



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA
PARA LOS LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

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

Autores:

Moya Piedra Jinsop Rodrigo

Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir

Tutor:

Ing. MSc. Marco Aníbal León Segovia

LATACUNGA - ECUADOR

Febrero - 2019



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Moya Piedra Jinsop Rodrigo** y **Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**”, siendo el **Ing. MSc. Marco Aníbal León Segovia** 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.

Moya Piedra Jinsop Rodrigo

C.I. 160033164-7

Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir

C.I. 160058837-8



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: **Moya Piedra Jinsop Rodrigo** y **Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir** con el título de Proyecto de Investigación: “**DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**”. 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, Febrero 2019

Para constancia firman:



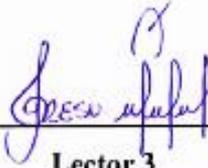
Lector 1

Ing. MSc. Jimmy Toaza
C.I: 171762106-2



Lector 2

Ing. MSc. Xavier Proaño
C.I: 050265642-4



Lector 3

Ing. MSc. Rommel Suárez
C.I: 180416535-3



Universidad
Técnica de
Cotopaxi



Ingeniería
Eléctrica

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, de los señores **Moya Piedra Jinsop Rodrigo** y **Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir**, 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 Proyecto 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. Marco Aníbal León Segovia

C.I.: 050230540-2



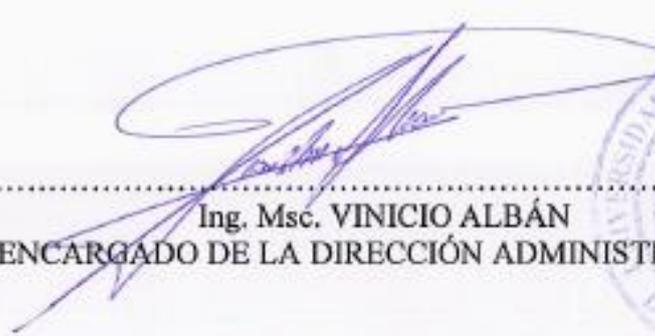
CERTIFICADO

Latacunga, 14 de Febrero de 2019

El motivo de esta carta es para hacer certificar que los estudiantes **JINSOP RODRIGO MOYA PIEDRA** con C.I. 160033164-7 y **WILMER BLADIMIR PILATASIG QUISPE** con C.I. 160058837-8 con el proyecto de Titulación: "**DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**", realizaron mediciones en el laboratorio de Eléctrica obteniendo resultados reales y verídicos.

Sírvase utilizar la presente para los correspondientes trámites.

Atentamente,


.....
Ing. Msc. VINICIO ALBÁN
ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN ADMINISTRATIVA



AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos brindado la vida, salud e inteligencia para culminar con tan arduo trabajo como es el desarrollo del proyecto de investigación, alcanzando por medio de ello la formación profesional.

A nuestras queridas familias, que siempre han estado cuando más los necesitamos, brindándonos su confianza y apoyo incondicional en cada una de las etapas de nuestras vidas, guiándonos siempre por el camino del bien para ser personas útiles para la sociedad.

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi, particularmente a quienes forman parte de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de manera especial a los docentes, quienes con su valioso aporte académico contribuyeron a la realización de este proyecto.

Jinsop Moya

Wilmer Pilatasig

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico especialmente con mucho cariño y afecto:

A mis padres Digna Piedra y Gerardo Moya, por darme la fuerza para continuar día tras día luchando para alcanzar mis sueños y anhelos; a mis hermanos José Luis Moya y Cristina Moya, quienes fueron un pilar fundamental en el transcurso de mi formación profesional. A mis abuelitos y familiares en general.

Jinsop Moya

Dedico este proyecto a mis padres: A Segundo Pilatasig y Silvia Quispe que siempre me han apoyado en las buenas y en las malas, que siempre confiaron en mí y me dieron todo su apoyo en el transcurso de mi vida, que siempre me inculcaron buenos valores para ser una persona de bien, a mis hermanos Carlos y Yamilex que nunca me abandonaron, que siempre me apoyaron y me brindaron su amor y a toda mi familia que me apoyaron durante la etapa universitaria

Wilmer Pilatasig

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA..... | ii |
| APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN | iii |
| AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN | iv |
| AVAL DE LA INSTITUCIÓN | v |
| AGRADECIMIENTOS..... | vi |
| DEDICATORIA | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xi |
| ÍNDICE DE TABLAS | xii |
| ÍNDICE DE ECUACIONES..... | xiii |
| RESUMEN | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| AVAL DE TRADUCCIÓN..... | xvi |
| 1. INFORMACIÓN GENERAL | 1 |
| 1.1 Título del Proyecto: | 1 |
| 1.2 Fecha de inicio:..... | 1 |
| 1.3 Fecha de finalización: | 1 |
| 1.4 Lugar de ejecución: | 1 |
| 1.5 Facultad que auspicia | 1 |
| 1.6 Carrera que auspicia: | 1 |
| 1.7 Proyecto de investigación vinculado: | 1 |
| 1.8 Equipo de trabajo: | 1 |
| 1.9 Área de Conocimiento: | 2 |
| 1.10 Línea de investigación: | 2 |
| 1.11 Sub líneas de investigación de la Carrera: | 2 |
| 2. RESUMEN DEL PROYECTO | 3 |
| 3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO..... | 3 |
| 4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO | 4 |
| 4.1. Directos | 4 |
| 4.2. Indirectos | 4 |
| 5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... | 4 |
| 5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 4 |

| | |
|--|-----------|
| 6. OBJETIVOS | 5 |
| 6.1. Objetivo General..... | 5 |
| 6.2. Objetivos Específicos | 5 |
| 7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS | 6 |
| 8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA | 7 |
| 8.1. Introducción | 7 |
| 8.3. Antecedentes..... | 8 |
| 9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS..... | 9 |
| 10. MARCO TEÓRICO..... | 9 |
| 10.1. Definiciones y conceptos básicos..... | 9 |
| 10.2. Objetivos de los sistemas de puesta a tierra | 10 |
| 10.3. Funciones de los sistemas de puesta a tierra | 10 |
| 10.4. Tipos de sobre voltaje y señales perjudiciales | 11 |
| 10.4.1. Fallas por cortocircuito | 11 |
| 10.4.2. Influencia de corrientes peligrosas en las personas | 12 |
| 10.4.3. Voltaje de toque limite tolerable por una persona | 12 |
| 10.4.4. Voltaje de paso limite tolerable para una persona | 14 |
| 10.5. Cálculo de la resistencia de la malla..... | 15 |
| 10.6. Métodos para la medición de la resistencia del suelo | 15 |
| 10.6.1. Método de Wenner | 16 |
| 10.6.2. Método de schlumberger | 17 |
| 10.7. Equipo utilizado para la medición de resistencia de puesta a tierra..... | 18 |
| 10.8. Tipos de sistema de puesta a tierra | 19 |
| 10.8.1. Sistema radial | 19 |
| 10.8.2. Sistema en anillo..... | 20 |
| 10.8.3. Sistema de red o malla..... | 20 |
| 10.8.3.1. Diseños de mallas de PT utilizando la norma IEEE 80/2000..... | 20 |
| 10.9. Tipos de electrodos de puesta a tierra..... | 21 |
| 10.10. Conductores de puesta a tierra..... | 22 |
| 10.11. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra | 24 |
| 10.12. Rango de resistividad del suelo..... | 24 |
| 10.13. Interconexión de malla de tierra | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 10.14. Materiales para realizar un diseño de puesta a tierra..... | 26 |
| 10.15. Criterios de diseño de mallas utilizando IEEE 80/2000 | 32 |
| 11. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL | 37 |
| 11.1. Métodos de investigación..... | 37 |
| 11.2. Técnicas de investigación | 37 |
| 11.3. Tipos de investigación..... | 37 |
| 12. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 38 |
| 12.1. Análisis de la norma IEEE 80/2000..... | 38 |
| 12.2. Descripción del lugar a instalarse la malla de puesta a tierra | 39 |
| 12.3. Datos de campo (Área) | 40 |
| 12.4. Análisis de la resistividad del suelo | 41 |
| 12.5. Cálculo de la resistencia de la malla (Rg) con el suelo en estado natural | 42 |
| 12.6. Propuestas para reducir la resistencia de la tierra..... | 47 |
| 12.7. Cálculo de la resistencia de la malla (Rg) con el suelo tratado..... | 51 |
| 12.7. Presupuesto de las mallas de puesta a tierra sin el suelo mejorado | 55 |
| 12.8. Presupuesto de las mallas de puesta a tierra con el suelo mejorado | 57 |
| 12.9. Dimensionamiento de la malla..... | 59 |
| 12.11. Validación de la hipótesis..... | 66 |
| 12.12. Cálculo de los interruptores termo magnéticos del tablero principal | 66 |
| 12. PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN | 69 |
| 13. CONCLUSIONES | 70 |
| 14. RECOMENDACIONES | 71 |
| 15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |
| 16. ANEXOS..... | 74 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Voltaje de toque | 13 |
| Figura 2: Voltaje de paso | 14 |
| Figura 3: Método de Wenner | 16 |
| Figura 4: Método de schlumberger. | 18 |
| Figura 5: Telurómetro de 4 puntas | 19 |
| Figura 6: Electrodo único de conexión a tierra..... | 21 |
| Figura 7: Varios electrodos conectados entre si | 21 |
| Figura 8: Red de mallas | 21 |
| Figura 9: Placa de conexión a tierra | 22 |
| Figura 10: Interconexión de dos mallas de tierra..... | 26 |
| Figura 11: Molde para conexión exotérmica | 27 |
| Figura 12: Características de los electrodos de grafito. | 28 |
| Figura 13: Gel mejorador de suelo..... | 29 |
| Figura 14: Químico soldadura exotérmica | 29 |
| Figura 15: Cable 2/0 AWG cobre desnudo | 30 |
| Figura 16: Varilla copperweld | 31 |
| Figura 17: Fm minerales..... | 32 |
| Figura 18: FM Agregado Plus | 32 |
| Figura 19: Ubicación de los laboratorios de alto voltaje en la Universidad Técnica de Cotopaxi | 40 |
| Figura 20: Área del terreno de laboratorio de alto voltaje..... | 40 |
| Figura 21: Malla cuadrada con varillas | 42 |
| Figura 22: Malla rectangular con varillas..... | 43 |
| Figura 23: Malla en tipo “L” | 45 |
| Figura 24: Gel utilizado para bajar la resistencia del suelo | 48 |
| Figura 25: Tipos de electrodos..... | 50 |
| Figura 26: Malla cuadrada mejorada..... | 51 |
| Figura 27: Malla rectangular con varillas..... | 52 |
| Figura 28: Malla en tipo “L” | 53 |
| Figura 29: Comparación de resultados de costos Vs. Resistencia | 57 |
| Figura 30: Barras de comparación de resultados entre costos y resistencia mejoradas | 59 |
| Figura 31: Transformador general de 300 kVA..... | 60 |
| Figura 32: Diagrama del transformador general..... | 60 |
| Figura 33: Diagrama del transformador general en el programa Etap..... | 61 |
| Figura 34: Simulación del tablero principal en Etap..... | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados | 6 |
| Tabla 2: Influencia de corrientes en el cuerpo humano..... | 12 |
| Tabla 3: Constantes de los materiales conductores..... | 22 |
| Tabla 4: Calibres de cables y alambres de cobre | 23 |
| Tabla 5: Calibres mínimos de conductores de cobre..... | 23 |
| Tabla 6: Valores máximos de resistencia de puesta a tierra | 24 |
| Tabla 7: Resistividad de los diferentes suelos | 25 |
| Tabla 8: Medidas de resistividad del suelo sin tratamientos | 41 |
| Tabla 9: Resistividad del suelo caliza compacta según la IEEE 80/2000 | 41 |
| Tabla 10: Datos para calcular una malla cuadrada con varillas..... | 42 |
| Tabla 11: Datos para calcular una malla rectangular con 12 varillas..... | 44 |
| Tabla 12: Datos para calcular una malla en “L” | 45 |
| Tabla 13: Resistencias obtenidas sin tratamiento del suelo | 47 |
| Tabla 14: Valores de dosificación..... | 49 |
| Tabla 15: Disminución de resistividad con gel..... | 49 |
| Tabla 16: Porcentaje de reducción de resistividad con Gel..... | 49 |
| Tabla 17: Tipos de electrodos | 50 |
| Tabla 18: Porcentaje de reducción de la resistividad con el Electrodo Fm plus..... | 50 |
| Tabla 19: Resultado final de reducción de resistividad con tratamientos | 51 |
| Tabla 20: Tabla comparativa de resistencias entre mallas cuadradas | 52 |
| Tabla 21: Tabla comparativa de resistencias entre mallas rectangulares | 53 |
| Tabla 22: Tabla comparativa de resistencias entre mallas tipo “L” | 54 |
| Tabla 23: Resistencias obtenidas con tratamiento del suelo | 54 |
| Tabla 24: Comparación de resultados entre resistencias iniciales y finales | 55 |
| Tabla 25: Costos de la malla cuadrada | 55 |
| Tabla 26: Costos de la malla rectangular..... | 56 |
| Tabla 27: Costos de la malla en “L”..... | 56 |
| Tabla 28: Comparación de resultados de costos Vs. Resistencia | 56 |
| Tabla 29: Costos de la malla cuadrada | 57 |
| Tabla 30: Costos de la malla rectangular..... | 58 |
| Tabla 31: Costos de la malla en “L”..... | 58 |
| Tabla 32: Comparación de resultados entre costos y resistencias mejoradas..... | 59 |
| Tabla 33: Características del transformador general..... | 60 |
| Tabla 34: Tabla de resultados entre Em y Etoque..... | 64 |
| Tabla 35: Tabla de resultados entre Ep y Espaso | 65 |
| Tabla 36: Presupuesto para la construcción del SPT | 69 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1: Coeficiente en función del terreno | 13 |
| Ecuación 2: Voltaje de toque limite tolerable | 13 |
| Ecuación 3: Valor eficaz máximo de la corriente a través del cuerpo humano | 14 |
| Ecuación 4: Es el voltaje de paso límite tolerable..... | 14 |
| Ecuación 5: Resistencia de la malla | 15 |
| Ecuación 6: Resistividad del suelo por el metodo de Wenner | 17 |
| Ecuación 7: Resistividad del suelo por el método de schlumberger | 18 |
| Ecuación 8: Corriente de falla en el lado secundario del transformador..... | 33 |
| Ecuación 9: Selección del tamaño del conductor..... | 33 |
| Ecuación 10: Corriente de cortocircuito a circular por la malla | 33 |
| Ecuación 11: Elevación del potencial de tierra | 33 |
| Ecuación 12: Voltaje máximo de malla..... | 34 |
| Ecuación 13: Valor geométrico de espaciamiento de la malla | 34 |
| Ecuación 14: Factor de corrección..... | 34 |
| Ecuación 15: Número de conductores paralelos de una malla rectangular | 34 |
| Ecuación 16: Factor de irregularidad | 35 |
| Ecuación 17: Longitud efectiva enterrada | 35 |
| Ecuación 18: Longitud total de todas las varillas..... | 35 |
| Ecuación 19: Longitud de conductor | 36 |
| Ecuación 20: Longitud total del conductor enterrado | 36 |
| Ecuación 21: Voltaje real de paso | 36 |
| Ecuación 22: Longitud total de los conductores de la malla | 36 |
| Ecuación 23: Factor de espaciamiento para tensión de paso | 37 |

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

TITULO: “Dimensionamiento de la malla de puesta a tierra para los laboratorios de alto voltaje de la Universidad Técnica De Cotopaxi”

Autores: Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir

Moya Piedra Jinsop Rodrigo

RESUMEN

La metodología para el dimensionamiento de la malla de puesta a tierra, se basa en la norma IEEE STD 80/2000 de mallas de puesta a tierra en Subestaciones Eléctricas, los cuales son de vital importancia para protección de los diferentes equipos y aparatos de medición, transformación y control. El objetivo de la investigación, es determinar la resistividad del terreno, así como las corrientes de paso y de toque; a la vez garantizar la seguridad a personas y equipos. Para medir estos índices y determinar el porcentaje de afectación se implementó un análisis técnico; que consistió en la realización de un estudio previo a la implementación del mallado de puesta a tierra basado en la adquisición de datos con el telurómetro. El resultado del estudio afirmó que el terreno tiene un alto valor de resistividad ya que no contiene sales solubles, por lo que debe ser mejorado con el fin de obtener valores que estén dentro de la norma IEEE STD 80/2000. La resistividad es también influenciada por la humedad y minerales. Mediante este análisis se pretende proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos. Para ello hemos realizado los cálculos en tres diferentes diseños (malla cuadrada, rectangular y en forma de “L”) propuestos por la norma, con la finalidad de encontrar el diseño más óptimo para posteriormente implementarlo en el laboratorio de alto voltaje. La simulación de cortocircuito se realizó en el software ETAP con el fin de verificar, si está bien dimensionada la malla para que no ocurra sobre voltajes y no afecte al sistema de puesta a tierra.

Palabras clave: Mallado a tierra, resistividad, cortocircuito

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

ACADEMIC UNIT OF ENGINEERING SCIENCES AND APPLIED

TITLE: “Dimensioning of the grounding grid for the high voltage laboratories of the Technical University of Cotopaxi”

Authors: Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir

Moya Piedra Jinsop Rodrigo

ABSTRACT

The methodology for the dimensioning of the grounding grid is based on the IEEE STD 80/2000 norm of grounding meshes in Electrical Substations, which are of vital importance for the protection of the different equipment and measuring devices, transformation and control. The objective of the investigation is to determine the resistivity of the ground, as well as the pass and touch currents; at the same time guarantee the safety of people and equipment. To measure these indices and determine the percentage of affectation, a technical analysis was implemented; which consisted of conducting a study prior to the implementation of the grounding grid based on the data acquisition with the tellurometer. The result of the study affirmed that the land has a high resistivity value since it does not contain soluble salts, so it must be improved in order to obtain values that are within the IEEE STD 80-2000 standard. The resistivity is also influenced by moisture and minerals. This analysis is intended to provide the means to dissipate electrical currents to ground without exceeding the limits of operation of the network and equipment. For this we have made the calculations in three different designs (square, rectangular and "L" shaped mesh) proposed by the standard, in order to find the most optimal design for later implementation in the high voltage laboratory. The short circuit simulation was performed in the ETAP software in order to verify, if the mesh is well dimensioned so that no overvoltages occur and does not affect the grounding system.

Keywords: Earth grounding, resistivity, short circuit



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

CENTRO DE IDIOMAS

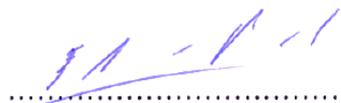
AVAL DE TRADUCCIÓN

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 CIYA: **Moya Piedra Jinsop Rodrigo y Pilatasig Quispe Wilmer Bladimir**, cuyo título versa **“Dimensionamiento de la malla de puesta a tierra para los laboratorios de alto voltaje de la Universidad Técnica De Cotopaxi”** lo realizo 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 del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, Febrero del 2019

Atentamente,


.....

