



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO DE SISTEMAS DE ATERRAMIENTO USANDO ACERO
INOXIDABLE COMO ALTERNATIVA AL COBRE”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ARTURO DANIEL LUPERA ALVARIO

PAULO ANDRE COBOS ORDOÑEZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2020

DEDICATORIA

Esta Tesis es dedicada a mi madre Laura Ordoñez quien con su fe y apoyo incondicional supo guiarme por el buen camino, a tener fe y la voluntad de levantarme las veces que sea necesario para lograr todas mis metas, a mi padre Jhonson Cobos por la confianza y el orgullo que tiene por mí, a mi hermana Ariana quien siempre está a mi lado y a toda mi familia que siempre me han brindado su apoyo, a los profesores, compañeros y amigos con quienes he compartido todos los años de esta carrera.

Paulo A. Cobos O.

Esta Tesis se la dedico a mis padres por su constante apoyo y ganas de verme superar; como también a mi abuelo paterno, Arturo Lupera Mariño, por ser mi mentor académico durante gran parte de mi etapa estudiantil y ser pilar importante para mi manera de pensar y habilidad ante problemas de la vida, me disculpo abuelito si no pude graduarme antes de tu partida, este logro va dedicado eternamente a ti.

Arturo D. Lupera A.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van dirigidos a quienes me han guiado por el camino de la vida, quienes me han sabido inculcar los valores que me definen como persona, a mi madre Laurita, por ser el pilar fundamental de mi existo y que siempre busco la forma de ayudarme a cumplir mis metas junto a mi padre Jhonson Cobos y mi hermana Ariana y a toda mi familia. A los profesores con quienes he estrechado una buena amistad y a mis compañeros y amigos con quienes he compartido este logro.

Paulo A. Cobos O.

Mis agradecimientos van dirigidos a quienes han forjado la persona que soy en la actualidad, a mi padre, Walter Arturo Lupera Navarrete, por ser mi inspiración y modelo para seguir; a mi madre, Nora Janet Alvario Gonzales, por ser mi mayor apoyo; al igual que a mis amigos cercanos (Adrián, Andrés, Elvis, Kevin y Pablo) y a mis primos Jamil Ramos Alvario y Anthony Murillo Alvario por su amistad sincera e incondicional durante todos estos años.

Arturo D. Lupera A.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Arturo Daniel Lupera Alvario y Paulo Andre Cobos Ordóñez damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Autor 1

Arturo Daniel Lupera Alvario



Autor 2

Paulo Andre Cobos Ordóñez

EVALUADORES

Ing. Renan Zambrano Ph.D.
PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Jimmy Córdova V. M.Sc.
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El sistema de puesta a tierra, o SPT, es una parte sensible de toda instalación eléctrica, es aquella que da seguridad y protección a las personas y al sistema eléctrico ante fallas de este, a su vez es la parte más expuesta a compuestos corrosivos que atentan contra su funcionalidad. En la actualidad de nuestro país el material usado en instalaciones de puesta a tierra es el cobre en conjunto de varillas copperweld, ambas altamente cotizadas en chatarrerías, impulsando la demanda de estos elementos, por lo que se propone un material alternativo: SPT en acero inoxidable austenítico 304.

Para plasmar esta idea se realizó la equivalencia física y eléctrica de una malla de puesta a tierra de una subestación, fue necesaria la norma IEEE-std 80 para calcular la capacidad de cada material del sistema convencional, para luego encontrar la equivalencia en acero inoxidable y el análisis económico entre ambos sistemas.

Los resultados han sido positivos, demostrando como la composición del acero inoxidable austenítico 304 hace que esta sea altamente resistente a suelos corrosivos, mientras que la resistencia de los sistemas implementados no se diferencia de los que encontraríamos en un sistema convencional de cobre y copperweld.

El acero inoxidable ofrece un servicio continuo más prolongado debido a su larga vida útil y gracias a la baja demanda económica en chatarrerías hacen de este material un reemplazo idóneo al cobre, el costo de adquisición dependerá del tipo de puesta a tierra, sin embargo, está garantizada la durabilidad del material sin mantenimiento; considerando que la resistencia de estos sistemas no aumenta demasiado y en la comparación económica sería más económico gracias al ahorro de mantenimientos y reposiciones de materiales que se tendría al utilizar un sistema convencional.

Palabras Clave: Sistema de Puesta a Tierra, Norma IEEE estándar 80, Acero Inoxidable Austenítico de tipo 304, Corrosión.

ABSTRACT

The grounding system is a sensitive part of any electrical installation, it is the one that gives safety and protection to people and the electrical system in the event of its failures, in turn it is the part most exposed to corrosive compounds that threaten its functionality. At present in our country the material used in grounding installations is pure copper in a set of copperweld rods, both highly valued in scrap yards, driving the demand for these elements, for which an alternative material is proposed: SPT in steel austenitic 304 stainless.

To capture this idea, the physical and electrical equivalence of a substation grounding mesh was carried out, the IEEE-std 80 standard was necessary to calculate the capacity of each material in the conventional system, to then find the equivalence in stainless steel and the economic analysis between both systems.

The results have been positive, demonstrating how the composition of austenitic 304 stainless steel makes it highly resistant to corrosive soils, while the resistance of the implemented systems does not differ from those that we would find in a conventional copper and copperweld system.

Stainless steel offers a longer continuous service due to its long useful life and thanks to the low economic demand in scrap yards make this material an ideal replacement for copper, the acquisition cost will depend on the type of grounding, however, it is guaranteed the durability of the material without maintenance; considering that the resistance of these systems does not increase too much and in the economic comparison it would be more economical thanks to the savings in maintenance and replacement of materials that would be had when using a conventional system.

Keywords: Grounding system, IEEE-std. 80, Steel austenitic 304 stainless, Corrosion.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Sistema de puesta a tierra	3
1.4.2 Tipos de Sistema de Puesta a Tierra	5
1.4.3 Resistividad del Terreno.....	5
1.4.4 Factores que influyen en la resistividad	5
1.4.5 Mediciones de la resistividad de un sistema de puesta a tierra	7
1.4.6 Concepto de corrosión	8
1.4.7 Causas de la Corrosión Metálica.....	8
1.4.8 Clasificación general de la corrosión.....	9
1.4.9 Potenciales de Corrosión	12
1.4.10 Aceros inoxidables Austeníticos.....	12
1.4.11 Características del acero AISI 304.....	12
1.4.12 Pruebas para calificar un buen sistema de puesta a tierra.....	12

CAPÍTULO 2.....	17
2. Metodología	17
2.1 Diseño de malla de puesta a tierra convencional	17
2.1.1 Normas para los sistemas de puesta a tierra	17
2.1.2 Flujograma de diseño de una malla de puesta a tierra.....	18
2.1.3 Criterio de diseño de malla de puesta a tierra	19
2.1.4 Cuadro de simbologías iniciales.....	22
2.1.5 Cálculo de parámetros de la malla de puesta a tierra	24
2.1.6 Cuadro de simbologías y parámetros finales	32
2.2 Sistema de puesta a tierra equivalente en acero inoxidable.....	34
2.2.1 Listado de materiales para la construcción de subestación	34
2.2.2 Elección de tipo de acero inoxidable	34
2.2.3 Equivalencia superficial de acero inoxidable en austenítico tipo 304	35
2.2.4 Comportamiento del Efecto Piel entre conductores	37
2.2.5 Correas y hebillas en acero inoxidable comerciales.....	37
2.3 Análisis comparativo técnico – económico (o Análisis Costo Beneficio).....	38
2.3.1 Análisis de costos.....	38
CAPÍTULO 3.....	42
3. Resultados Y ANÁLISIS.....	42
3.1 Comparación Económica entre Materiales	42
3.1.1 Comparación de vida útil.....	45
3.2 Comparación entre una instalación convencional de Cobre Vs instalación alternativa De Acero Inoxidable	46
3.2.1 Instalación de Sistema de Puesta a Tierra en Babahoyo	46
3.2.2 Instalación de Sistema de Puesta a Tierra para un Transformador en Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas	47
3.2.3 Instalación de Sistema de Puesta a Tierra para Poste 326 de Línea de Transmisión vía Salinas en la provincia de Santa Elena	48

3.3	Análisis de estado de un SPT en Acero Inoxidable previamente instalado ..	49
3.3.1	Sistema de Puesta a Tierra en reconector de Línea de 69kV ubicado en Vía a la Costa en la ciudad de Guayaquil.....	49
3.3.2	Sistema de Puesta a Tierra en transformador de Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas	50
3.3.3	Sistema de Puesta a Tierra para Poste 326 de Línea de Transmisión vía Salinas en la provincia de Santa Elena	51
CAPÍTULO 4		52
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....		54
ANEXOS.....		56
	Anexo 1: Evidencias de problemas internos del país	56
	Anexo 2: Imágenes de sistema de puesta a tierra en acero inoxidable.....	59
	Anexo 3: Mediciones de resistencia en SPT de acero inoxidable.....	62

ABREVIATURAS

ESPOL	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
CNEL	CORPORACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD
UN	UNIDAD DE NEGOCIO
SPT	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA
GPR	GROUND POTENTIAL RISE O MAXIMO POTENCIAL DE TIERRA
OSHA	OCCUPATIONAL SAFETY HEALTH ADMINISTRATION
NFPA	ASOCIACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS
ANSI / ISA	INSTITUTO NACIONAL ESTADOUNIDENSE DE ESTÁNDARES Y SOCIEDAD DE INSTRUMENTOS DE AMÉRICA
TIA	ASOCIACIÓN DE LA INDUSTRIA DE TELECOMUNICACIONES
IEC	COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL
CENELEC	COMITÉ EUROPEO DE ESTANDARIZACIÓN ELECTROTÉCNICA
IEEE	INSTITUTO DE INGENIEROS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS
STD	ESTÁNDAR

SIMBOLOGÍA

Al	Aluminio
Cr	Cromo
Fe	Hierro
Ni	Níquel
H	Hidrogeno
Cu	Cobre
Ag	Plata
Pt	Platino
A	Sección mínima de conductor por norma (4/0)
d	Diámetro del conductor por norma (4/0)
V	Nivel de Tensión
L_1	Largo de la Malla
L_2	Ancho de la Malla
A_M	Área de la malla de puesta a tierra
I_g	Corriente máxima de falla a tierra
I_G	Corriente máxima inyectada a la malla
ρ	Resistividad inicial del terreno
ρ_f	Resistividad del terreno con inserción de químico
ρ_s	Resistividad de la superficie
t	Tiempo máximo de falla
R_G	Resistencia de la Malla a tierra inicial
R_{Gf}	Resistencia de la Malla a tierra con ρ_f
H_s	Espesor de la capa superficial
L_T	Longitud total del conductor
n	Número de conductores en paralelo L_1
m	Número de conductores en paralelo L_2
D	Espaciamiento entre conductores
H	Profundidad de enterramiento

K_i	Factor de corrección por geometría de la malla
K_m	Factor de espaciamiento para tensión de malla
K_i	Factor de corrección por geometría de la malla
n_b	Constante para mallas cuadradas
n_c	Constante para mallas cuadradas y rectangulares
n_d	Constante para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L
L_r	Longitud de cada varilla
L_p	Longitud del perímetro de la malla
L_x	Máxima longitud de la malla en la dirección X
L_y	Máxima longitud de la malla en la dirección Y
L_v	Longitud de electrodo tipo varilla
N	Número de varillas
n	Número de conductores paralelos
D	Distancia entre conductores paralelos
h	Profundidad de los conductores de la malla
d_{cond}	Diámetro del conductor debido a norma (4/0)

