00	81	810
10,00	80	800
Mayor 10,00	50	500