Lic. MSc. Edison Marcelo Pacheco Pruna
DOCENTE DEL CENTRO DE IDIOMAS
C.I. 050261735-0



1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1 Título del Proyecto:

“DIMENSIONAMIENTO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA LOS LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”

1.2 Fecha de inicio:

19 de Abril 2018

1.3 Fecha de finalización:

25 de Enero 2019

1.4 Lugar de ejecución:

Provincia: Cotopaxi

Cantón: Latacunga

Barrio: El Ejido sector San Felipe

Institución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Calles: Av. Simón Rodríguez s/n

1.5 Facultad que auspicia

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

1.6 Carrera que auspicia:

Ingeniera Eléctrica en Sistemas eléctricos de potencia.

1.7 Proyecto de investigación vinculado:

Explotación y diseño de sistemas eléctricos de potencia

1.8 Equipo de trabajo:

Coordinador del Proyecto

Nombre: GONZALEZ PALAU ILIANA ANTONIA

Teléfonos: 0984340820 / 32270575

Correo electrónico: iliana.gonzales@utc.edu.ec

Área de Conocimiento: Eléctrica

Línea de investigación: Sistemas de potencia

Formación Académica:

Doctorados PhD: Doctora en Ciencias Técnicas en el área Sistemas de Potencia. Universidad Estatal de Minas de Sanspetersburgo. Año de Inicio 2009 año de finalización 2011.

Maestría: En Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba. 1999

Universitarios: Instituto de Minas de Moscú de Moscú. Ingeniera Eléctrica. Inicio 1978 Final 1983

ESTUDIANTE

Nombre: WILMER BLADIMIR PILATASIG QUISPE

Teléfonos: 0999070952

Correo electrónico: wilmer.pilatasig8@utc.edu.ec

Idiomas: Español / Ingles

ESTUDIANTE

Nombre: JINSOP RODRIGO MOYA PIEDRA

Teléfonos: 099042544

Correo electrónico: jinsop.moya7@utc.edu.ec

Idiomas: Español / Ingles

1.9 Área de Conocimiento:

Ingeniería y Tecnología Eléctricas (Unesco Cód. 3306)

Aplicaciones Eléctricas (Sub-línea Cód. 330602)

1.10 Línea de investigación:

Explotación y diseño de Sistemas eléctricos

1.11 Sub líneas de investigación de la Carrera:

Alto voltaje

2. RESUMEN DEL PROYECTO

La metodología para el dimensionamiento de la malla de puesta a tierra, se basa en la norma IEEE STD 80/2000 de mallas de puesta a tierra en Subestaciones Eléctricas, los cuales son de vital importancia para protección de los diferentes equipos y aparatos de medición, transformación y control. El objetivo de la investigación, es determinar la resistividad del terreno, así como las corrientes de paso y de toque; a la vez garantizar la seguridad a personas y equipos.

Para medir estos índices y determinar el porcentaje de afectación se implementó un análisis técnico; que consistió en la realización de un estudio previo a la implementación del mallado de puesta a tierra basado en la adquisición de datos con el telurómetro. El resultado del estudio afirmó que el terreno tiene un alto valor de resistividad ya que no contiene sales solubles, por lo que debe ser mejorado con el fin de obtener valores que estén dentro de la norma IEEE STD 80/2000. La resistividad es también influenciada por la humedad y minerales.

Mediante este análisis se pretende proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos. Para ello hemos realizado los cálculos en tres diferentes diseños (malla cuadrada, rectangular y en forma de “L”) propuestos por la norma, con la finalidad de encontrar el diseño más óptimo para posteriormente implementarlo en el laboratorio de alto voltaje.

Las simulaciones de los cortocircuitos se realizaron en el software ETAP de acuerdo a la Norma con el fin de verificar que coincidan los mismos valores calculados con el software.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La puesta a tierra es una conexión de resistencia muy baja desde el sistema eléctrico hasta la tierra física, dichos sistemas de puesta a tierra, contribuyen de forma importante a la protección y el buen funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica.

Prácticamente todos los equipos eléctricos y electrónicos necesitan estar conectados a una red de puesta a tierra como medio de protección contra descargas electroestáticas, descargas atmosféricas, interferencia electromagnética y errores humanos. La aplicación de la norma IEEE STD 80/2000, nos permite obtener niveles seguros de voltaje de paso y de toque dentro del área cercada y en sus proximidades; además nos permite mejorar los aspectos técnicos y así tener un sistema de puesta a tierra que garantice la seguridad de las personas y bienes que se encuentran en las cercanías.

Se busca mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas, con las cuales se pretende resguardar al personal de cualquier choque eléctrico. Con la implementación del SPT se busca proteger las instalaciones, equipos y bienes en general, contribuyendo a un buen desempeño de los sistemas de protección y su correcta operación.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Los beneficiarios de la malla de puesta a tierra son:

4.1. Directos:

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

4.2. Indirectos:

Estudiantes, docentes y personal encargado de los laboratorios.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

“El tema de la seguridad de las personas y de las instalaciones comienza a ser obligatorio en todo el mundo. Los conocimientos sobre las correctas prácticas de conexión a tierra son necesarios para asegurar el buen funcionamiento de los equipos, la debida actuación de los sistemas de protecciones eléctricas. La forma incorrecta de un sistema de puesta a tierra implica desde lesiones menores hasta la muerte de una persona, daños costosos e irreparables a los equipos e infraestructuras físicas.

Hay fuga eléctrica cuando la energía sale de su circuito normal, es decir cuando el aislamiento del conductor está deteriorado. Se corre el riesgo entonces de que el conductor haga contacto con otro cuerpo conductor.

Es necesario realizar una puesta a tierra ya que el laboratorio de alto voltaje contará con: tableros, máquinas, y un módulo de 15 KV. El diseño tiene que limitar en niveles de voltaje y corriente, para no poner en riesgo la seguridad de las personas o equipos bajo condiciones normales de falla.

5.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Mediante qué método se pueden analizar las diferentes configuraciones de mallas, que permita verificar la opción más adecuada para hacer estudios comparativos de las mismas?

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo General

Analizar las diferentes configuraciones de mallas de puesta a tierra que se puedan implementar en la Universidad Técnica de Cotopaxi, con el uso de análisis técnico e instrumentos de medida, para determinar la mejor configuración de las mismas desde el punto de vista técnico y económico.

6.2. Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia del terreno con el método Wenner, a diferentes puntos de separación de electrodos mediante el uso del telurómetro.
- Comparar los resultados de la resistencia de la malla, calculada para diferentes configuraciones de mallas en conformidad con la Norma IEEE STD 80/2000.
- Analizar las características técnicas de los materiales que se pueden utilizar para el mejoramiento del terreno.
- Realizar los planos de equipos y tableros a incorporarse en el laboratorio de alto voltaje para calcular la corriente de cortocircuito.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1: Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados

| OBJETIVOS | ACTIVIDAD | RESULTADO DE ACTIVIDADES | DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD |
|--|---|--|---|
| Determinar la resistencia del terreno con el método Wenner, a diferentes puntos de separación de electrodos mediante el uso del telurómetro. | Medición de resistencia | Obtención de la resistencia del terreno. | <ul style="list-style-type: none"> - Clavar las varillas copperweld a una cierta distancia y profundidad. - Utilizar el telurómetro para observar la resistencia del terreno. |
| Comparar los resultados de la resistencia de la malla, calculada para diferentes configuraciones de mallas en conformidad con la Norma IEEE STD 80/2000. | Analizar resultados conforme a la Norma IEEE. | Verificar si la resistencia se encuentra dentro de los límites de la norma IEEE para puestas a tierra. | <ul style="list-style-type: none"> - Investigar las normas IEEE para puestas a tierra. - Comparar las mediciones del terreno con las normas IEEE. |
| Analizar las características técnicas de los materiales que se pueden utilizar para el mejoramiento del terreno. | Investigación | Obtención de características técnicas de los diferentes materiales. | <ul style="list-style-type: none"> - Buscar información y detalles técnicos de los materiales a utilizar en la puesta a tierra. |
| Realizar los planos de equipos y tableros a incorporarse en el laboratorio de alto voltaje para calcular la corriente de cortocircuito. | Realizar el plano de ubicación. | <ul style="list-style-type: none"> - Obtención de un plano con las respectivas ubicaciones de los equipos y tableros. - Obtención de la corriente de cortocircuito, para proteger los equipos. | <ul style="list-style-type: none"> - Realizar en el programa AutoCAD el plano de ubicación de los equipos y tableros que se utilizarán en el laboratorio de alto voltaje. - Calcular la corriente de cortocircuito de los diferentes equipos que se instalarán en el laboratorio. |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

La puesta a tierra es un mecanismo de seguridad que forma parte de las instalaciones eléctricas y que consiste en conducir eventuales desvíos de la corriente hacia la tierra, impidiendo que el usuario entre en contacto con la electricidad.

Las puestas a tierras disminuyen los voltajes de objetos metálicos que se encuentran influenciados por inducciones eléctricas. Es el conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico puntual sin ningún tipo de interrupciones, protecciones como fusibles, interruptores, que conecta los equipos eléctricos con una masa metálica y el terreno.

Al presentarse una falla a tierra o una descarga atmosférica proporciona un camino seguro para la corriente eléctrica de falla y del rayo, cumpliendo el objetivo fundamental de los sistemas de puesta a tierra que es la seguridad de las personas.

Los sistemas de puesta a tierra son elementos muy importantes en los sistemas eléctricos, porque además de permitir de forma segura la conducción hacia el suelo de cargas eléctricas originadas por rayos, anomalías del sistema o electricidad estática, poseen la capacidad de dispersión y disipación de fallas, sin la presencia en la superficie de potenciales peligrosos. [1]

8.1. Introducción

Es necesario conocer la resistencia del terreno para así poder determinar el diseño de la conexión de la puesta a tierra en los laboratorios de Alto Voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi y así satisfacer las necesidades de resistencia de tierra. Como condición necesaria e indispensable es tener un terreno con la menor resistencia posible y eso se lo consigue dando tratamiento al suelo.

Muchas de las veces las malas condiciones del terreno provocan malas puestas de tierra, lo que es perjudicial para la seguridad de los equipos y la seguridad de las personas. El terreno es rara vez homogéneo y la resistividad del mismo varía geográficamente y a diversas profundidades.

En el presente trabajo de investigación se presenta datos bibliográficos de los métodos utilizados para medir la resistividad del terreno y los cálculos necesarios para obtener la resistividad promedio del terreno y a partir de estos datos poder realizar el tratamiento adecuado al suelo para una óptima puesta a tierra.

El equipo utilizado para este trabajo es un telurómetro DIGITAL EARTH TESTER AER01 BSIDE, el mismo que cuenta con cables conexión para verificar el voltaje del suelo y medir la

resistencia del suelo. Cabe mencionar que el voltaje del suelo debe ser menor a 20 Voltios para que las medidas no se distorsionen y arrojen datos erróneos.

8.2. Marco Contextual

En los sistemas de telégrafos de principios del siglo XIX se usaban dos o más cables para llevar la señal y el retorno de las corrientes. Por aquel entonces se descubrió (probablemente el científico alemán Carl August Steinheil) que la tierra podría ser usada como un camino de retorno para completar un circuito cerrado, de esta forma el cable de retorno era innecesario.

Sin embargo, había problemas con este sistema, ejemplificado por la línea de telégrafo transcontinental construida en 1861 por la Western Union Company entre St. Joseph (Misuri) y Sacramento (California). Con clima seco, la conexión de tierra a menudo desarrollaba una alta resistencia, esto requería que vertiera agua sobre las barras que hacían de conexión para que el sistema funcionara. Más adelante, cuando la telefonía comenzó a sustituir a la telegrafía, se encontró que las corrientes que inducían en la tierra otros aparatos, los ferrocarriles y los relámpagos causaban una interferencia inaceptable, por lo que el sistema de dos hilos fue reintroducido. [2]

Hasta el momento, no existe una metodología que muestre los pasos a seguir para hacer mediciones de resistencia e impedancia de la red de tierra y los voltajes superficiales de acuerdo a un estándar. La norma IEEE STD 80/2000 presenta una metodología para efectuar dichas mediciones y será la que se tomará como referencia, junto con otras existentes, para el presente estudio. El acuerdo 29-E-2000, Normas Técnicas de Diseño, Seguridad y Operación de las Instalaciones de Distribución Eléctrica establece los criterios de diseño y resistencias máximas de puesta a tierra tomando como referencia la norma IEEE STD 80 que se refiere a Guía para la seguridad de la puesta a tierra de subestaciones de corriente alterna, y cuyo enfoque no son las líneas de transmisión, pero si involucra las subestaciones. Hay procedimientos que no se realizan de rutina en las subestaciones y que es necesario hacerlos, tales como: las mediciones de voltaje de toque y de paso. Las investigaciones previas generalmente se basan en el diseño de las redes de tierra, pero la metodología para comprobar los valores de resistencia y demás parámetros no está dada.

8.3. Antecedentes

Un sistema de tierras efectivo consiste en forma típica de varillas de tierra, cables desnudos interconectados en forma de una malla y las conexiones a la estructura y partes metálicas del

Sistema Eléctrico. El diseño de un sistema de tierras seguro y económico es difícil de conjuntar, las instalaciones existentes están expuestas a cambios que requieren una revisión de seguridad y del comportamiento del sistema para asegurar el cumplimiento de su función.

El costo de diseñar, instalar y probar una malla de tierra nueva o redimensionar una ya existente puede ser bastante alto aunque necesario ya que si ocurre un accidente, el costo humano y los costos legales asociados podrían ser mayores.

Los primeros sistemas de puesta a tierra se realizaron con varillas de cobre puro, pero fueron omitidos casi de inmediato por la baja resistencia mecánica del material. Esto se solucionó al utilizar varillas de acero recubiertas con una capa de cobre, idea patentada por la marca Cooperweld americana, obteniendo resultados muy satisfactorios tanto en resistencia mecánica como en conductividad, esto permitió además optimizar recursos al lograr diseños de puestas a tierra con una mayor vida útil reduciendo costos por modificaciones o daños de los componentes del sistema de puesta a tierra. [3]

9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

¿Al realizar el dimensionamiento de la malla de puesta a tierra en los laboratorios de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, se logrará una buena protección hacia las personas que manipulan los equipos?

10. MARCO TEÓRICO

10.1. Definiciones y conceptos básicos

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.

- **Mallas de Tierra**

Es un conjunto de electrodos unidos eléctricamente entre sí.

- **Conexión a Tierra**

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

- **Resistividad de un Terreno.**

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

- **Gradiente Superficial.**

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

- **Tierra de Servicio.**

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

10.2. Objetivos de los sistemas de puesta a tierra

Los objetivos de una conexión a tierra son:

- Garantizar la seguridad de las personas durante fallas eléctricas.
- Proteger a las personas, limitando a los voltajes de contacto durante condiciones de cortocircuito.
- Evitar que aparezcan voltajes de paso, contacto y transferidas, para la vida humana en los gabinetes metálicos de los equipos eléctricos.

Para lograr que la puesta a tierra brinde protección y cumpla con los objetivos previstos, es necesario establecer un medio a través del cual sea posible entrar en contacto con el terreno, propiciando un camino de baja impedancia a menor costo. [4]

10.3. Funciones de los sistemas de puesta a tierra

La puesta a tierra de los equipos se refiere a la conexión intencional de las carcasas, bastidores o estructuras metálicas no portadores o transmisores de corriente de los mismos, para lograr los siguientes propósitos:

- Conducir a tierra todas las corrientes anormales que se originan como consecuencia en aparatos metálicos de los equipos eléctricos energizados.
- En estado estacionario, las puestas a tierra disminuyen los voltajes de elementos metálicos que se encuentran influenciados por inducciones de objetos energizados.
- Cuando se presentan las descargas atmosféricas, proporcionan un camino seguro para la corriente eléctrica del rayo.
- Proporcionar un medio para disipar la corriente eléctrica en la tierra bajo condiciones normales o de cortocircuito, sin exceder ningún límite operacional de los equipos.
- Asegurar el buen funcionamiento de los equipos de protección de una red, lo cual garantizará el adecuado aislamiento de las porciones de dicha red que estén en falla.
- Minimizar la interferencia de los circuitos de transmisión y distribución sobre los sistemas de comunicaciones y control.
- Mantener ciertos puntos de una red a un nivel de potencial definido con referencia a la tierra.
- Proteger la red contra los efectos de las descargas atmosféricas. [4]

10.4. Tipos de sobre voltaje y señales perjudiciales

Los sobre voltajes y señales eléctricas ajenas al sistema de distribución deforman su señal eléctrica nominal afectando a la generación y a la carga. Entre los tipos de fallas podemos encontrar las siguientes:

10.4.1. Fallas por cortocircuito

Un cortocircuito es una falla eléctrica que se produce cuando dos conductores de distinta fase o polaridad se juntan haciendo contacto físico entre sí.