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1. Ilustración de cómo se realiza las conexiones en el método de Wenner	7
Imagen 2. Ilustración de las conexiones en el método de Schlumberger	8
Imagen 3. Diagrama de flujo para el diseño de una malla de puesta a tierra	18
Imagen 4. Ejemplos de mediciones realizadas con Telurómetro Modelo Mi2124.....	21
Imagen 5. Diseño de caja paralelepípedo o rectangular.....	35
Imagen 6. Diseño de un cilindro general.....	36
Imagen 7. Cotización Final de Materiales para SPT en cobre y acero inoxidable	42
Imagen 8. Costo de Electrodo para SPT de Copperweld y Acero Inoxidable	43
Imagen 9. Costo del conductor por cada kilo de material	44
Imagen 10. Metraje de conductor por cada kilo de material	44
Imagen 11. Comparación de vida útil entre materiales	45
Imagen 12. Sistema de puesta a tierra convencional para un transformador en La Ventura en la ciudad de Babahoyo	46
Imagen 13. Sistema de puesta a tierra en acero inoxidable en La Ventura en la ciudad de Babahoyo.....	46
Imagen 14. Medida registrada el 09 de enero del año 2019 en sistema de puesta a tierra convencional deteriorada en la Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas.....	47
Imagen 15. Medida registrada en diciembre del 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en la Playa Mar Bravo	47
Imagen 16. Sistema de puesta a tierra convencional en cobre y copperweld para estructura en el POSTE 326 vía Salinas.....	48
Imagen 17. Sistema de puesta a tierra en acero inoxidable para estructura en el POSTE 326 vía Salinas	48
Imagen 18. Medida registrada el 1 de marzo del año 2019 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en Vía a la Costa en Guayaquil	49
Imagen 19. Medida registrada el 24 de noviembre del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en Vía a la Costa en Guayaquil	49
Imagen 20. Medida registrada el 8 de febrero del año 2019 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en la Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas .	50

Imagen 21. Medida registrada el 17 de diciembre del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en la Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas 50

Imagen 22. Medida registrada el 19 de enero del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en el Poste 326 de línea de transmisión vía Salinas en Santa Elena 51

Imagen 23. Medida registrada el 17 de diciembre del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en el Poste 326 de línea de transmisión vía Salinas en Santa Elena..... 51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistividad del Terreno	6
Tabla 2. Relación de Humedad con Resistividad.....	6
Tabla 3. Potencial Electroquímico Normalizado (V).....	11
Tabla 4. Condiciones en un diseño de un sistema de puesta a tierra.....	14
Tabla 5. Potencial Electroquímico Normalizado (V).....	20
Tabla 6. Parámetros iniciales para el diseño del SPT en cobre y copperweld.....	22
Tabla 7. Valores típicos del Factor de Decremento Df.....	25
Tabla 8. Resultados iniciales de cálculos para SPT sin alteraciones en el terreno ...	29
Tabla 9. Resultados finales de cálculos para SPT con alteraciones en el terreno.....	32
Tabla 10. Parámetros finales para el diseño del SPT en cobre y copperweld	32
Tabla 11. Listado de materiales para malla de puesta a tierra en cobre.....	34
Tabla 12. Propiedades del acero inoxidable austenítico 304.....	34
Tabla 13. Cotización de proveedor local para materiales de SPT convencional	38
Tabla 14. Cotización realizada por PROENERGY S.A. como distribuidora certificada en el país de STAVOL para la construcción del SPT en acero inoxidable.....	39
Tabla 15. Cotización de proveedor local para las soldaduras exotérmica en malla...	40
Tabla 16. Costos de actividades de mantenimiento.....	41

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad ha surgido una realidad que es difícil de ocultar, la cual es el hurto de materiales desprotegidos de una instalación eléctrica que, en muchas ocasiones, pueden ser los elementos que conforman un sistema de puesta a tierra, llegando a provocar un aumento al valor monetario que representan este tipo de pérdidas a la Unidad de Negocios encargada de ese sector eléctrico. Además, este problema conlleva a su vez a la desconexión del sistema de puesta a tierra dejando sin protección a los operadores, equipos y estructuras durante perturbaciones o fallas. Además, el hurto de estos materiales que conforman los sistemas de puesta a tierra de cobre ocasiona inestabilidad en el nivel de tensión en centros de transformación cuando ocurre algún fallo, generando niveles de tensión no deseados ante la pérdida de referencia en el neutro, llegando a provocar un daño, que puede ser irreversible, en todos los electrodomésticos conectados a ese alimentador afectado por el hurto.

Por otra parte, el Ecuador presenta distintos tipos de suelos dependiendo de la región, de los cuales podemos destacar los que son totalmente húmedos como en gran parte de la Amazonía y los que son extremadamente secos como en las zonas costeras, sobre todo en las playas del país, ya que la constitución de estos suelos tiene mayor influencia en la calidad del sistema de puesta a tierra instalado, siendo estos un problema debido a la resistividad que pueden llegar a presentar gracias a la abundancia de sales que presentan o que pueden llegar a necesitar, y que, con el paso del tiempo, degradarán los electrodos instalados, reduciendo su vida útil in situ.

En este trabajo analizaremos las ventajas económicas con respecto a las propiedades del acero inoxidable en contraste al cobre o copperweld en instalaciones de sistemas de puesta a tierra, considerando la durabilidad y eficiencia de estos, ya que no solo se busca reducir las pérdidas generadas por hurtos, sino también alargar la permanencia de estas instalaciones en el sitio, debido a que su tiempo de vida útil es más prolongado con respecto a los sistemas convencionales de cobre o derivados.

1.1 Descripción del problema

La Corporación Nacional de Electricidad Unidad de Negocios Guayas Los Ríos en conjunto con la contratista PROENERGY S.A. han sido testigos de las afectaciones provocadas por el hurto de los sistemas de puesta a tierra instaladas para usuarios residenciales e infraestructuras de sistemas de subtransmisión y de distribución, que, junto a la degradación de estos sistemas de puesta a tierra con el paso del tiempo por salinidad en ambiente, llegan a afectar económicamente a ambas empresas por el tiempo y los gastos que se deben invertir al momento de reponer los elementos del sistema de puesta a tierra afectado, perjudicando además a los usuarios por daños ocasionados en los electrodomésticos de sus viviendas debido a la carencia de estos sistemas.

1.2 Justificación del problema

Anualmente las empresas contratadas para realizar labores en baja tensión, como instalación de medidores registradores de energía, construcción de subestaciones o repotenciación de algún sector, han sido testigos de las afectaciones provocadas por el hurto de los sistemas de puesta a tierra instalados para usuarios residenciales e infraestructuras de sistemas de subtransmisión y distribución, como también han sido testigos del deterioro de los sistemas de puesta a tierra instalados debido a la corrosión de estos en ambientes salinos, afectando económicamente a las empresas con gastos que deben ser cubiertos al momento de reponer los elementos perdidos del sistema, además de pérdidas económicas de los usuarios por daño de los electrodomésticos por la corta vida útil del cobre en ambientes corrosivos.

En conjunto con la empresa PROENERGY S.A. y el Ing. Walter Lupera Navarrete se plantea solucionar el problema de pérdida y reposición del material, enseñando las ventajas de instalar nuevos sistemas de puesta a tierra de acero inoxidable como material alternativo al cobre o copperweld en instalaciones eléctricas, tanto para baja y media tensión como también para estructuras y subestaciones, esperando reducir el costo de inversión gracias a la reducción de mantenimientos y renovaciones en caso de deteriorarse los sistemas ya instalados, como también incorporar este material en la lista de los utilizados por la Corporación Nacional de Electricidad para la instalación o construcción de sistemas de puesta a tierra.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar una alternativa sobre el uso del acero inoxidable como material alternativo en sistemas de puesta a tierra para la renovación de electrodos y conexiones instaladas actualmente en el país.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Comprobar que el uso del acero inoxidable como material usado para los sistemas de puesta a tierra es una alternativa factible capaz de reemplazar las instalaciones convencionales de cobre o copperweld.
2. Analizar las ventajas del acero inoxidable para instalaciones de sistemas de puesta a tierra por sus características físicas.
3. Demostrar la factibilidad económica de la implementación del acero inoxidable frente al cobre en la cotización de materiales del sistema de puesta a tierra en la construcción de la subestación Simón Bolívar en la provincia del Guayas.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Sistema de puesta a tierra

La puesta a tierra es un sistema de protección al usuario de los aparatos conectados a la red eléctrica, se utilizan en las instalaciones eléctricas para dirigir a tierra los diferentes niveles de corriente causadas por fallas en las instalaciones o por las descargas atmosféricas. A este sistema se conecta todos y cada uno de los elementos de la instalación que requieran ser puestos a tierra, tales como los neutros, tanques y carcasas de los equipos, los cables de guarda, las estructuras metálicas y todas aquellas partes metálicas que deben estar a potencial de tierra, logrando las siguientes ventajas:[1]

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes a tierra.
- Proveer un medio para disipar las corrientes eléctricas indeseables. Facilitar la operación de los dispositivos de protección.
- Proveer un medio de descarga y desenergización de equipos, antes de proceder a las tareas de mantenimiento.
- Dar mayor confiabilidad y seguridad al servicio eléctrico.
- Disipar la corriente asociada a las descargas atmosféricas, limitando las sobretensiones generadas.
- Limitar la elevación de potencial de la red a valores aceptables, cuando ocurre una falla a tierra.
- Establecimiento y permanencia de un potencial de referencia.
- Proporcionar seguridad a las personas limitando el voltaje de contacto.
- Mejorar la calidad de la señal minimizando el ruido electromagnético.
- Fijar una tensión de referencia para la equipotencialización del sistema.

Para obtener una resistencia de tierra adecuada en los sistemas de puesta a tierra, se deben utilizar electrodos especiales para suelos de baja conductividad, es decir, electrodos mejorados, electrodos profundos o conductores anulares para obtener una resistencia de tierra adecuada.[2]

Un sistema de puesta a tierra bien diseñado es básico para cualquier instalación eléctrica, y así evitar el peligro asociado a las corrientes de falla, según lo establecido en las principales normas de puesta a tierra:[3]

- Ecuador: NEC-SB-IE "Instalaciones eléctricas"
- España: RBT2002 "Regulación electrotécnica de baja tensión". ITC-18 "Sistemas de puesta a tierra".
- Gran Bretaña: BS 7430 "Código de prácticas para la puesta a tierra".
- Francia: NF C 15-100 "Instalaciones eléctricas de baja tensión".
- Alemania: DIN VDE 0100 Parte 540 "Disposiciones de puesta a tierra, conductores de protección, conductores de conexión equipotencial"
- EE. UU.: UL 467 "Equipo de conexión a tierra y conexión"

1.4.2 Tipos de Sistema de Puesta a Tierra

En un sistema de tierra, el electrodo de tierra provee la conexión física para disipar la corriente a tierra, existen 2 tipos básicos de electrodos:

- El natural: Está intrínsecamente dentro de la instalación que incluye todo el metal enterrado en la estructura del edificio.[4]

- Metal de refuerzo de la cimentación: Los electrodos fabricados son instalados específicamente para mejorar el desempeño de los sistemas de tierra que incluyen mallas de alambre, platos metálicos, conductor de cobre desnudo y varillas directamente enterradas en el terreno.[4]

1.4.3 Resistividad del Terreno

La resistividad es una característica que posee todos los elementos, en el campo eléctrico es la capacidad que tienen los materiales de oponerse al paso de la corriente, permitiendo circular la corriente con facilidad o no, en el caso del suelo, es variable debido a su contenido orgánico y mineral.

La resistividad (ρ) es un parámetro característico de los medios conductores, su unidad es $[\Omega.m]$. El parámetro inverso la conductividad (σ) se expresa en $[Siemens/m]$. En un medio conductor homogéneo, isotrópico, el valor de la resistividad es igual en cualquier punto y dirección del medio. [5]

1.4.4 Factores que influyen en la resistividad

Los factores que influyen en la resistividad son externos, el valor de la resistividad del terreno no es constante en el tiempo y está afectado por muchas variables, algunos de ellos descritas a continuación:

a) Naturaleza del terreno

Cuanto menor sea la resistividad del terreno, con mayor facilidad se pueden alcanzar valores bajos para la resistencia de la instalación de los sistemas de tierra, en la Tabla 1 se muestra la relación de la naturaleza del terreno con la resistividad:[6]

Tabla 1. Resistividad del Terreno

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD ($\Omega.m$)
TERRENOS PANTANOSOS	MENOR a 30
LODO	20 a 100
HUMUS	10 a 150
ARENA ARCILLOSA	30 a 40
TERRENO PEDREGOSO DESNUDO	50 a 500
TERRENO PEDREGOSO RECUBIERTO DE CÉSPED	200 a 3000
CALIZAS TIERNAS	1500 a 3000
CALIZAS AGRIETADAS	300 a 500
MICACITAS	100 a 300
GRANITOS Y ARENISCAS EN ALTERACIÓN	1500 a 10000
GRANITAS Y ARENISCAS ALTERADOS	100 a 600

b) La humedad

La humedad es una característica importante, pues es necesaria para las mediciones del suelo y el mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra, ya que este varía según las estaciones del año, a medida que el grado de humedad aumenta se disuelven con mayor rapidez sales solubles y la resistividad disminuye, a continuación, se muestra en la Tabla 2 la relación del porcentaje de humedad con la resistividad:[7]

Tabla 2. Relación de Humedad con Resistividad

% HUMEDAD	0,0	2.5	5.0	10.0	15.0	20.0	30.0
ρ ($\Omega.m$)	100000	1500.0	430.0	185.0	105.0	63.0	42.0

c) La temperatura

La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se acusa mucho al alcanzarse los 0°C, hasta el punto de que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrólitos que, influyen decisivamente en la resistividad del terreno; de modo que estos parámetros son inversamente proporcionales.[7]

d) La salinidad.

La concentración de sales minerales disueltas en el terreno es un factor determinante en la resistividad de este. Al existir una mayor concentración de sales en el suelo, éste mejorará su conductividad. [7]

1.4.5 Mediciones de la resistividad de un sistema de puesta a tierra

La medición de la resistividad de un terreno se la realiza a través de un equipo llamado Telurómetro, el cual tiene dos principios de funcionamiento; del tipo de compensación de equilibrio en cero y el de lectura directa, este equipo inyecta una corriente en sus electrodos con una frecuencia no mayor a 60 [Hz] con el fin de evitar registrar mediciones que se deban a ruidos eléctricos de equipos cercanos.

Los telurómetros están conformados por cuatro terminales, dos para corriente y dos para potencial, cada una conectada a un electrodo con una longitud aproximada de 60 [cm] y un espesor de 16 [mm].

Las mediciones registradas por el equipo pueden ser dispares debido a la composición del terreno, por lo que es recomendable descartar mediciones que se encuentren muy alejadas del promedio aritmético.

Los métodos comunes para realizar las mediciones de resistividad en un terreno se las presenta a continuación:

1.4.5.1 Método de Wenner

Mide la resistividad del terreno, se entierran 4 electrodos en el suelo, los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración la cual no debe exceder la relación "a/20". Las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos, como en la Imagen 1, y de la resistividad del terreno.[8]

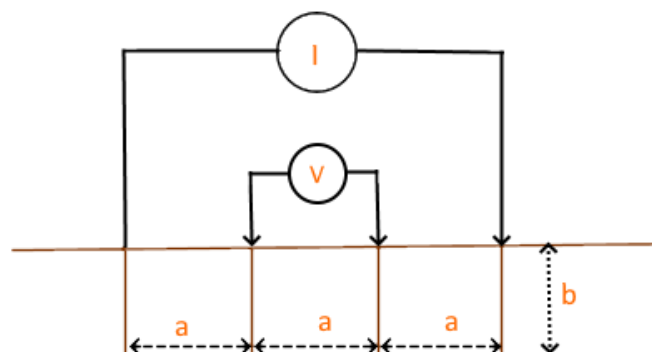


Imagen 1. Ilustración de cómo se realiza las conexiones en el método de Wenner

1.4.5.2 Método de Schlumberger

La variante en este método es el distanciamiento de las varillas de prueba, como en la Imagen 2, se las utiliza para medir la resistividad del suelo cuando las picas de prueba están separadas por una gran distancia o para acelerar las pruebas para múltiples ubicaciones de las picas de prueba.[8]

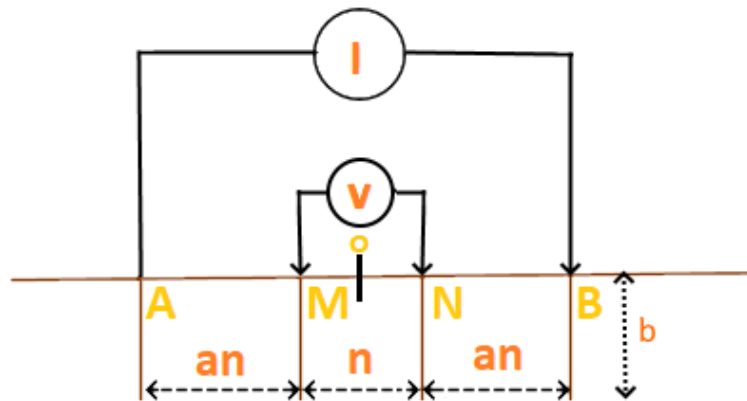


Imagen 2. Ilustración de las conexiones en el método de Schlumberger

1.4.6 Concepto de corrosión

La corrosión es el deterioro paulatino de un material debido a reacciones químicas y electroquímicas que se dan en el medio ambiente en el que está sometido, esto se puede dar en todo tipo de material como madera, metales, plásticos, cementos, etc.

El proceso de corrosión metálica se lo puede considerar como un efecto inverso a la metalurgia extractiva, en la cual se separa por completo un material metálico mediante la electrólisis durante su extracción, luego de que un material sea fundido termodinámicamente queda inestable y buscará nuevamente su estabilidad química, es decir, se combinará con agentes oxidantes hasta formar una superficie oxidada, esto reduce la vida útil del material y en muchos casos pierde el objetivo para el que fue construido inicialmente.[9]

1.4.7 Causas de la Corrosión Metálica

La pila de corrosión, o pila galvánica, en la superficie metálica de un electrodo es resultado de múltiples causas o heterogeneidades, dependiendo de la forma que tenga el metal su afectación por la corrosión será diferente, en las puntas o esquinas donde existe mayor concentración tenderá a corroerse con mayor rapidez.

Las imperfecciones de la fundición y formación de los metales dan como resultado metales policristalinos con muchos pequeños gránulos, los cuales facilitan que la pila galvánica tenga un potencial electroquímico para iniciar la corrosión.

Las heterogeneidades que presenta el metal se deben a la constitución del metal o al medio ambiente en el cual se encuentra, las corrosiones más frecuentes son:

- **Constitución:** Unión de diferentes metales, aleaciones, segregaciones, etc.
- **Estructura:** Espacios no uniformes entre granos cristalinos del metal.
- **Mecánicas:** Tensión y deformaciones del metal.
- **Imperfecciones de Superficie.**
- **Grado de pulido:** Granos excesivos, rayas, etc.

Mientras que las heterogeneidades de un medio ambiente corrosivo son:

- Variaciones abruptas de temperatura.
- Diferencias de concentración salina, composición.
- Concentración inestable de oxígeno.
- Agentes corrosivos.

1.4.8 Clasificación general de la corrosión

La corrosión metálica más frecuentes se las puede clasificar en tres grupos:

a. Corrosión de ataque directo

La corrosión de ataque directo se presenta cuando existe una reacción química entre el contacto directo de un elemento metálico con uno no metálico.

b. Corrosión Bacteriana

La corrosión bacteriana se presenta cuando existe en el medio ambiente la bacteria sulfato – reductora, esta acelera el efecto de la corrosión sin necesidad de existir oxígeno, la forma de actuar de esta bacteria es reducir el sulfato a sulfuro que en el caso de estar en contacto con el hierro forma sulfuro de hierro, en presencia de oxígeno produce oxido de hidrogeno gaseoso que acelera la corrosión, esta última es conocida como película de polarización, la bacteria al consumir hidrogeno deja libre el cátodo y como resultado se produce un ciclo cerrado donde la corrosión no termina.[9]

c. Corrosión Electroquímica

La corrosión electroquímica se produce en medios líquidos o electrolitos que tienen una alta conductividad y son capaces de permitir el paso de electrones, siendo directamente proporcional la corrosión con la cantidad de corriente que fluye del metal al electrolito. Si consideramos un ambiente ideal para conseguir la corrosión esperada se necesita un electrolito, medio donde fluye la corriente, un ánodo que suministra la corriente y es donde se produce la corrosión, un cátodo que recibe la corriente y está exento de la corrosión.[9]

d. Corrosión de Ataque Localizado

El ataque localizado es más difícil de prevenir ya que ataca en diversas localidades del metal, en puntas, curvas, o concentración de metales, la corrosión ocasiona pérdida de metal ya que este es consumido lentamente, dañando partes específicas del material que impiden continuar con una correcta funcionalidad de este, los tipos de ataques se clasifican a continuación:[9]

a. Corrosión por Ranuras

La corrosión de ataque en las ranuras se debe a que en ciertas partes de los metales poseen una débil estructura molecular, debido a esto resulta más conveniente para el medio ambiente aprovechar los vacíos que hay entre las ranuras y formar una grieta en donde se forman especies iónicas nocivas que inicia la corrosión. [9]

b. Corrosión por Picadura

Si consideramos tuberías metálicas que transportan líquidos o fluidos pesados, estos mantienen una fricción que con el paso del tiempo carcomen la superficie de contacto formando pequeños gránulos, al ser un ataque en un área pequeña, la concentración de agentes oxidantes tiene un mayor impacto y su corrosión se vuelve interna que a diferencia de la corrosión uniforme ataca en la estructura interior del material, con el tiempo puede existir una rotura o perforación. [9]

e. Aireación diferencial

En el caso de sistemas de puesta a tierra residenciales donde un electrodo de un metal con una buena conductividad y baja resistividad se entierra en el suelo, este se encuentra enterrado por completo y rodeado de incontables sustancias o compuestos químicos que pueden afectar al material debido a las diferencias de potencial electroquímico que se promueven entre sí, como la cantidad de sulfuro o de oxígeno disuelto en el suelo, por lo que la composición tendrá una alta concentración de agentes oxidantes que buscaran la superficie metálica más favorable para poder reaccionar y de paso corroer el metal.[9]

f. Erosión

La erosión es causada por el movimiento o fricción que se produce entre dos superficies metálicas, durante esta acción se produce el desgaste mecánico y la corrosión ataca cuando se desprende la capa de óxido o de protección.

g. Corrosión Galvánica o Bimetálica

La corrosión galvánica se forma cuando están en contacto dos metales con composición diferente, es decir, tiene una estructura molecular con potencial electroquímico diferente. En esta situación el metal más noble tiende a ceder y a disolverse más rápidamente en comparación a si estuviese aislado o en contacto con un ambiente corrosivo. Esta corrosión es peligrosa cuando existe una gran diferencia entre el potencial electroquímico estándar (Tabla 3) entre los materiales en contacto, mostrando los potenciales electroquímicos normalizados entre materiales.[9]

Tabla 3. Potencial Electroquímico Normalizado (V)

ELEMENTO	POTENCIAL NORMALIZADO (V)	
Aluminio	-1.67	Extremo Activo
Cromo	-0.71	
Hierro	-0.44	
Níquel	-0.25	
Hidrogeno	0.00	
Cobre	+0.345	Extremo Pasivo
Plata	+0.80	
Platino	+1.20	

1.4.9 Potenciales de Corrosión

Durante la corrosión de un metal se emite energía que es medida a través del potencial dentro de la solución, mientras el metal sea más cercano al extremo activo será más susceptible a ser medido, como por ejemplo, si tomamos dos metales como el hierro y la cobre ambos con diferentes potencial y se lo coloca dentro de una solución de cloruro de sodio y se mide el voltaje y la corriente entre ambos metales, se generará una pequeña corriente producida por la acción galvánica; mientras más diferencia exista entre ellos, será mayor la corriente que fluya a través de ellos. [9]

1.4.10 Aceros inoxidables Austeníticos

Los aceros inoxidables son aleaciones no magnéticas endurecibles por conformado en frío. Su microestructura está conformada fundamentalmente por granos de austenita, tienen una excelente resistencia a la corrosión, buena conformidad y generalmente facilita la soldadura.