“En función de la duración de la falla (tiempo de existencia sin despeje por los órganos de protección), la corriente de cortocircuito puede presentar tres valores característicos, subtransiente (no más de 0,1 seg.), transiente (entre 0,1 y 0,3 seg.) y permanente (luego de transcurrido más de 0,3 seg.)” [9]

10.4.2. Influencia de corrientes peligrosas en las personas

Mediante una diferencia de potencial (voltaje) se generan corrientes no deseadas, que pueden circular a través de un equipo o de una persona. [10]

Tabla 2: Influencia de corrientes en el cuerpo humano

| Intensidad mA, C.A., 50 o 60 Hz | | Efecto en el organismo |
|---------------------------------|-------|---|
| Hombre | Mujer | |
| 0.4 | 0.4 | Ninguna sensación |
| 0.5 | 0.5 | Umbral de percepción |
| 9 | 6 | Pérdida de control muscular en el 0.5 % |
| 16 | 10.5 | Pérdida de control muscular en el 50 % |
| 20 – 30 | | Posibilidad de asfixia |
| $\frac{0.116}{\sqrt{t}}$ | | Fibrilación de corazón (t representa el tiempo de exposición el cual puede ser mayor a 0.083 s. y menor a 5 s.) |

Fuente: [10]

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

10.4.3. Voltaje de toque limite tolerable por una persona

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. [11]

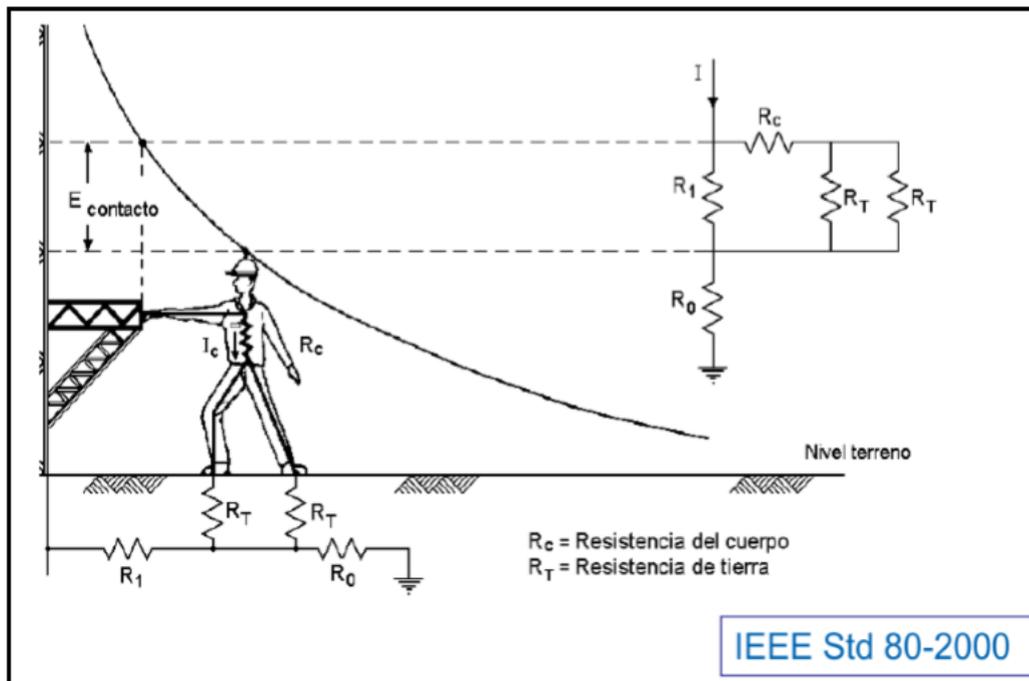


Figura 1: Voltaje de toque

Fuente: [11]

$$C_s \approx 1 - \frac{0.09 * (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2hs + 0.09}$$

Ecuación 1

$$E_{\text{toque}} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) * I_B$$

Ecuación 2

Donde:

C_s = Coeficiente en función del terreno

ρ = Es la resistividad del terreno ($\Omega * m$)

ρ_s = resistividad aparente de la capa superficial (valor entre 2000 a 2500 $\Omega.m$)

hs = Espesor de la capa superficial

E_{toque} = Voltaje de toque limite tolerable

1000 → Resistencia promedio del cuerpo humano (dado por Norma)

I_B = Valor eficaz máximo de la corriente a través del cuerpo humano (A)

El tiempo que una persona puede soportar la circulación de una corriente eléctrica a través de su cuerpo, sin sufrir daño corporal (fibrilación ventricular), es bastante corto y puede ser determinada mediante una ecuación experimental dada en la siguiente ecuación:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

Ecuación 3

Donde:

I_B = Valor eficaz máximo de la corriente a través del cuerpo humano (A)

$k = 0.116$ → Constante empírica para una persona de 50 kg

$k = 0.157$ → Constante empírica para una persona de 70 kg

t = Tiempo de duración de falla (Valores típicos dados por la Norma IEEE 80/2000 [pág. 27], están en el rango de 0.25 seg. a 1 seg.)

10.4.4. Voltaje de paso limite tolerable para una persona

Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (aproximadamente un metro). [11]

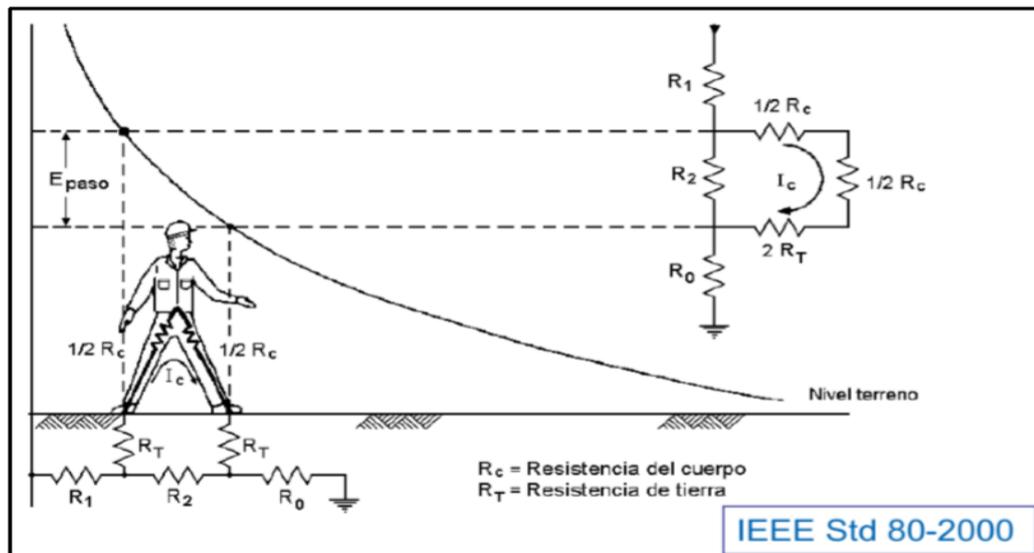


Figura 2: Voltaje de paso

Fuente: [11]

$$E_{paso} = (1000 + 6C_S\rho_S) * I_B$$

Ecuación 4

Donde:

E_{paso} = Es el voltaje de paso límite tolerable

1000Ω → Resistencia promedio del cuerpo humano.

ρ_s = resistividad aparente de la capa superficial (valor entre 2000 a 2500 $\Omega.m$)

C_s = Coeficiente en función del terreno

I_B = Valor eficaz máximo de la corriente a través del cuerpo humano (A)

10.5. Cálculo de la resistencia de la malla

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

Ecuación 5

R_g = Resistencia de la malla

ρ = Es la resistividad del terreno

L = Longitud total del conductor

A = Área de la malla de puesta a tierra

h = Profundidad de enterramiento de la malla de puesta a tierra

10.6. Métodos para la medición de la resistencia del suelo

Estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores gruesamente aproximados de la resistencia. Por tanto es necesario tomar mediciones directamente en el sitio donde quedara ubicada la puesta a tierra.

Las técnicas para medir la Resistencia del suelo son esencialmente las mismas cualquiera sea el propósito de la medida. Sin embargo la interpretación de los datos recolectados puede variar considerablemente y especialmente donde se encuentren suelos con resistividades no uniformes.

Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales superpuestas, cada una teniendo diferente resistencia.

A menudo se presentan también cambios laterales de resistencia pero más graduales a menos que se configuren fallas geológicas. Por tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas para determinar si hay alguna variación importante de la resistividad con la profundidad. [12]

Se utilizan varios procedimientos para determinar la resistencia de los terrenos. El más usado es el de los “cuatro electrodos” que presenta dos métodos:

- **Método de WENNER** apropiado en el caso de querer realizar una medida en una única profundidad
- **Método de SCHLUMBERGER** apropiado para realizar medidas a distintas profundidades y crear así perfiles geológicos de los suelos.

10.6.1. Método de Wenner

El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad “b” y espaciados (en línea recta) una distancia “a”, como se ilustra en la siguiente figura.

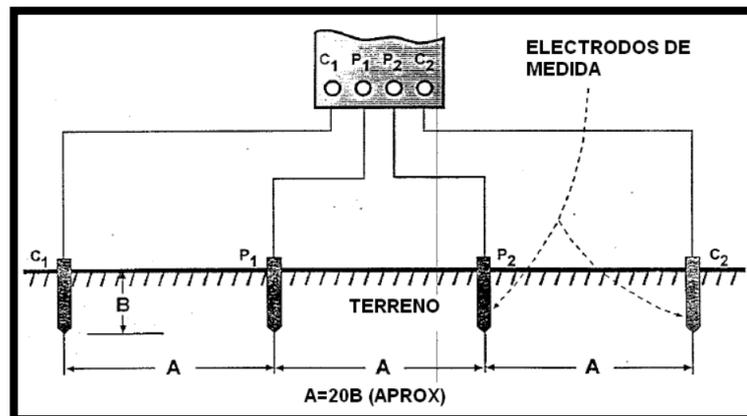


Figura 3: Método de Wenner

Fuente: [13]

Principio de medida

Se insertan cuatro electrodos en línea recta en el suelo y a igual distancia a entre ellos. Entre los dos electrodos exteriores (E y H), se inyecta una corriente de medida I mediante un generador. Entre los dos electrodos centrales (S y ES), se mide el potencial ΔV gracias a un voltímetro.

En el momento de la medición se deben seguir los siguientes pasos:

- Se desconecta del sistema de puesta a tierra a medir todos los componentes conectados a ella.
- Se conecta el equipo de medición al electrodo de la malla.
- Se coloca el electrodo de corriente a una distancia conocida del electrodo bajo prueba.
- Se realizan varias mediciones de resistencia para diferentes ubicaciones del electrodo de potencial, (el electrodo bajo estudio y los electrodos de prueba deben estar en línea recta.

[13]

El valor de la resistencia R leída en el telurómetro permite calcular la resistividad mediante la siguiente fórmula de cálculo simplificada:

$$\rho = (2\pi aR)$$

Ecuación 6

Donde:

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)

a = distancia de separación de electrodos

R = valor (en Ω) de la resistencia leída en el telurómetro.

10.6.2. Método de schlumberger

El Método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación (a) entre los electrodos centrales o de potencial se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos (na) de la separación base de los electrodos internos (a). La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se presenta en el siguiente gráfico:

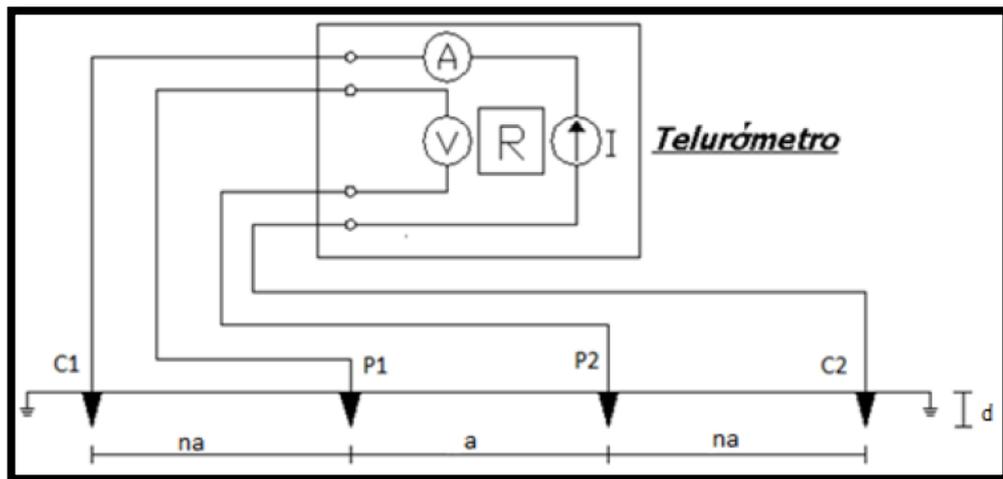


Figura 4: Método de schlumberger.

Fuente: [13]

Entonces el valor de la resistividad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = 2\pi R (n+1) * na$$

Ecuación 7

Donde:

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$)

R = Resistencia medida del suelo o relación. $\left(\frac{V}{I}\right)$

n = Número de electrodos tipo varilla

na = Distancia entre los electrodos C1 y P1 ó C2 y P2 [m]

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

10.7. Equipo utilizado para la medición de resistencia de puesta a tierra

El equipo utilizado para la medición de la resistencia de puesta a tierra es el instrumento certificado: telurómetro marca EARTH RESISTANCE TESTER C4235.



Figura 5: Telurómetro de 4 puntas
Fuente: [14]

10.8. Tipos de sistema de puesta a tierra

En un sistema simple de conexión a tierra, se figura un solo electrodo de tierra física instalado en el terreno. El uso de un solo electrodo es la manera más usual de realizar una conexión a tierra física, y puede hallarse fuera de su casa u oficina.

Los sistemas de malla de puesta a tierra están considerados como complejos en relación a un sistema de un único electrodo, la malla de tierra está compuesta de varias varillas de conexión a tierra conectadas entre sí, esta se halla en subestaciones y construcciones eléctricas de gran magnitud.

Por lo general las mallas a tierra se instalan en las subestaciones de reducción de tensión, subestaciones de paso y subestaciones de generación. En las redes complejas la resistencia al paso de la corriente hacia la tierra aumenta por esta razón la construcción de la malla se torna más complicada, por tanto, se debe mejorar el paso de la corriente a tierra física, por ejemplo, se aumenta el número de varillas conectadas entre sí en una conexión en paralelo.

El sistema de puesta a tierra puede estar dispuesto de tres formas:

10.8.1. Sistema radial

El sistema radial es el más barato pero no el más satisfactorio ya que de producirse una falla en un aparato, se producen grandes gradientes de potencial. Este sistema consiste en uno o varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones a cada aparato.

10.8.2. Sistema en anillo

El sistema en anillo se obtiene colocando en forma de anillo un cable de cobre de suficiente calibre (aproximadamente 1000 MCM) alrededor de la superficie ocupada por los equipos del sistema y conectando derivaciones a cada dispositivo mediante cable más delgado (500 MCM o 4/0 AWG).

Este es un sistema económico y eficiente y en él se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial. Los potenciales peligrosos disminuyen al disiparse la corriente de falla por varios caminos en paralelo.

10.8.3. Sistema de red o malla

El sistema en red o malla, es el más usado en la actualidad en nuestro sistema eléctrico y será el motivo de la investigación, consiste como su nombre lo indica en una malla formada por cable de cobre cuyo calibre va entre 2/0 AWG y 5000 MCM, conectados a través de varillas copperweld a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficiente pero a la vez el más caro de los tres tipos de sistemas. [15]

10.8.3.1. Diseños de mallas de PT utilizando la norma IEEE 80/2000

Para los diseños preliminares se considerará 3 casos posibles. Siendo estos:

- Caso 1: Malla Cuadrada con varillas.
- Caso 2: Malla Rectangular con varillas.
- Caso 3: Malla en tipo “L” con varillas.

La malla debe diseñarse bajo las siguientes condiciones:

- Un cable continuo debe rodear totalmente la rejilla para abarcar la mayor área posible, debe evitarse puntas de cable sin conectar.
- Los cables en el interior de la rejilla deberán colocarse paralelamente a una distancia conveniente y lo más constante posible, procurando llevarlos cerca de todas las salidas a estructuras, columnas metálicas, carcasas de motores, generadores, neutros, etc.

10.9. Tipos de electrodos de puesta a tierra

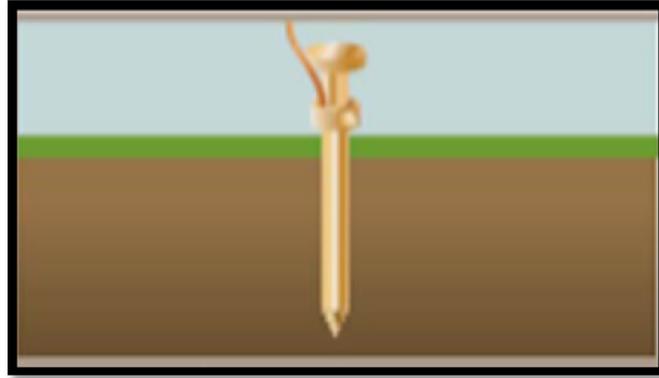


Figura 6: Electrodo único de conexión a tierra

Fuente: [16]

En la figura 6, se observa un electrodo que es una varilla de cobre metálica desnuda que va enterrada y su función es establecer un contacto con la tierra.

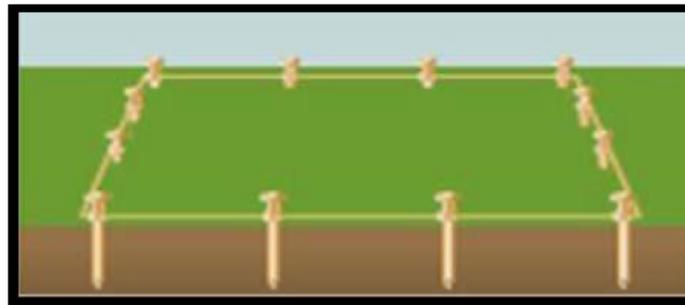


Figura 7: Varios electrodos conectados entre sí

Fuente: [16]

En la figura 7, se observa varios electrodos que se encuentran unidos entre sí y su función es establecer el contacto con la tierra.

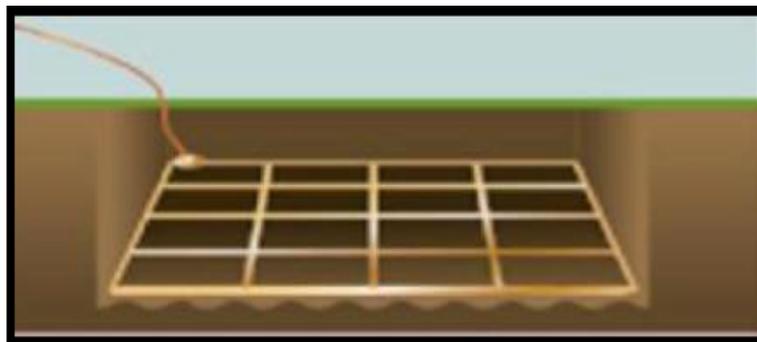


Figura 8: Red de mallas

Fuente: [16]

En la figura 8, la malla se hace armando una red de conductores de cobre desnudos, esta malla se puede mejorar con algunos electrodos. Esta malla es muy utilizada en subestaciones eléctricas, ya que reduce el riesgo de descargas.

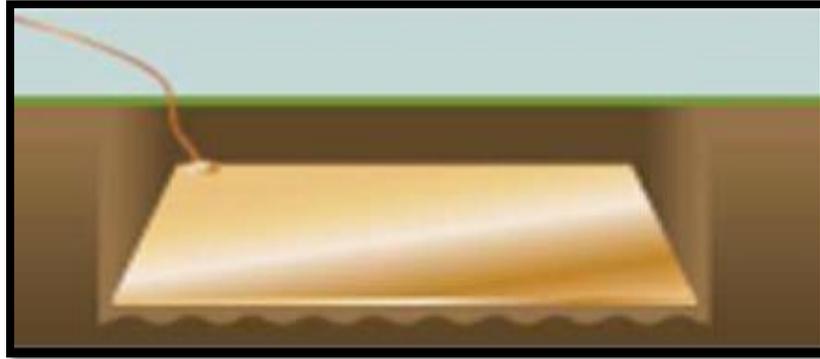


Figura 9: Placa de conexión a tierra

Fuente: [16]

En la figura 9, se observa una placa de conexión a tierra de cobre, acero galvanizado y acero inoxidable; recomendado para instalaciones en terrenos muy húmedos o con altos grados de salinidad, así como terrenos altamente corrosivos.

10.10. Conductores de puesta a tierra

Una malla de tierra típica para una subestación, puede comprender, cable de cobre desnudo de calibre entre 2/0 AWG y 500 MCM, enterrado 0,5 y 1,5 metros debajo de la superficie del piso. En cada unión deben colocarse un conector que asegure una perfecta conexión eléctrica.