El acero inoxidable del tipo AISI 304 (19% Cr – 10% Ni) es el más representativo de este grupo de aleaciones, pero cuando las condiciones de servicio exigen una mayor resistencia a la corrosión por picaduras se emplea el acero inoxidable del tipo AISI 316 (17% Cr – 12% Ni – 2% Mo). [10]

1.4.11 Características del acero AISI 304

El acero inoxidable austenítico AISI 304, con una aleación de cromo, níquel y bajo contenido de carbono presenta una buena resistencia a la corrosión. No requiere un tratamiento posterior al proceso de soldadura; tiene propiedades para embutido profundo, no es templable ni magnético. Puede ser fácilmente trabajado en frío (por ejemplo, doblado, cilindrado, embutido profundo, etc.) Sin embargo, el alto grado de endurecimiento que alcanza por trabajo en frío, comparado con aceros de baja aleación, hacen requerir de mayores esfuerzos para su proceso de conformado. [11]

1.4.12 Pruebas para calificar un buen sistema de puesta a tierra

Una conexión a tierra deficiente contribuye a un tiempo de inactividad innecesario, pero la falta de una buena conexión a tierra es peligrosa y aumenta el riesgo de falla del equipo.

Sin un sistema de conexión a tierra eficaz, podría estar expuesto al riesgo de descarga eléctrica, sin mencionar errores de instrumentación, problemas de

distorsión armónica, problemas de factor de potencia y una serie de posibles dilemas intermitentes. Si las corrientes de falla no tienen camino a tierra a través de un sistema de puesta a tierra diseñado y mantenido adecuadamente, encontrarán caminos no deseados que pudieran incluir personas.

Estas organizaciones brindan recomendaciones y / o desarrollan estándares de puesta a tierra para garantizar la seguridad:

- OSHA (Occupational Safety Health Administration)
- NFPA (Asociación Nacional de Protección contra Incendios)
- ANSI / ISA (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares y Sociedad de Instrumentos de América)
- TIA (Asociación de la Industria de Telecomunicaciones)
- IEC (Comisión Electrotécnica Internacional)
- CENELEC (Comité Europeo de Estandarización electrotécnica)
- IEEE (Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos)

Los comprobadores de puesta a tierra son herramientas indispensables para la resolución de problemas que le ayudarán a mantener el tiempo de actividad. Con problemas eléctricos frustrantes e intermitentes, el problema podría estar relacionado con una conexión a tierra deficiente o una mala calidad de la energía. [2]

El NEC, Código Eléctrico Nacional, Artículo 100 define una tierra como: "conectada (conectando) a tierra o a un cuerpo conductor que extiende la conexión a tierra". Mientras que cuando se habla de puesta a tierra, se trata de dos temas diferentes.

- Conexión a tierra: la conexión intencional de un conductor de circuito, generalmente el neutro, a un electrodo de tierra aterrizado.
- Conexión a tierra del equipo: garantiza que el equipo operativo dentro de una estructura esté conectado a tierra correctamente.

Se requiere que estos dos sistemas de puesta a tierra se mantengan separados excepto por una conexión entre los dos sistemas. Esto evita las diferencias en el potencial de voltaje de una posible descarga eléctrica provocada por rayos. El propósito de una tierra además de la protección de personas, plantas y equipos es

proporcionar un camino seguro para la disipación de corrientes de falla, rayos, descargas estáticas, señales e interferencias EMI y RFI. [12]

Cabe recordar que el objetivo de la resistencia de tierra es lograr el valor de resistencia de tierra más bajo posible que tenga sentido económica y físicamente, ya que existe una gran confusión en cuanto a qué constituye una buena tierra y cuál debe ser el valor de resistencia de la tierra. Idealmente, una tierra debe tener una resistencia de cero ohmios. Pero, para considerar cual es un buen valor de resistencia a tierra, tenemos varias normas o entidades que dictan un parámetro a considerar a la hora de diseñar una puesta a tierra, de los cuales destacamos los siguientes.

Tabla 4. Condiciones en un diseño de un sistema de puesta a tierra

NFPA y IEEE	NEC		Otras entidades
La NFPA y la IEEE han recomendado un valor de resistencia a tierra de 5.0 ohmios o menos.	el NEC, se tiene que comprobar que la impedancia del sistema a tierra es inferior a 25 ohmios especificados en NEC 250.56.	En instalaciones con equipos sensibles, debe ser de 5,0 ohmios o menos.	La industria de las telecomunicaciones a menudo ha utilizado 5,0 ohmios o menos como valor para la conexión a tierra y la unión.

Antes de varias décadas atrás, la metodología básica para las pruebas en tierra se mantuvo fundamentalmente sin cambios desde que se diseñó originalmente a principios del siglo XX. El usuario final usaría un instrumento de prueba y sondas para inyectar primero una corriente a la tierra entre un electrodo de prueba y una sonda remota, mediría la caída de voltaje causada por el suelo hasta un punto designado y luego usaría la Ley de Ohm para calcular.

Junto con el desarrollo de nueva instrumentación, el procedimiento de prueba en sí también se estandarizó. Al "caminar" la sonda de potencial hacia la sonda de corriente y graficar las mediciones; el usuario final podría desarrollar un perfil que indicara de manera confiable la resistencia del electrodo de tierra. Este procedimiento de prueba también se conoce como el método de "caída de potencial" y se describe en la "Guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de tierra y los

potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de tierra” (ANSI / IEEE estándar 81).

Varios otros métodos de prueba populares, como Pendiente, Regla del 62% y Curvas de intersección, se derivaron del método Caída de potencial, con ligeras modificaciones para hacer frente a situaciones especiales o para mejorar la productividad. Sin embargo, todos estos métodos emplean la misma instrumentación. La cual ha mejorado constantemente en términos de conveniencia, seguridad, facilidad de operación, precisión y características disponibles. [13]

1.4.12.1 Método sin estacas

La prueba de acceso directo se realiza conectando una pieza de equipo de prueba entre el electrodo de prueba y una tierra remota, y luego midiendo la resistencia de un bucle. El método es fácil, pero pierde precisión porque todos los demás elementos del bucle forman parte de la medición. La prueba de sujeción evita este problema al depender de múltiples rutas de retorno, que están en paralelo entre sí. Según la ley de resistencias paralelas, la resistencia de retorno prácticamente se cancela y el probador mide solo la resistencia del suelo. [14]

Las mordazas de un probador de abrazadera contienen dos devanados. Cuando se sujeta sobre una varilla de tierra y se energiza, un CT en el probador induce una corriente de prueba en el circuito a través de un acoplamiento electromagnético. La corriente viaja a través del suelo y regresa a la varilla (pero más significativamente a las mandíbulas del probador), completando así el circuito a través de todas las conexiones a tierra disponibles del sistema.[15]

1.4.12.2 Medidas de impedancia de tierra

Al intentar calcular posibles corrientes de cortocircuito en plantas de energía y otras situaciones de alto voltaje / corriente, es importante determinar la impedancia de puesta a tierra compleja, ya que la impedancia estará compuesta por elementos inductivos y capacitivos.[16] Dado que la inductividad y la resistividad se conocen en la mayoría de los casos, la impedancia real se puede determinar mediante un cálculo complejo.

Dado que la impedancia depende de la frecuencia, los analizadores comúnmente utilizan una señal de 55 Hz para que este cálculo sea lo más cercano

posible a la frecuencia de funcionamiento del voltaje, esto asegura que la medición esté cerca del valor de la frecuencia operativa real.

Los técnicos de servicios de energía que prueban líneas de transmisión de alto voltaje están interesados en dos cosas: la resistencia de tierra en caso de un rayo y la impedancia de todo el sistema en caso de un cortocircuito en un punto específico de la línea.[3]

En este caso, un cortocircuito significa que un cable energizado se encontraría suelto y tiene la probabilidad de tocar la rejilla metálica de una torre llegando a energizarla también.

CAPÍTULO 2

2. Metodología

La presente metodología busca demostrar los beneficios que tiene un sistema de puesta tierra, o SPT, implementando acero inoxidable como material para sus elementos. Gracias a la colaboración del Ingeniero Walter Lupera Navarrete y los recursos suministrados por el mismo, fue posible adquirir información necesaria para el dimensionamiento de la malla de puesta a tierra en la construcción de la subestación Simón Bolívar en la ciudad de Milagro.

La primera parte de esta metodología es presentar el diseño de una malla de puesta a tierra de cobre que cumpla todas las normativas necesarias para un correcto funcionamiento, como segundo punto se tendrá que encontrar un equivalente físico y eléctrico que cumpla con los mismos requisitos que el modelo inicial y para terminar con la tercera parte se realizará un análisis costos beneficios al corto y largo plazo que será la base de las conclusiones.

2.1 Diseño de malla de puesta a tierra convencional

Este diseño deberá cumplir con lo estipulado en las normas eléctricas nacionales e internacionales actualmente vigentes. Cabe resaltar la importancia de esto, puesto que el objetivo fundamental de la malla de puesta a tierra es proteger a las personas que laboran, o transitan en ellas, contra tensiones peligrosas que puedan aparecer cuando se presente una falla y logre ser disipada por la misma.

2.1.1 Normas para los sistemas de puesta a tierra

Los cálculos realizados en el presente documento están basados en las siguientes normas:

- IEEE STD 80-2000. Guide for Safety in A.C. Substations Grounding (Guía para Protección de Tierras en Subestaciones).
- IEEE STD 142-1991. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.

2.1.2 Flujograma de diseño de una malla de puesta a tierra

Los principales pasos a la hora de desarrollar un diseño de mallas de tierra son:

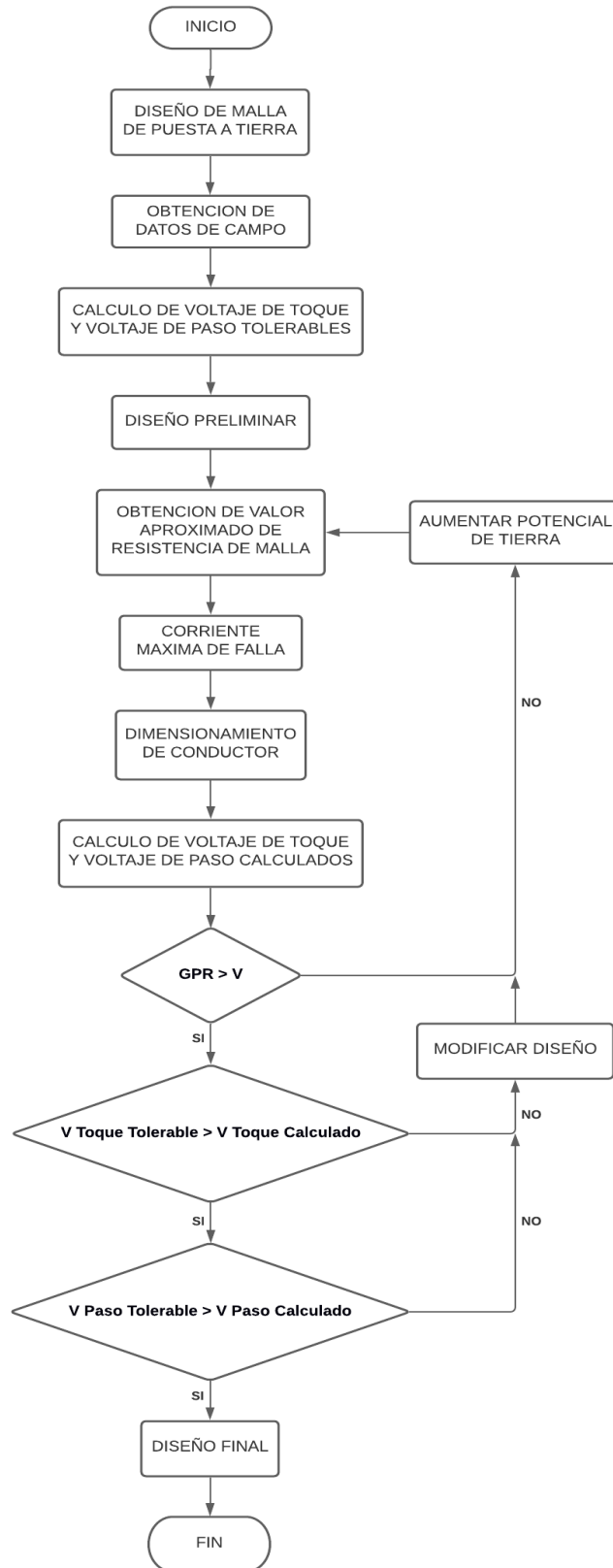


Imagen 3. Diagrama de flujo para el diseño de una malla de puesta a tierra

2.1.3 Criterio de diseño de malla de puesta a tierra

Para el cálculo de la malla de puesta a tierra para la subestación Simón Bolívar se considera los siguientes criterios de diseño:

- La resistencia máxima de puesta a tierra deberá estar en los valores recomendados por el IEEE STD 142-2007, de modo que para subestaciones de este tipo se deberá tener de 1 a 5 ohmios; buscando siempre un valor de 1 ohmios como límite máximo para brindar mayor seguridad.
- Se utilizará conductor de cobre desnudo calibre # 4/0 AWG para la malla y calibre # 2/0 AWG para aterrizar la carcasa de los equipos por norma.
- Los electrodos o varillas de puesta a tierra serán de copperweld, de 5/8" de diámetro y 8 pies (2.44m) de longitud de alta camada. Mientras que, la distancia entre varillas no deberá ser menor a 3m para evitar la provocación de interferencia entre los gradientes de potencial de estos.
- Al tratarse de un sistema de puesta a tierra convencional de cobre y copperweld, el tipo de conexiones en malla será exotérmico. Siendo las uniones entre conductores de la malla a los equipos o estructuras una soldadura exotérmica del tipo cadweld o similar.
- La profundidad de la malla por ningún motivo será menor a 0.6m.
- Se ha considerado el tiempo de despeje de falla del disyuntor de 0.5s.
- Todos los valores serán calculados en base a la normativa IEEE STD 80-2000.
- La máxima corriente de falla a tierra suministrada por CNEL EP Unidad de Negocio Milagro a nivel de 69 kV es 2760 Amperios.

2.1.3.1 Resistividad superficial (ρ_s).

Viene a ser la resistividad de la superficie en la que interviene la resistencia de la grava y cuyo valor está entre los 1500 a 3000 [$\Omega.m$], dependiendo del espesor de la grava (se recomienda un espesor de 15 cm de grava estableciendo para el mismo un valor de 3000 [$\Omega.m$]. [17])

2.1.3.2 Resistividad del suelo (ρ).

Se utilizó el método de Wenner y se realizaron mediciones de resistencia del suelo en dos sectores, sector (A) donde se ubicará el patio de maniobras 69 kV y sector (B) casa de control. En cada sector se realizó las mediciones con una separación entre varillas (distancia d) de 1, 2, 3 y 4 metros.

Se aplica la fórmula de resistividad simplificada:

$$\rho = 2 * \pi * d * R$$

d = distancia de cada medición dada en [m].

Mediante el método de suelo uniforme, podremos obtener la resistividad equivalente de acuerdo con el número de mediciones realizadas.

Obteniendo que:

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_n}{n} = [\Omega m]$$

Donde, n = número de mediciones

Tabla 5. Potencial Electroquímico Normalizado (V)

DISTANCIA d [m]	SECTOR A		SECTOR B		PROMEDIO	
	Resistencia medida [Ω]	Resistividad ρ calculada [Ωm]	Resistencia medida [Ω]	Resistividad ρ calculada [Ωm]	Resistencia terreno [Ω]	Resistividad ρ calculada [Ωm]
1	47,80	300,3363	46,8	294,0531	47,3	297,1947
2	42,40	532,8141	42,2	530,3008	42,3	531,5575
3	32,90	620,1504	30,7	578,6814	31,8	599,4159
4	22,50	565,4867	23,9	600,6725	23,2	583,0796
Resistividad del suelo [Ωm]						502,8119

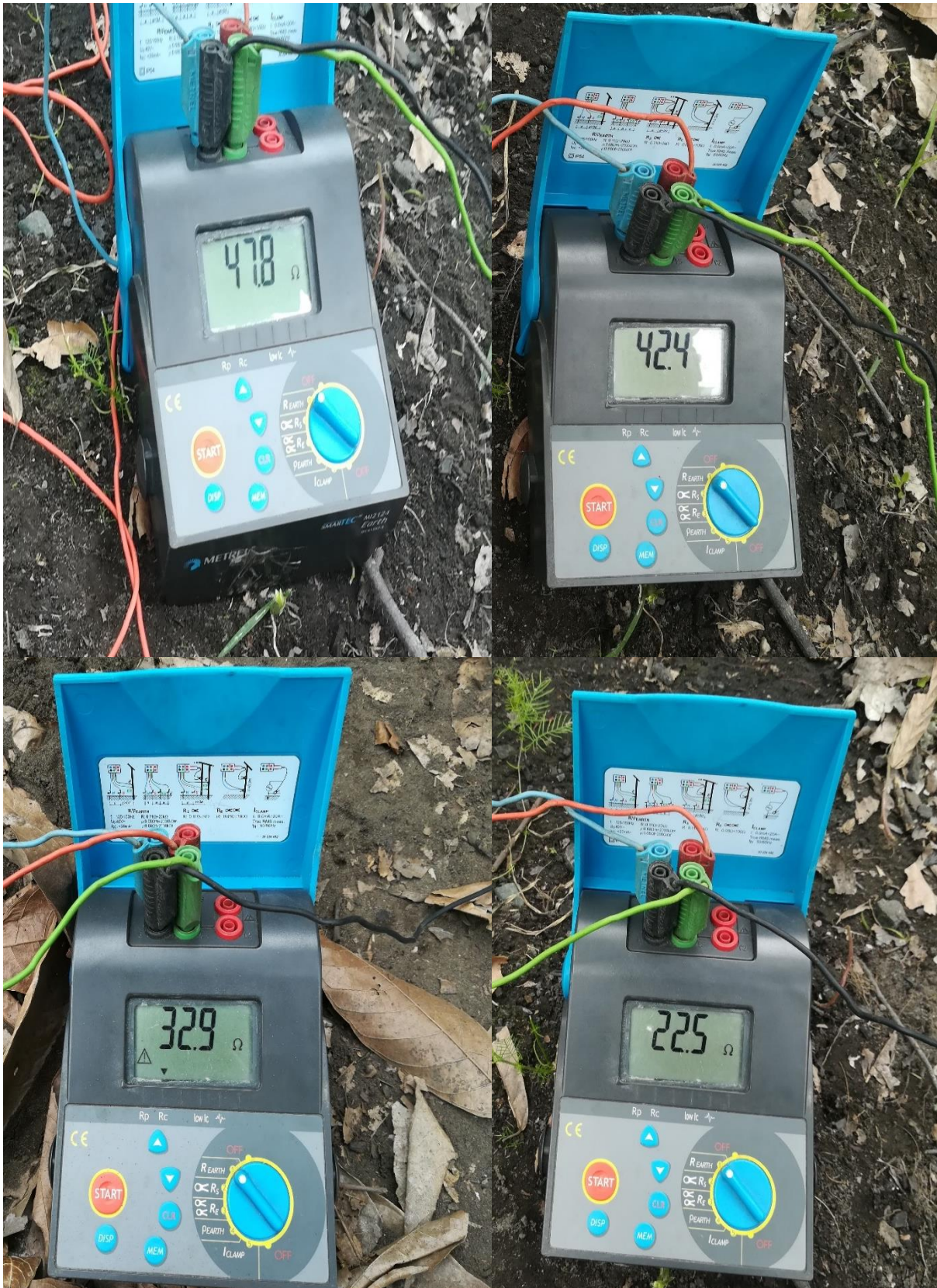


Imagen 4. Ejemplos de mediciones realizadas con Telurómetro Modelo Mi2124

2.1.4 Cuadro de simbologías iniciales

A continuación, se presenta la Table 3 con variables necesarias para el cálculo de parámetros de la malla de puesta a tierra construida en la subestación Simón Bolívar.

Tabla 6. Parámetros iniciales para el diseño del SPT en cobre y copperweld

Simbología	Descripción	Valor [unidad]
A	Sección mínima de conductor por norma (4/0)	107.22 [mm^2]
d	Diámetro del conductor por norma (4/0)	0.01333 [m^2]
V	Nivel de Tensión	69 [kV]
	Dimensiones de la malla	24.50 [m] x 52.5 [m]
L_1	Largo de la Malla	52.2 [m]
L_2	Ancho de la Malla	24.5 [m]
I_g	Corriente máxima de falla a tierra	2760 [A]
ρ	Resistividad inicial del terreno	502.81 [$\Omega \cdot m$]
ρ_f	Resistividad del terreno con inserción de químico	10 [$\Omega \cdot m$]
ρ_s	Resistividad de la superficie	3000 [$\Omega \cdot m$]
t	Tiempo máximo de falla	0.5 [s]
H_s	Espesor de la capa superficial	0.15 [m]
L_T	Longitud total del conductor	812 [m]
n	Número de conductores en paralelo L_1	8
m	Número de conductores en paralelo L_2	16
D	Espaciamiento entre conductores	3.5 [m]
H	Profundidad de enterramiento	0.60 [m]
A_M	Área de la malla de puesta a tierra	1,286.25 [m^2]

K_i	Factor de corrección por geometría de la malla, el cual tiene en cuenta el incremento de la densidad de corriente en los extremos de la malla	2.2054
n_b	Constante para mallas cuadradas	1
n_c	Constante para mallas cuadradas y rectangulares	1
n_d	Constante para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L	1
K_m	Factor de espaciamiento para tensión de malla	0.4487
K_i	Factor de corrección por geometría de la malla	2.2054
L_c	Longitud total de conductor en la malla horizontal	812 [m]
L_r	Longitud de cada varilla	2.44 [m]
L_R	Longitud total de todas las varillas	112.24 [m]
L_p	Longitud del perímetro de la malla	154 [m]
L_X	Máxima longitud de la malla en la dirección X	24.5 [m]
L_Y	Máxima longitud de la malla en la dirección Y	52.5 [m]
L_c	Longitud de conductor horizontal	812 [m]
L_v	Longitud de electrodo tipo varilla	2.44 [m]
N	Número de varillas	46 [m]
n	Número de conductores paralelos	11
D	Distancia entre conductores paralelos	3.5 [m]
h	Profundidad de los conductores de la malla	0.6 [m]
d_{cond}	Diámetro del conductor debido a norma (4/0)	0.0133 [m]

2.1.5 Cálculo de parámetros de la malla de puesta a tierra

Para calcular la resistencia de puesta a tierra de la malla, el máximo potencial de tierra GPR, la tensión de malla y de paso en caso de falla se considera aspectos normativos para garantizar la seguridad de las personas, de modo que en ningún caso supere la máxima corriente que pueda soportar el cuerpo humano, debido a las tensiones de paso o de contacto.

2.1.5.1 Cálculo de la máxima corriente inyectada a la malla (I_G)

La corriente finalmente inyectada a la malla se calcula a partir de la siguiente formula:

$$I_G = C_P * D_f * S_f * I_F$$

Donde:

Descripción	Simb	Unidad
Factor de proyección del crecimiento para un sistema con un crecimiento futuro cero $C_P = 1$.	C_P	
Factor de decremento para la duración total de la falla	D_f	
Factor de división de corriente, es el porcentaje de corriente que disipara la malla a tierra, el resto retornara al sistema hasta ser despejada.	S_f	
Corriente de falla a tierra simétrica	I_F	$[A_{RMS}]$

Se asume un tiempo de despeje de 500 ms, como lo recomienda la norma ANSI/IEEE Std. 80 "IEEE Guide for Safety in A.C. Substation Grounding".

Valores típicos de D_f se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 7. Valores típicos del Factor de Decremento D_f

Duración de la falla, <i>t</i>		Factor de Decremento, <i>D_f</i>			
Segundos [seg]	Ciclos a 60 [Hz]	X/R = 10	X/R = 20	X/R = 30	X/R = 40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.0	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Con un X/R=10 y un tiempo de duración de falla de 0.5s, tenemos un D_f = 1.026

Reemplazando valores tenemos:

$$I_G = 1 * 1.026 * S_F * I_F$$

Donde:

$$S_F = I_g/3I_o = I_g/I_F$$

$$I_G = 2831.76 [A]$$

Descripción	Simbología	Unidad
Es el valor eficaz de la corriente simétrica en la malla	<i>I_g</i>	[A]
Es la corriente de falla de secuencia cero	<i>I_o</i>	[A]

La máxima corriente inyectada en la malla es de *I_G* = 2831.76 [A].

2.1.5.2 Cálculo de la resistencia de la malla de puesta a tierra (R_G)

La Resistencia de la Malla a tierra se calcula a partir de la siguiente formula:

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

Donde:

R_g = Resistencia de malla de puesta a tierra

Reemplazando valores en la formula indicada tenemos $R_G = 6.67 \Omega$.

2.1.5.3 Ground Potential Rise (GRP)

Para realizar el cálculo del GRP o Máximo Potencial de Tierra en español, se debe tomar en cuenta una multiplicación de factores antes calculados:

$$GPR = I_G * R_G$$

$$GPR = 18887.84 [V]$$

2.1.5.4 Cálculo de la tensión de malla (E_m)

La Tensión de malla Tolerable (E_m) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_m}$$

Donde:

K_m = Factor de espaciamiento para tensión de malla

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

$K_{ii} = 1$ para mallas con varillas a lo largo del perímetro, o en las esquinas, o conjuntamente a lo largo del perímetro y dispersadas en el área de la malla.

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

$$K_h = 1.2649$$

Por lo tanto, reemplazando en la ecuación anterior obtenemos $K_m = 0.4487$.

Ahora para calcular la longitud del conductor de la malla aplicaremos:

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

Donde:

L_m = Longitud del conductor de la malla considerando la distribución de varillas de puesta a tierra.

$$L_m = 819.31 [m]$$

La longitud del conductor de la malla es 819.31 [m].

Finalmente tenemos todos los datos para calcular la tensión de la malla E_m :

$$E_m = \frac{(502.82 * 2831.76 * 0.4487 * 2.2054)}{819.31}$$

$$E_m = 1719.75 [V]$$

Teniendo que la tensión de malla durante la máxima falla es 1719.75 [V]

2.1.5.5 Voltaje de paso tolerable

El Voltaje de Paso Tolerable (E_p) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_p = \frac{((1000 + 6 * C_s * \rho_s) * 0.116)}{\sqrt{t}} ; \rho_s = 3000 [\Omega \cdot m], t = 0.5 [s]$$

Donde:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} ; \rho = 502.82 [\Omega \cdot m], h_s = 0.15 [m]$$

$$C_s = 0.8079$$

Obteniendo:

$$E_p = \frac{((1000 + 6 * 0.8079 * 3000) * 0.116)}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_p = 2549.70 [V]$$

2.1.5.6 Voltaje de toque tolerable

El Voltaje de Toque Tolerable (E_t) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_t = \frac{((1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * 0.116)}{\sqrt{t}}; C_s = 0.8079$$
$$E_t = 760.46 [V]$$

2.1.5.7 Voltaje de toque calculado

Entonces el Voltaje de Toque Calculado (E_t) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_t = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_c + \left[1.55 + 1.22 * \left(\frac{L_v}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}} \right) \right] * N * L_v}$$

Obteniendo:

$$E_t = \frac{1409004.65}{819.31}$$

$$E_t = 1719.75 [V]$$

2.1.5.8 Voltaje de paso calculado

Entonces el Voltaje de Paso Calculado (E_p) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_p = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{0.75 * L_c + 0.85 * N * L_v}$$

Donde:

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

$$K_s = 0.4336$$

Obteniendo:

$$E_p = \frac{1361580.92}{704.404}$$

$$E_p = 1932.95 [V]$$

2.1.5.9 Resultados iniciales de los cálculos de malla de puesta a tierra con 502.81 [Ω -m]

Una vez encontradas las tensiones de paso y de contacto para el diseño de la malla, en valores teóricos y en valores tolerables como se detalla a continuación en la Tabla 8, se procede a analizar si el diseño tiene un buen criterio y cumple la norma.

Tabla 8. Resultados iniciales de cálculos para SPT sin alteraciones en el terreno

DESCRIPCION	TEORICO CALCULADO	TOLERABLE
Tensión de paso	1932.95 [V]	2549.7 [V]
Tensión de contacto	1719.75 [V]	760.46 [V]
Resistencia de la malla de puesta a tierra	6.67 [Ω]	1 [Ω]

Obteniendo que el **$GPR = 18887.84 [V]$**

El criterio para utilizarse de acuerdo con la norma IEEE STD 80-2000 detalla:

Si **$GPR > V$** Tensión de toque tolerable, entonces debe calcularse las tensiones de la malla, tensión de toque y tensión de paso en caso de falla, caso contrario el diseño ha concluido. De tal forma que, si **V paso tolerable $>$ V paso calculado** y también **V contacto tolerable $>$ V contacto calculado** se cumplen, el diseño estará correctamente diseñado, caso contrario se debe rediseñar la configuración de este. Para este caso no se ha logrado cumplir las condicionales en cuestión, por lo tanto, el diseño de la malla **NO cumple** con la norma IEEE STD 80-2000.

La resistividad promedio obtenida sobre la base de las mediciones realizadas en el área de la Subestación es de 36.15[Ω], mismo que de acuerdo con el método de cálculo de Wenner corresponde a una resistividad de 502.82 [Ω . m], siendo este un valor muy alto que no podemos utilizar, el cual está acorde con el tipo de suelo arenoso de la zona.

Se recomienda utilizar material para mejorar la resistividad del terreno, llegando a conseguir una resistividad por debajo o igual a 1 [Ω . m], pudiéndose utilizar que G.E.M o bentonita como mejorador de terreno.

Se anexan a continuación los resultados del cálculo con $\rho = 10 [\Omega.m]$, donde se observa que, para este caso, el diseño cumplirá con todas las condiciones tolerables para el ser humano.

2.1.5.10 Cálculo de la resistencia de la malla de puesta a tierra (R_G) con terreno mejorado; $\rho = 10 [\Omega.m]$

La Resistencia de la Malla a tierra se volverá a calcular a partir de la fórmula:

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

Reemplazando valores en la formula indicada tenemos $R_G = 0.1326 \Omega$

2.1.5.11 Cálculo del máximo potencial de tierra (GPR)

El nuevo GRP o Máximo Potencial de Tierra en español quedará:

$$GPR = I_G * R_G$$

$$GPR = 2831.76 * 0.1326$$

Obteniendo:

$$GPR = 375.49 [V]$$

2.1.5.12 Cálculo de la tensión de malla (E_m); $\rho = 10 [\Omega.m]$

La nueva tensión de malla con una resistividad de $10 [\Omega.m]$ estará dada por:

$$E_m = \frac{\rho * I_G * Km * Ki}{Lm}$$

Reemplazando los valores con la primera parte obtenemos una tensión de malla:

$$E_m = 34.20 [V]$$

2.1.5.13 Voltaje de paso tolerable; $\rho = 10 [\Omega.m]$

El Voltaje de Paso Tolerable (E_p) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_p = \frac{((1000 + 6 * C_s * \rho_s) * 0.116)}{\sqrt{t}}$$

Donde:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} = 0.77$$

Obteniendo:

$$E_p = \frac{((1000 + 6 * 0.77 * 3000) * 0.116)}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_p = 2437.76 [V]$$

2.1.5.14 Voltaje de toque tolerable; $\rho = 10 [\Omega \cdot m]$

El Voltaje de Toque Tolerable (E_t) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_t = \frac{((1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * 0.116)}{\sqrt{t}}$$

$$E_t = 732.48 [V]$$

2.1.5.15 Voltaje de paso calculado; $\rho = 10 [\Omega \cdot m]$

El Voltaje de Paso Calculado (E_p) se calcula considerando la nueva resistividad del suelo, a partir de la siguiente formula:

$$E_p = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{0.75 * L_c + 0.85 * N * L_v}; \rho = 10 [\Omega \cdot m]$$

Obteniendo:

$$E_p = \frac{27078.89}{704.404}$$

$$E_p = 38.44 [V]$$

2.1.5.16 Voltaje de toque calculado; $\rho = 10 [\Omega \cdot m]$

El Voltaje de Toque Calculado (E_t) se calcula a partir de la siguiente formula:

$$E_t = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_c + \left[1.55 + 1.22 * \left(\frac{L_v}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}} \right) \right] * N * L_v}$$

Obteniendo:

$$E_t = \frac{28022.05}{819.31}$$

$$E_t = 34.20[V]$$

2.1.5.17 Resultados finales de los cálculos de malla de puesta a tierra

Una vez encontradas las nuevas tensiones de paso y de contacto para el diseño, tanto en valores teóricos y contrastados con valores tolerables como se detalla en la Tabla 9, se procede a analizar si el diseño tiene un buen criterio y cumple la norma.

Tabla 9. Resultados finales de cálculos para SPT con alteraciones en el terreno

DESCRIPCION	TEORICO CALCULADO	TOLERABLE
Tensión de paso	38.44 [V]	2437.76 [V]
Tensión de contacto	34.20 [V]	732.47 [V]
Resistencia de la malla de tierra	0.1326 [Ω]	1 [Ω]

Obteniendo que el $GPR = 375.49 [V]$

El criterio para utilizarse de acuerdo con la norma IEEE STD 80-2000 detalla:

Si $GPR > V$ Tensión de toque tolerable, entonces debe calcularse las tensiones de la malla, tensión de toque y tensión de paso en caso de falla, caso contrario el diseño ha concluido. De tal forma que, si V paso tolerable $>$ V paso calculado y también V contacto tolerable $>$ V contacto calculado se cumplen, el diseño estará correctamente diseñado, caso contrario se debe rediseñar la configuración de este. Para este caso sí se ha logrado cumplir las condicionales en cuestión, por lo tanto, el diseño de la malla **CUMPLE** con la norma IEEE STD 80-2000.