Tabla 3: Constantes de los materiales conductores

| Descripción | Conductividad del material (%) | Factor α a 20 °C | Factor k a 0 °C | Temperatura de fusión T_m °C | Factor ρ a 20 °C | TCAP Capacidad Térmica | Kf |
|--|--------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-------|
| Cobre suave | 100 | 0.0039 | 234 | 1083 | 1.72 | 3.42 | 7 |
| Cobre duro cuando se utiliza suelda exotérmica | 97 | 0.0038 | 242 | 1084 | 1.78 | 3.42 | 7.06 |
| Alambre de acero recubierto de cobre | 40 | 0.0037 | 245 | 1084 | 4.4 | 4.4 | 10.45 |
| Alambre de acero recubierto de cobre | 30 | 0.0037 | 245 | 1084 | 5.86 | 3.85 | 12.06 |

| | | | | | | | |
|---|----|--------|-----|------|------|------|-------|
| varilla de acero recubierto de cobre | 20 | 0.0037 | 245 | 1084 | 8.62 | 3.85 | 14.64 |
|---|----|--------|-----|------|------|------|-------|

Fuente: [17]

Para asegurar un diseño lo más óptimo posible, se tomará en cuenta únicamente los conductores de cobre, ya que estos poseen una conductividad de más del 95 %, que permite un tiempo de despeje de falla más rápido y por la relación cantidad costo frente a conductores de otro material. La norma IEEE 80/2000, estima que el calibre de conductor para el diseño de mallas de puesta a tierra debe enmarcarse dentro del rango entre 2/0 AWG y 500 MCM.

Tabla 4: Calibres de cables y alambres de cobre

| Calibre del conductor | | Área nominal mm ² | Diámetro m |
|-----------------------|-----|------------------------------|------------|
| MCM | AWG | | |
| 350 | - | 177,35 | 0,015 |
| 300 | - | 152,01 | 0,0139 |
| 250 | - | 126,68 | 0,0127 |
| 211,6 | 4/0 | 107,22 | 0,0117 |
| 167,8 | 3/0 | 85,03 | 0,0104 |
| 133,1 | 2/0 | 67,44 | 0,0093 |

Fuente: [17]

La siguiente tabla presenta los calibres mínimos de los conductores para evitar fusión por sobrecalentamiento. En caso de que el mallado se construya con conductores de otro material la tabla queda dentro de los límites tolerables.

Tabla 5: Calibres mínimos de conductores de cobre

| Duración de fallas en segundos | Cable desnudo solamente | Circular Mils/Amp | Cable desnudo con juntas atornilladas |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|
| | | Cable desnudo con uniones soldadas | |
| 30 | 350 MCM | 300 MCM | 650 MCM |
| 4 | 250 MCM | 4/0 | 250 MCM |

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 3/0 | 2/0 | 3/0 |
| 0.5 | 2/0 | 1/0 | 1/0 |

Fuente: [17]

10.11. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

La principal función de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas. Esta es una consideración muy importante durante el diseño y obliga a que se fije una resistencia objetivo.

Los valores establecidos de resistencia de puesta a tierra, para distintas aplicaciones, que establece la norma, se describe a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 6: Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

| Aplicación | Valor máximo de resistencia de puesta a tierra Ω |
|--|---|
| Estructura de línea de transmisión | 20 |
| Subestaciones de alta y extra alta tensión $V \geq 115\text{Kv}$ | 1 |
| Subestaciones de media tensión uso exterior | 10 |
| Subestaciones de media tensión uso interior | 10 |
| Protección contra rayos | 4 |
| Neutro acometida en baja tensión | 25 |
| Descargas electrostáticas | 25 |
| Equipos electrónicos sensibles | 5 |

Fuente: [17]

10.12. Rango de resistividad del suelo

Las investigaciones sobre resistividad del terreno de una subestación son esenciales para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de las excavaciones, perforaciones y otras investigaciones geológicas, proporcionan información útil sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del suelo, y dan una idea sobre el rango de resistividad del terreno del sitio.

En la tabla 7, representa la resistividad de los diferentes tipos de suelos según la norma STD IEEE 80/2000.

Tabla 7: Resistividad de los diferentes suelos

| Tipo de suelo | Resistividad ($\Omega \cdot m$) |
|----------------------|---|
| Lama | 5 -100 |
| Humus | De 10 a 150 |
| Limo | De 20 a 100 |
| Arcillas | De 80 a 330 |
| Tierra de jardín | De 140 a 480 |
| Caliza fisurada | De 500 a 1000 |
| Caliza compacta | De 1000 a 5000 |
| Granito | De 1500 a 10000 |
| Arena común | De 3000 a 9000 |
| Basalto | De 10000 a 20000 |

Fuente: [17]

10.13. Interconexión de malla de tierra

La interconexión de 2 o más malla de tierra se analiza considerando los efectos mutuos respectivos y aplicando posteriormente el método de cálculo de resistencia de electrodos, compuestos, para lo cual se supone a cada malla individual con un electrodo componente. [18]

Método de cálculo aproximado de puestas a tierra interconectadas

El cálculo exacto de puestas a tierra se puede efectuar siguiendo el mismo procedimiento utilizado para análisis de 1 sola, considerando los elementos de toda puestas a tierra y los elementos de interconexión. A pesar de lo anterior, resulta conveniente y suficiente emplear métodos aproximados de cálculos más simples, que proporcione una exactitud adecuada.

Una forma para calcular aproximadamente la resistencia de puestas a tierra aproximadas, es considerar a cada uno de los componentes que conforman la interconexión: puestas a tierra propiamente tales y cables de interconexión, como electrodos equivalentes. De este modo, conociendo la resistencia propia de cada uno y las resistencias mutuas entre ellos, se configura un sistema de ecuaciones similar al de un sistema de puesta tierra simple. Entonces se analiza la interconexión de dos o más mallas de tierra considerando los efectos mutuos respectivos y

¿Qué es la soldadura exotérmica?

La soldadura exotérmica es un procedimiento de soldadura utilizada para unir dos conductores de cobre sin la necesidad de pernos o uniones, tiene su base en la reducción de dióxido de cobre por aluminio metálico. La reacción es muy exotérmica, desprendiendo una gran cantidad de calor al producirse, de forma que llegan a alcanzarse temperaturas de más de 1000°C. Estas condiciones permiten la fusión de los materiales a soldar, quedando unidos por el producto resultante de la reacción principal.

Sus características principales son:

- No se corroe, oxida o degrada con el tiempo y es resistente al par galvánico.
 - Es capaz de soportar descargas eléctricas de forma repetida.
 - Nunca aumenta su resistencia.
 - La conductividad de la conexión mediante soldadura, es igual o superior a los dos conductores unidos. [19]
-
- **Molde para conexión exotérmica**

Los moldes se mecanizan a partir de un bloque de material refractario (grafito). Su duración media, en condiciones normales de utilización es de 70 a 100 soldaduras. La reacción tiene lugar en un molde de grafito en el que previamente se han introducido los elementos a soldar y la carga necesaria. [19]



Figura 11: Molde para conexión exotérmica
Fuente: Coordinadores del proyecto

- **FM electrodo plus – 6 pulgadas / electrodo químico activo**

Un electrodo químico FM Electrodo Plus, reemplaza 8 varillas copperweld; el inconveniente de las varillas copperweld radica principalmente, en que son muy propensas a la corrosión galvánica del suelo, por su fina capa de recubrimiento de cobre sobre el acero, lo cual hace que el tiempo de vida útil de las varillas copperweld sea inferior a 1 año dependiendo del tipo de suelo; mientras que los electrodos químicos tiene una garantía de operación de 15 años en cualquier tipo de suelo. La conformación del electrodo de grafito rígido en forma de ánodo, con un activador-conductor de relleno para la mejora de la intimación con el terreno, hacen que este sistema de puesta a tierra, sea de alta fiabilidad al tratarse de un electrodo constituido enteramente por grafito, no se encuentra afectado intensamente por la corrosión a diferencia de lo que ocurre con los metales. [19]



Figura 12: Características de los electrodos de grafito.

Fuente: Coordinadores del proyecto

- **Gel mejorador de suelo**

El Gel Mejorador de Suelo – FM Compactador Plus, es un tratamiento natural para suelos de alta resistividad, contribuye a la optimización de la conductividad, mejorando la capacidad de absorción, y retención de agua del terreno, maximizando así la concentración de sales y minerales solubles. [19]

1. Mejora la conductividad eléctrica del terreno, gracias a su fórmula especial que favorece la absorción y retención de agua.

2. Minimiza los efectos de corrosión galvánica del suelo, obteniendo un equilibrio de humedad adecuado para la puesta a tierra.
3. Agiliza la compactación de la puesta a tierra con el suelo, potenciando la efectividad del paso de la corriente.

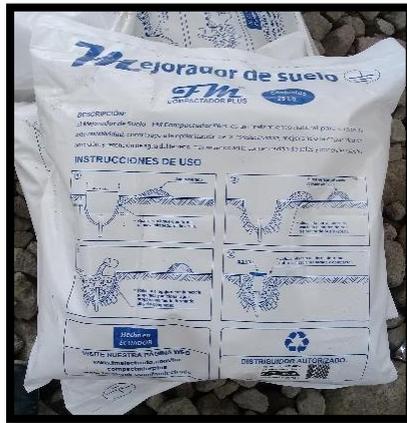


Figura 13: Gel mejorador de suelo

Fuente: Coordinadores del proyecto

- **Reactivos en polvo para realizar la soldadura exotérmica**

El Compuesto de soldadura es la mezcla de reactivos en polvo que al reaccionar produce un fundido capaz de soldar los conductores requeridos.

Con cada unidad de compuesto de soldadura se adjunta una pequeña porción de reactivo iniciador que actúa como una mecha. [19]



Figura 14: Químico soldadura exotérmica

Fuente: Coordinadores del proyecto

- **Cable 2/0 AWG cobre desnudo**

Principales aplicaciones

- Los cables de cobre en función de su temple y construcción, se usan sobre aisladores en líneas aéreas de distribución eléctrica.
- En conexiones de neutros y puestas a tierra de equipos y sistemas eléctricos.

Características

- Formado por alambres de cobre electrolítico de alta pureza con un contenido mínimo de 99,9% de cobre.
- Los cables se fabrican en construcción concéntrica.
- Temple duro, semiduro o suave dependiendo de las aplicaciones.
- Estos productos se ofrecen en empaques de carrete.

Ventajas

- Por su alta conductividad eléctrica el cobre es el metal ideal para las instalaciones eléctricas.
- Los conductores de cobre son resistentes a la corrosión.
- Ofrecen una gran resistencia mecánica.
- Mayor flexibilidad que el alambre por su construcción. [19]

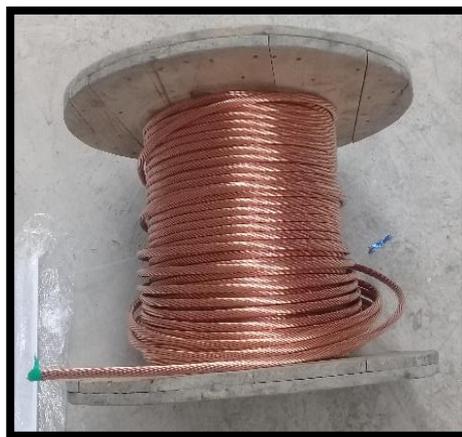


Figura 15: Cable 2/0 AWG cobre desnudo

Fuente: Coordinadores del proyecto

- **Varillas copperweld**

La varilla copperweld es un elemento bimetálico compuesto por un núcleo de acero y una película externa de cobre unidos metalúrgicamente. La capa de cobre brinda protección suficiente contra la corrosión del terreno y la varilla en conjunto permite una adecuada difusión a tierra de las corrientes de falla que se puedan presentar en el sistema eléctrico.

La varilla Copperweld basa su funcionamiento en la longitud de la misma, por lo que disminuiría en proporción a su largo la resistencia de propagación de corrientes. Para mejores resultados, es importante una adecuada instalación y homogeneidad del terreno, el cual previamente hay que tratar con aditamentos químicos para mejoramiento de la tierra. [19]



Figura 16: Varilla copperweld

Fuente: Coordinadores del proyecto

- **FM Minerales 3 Lb (1,36 Kg) – Agregado electrolítico**

FM Minerales, es un producto en estado sólido diseñado para efectos de activación y mantenimiento de los electrodos químicos y varillas. La función principal es brindar al suelo el agregado electrolítico necesario, para reducir la resistencia eléctrica de contacto permitiendo potenciar eficazmente la disipación de las corrientes de falla. [19]



Figura 17: Fm minerales

Fuente: Coordinadores del proyecto

- **FM Agregado Plus 1 Gl – Agregado electrolítico**

FM Agregado Plus, es un producto en estado líquido diseñado para efectos de activación y mantenimiento de los electrodos químicos y varillas. La función principal es brindar al suelo el agregado electrolítico necesario, para reducir la resistencia eléctrica de contacto permitiendo potenciar eficazmente la disipación de las corrientes de falla. [19]



Figura 18: FM Agregado Plus

Fuente: Coordinadores del proyecto

10.15. Criterios de diseño de mallas utilizando IEEE 80/2000

Los siguientes valores se calculan con el fin de ver si la corriente de falla que se pueda producir en un instante de tiempo no afecte a las personas ni a los equipos eléctricos, enviando las magnitudes peligrosas a la malla previamente diseñada.

- **Corriente de falla en el lado secundario del transformador**

$$I_{fL-N} = \frac{\text{Potencia del transformador en KVA}}{\sqrt{3} * \text{Voltaje del lado secundario del transformador en KV}}$$

Ecuación 8

- **Selección del tamaño del conductor**

$$A_{MCM} = I_0 * K_F * \sqrt{t}$$

Ecuación 9

Donde:

A_{MCM} = Área del conductor en MCM.

I_F = Corriente de falla en kA

K_F = Constante para el material dado en la Tabla 3, usando una $T_a = 40$ °C

t = tiempo de duración de la corriente en seg.

- **Determinación de la corriente de cortocircuito a circular por la malla**

$$I_g = I_{fL-N} * Z$$

Ecuación 10

Donde:

I_g = Corriente de cortocircuito a circular por la malla

I_{fL-N} = Corriente de cortocircuito primario

Z = Impedancia de cortocircuito del transformador

- **Elevación del potencial de tierra**

$$GPR = I_g * R_g$$

Ecuación 11

Donde:

GPR = Elevación del potencial de tierra

I_g = Corriente a circular por la malla

R_g = Resistencia de la malla de puesta a tierra

- **Calculo del voltaje máximo de malla**

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_g}{L_M}$$

Ecuación 12

Donde:

E_m = Voltaje máximo de malla

ρ = Resistividad del terreno mejorado

K_m = Valor geométrico de espaciamiento de la malla

K_i = Factor de irregularidad

I_g = Corriente a circular por la malla

L_m = longitud efectiva enterrada

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 h d_c} + \frac{(D + 2h)^2}{8 D d_c} - \frac{h}{4 d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n - 1)} \right) \right]$$

Ecuación 13

Donde:

K_m = Valor geométrico de espaciamiento de la malla

D = Espaciamiento entre conductores

h = Profundidad de la malla

d_c = Diámetro del conductor de la malla en m.

K_{ii} = Factor de corrección, (1 dado por Norma)

K_h = Factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla

n = Representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{1}}$$

Ecuación 14

Donde:

K_h = Factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla

h = Profundidad de la malla

$$n = n_a * n_b$$

Ecuación 15

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}}$$

Donde:

n = Número de conductores paralelos de una malla rectangular

L_c = Longitud total de los conductores de la malla horizontal en metros

L_p = Longitud del perímetro de la malla en m

A = Área de la malla de puesta a tierra

$$K_i = 0.644 + 0.148 n$$

Ecuación 16

Donde:

K_i = Factor de irregularidad

n = Representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular

$$L_M = L_c + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right) L_R$$

Ecuación 17

Donde:

L_M = Longitud efectiva enterrada

L_c = Longitud total de los conductores de la malla

L_r = Longitud de la varilla

L_x, L_y = Longitud de largo y ancho de la malla

L_R = Longitud total de todas las varillas

$$L_R = n_r * L_r$$

Ecuación 18

Donde:

L_R = Longitud total de todas las varillas

n_r = Numero de varillas

L_r = Longitud de cada varilla

$$L_c = M_1 * L_1 + M_2 * L_2$$

Ecuación 19

Donde:

L_c = Longitud de conductor

M = Número de varillas a lo largo y ancho

L = Dimensionamiento del terreno

$$L_T = L_c + N * L_v$$

Ecuación 20

Donde:

L_T = Longitud total del conductor enterrado

N = Numero de varillas

L_v = Longitud de la varilla

- **Calculo del voltaje real de paso**

$$E_p = \frac{\rho * I_g * K_s * K_i}{L_s}$$

Ecuación 21

Donde:

E_p = Voltaje real de paso

ρ = Resistividad del terreno mejorado

I_g = Corriente a circular por la malla

K_s = Factor de espaciamento para tensión de paso

K_i = Factor de irregularidad

L_s = Longitud efectiva del conductor enterrado

$$L_s = 0,75 L_c + 0,85 L_R$$

Ecuación 22

Donde:

L_c = Longitud total de los conductores de la malla

L_R = Longitud total de todas las varillas

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

Ecuación 23

Donde:

K_s = Factor de espaciamento para tensión de paso

h = Profundidad de la malla

D = Espaciamento entre conductores

n = representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular

Esta ecuación es válida para profundidades de enterramiento de $0.25\text{m} < h < 2.5\text{m}$ de acuerdo a la norma IEEE 80/2000.

11. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

11.1. Métodos de investigación

- **Método Inductivo – Deductivo**

El método inductivo – deductivo permitirá un análisis individual de cada una de las partes que conforma el sistema eléctrico, iniciando con la recolección de los que permitirán aportar conclusiones y recomendaciones del problema investigado.

11.2. Técnicas de investigación

- **Observación directa**

Esta técnica permitió tener el contacto directo con el suelo, identificando los lugares estratégicos para la ejecución del diagnóstico.

11.3. Tipos de investigación

- **Investigación Bibliográfica**

El presente diagnóstico se realizó mediante una búsqueda bibliográfica, en libros, revistas científicas, páginas web, resoluciones, etc. Las cuales aportaron conocimiento valioso para

presentar posibles soluciones a los problemas encontrados en el sistema eléctrico de la universidad.

- **Investigación Descriptiva**

Este tipo de investigación detalla los problemas que puede producir en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, mediante la recolección y evaluación de los futuros daños a diagnosticar para determinar una excelente protección.

- **Investigación Exploratoria**

Esta investigación permitió conocer los nuevos laboratorios de la universidad, verificando de manera exploratoria donde se puede realizar la puesta a tierra de manera adecuada.

- **Investigación de Campo**

Esta investigación permitió tener un contacto directo con el terreno de la universidad, verificando directamente la resistencia del suelo.

12. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

12.1. Análisis de la norma IEEE 80/2000

El procedimiento de diseño que se describe corresponde a la Norma IEEE STD 80/2000, el propósito de esta norma enfocado a este proyecto de tesis es presentar los métodos de instrumentación práctica que pueden ser usados para la medición de la impedancia de la tierra, potenciales de toque y de paso, y distribuciones de corriente de sistemas de tierra largos o extensos. El método a utilizarse para la medición del terreno de la UTC es el de Wenner.