2.1.6 Cuadro de simbologías y parámetros finales

Tabla 10. Parámetros finales para el diseño del SPT en cobre y copperweld

Simb.	Descripción	Valor [u]
A	Sección mínima de conductor por norma (4/0)	107.22 [mm^2]
d	Diámetro del conductor por norma (4/0)	0.01333 [m^2]
V	Nivel de Tensión	69 [kV]
L_1	Largo de la Malla	52.2 [m]
L_2	Ancho de la Malla	24.5 [m]
A_M	Área de la malla de puesta a tierra	1,286.25 [m^2]
I_g	Corriente máxima de falla a tierra	2760 [A]

I_G	Corriente máxima inyectada a la malla	2831.76 [A]
ρ	Resistividad inicial del terreno	502.81 [$\Omega \cdot m$]
ρ_f	Resistividad del terreno con inserción de químico	10 [$\Omega \cdot m$]
ρ_s	Resistividad de la superficie	3000 [$\Omega \cdot m$]
R_G	Resistencia de la Malla a tierra inicial	6.67 [Ω]
R_{Gf}	Resistencia de la Malla a tierra con ρ_f	0.1326 [Ω]
H_s	Espesor de la capa superficial	0.15 [m]
L_T	Longitud total del conductor	812 [m]
n	Número de conductores en paralelo L_1	8
m	Número de conductores en paralelo L_2	16
D	Espaciamiento entre conductores	3.5 [m]
H	Profundidad de enterramiento	0.60 [m]
K_i	Factor de corrección por geometría de la malla	2.2054
K_m	Factor de espaciamiento para tensión de malla	0.4487
K_i	Factor de corrección por geometría de la malla	2.2054
L_r	Longitud de cada varilla	2.44 [m]
L_X	Máxima longitud de la malla en la dirección X	24.5 [m]
L_Y	Máxima longitud de la malla en la dirección Y	52.5 [m]
L_v	Longitud de electrodo tipo varilla	2.44 [m]
N	Número de varillas	46 [m]
n	Número de conductores paralelos	11
D	Distancia entre conductores paralelos	3.5 [m]
h	Profundidad de los conductores de la malla	0.6 [m]
d_{cond}	Diámetro del conductor debido a norma (4/0)	0.0133 [m]
GPR	Elevación o aumento de potencial en una puesta a tierra	375.49 [V]

2.2 Sistema de puesta a tierra equivalente en acero inoxidable

2.2.1 Listado de materiales para la construcción de subestación

A continuación, se presenta el listado de materiales de tipo convencional para una malla de puesta a tierra de cobre o derivado implementada en la construcción del sistema de puesta a tierra de la Subestación Simón Bolívar. Con estos materiales de referencia se realizará la equivalencia física y eléctrica respecto al acero inoxidable.

Tabla 11. Listado de materiales para malla de puesta a tierra en cobre

LISTADO DE MATERIALES ESTIMADOS PARA LA CONSTRUCCION DE SUBESTACION	
DESCRIPCION	Cant
Conductor de Cu. desnudo #4/0 para la malla de puesta a tierra y chicotes	824 m
Conductor de Cu. Desnudo #2/0 para aterrizar disyuntores y estructuras	54 m
Varilla Cooperweld de puesta a tierra con tubería de 5/8" x 8"	46 u
Terminal de compresión para aterrizamiento de disyuntores y estructuras metálicas	18 u
Cemento conductor (Funda de 25 lbs)	232 fundas
Caja de 0.60m x 0.60m x1m para revisión de malla de puesta a tierra	2 u
ACCESORIOS QUE TAMBIEN DEBERÍAN INCLUIRSE EN COTIZACIÓN	
DESCRIPCION	Cant
Soldadura exotérmica TIPO GT (Varilla – Cable)	46 u
Soldadura exotérmica TIPO TA (T Cable – Cable)	110 u
Soldadura exotérmica TIPO XA (CRUZ Cable – Cable)	40 u

2.2.2 Elección de tipo de acero inoxidable

La selección para este estudio es el acero inoxidable austenítico 304 como material alternativo al uso de conductores de cobre con una vida útil mayor de 15 años, además de presentar las propiedades que se detallan a continuación.

Tabla 12. Propiedades del acero inoxidable austenítico 304

Propiedades Químicas	Propiedades Mecánicas	Propiedades Eléctricas
Resistente a la corrosión atmosférica.	No requiere soldadura exotérmica	Manejo eficaz del potencial de toque y paso.

2.2.3 Equivalencia superficial de acero inoxidable en austenítico tipo 304

El espacio geométrico puede considerarse como el conjunto de todos los puntos del universo físico. Por tanto, cada punto, recto y plano está en el espacio. La definición de geometría sólida es complicada, una posible definición es la siguiente:

Un sólido geométrico es una región de espacio cerrado limitada por superficies que pueden ser planas o curvas.

2.2.3.1 Caja paralelepípedo o rectangular

Es la figura que tiene base rectangular sólida y sus bordes laterales son perpendiculares a la base como se muestra en la Imagen 3. Es llamado cubo si todos sus bordes son de igual medida.

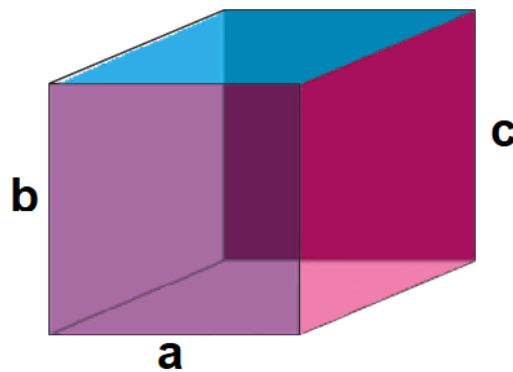


Imagen 5. Diseño de caja paralelepípedo o rectangular

Su superficie y volumen son dado por lo siguiente:

Fórmula del área de superficie conductores planos:

$$A = 2ab + 2ac + 2bc$$

Fórmula de volumen Conductores planos

$$V = abc$$

Donde:

a = 22 mm (ancho)

b = 1,2 mm (grueso)

c = 10,000 mm (longitud)

Por lo tanto, reemplazando esos valores en la fórmula antes de obtener:

Área de superficie de conductores planos = 464,053 mm²

2.2.3.2 Cilindro

El cilindro, Imagen 6, está formado por circulares paralelas caras y el conjunto de todos los segmentos de líneas rectas perpendicular a sus caras y entre ellos.

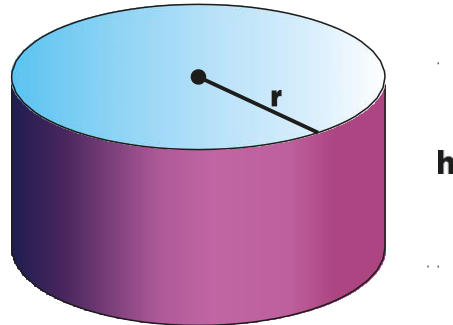


Imagen 6. Diseño de un cilindro general

Su superficie y volumen vienen dados por siguiente fórmula:

Formula de área superficial de Conductores Cilíndricos

$$A = 2 (\pi) (r)^2 + 2 (\pi) (r) h$$

Formula del volumen de Conductores Cilíndricos

$$V = (\pi) (r)^2 h$$

Donde:

$r = 2,91$ mm (diámetro)

$h = 10,000$ mm (longitud)

Si hacemos el mismo ejercicio con las dimensiones utilizadas para nuestro GKS en acero inoxidable, pero con conductor circular, obtenemos lo siguiente:

$$\text{Área de superficie de conductores cilíndricos} = 188,552 \text{ mm}^2$$

En otras palabras, podemos concluir que el paralelepípedo rectangular tiene 2,46 veces más superficie que la geometría circular. Por tanto, para obtener el mismo equivalente de nuestro bajante plano GKS de acero inoxidable con conductor circular éste debería tener 14 mm de diámetro o AWG 4/0.

2.2.4 Comportamiento del Efecto Piel entre conductores

La densidad de la corriente continua (CC) fluye uniformemente a través de toda la superficie del conductor, en el caso de la corriente alterna (CA) se presenta de forma diferente, pues la corriente fluye principalmente en la periferia del conductor debido al campo electromagnético creado.

El efecto piel está relacionado directamente con la forma del borde del conductor y su longitud en relación con su área seccional. Eléctricamente hablando, este efecto está relacionado con la impedancia mutua del conductor.

Los bloques usados en las barras colectoras son más eficientes para la conducción del flujo eléctrico que los conductores circulares usados en forma de cables, debido a la influencia decreciente del efecto piel; esto es por su mayor longitud periférica en relación con su área seccional.

2.2.5 Correas y hebillas en acero inoxidable comerciales

La empresa Eléctricos Internacional en conjunto con Proenergy S.A. ha implementado y comprobado una línea completa de productos para correas utilizadas en una variedad de industrias diversas.

Según las características del entorno, las correas y hebillas están diseñadas para adaptarse a las condiciones del terreno y se clasifican en 3 clases:

CLASE 1:

Para ambientes normales o ligeramente corrosivos, como no contaminados, o sectores residenciales y rurales similares, están fabricados en acero inoxidable AISI-201.

CLASE 2:

Para ambientes moderadamente corrosivos, de contaminación no muy severa, están fabricados en acero inoxidable AISI-301 y AISI-304.

CLASE 3:

Para ambientes altamente corrosivos, como áreas industriales o rurales, contaminación costera con corrosión severa y son fabricados en acero inoxidable AISI-316.

2.3 Análisis comparativo técnico – económico (o Análisis Costo Beneficio)

En esta sección se hará referencia a la parte económica del proyecto, la cual será enfocada desde varios puntos económicos de ambas alternativas propuestas, analizaremos el costo de los materiales necesarios para ambos sistemas de puesta a tierra en conjunto con el análisis de costo beneficio respecto a su vida útil.

2.3.1 Análisis de costos

El análisis de los costos de materiales es necesario para la toma de decisiones, de que alternativa es más viable, por lo que comenzaremos analizando varios grupos de materiales y métodos de soldadura y compresión.

2.3.1.1 Comparación entre los materiales

Esta sección se enfocará en la comparación de dos partes, primero se realizará la comparación entre los materiales de cobre / copperweld y el acero inoxidable y la segunda en la comparación entre la unión exotérmica y uniones mecánicas con conectores de acero inoxidable.

Los costos de los materiales para la construcción e instalación de los sistemas de puesta a tierra se los muestra a continuación:

Tabla 13. Cotización de proveedor local para materiales de SPT convencional

COSTO DE MATERIALES EN COBRE Y COPPERWELD						
COD	ITEM	DESCRIPC	UNI	CANT	P.U (\$/Und)	COSTO TOTAL
1	Conductor de Cu. desnudo #4/0 para la malla de puesta a tierra y chicotes.	#4/0	m	824	\$9.91	\$8,165.84
2	Conductor de Cu. Desnudo #2/0 para aterrizar disyuntores y estructuras.	#2/0	m	54	\$6.16	\$332.64
3	Varilla Cooperweld de puesta a tierra con tubería.	5/8" x 8"	u	46	\$15.22	\$700.12
4	Terminal de compresión para aterrizamiento de disyuntores y estructuras metálicas.		u	18	\$15.00	\$270.00
TOTAL						\$ 8,785.76

Tabla 14. Cotización realizada por PROENERGY S.A. como distribuidora certificada en el país de STAVOL para la construcción del SPT en acero inoxidable

COTIZACION DE MATERIALES EN ACERO INOXIDABLE PARA LA SUBESTACION SIMON BOLIVAR						
CÓDIGO	ITEM	DESCRIPCION	UNI	CANT	P.U (\$/Und)	COSTO TOTAL
1	Fleje Acero Inoxidable 304	22mm x 1,2mm	m	913	\$1.46	\$1.332,989
2	Conector de Placas paralelas	3 placas	u	134	\$7.00	\$938
3	Conector tipo J	Agujero 1/2	u	18	\$5.2	\$93.6
4	Electrodo Varilla Acero Inoxidable 304	5/8" x 2,44 m	u	47	\$ 18.10	\$850.12
5	Fleje Acero Inoxidable 304 (0,5m c/u)	22mm x 1,2mmx 500mm con preforma 5/8"	u	47	\$5.80	\$272.6
6	Conector Tipo U	5/8"	u	47	\$6.10	\$286.7
7	Conector Tipo C (Conexión Electrodo)		u	47	\$6.20	\$291.4
TOTAL						\$4.064,23

En un sistema de puesta a tierra convencional, con materiales de cobre y varillas de copperweld, el cobre de los conductores y el electrodo vendrían siendo el material más costoso, de modo que, en conjunto estos materiales tienen un precio de distribuidora de \$8,785.76; mientras que, en la cotización por parte de nuestra propuesta, los materiales del sistema de puesta a tierra de acero inoxidable es de \$4.064,23. Sin embargo, aquí hay dos puntos importantes para analizar, teniendo que para los electrodos de cada sistema, la varilla de acero inoxidable es de aproximadamente un 16% más costoso que la varilla copperweld convencional, mientras que, para la equivalencia económica del conductor y fleje, este se ve relacionado con la cantidad de material que existe tanto para cobre como para el fleje de acero inoxidable, teniendo una ventaja prudente el de acero inoxidable en cuanto a aprovechamiento de superficie por donde llegará a circular la corriente, disminuyendo el efecto piel, reduciendo el volumen y la cantidad de material necesario con respecto al cobre, reflejándose en las cotizaciones de ambos sistemas. Los costos necesarios para mejorar la calidad del terreno no son relevantes para el estudio, puesto que es necesario en ambos casos debido a la alta resistividad de este.