La obtención de la resistencia de puesta a tierra depende, si el diseño de la malla está compuesta o no por varillas, además de la geometría de la malla que se desea realizar. Un buen sistema de aterramiento provee una baja resistencia a la tierra remota para minimizar el incremento de potencial a tierra. Para la mayoría de las subestaciones de transmisión y otras más grandes, la resistencia a tierra es comúnmente 1Ω o menos. En subestaciones de distribución más pequeñas

el rango que comúnmente se acepta es de 1Ω hasta 5Ω , dependiendo de las condiciones del lugar.

- **Precauciones generales**

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

- **Seguridad en la preparación de las pruebas**

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

12.2. Descripción del lugar a instalarse la malla de puesta a tierra

Para realizar el estudio paralelo de la malla de puesta a tierra de la Universidad Técnica De Cotopaxi se ubicó el área donde se construyó los laboratorios de alto voltaje en la Universidad.

Debido a las condiciones de resistividad del terreno por su homogeneidad, la malla a construirse se regirá el mismo cálculo recomendado por la IEEE Std 80/2000. El motivo por el cual se construye esta malla es debido que en estos puntos se requieren valores de Resistencia de Puesta a Tierra bajos.



Figura 19: Ubicación de los laboratorios de alto voltaje en la Universidad Técnica de Cotopaxi
Fuente: [4]

12.3. Datos de campo (Área)

Para realizar el mallado del sistema de puesta a tierra es necesario conocer el área del terreno. En la siguiente figura se muestra el área del terreno del laboratorio de alto voltaje que comprende a un área de 182 m².

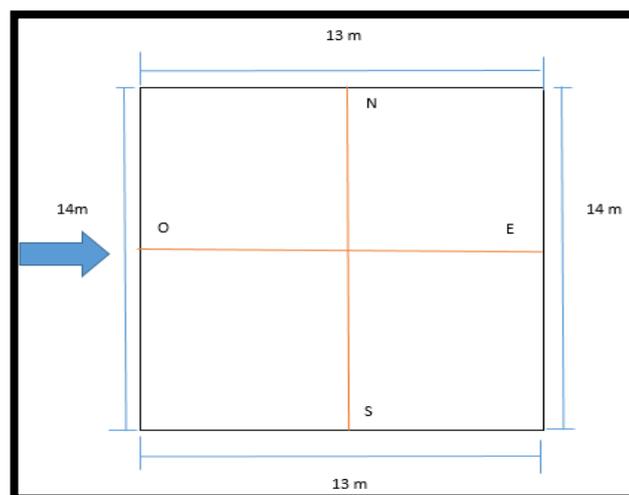


Figura 20: Área del terreno de laboratorio de alto voltaje
Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

12.4. Análisis de la resistividad del suelo

A continuación debemos conocer la resistividad superficial del terreno en estado puro, es decir sin haberle tratado químicamente al mismo. Empleando el método de Wenner, las resistividades medidas en función de la profundidad para el terreno disponible (14m * 13m), son consignadas en la tabla 8. Se puede apreciar que a mayor distancia de separación, la resistencia del terreno va a ser menor.

Tabla 8: Medidas de resistividad del suelo sin tratamientos

| Medida número | a(m) | Re(ohm) | $\rho[2\pi aR](\Omega*m)$ |
|-----------------|----------|--------------|--------------------------------------|
| 1 | 1 metro | 213 Ω | 1338,32 |
| 2 | 2 metros | 187 Ω | 2349,92 |
| 3 | 3 metros | 116 Ω | 2186,55 |
| 4 | 4 metros | 111 Ω | 2789,74 |
| PROMEDIO | | | 2166,13 $\Omega*m$ |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

En base a los cálculos de la resistividad por el método de Wenner, hemos comparado los resultados con la norma IEEE 80/2000, la cual nos indica que es muy lógico obtener este resultado de resistividad igual a 2166,13 $\Omega*m$ debido a que se trata de un suelo tipo caliza compacta por ende su valor de resistividad está comprendido entre:

Tabla 9: Resistividad del suelo caliza compacta según la IEEE 80/2000

| Tipo de suelo | Resistividad ($\Omega*m$) |
|-----------------|-----------------------------|
| Caliza compacta | De 1000 a 5000 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

12.5. Cálculo de la resistencia de la malla (R_g) con el suelo en estado natural

➤ Resistencia de la malla cuadrada con 4 varillas

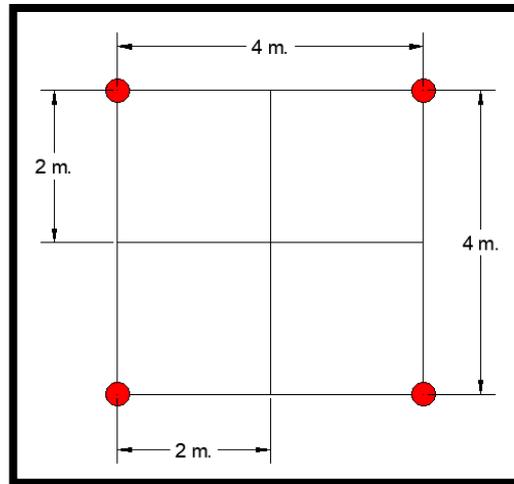


Figura 21: Malla cuadrada con varillas

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Las características que se proponen para esta malla son las siguientes:

Tabla 10: Datos para calcular una malla cuadrada con varillas

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Área de la malla de puesta a tierra | $A = 16m^2$ |
| Largo de la malla | $L1 = 4m$ |
| Ancho de la malla | $L2 = 4m$ |
| Profundidad de la malla | $h = 0,5 m$ |
| Número de conductores a lo largo | $M1 = 3$ |
| Número de conductores a lo ancho | $M2 = 3$ |
| Espaciamiento entre los conductores | $D = 2 m$ |
| Número de electrodos tipo varilla | $N = 4$ |
| Longitud de un electrodo tipo varilla | $Lv = 1,80 m$ |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

- Longitud de conductor

$$Lc = M_1 * L1 + M_2 * L2$$

$$Lc = 3 * 4 + 3 * 4$$

$$Lc = 24 m$$

- Longitud total del conductor enterrado

$$L_T = L_c + N * Lv$$

$$L_T = 24 \text{ m} + 4 * 1.80$$

$$L_T = 31,2 \text{ m}$$

- Resistencia de la malla a tierra

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

$$Rg = 2166,13 * \left[\frac{1}{31,2} + \frac{1}{\sqrt{20 * 16}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{20/16}} \right) \right]$$

$$Rg = 268,19 \Omega$$

➤ Resistencia de la malla rectangular con 12 varillas

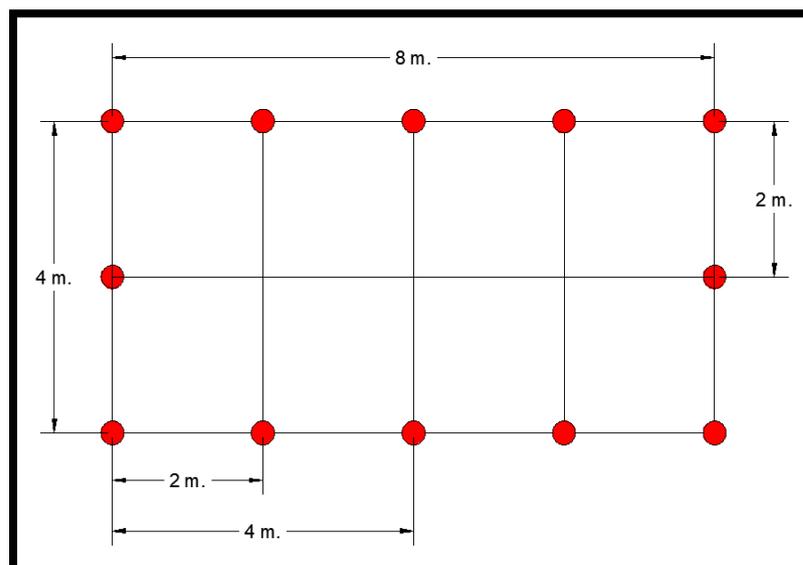


Figura 22: Malla rectangular con varillas
Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Las características que se proponen para esta malla son las siguientes:

Tabla 11: Datos para calcular una malla rectangular con 12 varillas

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Área de la malla de puesta a tierra | $A = 32m^2$ |
| Largo de la malla | $L1 = 8m$ |
| Ancho de la malla | $L2 = 4m$ |
| Número de conductores a lo largo | $M1 = 3$ |
| Número de conductores a lo ancho | $M2 = 5$ |
| Espaciamiento entre los conductores | $D = 2m$ |
| Número de electrodos tipo varilla | $N = 12$ |
| Profundidad de la malla | $h = 0,5 m$ |
| Longitud de un electrodo tipo varilla | $Lv = 1,80m$ |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

- Longitud de conductor

$$L_c = M_1 * L1 + M_2 * L2$$

$$L_c = 3 * 8 + 5 * 4$$

$$L_c = 44 m$$

- Longitud total del conductor enterrado

$$L_T = L_c + N * Lv$$

$$L_T = 44 m + 12 * 1.80$$

$$L_T = 65,6 m$$

- Resistencia de puesta a tierra del terreno normal

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

$$R_g = 2166,13 * \left[\frac{1}{65,6} + \frac{1}{\sqrt{20 * 32}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50\sqrt{20/32}} \right) \right]$$

$$R_g = 180,0 \Omega$$

➤ Resistencia de la Malla en tipo “L” con varillas

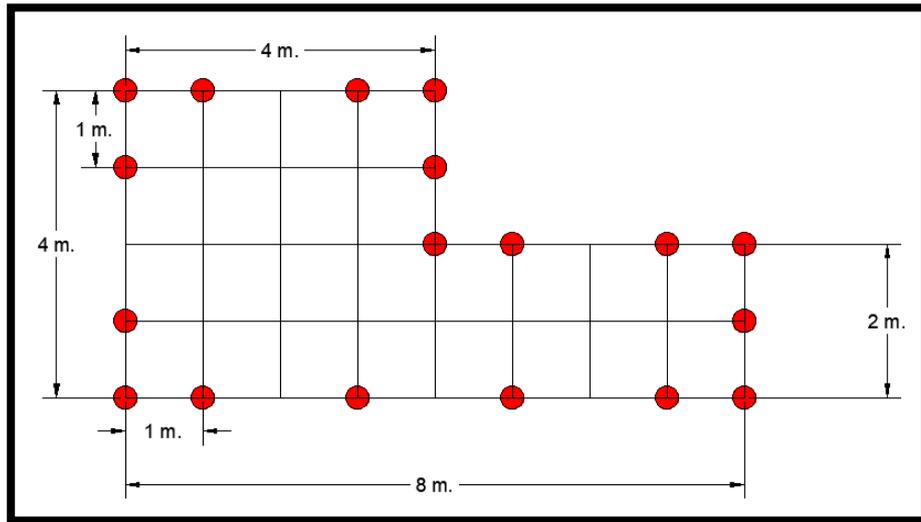


Figura 23: Malla en tipo “L”

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Las características que se proponen para esta malla son las siguientes:

Tabla 12: Datos para calcular una malla en “L”

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Área de la malla de puesta a tierra | $A = 24m^2$ |
| Espaciamiento entre conductores | $D = 1m$ |
| Profundidad de la malla | $h = 0.5m$ |
| Número de electrodos tipo varilla | $N = 18$ |
| Longitud de un electrodo tipo varilla | $L_v = 1,80m$ |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

- Longitud total de todas las varillas.

$$L_R = n_r * L_r$$

$$L_R = 18 * 1,80 m$$

$$L_R = 32,4 = 32 m$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Cuadrado} \\
 & L_c = N_{lx} + M_{ly} \\
 & L_c = 8 + 10 \\
 & L_c = 18 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Rectangular} \\
 & L_c = N_{lx} + M_{ly} \\
 & L_c = 18 + 24 \\
 & L_c = 42 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 L_{CTtotal} &= 18 \text{ m} + 42 \text{ m} \\
 L_{CTtotal} &= 60 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- Longitud total de conductores enterrados

$$\begin{aligned}
 L_T &= L_c + L_R \\
 L_T &= 60 \text{ m} + 32 \text{ m} \\
 L_T &= 92 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- Resistencia de puesta a tierra del terreno normal

$$\begin{aligned}
 Rg &= \rho * \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right] \\
 Rg &= 2166,13 * \left[\frac{1}{92} + \frac{1}{\sqrt{20 * 24}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{20/24}} \right) \right] \\
 Rg &= 190,29 \Omega
 \end{aligned}$$

- **Resumen de resistencias obtenidas sin el suelo mejorado**

A continuación en la tabla se muestra el resumen de las resistencias de la malla de puesta a tierra en función a los diferentes diseños de mallas de PT. Cabe indicar que ninguno de estos valores están dentro de la norma IEEE80/2000 por lo que se procederá a mejorar el suelo con la finalidad de bajar los valores a lo establecido por la norma.

Tabla 13: Resistencias obtenidas sin tratamiento del suelo

| Diseño de malla | Resistencia obtenida |
|------------------------|-----------------------------|
| Malla cuadrada | 268,19 Ω |
| Malla rectangular | 180,0 Ω |
| Malla en tipo "L" | 190,29 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

12.6. Propuestas para reducir la resistencia de la tierra

Cuando la resistencia del suelo es demasiada elevada, conviene tratarlo con diferentes métodos para que los valores estén dentro de la norma y así precautelar la vida de las personas. En general todos los métodos tratan de crear una mejor conductividad en las primeras capas o cilindros de tierra que rodean al electrodo, en donde la superficie conductora es pequeña.

En la práctica cuando la resistencia de la tierra no es suficientemente baja, se utilizan los métodos más comunes para mejorarla como son:

- a) Usando una varilla de mayor diámetro.
- b) Usando electrodos más largos
- c) Aporte de sales "gel"
- d) Inyección de bentonita.
- e) Agregado de sales simples.
- f) Reducción de la resistividad del suelo tratando químicamente el terreno.

- **Tratamiento químico del suelo mediante la adición de Gel**

El método utilizado para la reducción de la resistencia de puesta a tierra fue el Gel, surge como un medio para mejorar y disminuir la resistencia eléctrica del SPT sin necesidad de utilizar gran cantidad de varillas.



Figura 24: Gel utilizado para bajar la resistencia del suelo

Fuente: Coordinadores del proyecto

El gel que se muestra en la figura 24, se utilizó para bajar la resistencia de la tierra y presenta las siguientes características:

- ✓ Facilidad para aplicarlo
- ✓ Elevado porcentaje de reducción de resistencia inicial
- ✓ Larga vida útil.
- ✓ Fácil reactivación
- ✓ Mantiene la resistencia baja por varios años.
- ✓ No es corrosivo: elevada conductividad eléctrica
- ✓ Higroscopicidad: alta capacidad de Gelificación
- ✓ No es toxico: Inofensivo para la naturaleza
- ✓ Químicamente estable en el suelo
- ✓ No afecta al medio ambiente
- ✓ Económico

El tratamiento consiste en agregar los electrolitos mediante el Gel, con la finalidad de retener la humedad necesaria por un periodo prolongado para que no varíe la resistencia del suelo por las diferentes variaciones del clima. La cantidad de dosis por metro cubico varia de 2 a 6. En la tabla 14 se presentan algunos valores de dosificación.

Tabla 14: Valores de dosificación

| Resistividad $\Omega \cdot m$ | Dosificación |
|---|--------------------------|
| De 50 a 200 | 2 dosis x m ³ |
| De 200 a 400 | 4 dosis x m ³ |
| De 400 a mas | 6 dosis x m ³ |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

A continuación se presentan los valores de reducción de la resistividad al aplicar el Gel; cabe mencionar que los valores vienen especificados en el manual de la marca utilizada y son los siguientes:

Tabla 15: Disminución de resistividad con gel

| Resistividad inicial ($\Omega \cdot m$) | % de reducción | Resistividad final ($\Omega \cdot m$) |
|---|-----------------------|---|
| 2000 | 95 | 100 |
| 1000 | 95 | 50 |
| 800 | 95 | 40 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

En nuestro caso se aplicó el Gel y obtuvimos los siguientes resultados

Tabla 16: Porcentaje de reducción de resistividad con Gel

| Resistividad inicial ($\Omega \cdot m$) | % de reducción | Resistividad final ($\Omega \cdot m$) |
|---|-----------------------|---|
| 2166.13 | 95 | 108.30 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

En la siguiente grafica se muestran varios tipos de electrodos que hay en el mercado.

Tabla 17: Tipos de electrodos

| Tipos de Electrodos mejoradores de suelo | Resistencia eléctrica |
|--|-----------------------|
| Electrodo de grafito marca RENFE | 0,000094 Ω *m |
| Electrodo de grafito marca FMPLUS | 0,000014 Ω *m |
| Electrodo de grafito rígido SEQ | 0,0001375 Ω *m |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

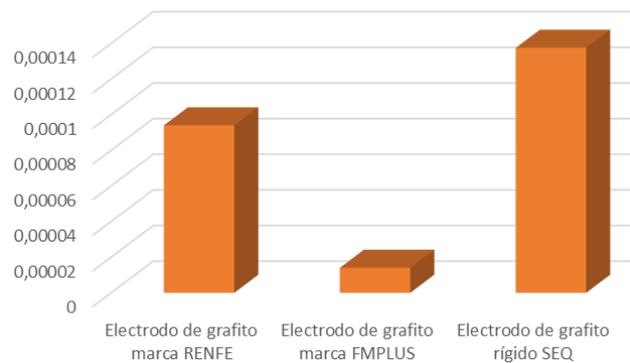


Figura 25: Tipos de electrodos

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

En la figura 25 se detalla los diferentes tipos de electrodos mejoradores del suelo siendo la más óptima la de marca FM plus, ya que presenta menor resistencia que las demás y por ende conduce más rápido una descarga de cortocircuito a tierra.

Tabla 18: Porcentaje de reducción de la resistividad con el Electrodo Fm plus

| Electrodo | % de reducción de resistividad |
|-----------|--------------------------------|
| Fm plus | 50 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Resultados: a continuación se presenta los resultados de ambos tratamientos sumados y restados para el valor de la resistividad inicial, dando así el valor total de la resistividad utilizada para realizar los respectivos cálculos.

Tabla 19: Resultado final de reducción de resistividad con tratamientos

| Descripción | Cantidad | Resistividad inicial | Resistividad final |
|---|----------|----------------------|--------------------|
| Gel mejorador de suelo | 1 | 2166.13 | 108.30 |
| Electrodo activos | 2 | 2166.13 | 2088.58 |
| (Suma de Resistividad final de ambos tratamientos) – resistividad inicial | | | 2166.13 |
| Resistividad estimada en el terreno aplicando los tratamientos | | | 30.75 Ω *m |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

12.7. Cálculo de la resistencia de la malla (R_g) con el suelo tratado

➤ Resistencia de la malla cuadrada tratada químicamente

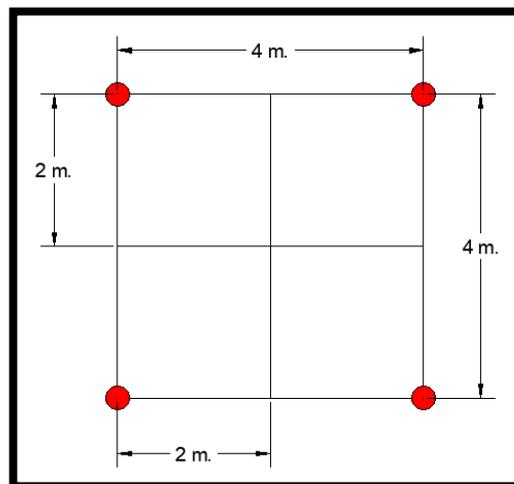


Figura 26: Malla cuadrada mejorada

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Memoria de cálculos:

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

$$Rg = 30.75 * \left[\frac{1}{31.2} + \frac{1}{\sqrt{20 * 16}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{20/16}} \right) \right]$$

$$Rg = 3.80 \Omega$$

- **Comparación de resultados**

Tabla 20: Tabla comparativa de resistencias entre mallas cuadradas

| Terreno | Resistencia de la malla |
|-------------|-------------------------|
| Sin mejorar | 268,19 Ω |
| Mejorado | 3.80 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

➤ **Resistencia de la malla rectangular tratada químicamente**

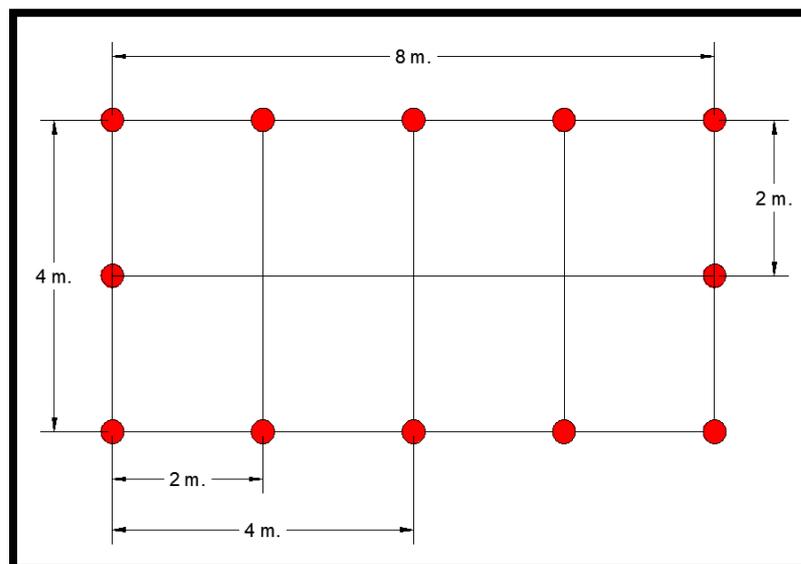


Figura 27: Malla rectangular con varillas

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Memoria de cálculos:

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

$$Rg = 30.75 * \left[\frac{1}{65,5} + \frac{1}{\sqrt{20 * 32}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50 \sqrt{20/32}} \right) \right]$$

$$Rg = 2.5 \Omega$$

- **Comparación de resultados**

Tabla 21: Tabla comparativa de resistencias entre mallas rectangulares

| Terreno | Resistencia de la malla |
|-------------|-------------------------|
| Sin mejorar | 180 Ω |
| Mejorado | 2.5 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

➤ **Resistencia de la Malla en tipo “L” tratada químicamente**

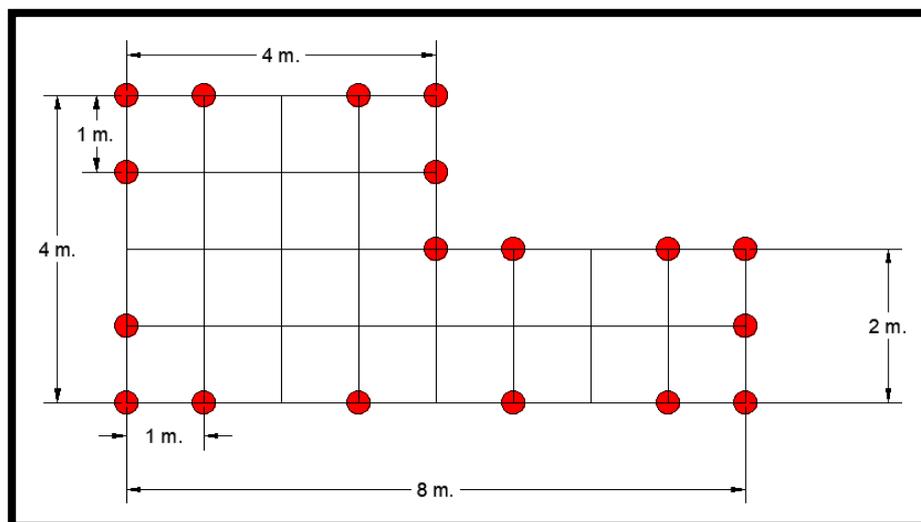


Figura 28: Malla en tipo “L”

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Memoria de cálculos:

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

$$Rg = 30.75 * \left[\frac{1}{92} + \frac{1}{20 * 24} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.50\sqrt{20/24}} \right) \right]$$

$$Rg = 2.70 \Omega$$

- **Comparación de resultados**

Tabla 22: Tabla comparativa de resistencias entre mallas tipo “L”

| Terreno | Resistencia de la malla |
|-------------|-------------------------|
| Sin mejorar | 190,29 Ω |
| Mejorado | 2.70 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

- **Resumen de resistencias obtenidas con el suelo mejorado**

A continuación presentamos la tabla de resultados de las resistencias con los diferentes tipos de mallas, después de haber tratado el terreno químicamente.

Tabla 23: Resistencias obtenidas con tratamiento del suelo

| Diseño de malla | Resistencia obtenida |
|-------------------|----------------------|
| Malla cuadrada | 3.80 Ω |
| Malla rectangular | 2.5 Ω |
| Malla en tipo “L” | 2.70 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

- **Resumen de valores de resistencias**

En la siguiente tabla se observan los valores de resistencia iniciales y los valores de resistencias finales con el terreno tratado químicamente.

Tabla 24: Comparación de resultados entre resistencias iniciales y finales

| Tipo de malla | Resistencia inicial (Ω) | Resistencia final (Ω) |
|----------------------|--|--|
| Cuadrada | 268,19 | 3.80 |
| Rectangular | 180,0 | 2.5 |
| En "L" | 190,29 | 2.70 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

12.7. Presupuesto de las mallas de puesta a tierra sin el suelo mejorado

La siguiente tabla corresponde al presupuesto de la malla cuadrada sin tratamiento del suelo; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 25: Costos de la malla cuadrada

| Materiales | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|----------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Conductor AWG 2/0 | 31,2 metros | \$ 5,70 | \$ 177,84 |
| Varillas copperweld | 4 | \$ 7,50 | \$ 30 |
| Soldadura exotérmica | 9 paquetes | \$ 12 | \$ 108 |
| Mano de obra | \$ 900* | | \$ 900 |
| Total | | | \$ 1215.84 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

La siguiente tabla corresponde al presupuesto de la malla rectangular sin tratamiento del suelo; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 26: Costos de la malla rectangular

| Materiales | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|----------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Conductor AWG 2/0 | 65,6 metros | \$ 5,70 | \$ 373.92 |
| Varillas copperweld | 12 | \$ 7,50 | \$ 90 |
| Soldadura exotérmica | 15 paquetes | \$ 12 | \$ 180 |
| Mano de obra | \$ 900* | | \$ 900 |
| Total | | | \$ 1543.92 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

La siguiente tabla corresponde al presupuesto de la malla en “L” sin tratamiento del suelo; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 27: Costos de la malla en “L”

| Materiales | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|----------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Conductor AWG 2/0 | 60 metros | \$ 5,70 | \$ 342 |
| Varillas copperweld | 18 | \$ 7,50 | \$ 135 |
| Soldadura exotérmica | 37 paquetes | \$ 12 | \$ 444 |
| Mano de obra | \$ 900* | | \$ 900 |
| Total | | | \$ 1821 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

*Precio referencial

A continuación realizamos la tabla comparativa de costo-beneficio sin mejorar el suelo

Tabla 28: Comparación de resultados de costos Vs. Resistencia

| Malla | Costo | Resistencia de la malla |
|--------------|--------------|--------------------------------|
| Cuadrada | \$ 1215.84 | 268,19 Ω |
| Rectangular | \$ 1543.92 | 180 Ω |
| En “L” | \$ 1821 | 190,29 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

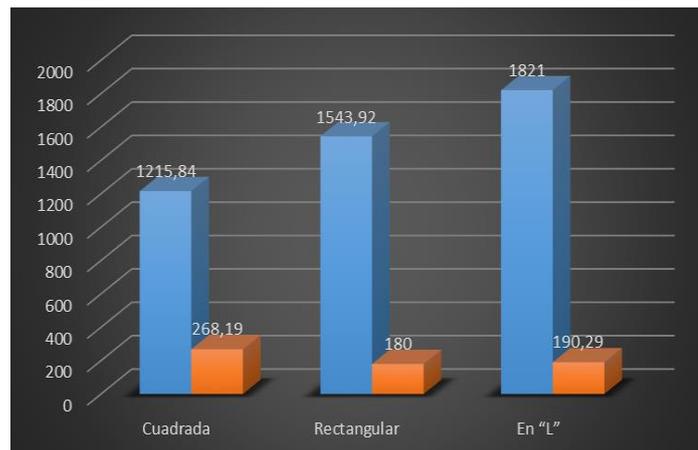


Figura 29: Comparación de resultados de costos Vs. Resistencia

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

12.8. Presupuesto de las mallas de puesta a tierra con el suelo mejorado

La siguiente tabla corresponde al presupuesto de la malla cuadrada con tratamiento del suelo; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 29: Costos de la malla cuadrada

| Materiales | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| Conductor AWG 2/0 | 31,2 metros | \$ 5,70 | \$ 177,84 |
| Electrodo plus | 2 | \$ 350 | \$ 700 |
| Varillas copperweld | 4 | \$ 7,50 | \$ 30 |
| Gel mejorador de suelo | 10 sacos | \$47,50 | \$ 475 |
| Soldadura exotérmica | 9 paquetes | \$ 12 | \$ 108 |
| Fm agregado plus | 2 galones | \$17,50 | \$ 35 |
| Fm minerales | 10 sacos | \$ 45,50 | \$ 455 |
| Mano de obra | \$ 900* | | \$ 900 |
| Total | | | \$ 2880,84 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

La siguiente tabla corresponde al presupuesto de la malla rectangular con tratamiento del suelo; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 30: Costos de la malla rectangular

| Materiales | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Conductor AWG 2/0 | 65,6 metros | \$ 5,70 | \$ 373.92 |
| Electrodo plus | 2 | \$ 350 | \$ 700 |
| Varillas copperweld | 12 | \$ 7,50 | \$ 90 |
| Gel mejorador de suelo | 20 sacos | \$47,50 | \$ 950 |
| Soldadura exotérmica | 15 paquetes | \$ 12 | \$ 180 |
| Fm agregado plus | 4 galones | \$17,50 | \$ 70 |
| Fm minerales | 20 sacos | \$ 45,50 | \$ 910 |
| Mano de obra | \$ 900* | | \$ 900 |
| Total | | | \$ 4173,92 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

La siguiente tabla corresponde al presupuesto de la malla en “L” con tratamiento del suelo; los resultados se muestran a continuación:

Tabla 31: Costos de la malla en “L”

| Materiales | Cantidad | Precio unitario | Precio total |
|------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Conductor AWG 2/0 | 60 metros | \$ 5,70 | \$ 373.92 |
| Electrodo plus | 2 | \$ 350 | \$ 700 |
| Varillas copperweld | 18 | \$ 7,50 | \$ 90 |
| Gel mejorador de suelo | 20 sacos | \$47,50 | \$ 950 |
| Soldadura exotérmica | 37 paquetes | \$ 12 | \$ 180 |
| Fm agregado plus | 4 galones | \$17,50 | \$ 70 |
| Fm minerales | 20 sacos | \$ 45,50 | \$ 910 |
| Mano de obra | \$ 900* | | \$ 900 |
| Total | | | \$ 4451 |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

* Precio referencial

A continuación realizamos la tabla comparativa de costo-beneficio

Tabla 32: Comparación de resultados entre costos y resistencias mejoradas

| Malla | Costo | Resistencia de la malla |
|-------------|------------|-------------------------|
| Cuadrada | \$ 2880,84 | 3.73 Ω |
| Rectangular | \$ 4173,92 | 2.5 Ω |
| En "L" | \$ 4451 | 2.64 Ω |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

**Figura 30:** Barras de comparación de resultados entre costos y resistencia mejoradas

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

12.9. Dimensionamiento de la malla

Para determinar el conductor de malla debemos primero realizar el cálculo de cortocircuito del transformador principal, para ello se presenta la tabla con las características del transformador general utilizado para los laboratorios de Alto Voltaje, cabe destacar que el transformador de 300 kVA está sobredimensionado para los laboratorios; ya que antes de construirse los laboratorios se iba a construir un edificio de 15 pisos en el mismo lugar.



Figura 31: Transformador general de 300 kVA.

Fuente: Coordinadores del proyecto

Tabla 33: Características del transformador general

| Características | |
|-----------------------------|---------|
| Potencia | 300 kVA |
| Voltaje del lado primario | 13.8 kV |
| Voltaje del lado secundario | 220V |
| Impedancia de cortocircuito | 3,5 % |

Fuente: Coordinadores del proyecto

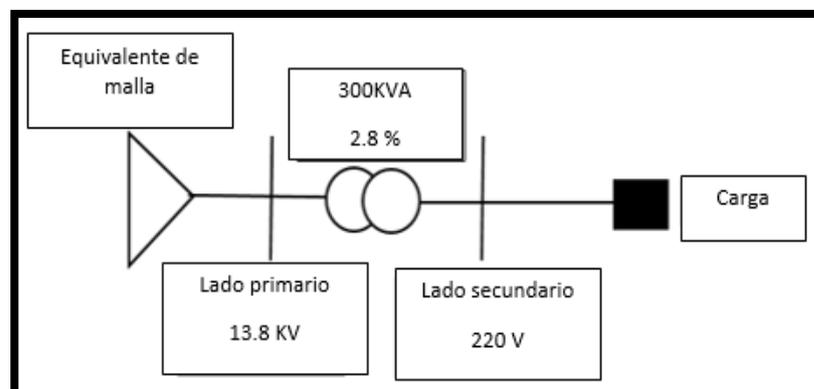


Figura 32: Diagrama del transformador general

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

Simulación en el software ETAP

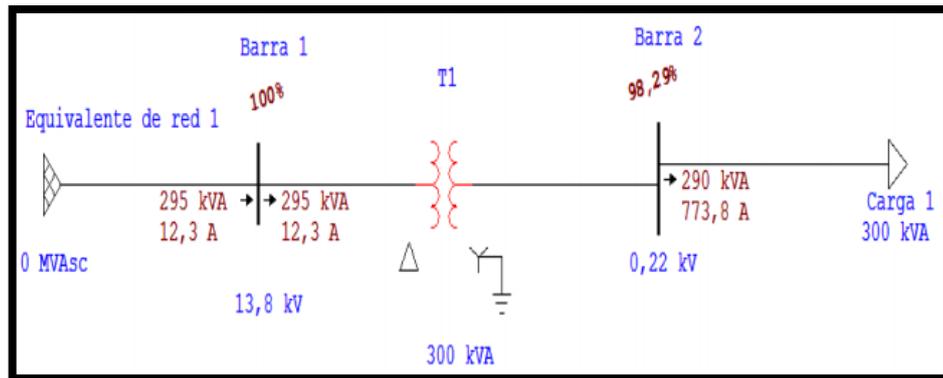


Figura 33: Diagrama del transformador general en el programa Etap
Elaborado por: Coordinadores del proyecto

- **Corriente de la corriente de cortocircuito a circular por la malla:**

$$I_{fL-N} = \frac{300 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 0.22 \text{ kV}} = 787.29 \text{ (A)}$$

$$Z = 3,5 \% \approx 0.035$$

$$I_g = I_{fL-N} * Z$$

$$I_g = 27.55 \text{ (A)}$$

- **Selección del tamaño del conductor**

El tiempo de duración de la falla t , se fijará en 1 segundo. La malla de tierra se realizará utilizando suelda exotérmica, por lo cual el valor de conductividad del conductor es del 97% y K_f es 7.06 según la tabla 3.

$$A_{MCM} = I_g * K_F * \sqrt{t}$$

$$A_{MCM} = 27.56 \text{ (A)} * 7.06 * \sqrt{1\text{seg.}}$$

$$A_{MCM} = 194.503 \text{ MCM}$$

El conductor obtenido según la tabla número 4 es el conductor # 4/0 AWG, pero se acostumbra a emplear como calibre mínimo el conductor de cobre # 2/0 AWG debido a requerimientos de esfuerzo mecánico, la norma IEEE dice que el conductor mínimo a usarse en este sistema de protección a tierra debe ser con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla para soportar la corrosión.

- **Criterio de voltajes de paso y toque tolerables por una persona**

Las tensiones de límites peligrosas definidas por la IEEE Std 80-2000 se dan para distintos pesos (50 y 70 Kg) de la persona sometida a peligro, aplicándose distintas fórmulas. Para el diseño de la malla de tierra se considera un promedio de personas de 70 Kg.

$$Cs = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09}$$

$$Cs = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{30.75 \Omega.m}{2000 \Omega.m}\right)}{2 * 0.1m + 0.09}$$

$$Cs = 0.69$$

$$E_{paso_{70kg}} = (1000 + 6 * Cs * \rho_s) * \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{paso_{70kg}} = (1000 + 6 * 0.69 * 2000 \Omega.m) * \frac{0.157}{\sqrt{1 \text{ seg.}}}$$

$$E_{paso_{70kg}} = 1456.96 \text{ V}$$

$$E_{toque_{70kg}} = (1000 + 1.5 * Cs * \rho_s) * \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{toque_{70kg}} = (1000 + 1.5 * 0.69 * 2000 \Omega.m) * \frac{0.157}{\sqrt{1 \text{ seg.}}}$$

$$E_{toque_{70kg}} = 481.99 \text{ V}$$

- **Cálculo del máximo potencial de tierra**

$$GRP = I_g * R_g$$

$$GRP = 27.56 \text{ (A)} * 2.5 \Omega$$

$$GRP = 68.88 \text{ V}$$

Ahora procedemos a calcular los valores de tensión de malla y de paso en caso de falla.

- Voltaje de malla y de paso en caso de falla.

$$L_M = L_c + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right) L_R$$

$$L_M = 44 + \left(1.55 + 1.22 \left(\frac{1,80}{\sqrt{8^2 + 4^2}} \right) \right) 21,60$$

$$L_M = 82.78 \text{ m}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{1}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0,5}{1}}$$

$$K_h = 1.225$$

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

$$n_a = \frac{2 \cdot 44}{24}$$

$$n_a = 3.67 \text{ m}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{24}{4 \cdot \sqrt{32}}}$$

$$n_b = 1.03 \text{ m}$$

$$n = n_a \cdot n_b$$

$$n = 3.67 \text{ m} \cdot 1.03 \text{ m}$$

$$n = 3.78 \text{ m}$$

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2^2}{16 \cdot 0.5 \cdot 0.0093} + \frac{(2 + 2 \cdot 0.5)^2}{8 \cdot 2 \cdot 0.0093} - \frac{0.5}{4 \cdot 0.0093} \right) + \frac{1}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot 3.78 - 1)} \right) \right]$$

$$K_m = 0.611$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 n$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 (3.78)$$

$$K_i = 1.20$$

$$Em = \frac{\rho * Km * Ki * Ig}{L_M}$$

$$Em = \frac{30.75 \Omega m * 0.611 * 1.20 * 27.56 (A)}{82.78 m}$$

$$Em = 7.61 V$$

Tabla 34: Tabla de resultados entre Em y Etoque

| | |
|------------------------------|----------|
| Em | 7.61 V |
| Etoque_{70kg} | 481.99 V |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

Cómo el Em < E toque pasaremos a calcular el voltaje de paso.

$$L_s = 0.75 * L_c + 0.85 * L_R$$

$$L_s = 0.75 * 44 m. + 0.85 * 21.60 m.$$

$$L_s = 51.36 m.$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.50} + \frac{1}{2 + 0.50} + \frac{1}{2} (1 - 0.5^{3.78-2}) \right]$$

$$K_s = 0.64$$

$$E_p = \frac{\rho * I_g * K_s * K_i}{L_s}$$

$$E_p = \frac{30.75 \Omega m * 27.56 A * 0.64 * 1.20}{51.36 m.}$$

$$E_p = 12.67 V$$

Tabla 35: Tabla de resultados entre Ep y Epaso

| | |
|-----------------------------|---------|
| Ep | 12.67 V |
| Epaso_{70kg} | 1456 V |

Elaborado por: Coordinadores del proyecto.

En caso de no satisfacer las condiciones de paso y contacto establecidas, se debe realizar un replanteo del diseño de malla de tierra que incluye:

- Aumentar la cantidad de conductor horizontal, reduciendo las dimensiones de la retícula.
- Agregar jabalinas sobre la superficie cubierta por la malla.
- Aumentar el área cubierta por la malla.
- Aumentar el espesor de la capa de piedra partida a efectos de aumentar el voltaje de paso y contacto admisibles.

12.10. Validación de la hipótesis

Cómo el E_p (12.6 V) es inferior al E paso máximo que puede existir en la malla sin causar daño a la persona (1456 V), el diseño de la malla es correcto siendo factible y seguro. En función de esas dos premisas nosotros podemos garantizar que la persona no va a tener ningún problema al momento de ocurrir una descarga hacia la malla de tierra en el laboratorio de alto voltaje.

El circuito equivalente indica que la corriente en el cuerpo humano está por debajo del umbral de percepción y no causa peligro, entonces se puede concluir que en este caso la conexión de la puesta a tierra es segura.

12.12. Cálculo de los interruptores termo magnéticos del tablero principal

Laboratorio L1- L5

$$P_c = I_c * \sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset$$

$$P_c = 75 A * \sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9$$

$$P_c = 28575 W$$

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset}$$

$$I_c = \frac{28575 W}{\sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9}$$

$$I_c = 75 Amp.$$

Laboratorio L6

$$P_c = I_c * \sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset$$

$$P_c = 125 A * \sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9$$

$$P_c = 47625 W.$$

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset}$$

$$I_c = \frac{47625 W}{\sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9}$$

$$I_c = 125 Amp.$$

Reservas

$$P_c = I_c * \sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset$$

$$P_c = 50 A * \sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9$$

$$P_c = 19050 W$$

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset}$$

$$I_c = \frac{19050 W}{\sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9}$$

$$I_c = 50 Amp.$$

Corriente del tablero principal

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset}$$

$$I_c = \frac{(5 * 28575) + (47625) + (2 * 19050)}{\sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9}$$

$$I_c = 500 Amp.$$

- **Cálculo para el circuito de Iluminación y fuerza**

Circuitos Iluminación y fuerza

$$P_c = I_c * V_f - n * \cos \emptyset$$

$$P_c = 32 A * 110 V * \cos 0.9$$

$$P_c = 3520W$$

$$I_c = \frac{P_c}{V_f * \cos \emptyset}$$

$$I_c = \frac{3520W}{110 V * \cos 0.9}$$

$$I_c = 32 Amp.$$

Circuitos trifásicos para tomas especiales y reserva

$$P_c = I_c * \sqrt{3} * V_f * \cos \emptyset$$

$$P_c = 50 A * \sqrt{3} * 220 V * \cos 0.9$$

$$P_c = 19050 W$$

$$I_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} * V_f * \cos \phi}$$

$$I_c = \frac{19050 \text{ W}}{\sqrt{3} * 220 \text{ V} * \cos 0.9}$$

$$I_c = 50 \text{ Amp.}$$

- Simulación en el software ETAP

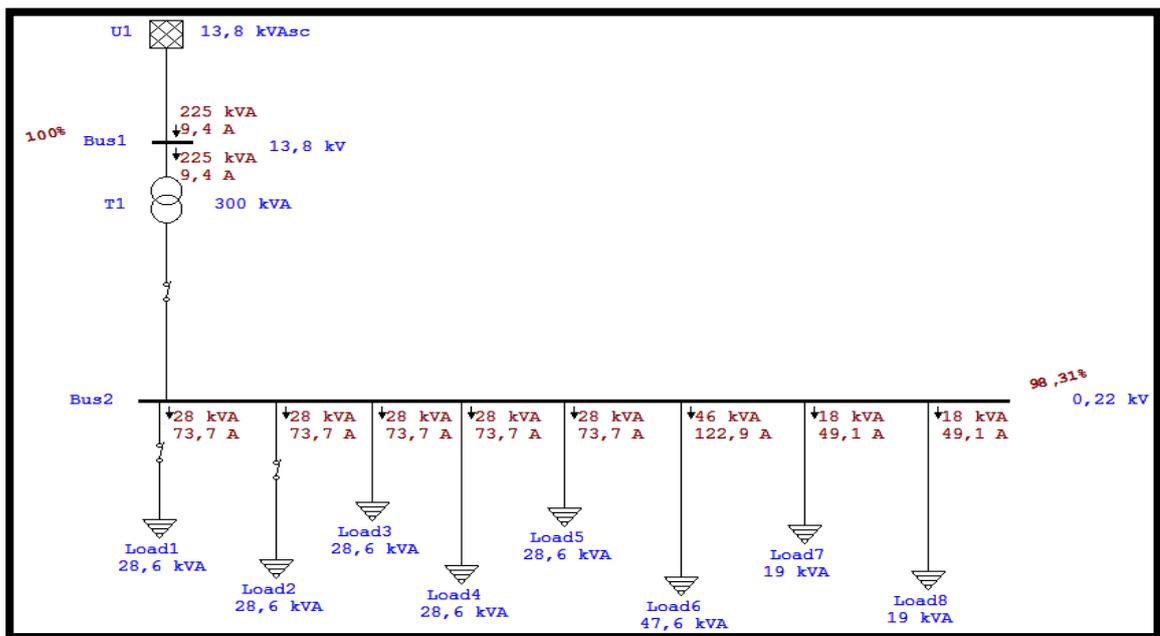


Figura 34: Simulación del tablero principal en Etap

Elaborado por: Coordinadores del proyecto

12. PRESUPUESTO referencial PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En base a los precios establecidos en el mercado, se pudo hacer una lista con los materiales utilizados para la construcción de las mallas de puesta a tierra en los laboratorios de la Universidad, en el cual se detallan los precios de cada uno que se muestran en la tabla 38.

Tabla 36: Presupuesto para la construcción del SPT

| Descripción | Cantidad | Unidades | Valor unidad (dólares) | Valor total (dólares) |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| conductor de cobre desnudo 2/0 AWG | 100 | metros | 5,7 | 570 |
| Gel mejorador de suelo de 25 Lb c/u | 30 | sacos | 47,5 | 1425 |
| Soldadura Exotérmica | 30 | paquetes | 12 | 360 |
| Varilla Copperweld (5/8" x 1,80) | 10 | c/u | 7,5 | 75 |
| FM Agregado Plus (1 Gl) | 6 | galones | 17,5 | 105 |
| FM Electrodo plus (6") | 4 | c/u | 350 | 1400 |
| Mano de obra | - | - | 900 | 900 |
| | | | Subtotal | \$ 4835 |
| | | | Tarifa 12% | \$ 580.20 |
| | | | Total | \$ 5415.20 |

Fuente: Coordinadores del proyecto

13. CONCLUSIONES

- La resistencia a tierra de una red de electrodos depende, fundamentalmente, de tres factores: la resistencia de los propios electrodos, la resistencia de contacto de los electrodos con el terreno y la resistividad del terreno, siendo esta última la que presenta el mayor valor de los tres.
- Con la aplicación de las correspondientes dosificaciones de gel al terreno para disminuir su resistividad, a lo largo de este estudio y mediante la práctica constructiva, se comprobó que influye de manera notable y positiva en los resultados finales ya que se obtiene una disminución de casi 85% de la resistencia de puesta a tierra final, con respecto al mismo caso pero con el terreno no tratado químicamente.
- Las mediciones de resistencia del suelo registradas con el telurómetro a una profundidad de 20 cm. fue de 111 Ω a una separación de 4 metros, pero luego de ser tratado químicamente con el uso de gel, aditivos y electrodos se bajó la resistencia a 2.5 Ω , que es un valor por debajo de los 5 Ω requerido por la norma IEEE.
- El diseño final de la malla de P.T. a instalarse fue la malla rectangular, ya que presenta una menor resistencia y por ende disipa más rápido las descargas de cortocircuito a tierra.
- La corriente de cortocircuito a disiparse por la malla fue de 27.55 (A), para lo cual se utilizó el conductor # 2/0 AWG que soporta las tensiones mecánicas y previene la corrosión.

14. RECOMENDACIONES

- Es recomendable no utilizar uniones o empalmes a la hora de unir los conductores, ya que éstos con el paso del tiempo se desgastan y debilitan la vida útil de la malla de puesta a tierra.
- La capa superficial del terreno debe ser preparada con materiales aislantes, con la finalidad de evitar que el voltaje de paso afecte a las personas.
- Todos los componentes que se encuentren dentro del laboratorio de alto voltaje como son: puertas metálicas, mallas, motores, tableros, módulos, entre otros; deberán estar conectados a tierra con el propósito de asegurar el correcto funcionamiento y protegerlos en caso de alguna descarga o cortocircuito.
- Instalar cajas de revisión en cada varilla o electrodo de puesta a tierra; para realizar las respectivas revisiones periódicas a fin de verificar su estado y humedad del terreno, asegurándose que tenga el valor correcto de resistencia para el cual fue diseñado.
- Comprobar que las sales minerales o químicos a utilizarse para el mejoramiento del terreno sean inofensivos para el medio ambiente y no sean corrosivos con los componentes que conforman el sistema de puesta a tierra.

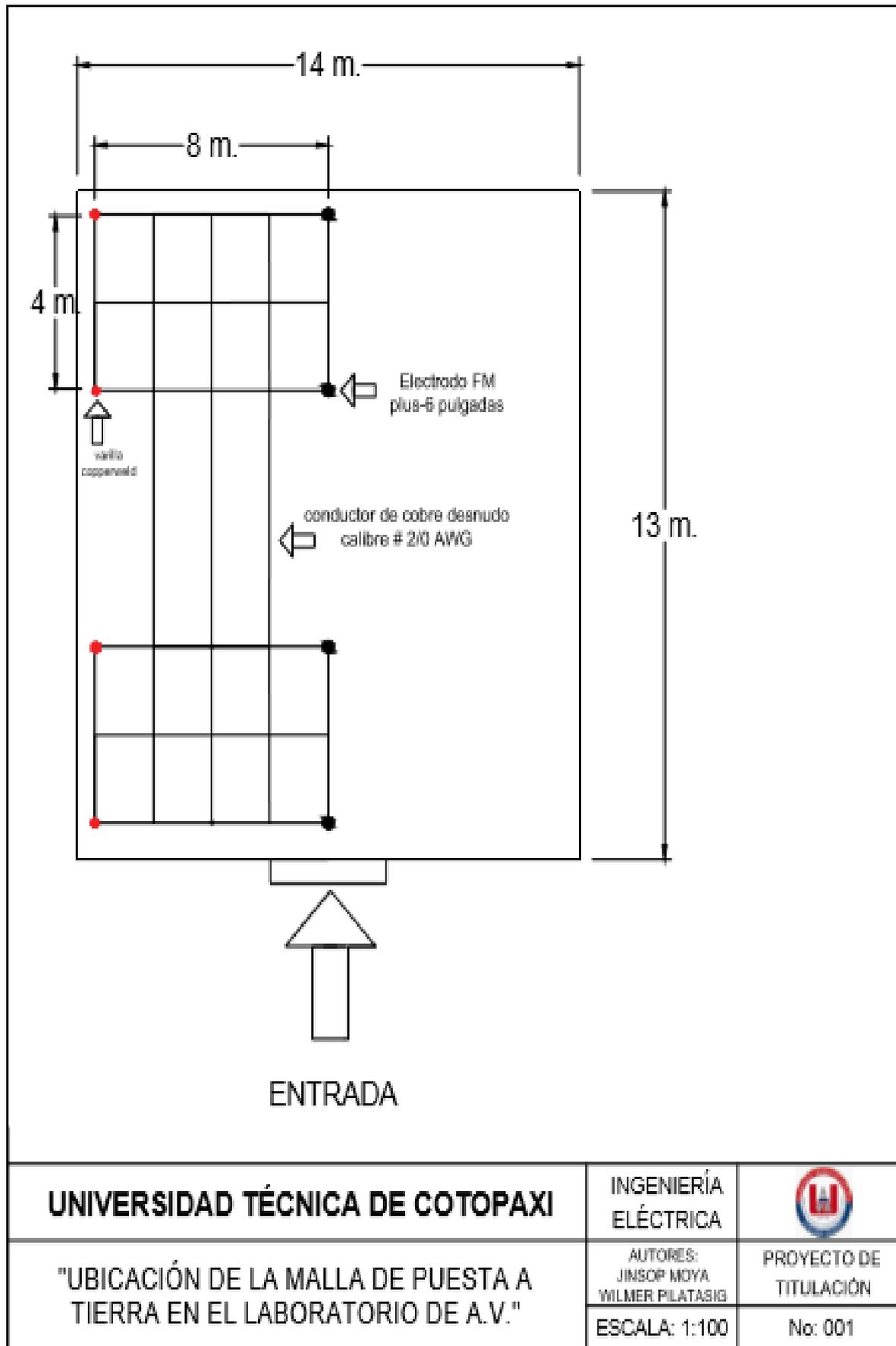
15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

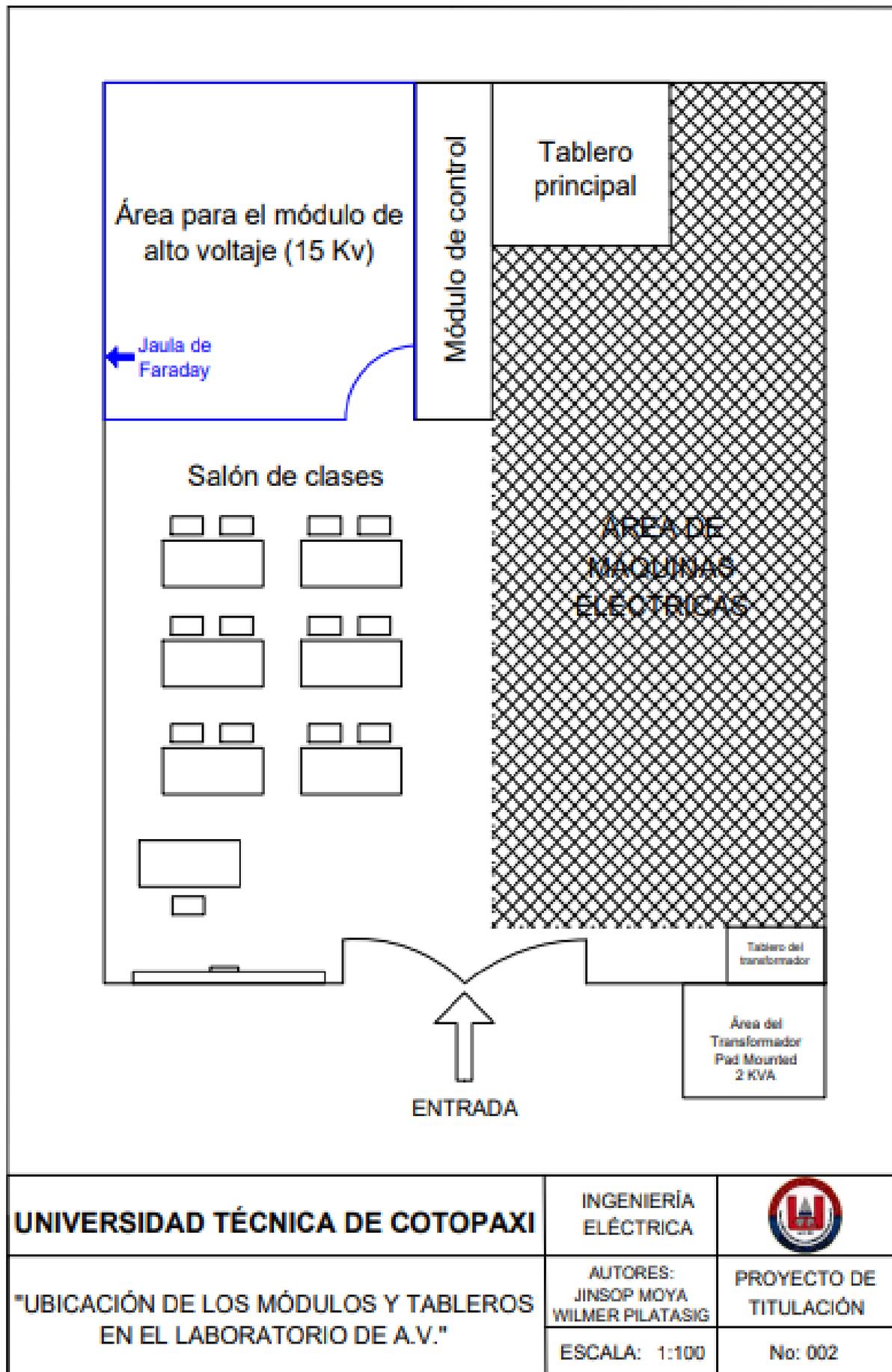
- [1] García Márquez, R. (2009). La Puesta a Tierra de Instalaciones Eléctricas. México: Alfaomega.
- [2] Morales Osorio, N. (10 de 2011). Sistemas de puesta a tierra. (Universidad de Chile)
- [3] Antonio Eduardo, Cano P. (2010). SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA diseñados con la IEEE 80 Manizales –Colombia
- [4] «Google Earth,» Disponible: <https://earth.google.es/>. [Último acceso: 02 agosto 2018].
- [5] Rojas Gregory, (2011) Manual de Puestas a Tierra.
- [6] OJEDA, Nerio, Sistemas de puesta a tierra. Guía curso de extensión de conocimientos. Caracas 2000, p. 16. ISBN 934-83-430-48292
- [7] E. Flores, «Diseño de mallas de puestas a tierra bajo la norma IEEE 80/2000, Utilizando herramientas informáticas en plataformas para sistemas operativos móviles,» *Revista Tecnológica ESPE* , pp. 1-11, 2015.
- [8] DIAZ, Pablo. Soluciones Prácticas para la Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos de Distribución. McGraw-Hill, 2001. P 297 -310
- [9] ENRÍQUEZ Harper, La Calidad de la Energía en los Sistemas Eléctricos. Editorial Limusa. 2012, p.185. ISBN: 978-968-18-6736-2
- [10] IEC 60479- Efectos de la circulación de corriente en el cuerpo humano
- [11] ROJAS Gregor, Manual de Sistemas de Puestas a Tierra, 2007, disponible en: http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf
- [12] A. C. -. C. M., «CÁLCULO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA,» Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/694/1/te326.pdf>.
- [13] Disponible en:
http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/IEI/IEI05/es_IEA_IEI05_Contenidos/website_911_mtodo_de_wenner.html
- [14] «Olx ecuador,» Fabrice Grinda, Marzo 2006. Disponible: <https://www.olx.com.ec/>. [Último acceso: 23 Octubre 2018].
- [15] RAMÍREZ JOSÉ Samuel, Sistemas de puesta a tierra diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF, Primera Edición, Editorial Blanecolor Ltda., Colombia, Marzo 2010
- [16] HARPER ENRIQUEZ, Gilberto, Manual del Técnico en Subestaciones Eléctricas, Industrias y Comerciales, Primera Edición, Editorial Limusa, México, 2008.

- [17] IEEE, «Puesta a tierra en instalaciones de alta tensión,» *IEEE*, Vols. %1 de %2Norma IEEE - 80/2000, nº 5, pp. 1-31, 2016.
- [18] J. M. Concha, «Interconexión de Mallas de Tierra,» SCRIBD, 24 Noviembre 2013. Disponible: <https://es.scribd.com/document/283839253/Interconexión-de-Mallas-de-Tierra>.
- [19] [En línea]. Disponible: <http://www.fmelectrodo.com>
- [20] D. I. M. Vignolo, «Mallas de Tierra en Alta Tensión,» 23 octubre 2011. Disponible: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/63872/mod_resource/content/1/Apuntes_Malla_de_tierra_2011.pdf.

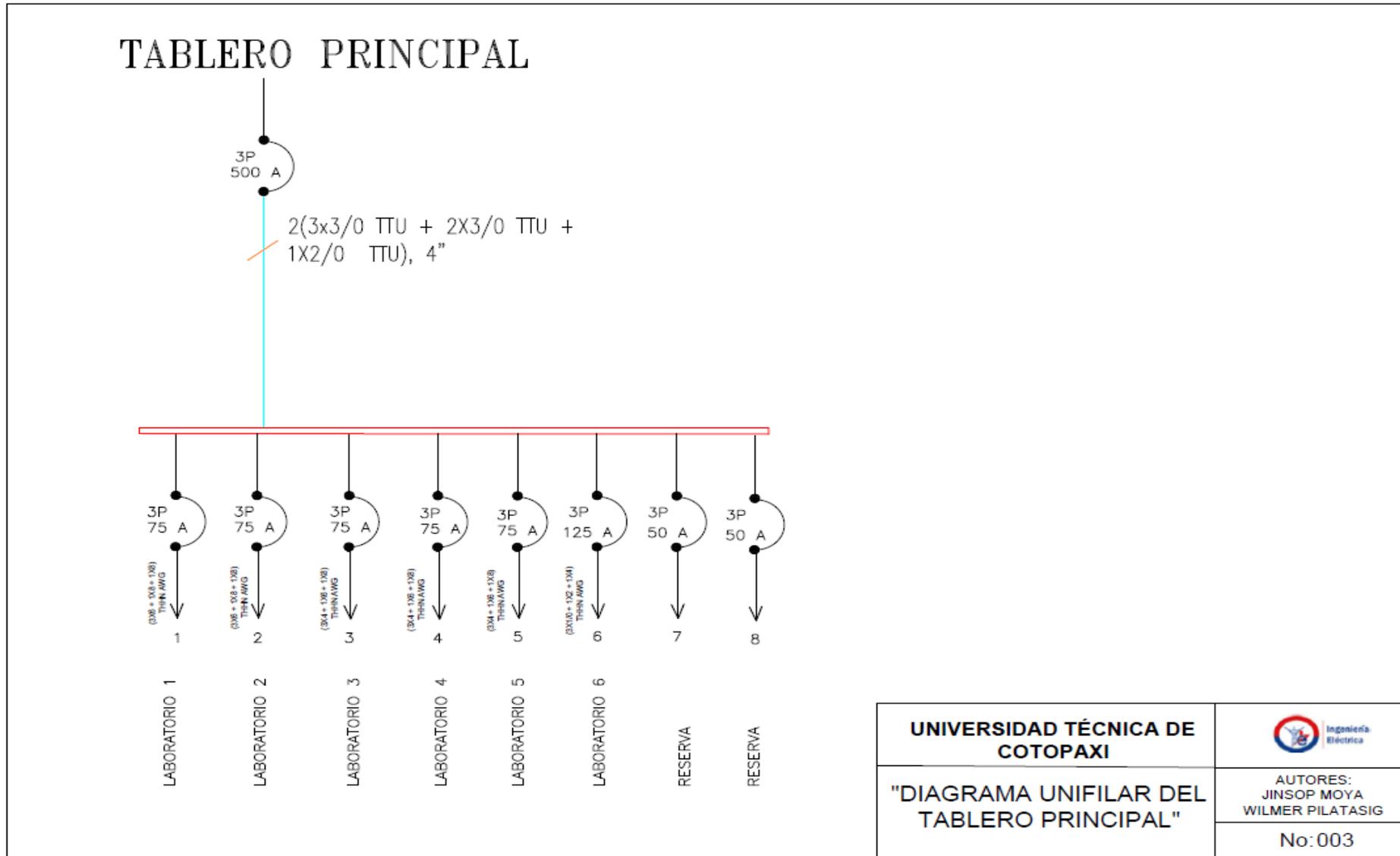
ANEXOS

Anexo 1: Ubicación de la malla y los módulos en el laboratorio de A.V.

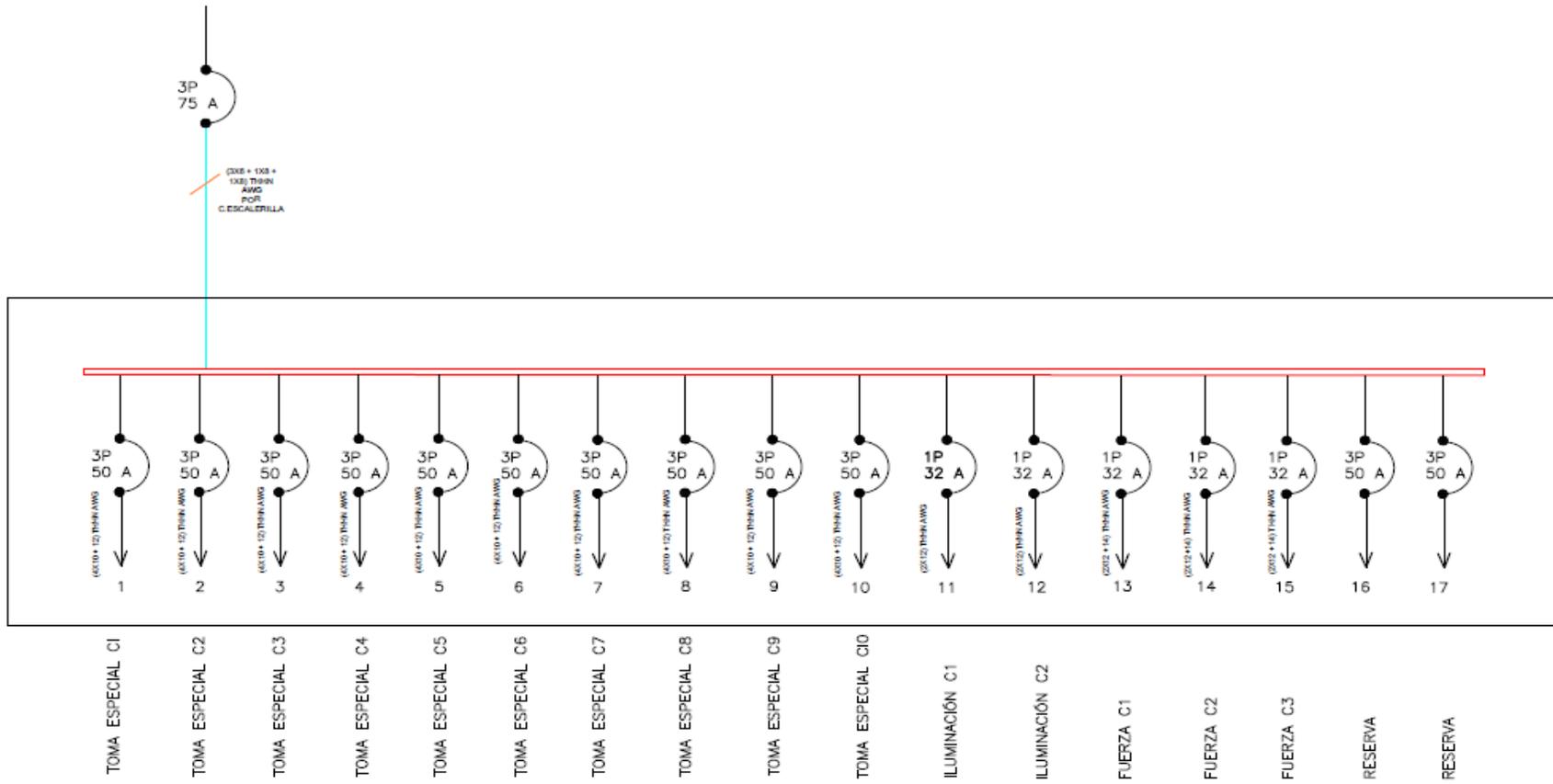




Anexo 2: Diagrama unifilar del tablero principal y de los subtableros secundarios

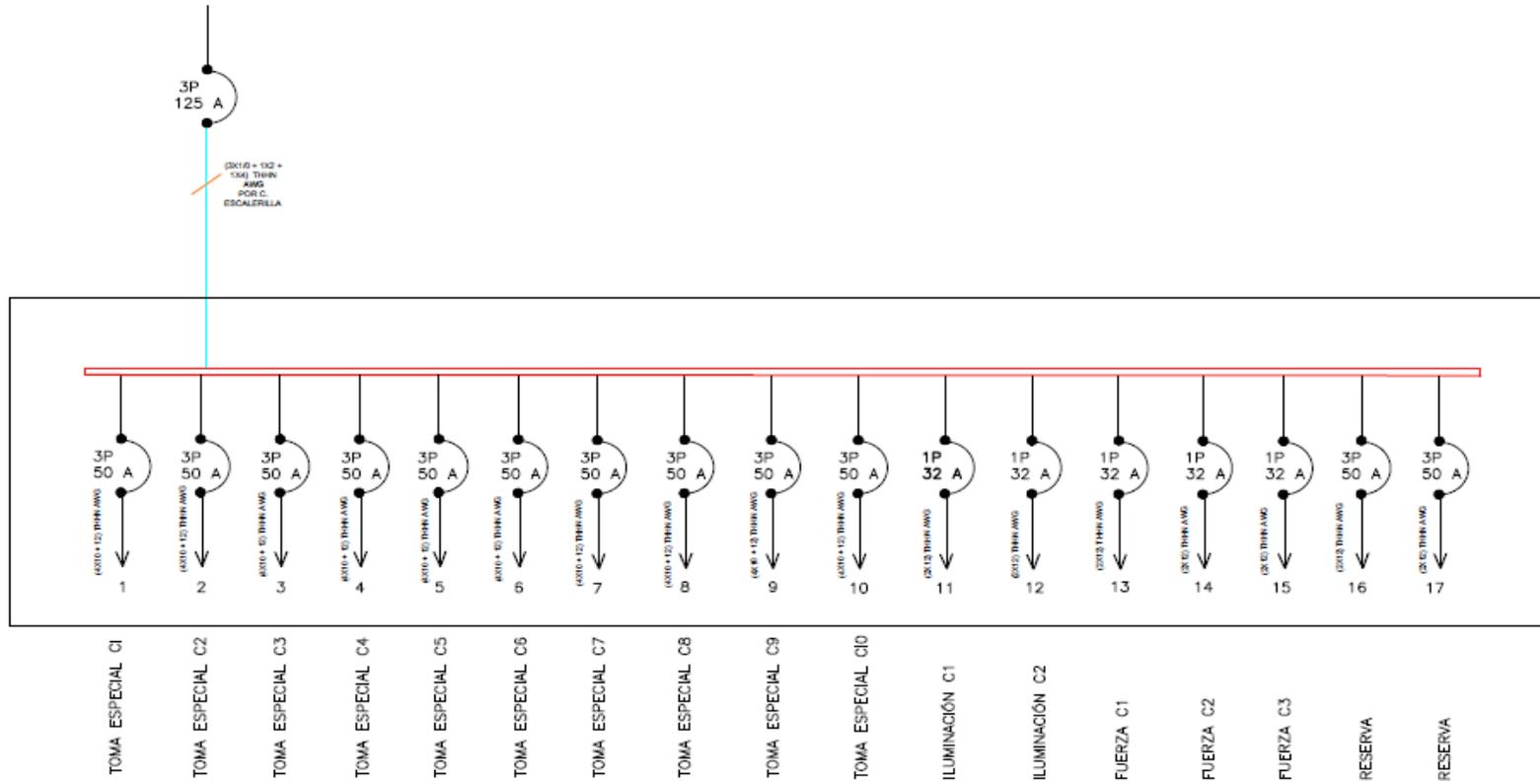


SUBTABLEROS L1-L2-L3-L4-L5



| | |
|---|---|
| <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</p> |  <p>Ingeniería Eléctrica</p> |
| <p>"DIAGRAMA UNIFILAR DE LOS SUB-TABLEROS L1-L2-L3-L4-L5"</p> | <p>AUTORES: JINSOP MOYA WILMER PILATASIG</p> <p>No: 004</p> |

SUBTABLEROS L6



| | |
|--|---|
| <p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</p> |  |
| <p>"DIAGRAMA UNIFILAR DEL SUB-TABLERO L6"</p> | |
| <p>AUTORES: JINSOP MOYA WILMER PILATASIG</p> | |
| <p>No: 005</p> | |

Anexo 3: Imágenes de las diferentes actividades realizadas

Materiales para realizar la medición de la resistencia en el terreno del laboratorio



Área del mallado de puesta a tierra para el laboratorio de A.V.



Clavado de varillas en el terreno a ser medido por el teluometro



Medición de la distancia de las cajas de revisión



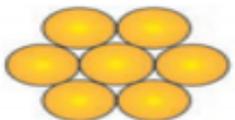
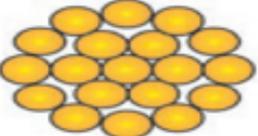
Medición de la resistencia en el terreno mejorado con químicos



Lectura de las mediciones en el terreno mejorado químicamente



Anexo 4: Características de los conductores de cobre desnudo de la empresa Centelsa

| Conductores de Cobre Desnudo | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|----------------|-------|------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------|----------------------------|---------------------------------|-----------|------------------------|-------------|
| Cableado | Calibre | Diámetros (mm) | | | Peso Total Aprox. (kg/km) | Cobre Duro (4) | | | Cobre Suave (4) | | | Capacidad de Corriente | |
| | | Hilos | Cable | RMG | | Carga de Rotura kg-f | Resistencia Eléctrica (Ohm/ km) | | Carga de Rotura(1) kg-f | Resistencia Eléctrica (Ohm/ km) | | (2) A | CC(3) kA |
| | | | | | | | DC a 20°C | AC a 75°C | | DC a 20°C | AC a 75°C | | |
| Cableado 1 Hilos  | 14 AWG | 1,63 | 1,63 | 0,63 | 18,5 | • | • | • | 42 | 8,29 | 10,08 | 40 | 0,46 |
| | 12 AWG | 2,05 | 2,05 | 0,80 | 29,4 | • | • | • | 67 | 5,21 | 6,34 | 55 | 0,72 |
| | 10 AWG | 2,59 | 2,59 | 1,01 | 46,8 | • | • | • | 106 | 3,28 | 3,99 | 70 | 1,15 |
| Cableado 7 Hilos  | 8 AWG | 1,23 | 3,70 | 1,34 | 75,9 | 353 | 2,19 | 2,64 | 169 | 2,10 | 2,56 | 100 | 1,83 |
| | 6 AWG | 1,56 | 4,67 | 1,69 | 120,6 | 557 | 1,37 | 1,66 | 269 | 1,32 | 1,61 | 130 | 2,9 |
| | 4 AWG | 1,96 | 5,88 | 2,14 | 191,8 | 879 | 0,865 | 1,044 | 427 | 0,831 | 1,011 | 175 | 4,5 |
| | 2 AWG | 2,47 | 7,42 | 2,69 | 305,0 | 1381 | 0,544 | 0,657 | 679 | 0,523 | 0,636 | 235 | 7,2 |
| Cableado 19 Hilos  | 1/0 AWG | 1,89 | 9,47 | 3,59 | 484,9 | 2223 | 0,342 | 0,413 | 1080 | 0,329 | 0,400 | 315 | 11,7 |
| | 2/0 AWG | 2,13 | 10,63 | 4,03 | 611,4 | 2790 | 0,271 | 0,328 | 1362 | 0,261 | 0,317 | 365 | 14,8 |
| | 3/0 AWG | 2,39 | 11,94 | 4,52 | 771,0 | 3492 | 0,215 | 0,260 | 1718 | 0,207 | 0,252 | 420 | 18,6 |
| | 4/0 AWG | 2,68 | 13,40 | 5,08 | 972,2 | 4362 | 0,171 | 0,206 | 2166 | 0,164 | 0,199 | 490 | 23,5 |

Notas

Los datos aquí indicados están sujetos a las tolerancias normales de fabricación y pueden ser modificados sin previo aviso.

(1) La carga de rotura de los conductores de temple suave se indican con carácter informativo.

(2) Capacidad de corriente a temperatura ambiente 25°C, temperatura conductor 75°C, emisión solar 1kW/m², coeficientes de absorción y emisividad 0,5, velocidad del viento 610 mm/seg, a nivel del mar y a 60 Hz.

(3) Corriente de corto circuito como conductor de línea o fase para un (1,0) segundo, a una temperatura inicial 75°C y temperatura final 645°C. Como conductor de puesta a tierra la temperatura inicial es de 25°C; multiplicar el valor de corriente por 1,1
Para cables de cobre duro, ME: el Módulo de Elasticidad (ME) es 11939 kgf/mm² y el Coeficiente de Dilatación Lineal (CDL) es 16,9 x 10 exp(-6) /°C
RMG: Radio Medio Geométrico.
Otras configuraciones, calibres, colores y longitudes no especificados en este catálogo están disponibles bajo pedido.

(4) El RETIE especifica los temples duro y suave para sistemas de puesta a tierra, no incluye el temple Semiduro.