Tabla 15. Cotización de proveedor local para las soldaduras exotérmica en malla

COSTO DE SOLDADURA EXOTÉRMICA PARA SPT CONVENCIONAL					
COD	DESCRIPCION	UNI	CANT	P.U (\$/Und)	COSTO TOTAL
1	Carga soldadura exotérmica	u.	196	\$13.80	\$2,704.80
TOTAL					\$2,704.80

En cuanto a los costos en soldaduras exotérmicas que son necesarias para la formación de la malla a utilizar, para el sistema de puesta a tierra convencional en cobre y copperweld tenemos que es aproximadamente el 62% del precio de la cotización global dictada por nuestra propuesta para la instalación completa del sistema de puesta a tierra en acero inoxidable.

2.3.1.2 Análisis de costo de Mantenimiento

El mantenimiento de todo sistema eléctrico es fundamental, en un sistema de puesta a tierra es importante llevar control del estado en que se encuentra la malla, verificar si está operativa y en buen estado, para esto se realiza tres tipos de mantenimiento:

- **Mantenimiento Predictivo:** Medición que se realiza con el fin de comprobar que los valores de resistencia de puesta a tierra estén dentro de los parámetros permitidos.
- **Mantenimiento Preventivo:** Retiro de polución en uniones visibles de forma manual.
- **Reposición de Sistema:** Renovar los componentes del sistema de puesta a tierra, para restituir los valores establecidos en las normas.

Estos mantenimientos representan un costo adicional a los materiales, es necesario considerarlo para la toma de decisión de la alternativa más viable durante su vida útil. En la Tabla 16 Costos de actividades de mantenimiento adquirida de *EL COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA PRINCIPAL DE TRANSMISIÓN DE RED ELECTRICA DEL SUR – PERU*, plantea el costo unitario por cada actividad.

Tabla 16. Costos de actividades de mantenimiento

ITEM	ACTIVIDAD	Unid	Cant	Costo Unitario [\$]	Frecuencia (Meses)	Costo Anual [\$]
ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO						
1	Medición de puesta a tierra	Estructura	1	\$37.55	12	\$ 37.55
ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO						
2	Limpieza manual	Cadenas	1	\$14.86	12	\$ 14.86
ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO						
3	Reparación (mejoramiento) de puesta a tierra	Estructura	1	\$381.45	2	\$ 381.45

En el análisis de costo de mantenimiento se propone tres hipótesis, se establece como referencia el SPT de acero inoxidable 304 el cual tiene una vida útil de 15 años, posteriormente definimos que este sistema solo necesita mantenimiento predictivo durante su vida útil por lo que la parte correctiva queda exenta del costo de mantenimiento, segundo se plantea el STP convencional considerando un mantenimiento correctivo cada dos años y como última hipótesis consideramos el STP convencional con la reposición y cambio de todo el sistema cada cinco años sin contar con mantenimiento correctivo. En el capítulo 3 de resultados se planteará una gráfica de costo respecto a los años de vida útil del sistema referencial, en el cual se acumularán los costos desde el año cero hasta los 15 años de vida útil del acero inoxidable austenítico del tipo 304.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Comparación Económica entre Materiales



Imagen 7. Cotización Final de Materiales para SPT en cobre y acero inoxidable

Si bien quedo establecido en la tercera parte de la metodología y se aprecia en la Imagen 7 de Cotización Final de Materiales para SPT en cobre y acero inoxidable, el costo de materiales de un sistema de puesta a tierra convencional de cobre y copperweld es más costoso que la alternativa planteada, en gran parte se debe a que el conductor de cobre desnudo 4/0 y 2/0 representan un 73% del costo total de los materiales del sistema, sin embargo, gracias a la equivalencia física y eléctrica del conductor a un fleje de acero inoxidable, se aprovecha de mejor manera el área transversal por donde circula la corriente, al tener una sección rectangular este disminuye el efecto piel y por consecuencia se necesita menos material conductor que resulta en un menor costo para la instalación.

Un gran punto a analizar es el componente económico de los electrodos conductores en ambas alternativas, su composición, fabricación y beneficios que tiene cada uno, en la Imagen 8 de Costo de Electrodos para SPT de Copperweld y Acero Inoxidable se puede observar que los electrodos tienen un costo mayor para el acero

inoxidable, este es un 16% más costoso que la varilla de copperweld, pues su valor aumenta debido a la resistencia que tiene de mantenerse operativa y funcional por mayor tiempo ante ambientes con altos índices de corrosión, mientras que en el caso de la varilla convencional, esta se ve limitada y reduce su tiempo de vida útil que conlleva a reemplazar el material y tener un mantenimiento continuo con mayor frecuencia que representa un costo adicional el cual no se vería reflejado en nuestra alternativa.

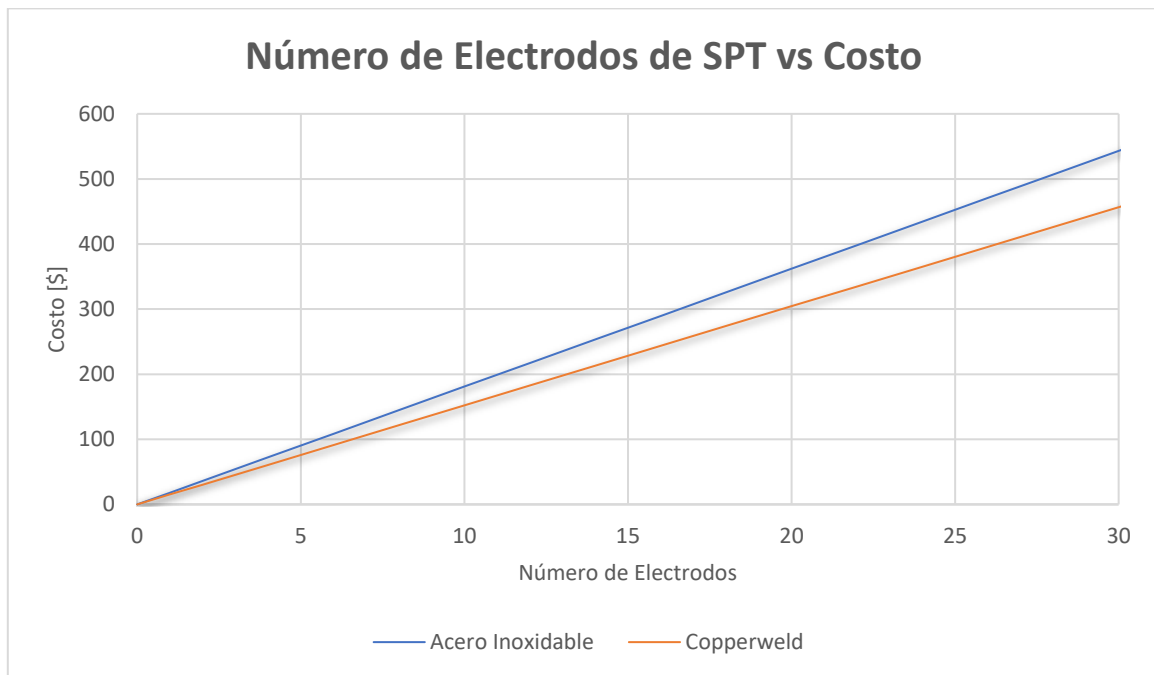


Imagen 8. Costo de Electrodos para SPT de Copperweld y Acero Inoxidable

El costo del conductor es un punto fuerte en la cotización final de materiales de las alternativas propuestas para el SPT, estos tienen un gran peso en la cotización, sin embargo, para poder comparar su costo económico se lo realiza mediante dos ilustraciones: en la Imagen 9 Costo del conductor por cada kilo de material, analizamos un equivalente por kilo de material, ya que la forma de adquirir el fleje de acero inoxidable es comprando por kilogramos mientras que el cobre desnudo 4/0 es por metro, para realizar esta comparación se lleva ambas variables a kilos, siendo 0.966 [Kg] por cada metro de conductor. Para el SPT convencional se requiere de cobre con alta pureza para lograr una buena resistencia de tierra, sin embargo, el costo de este material es elevado, siendo \$9.91 el metro y \$9.57 por cada kilo, mientras que en el acero inoxidable su costo por kilo es de \$6 apropiadamente, siendo un 37% más económico que el cobre desnudo.



Imagen 9. Costo del conductor por cada kilo de material

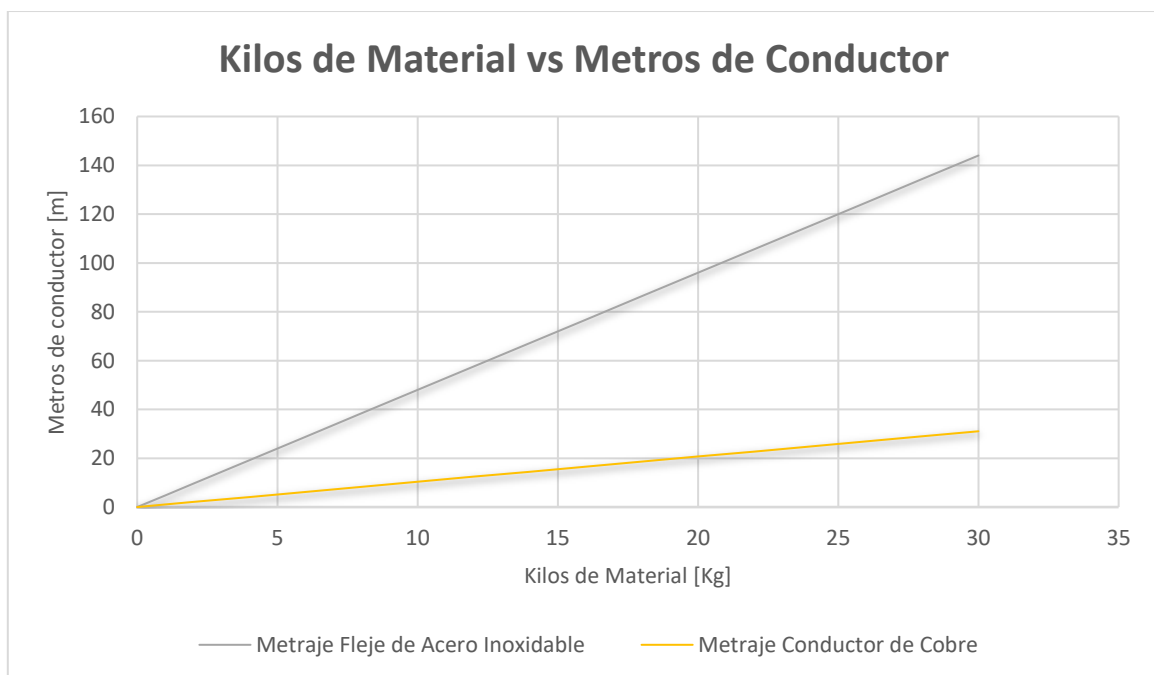


Imagen 10. Metraje de conductor por cada kilo de material

El metraje que viene por cada kilo de material aumenta el beneficio económico que tiene el fleje de acero inoxidable, su forma rectangular reduce el efecto piel que directamente se ve reducido en la cantidad de material que está compuesto, por lo que en un kilo de material hay 4.8 [m] de longitud mientras que en el cobre solo se tendría un metro de conductor, la Imagen 10 Metraje de conductor por cada kilo de

material indica la relación que existe entre el metraje por cada kilo, por lo que para este proyecto la alternativa convencional consta de 796 [kg] de cobre desnudo que equivale a 824 [m] mientras que para los 913 [m] de fleje de acero inoxidable solamente equivale 190 [kg], una diferencia de 606 [kg] que en costo monetario representa \$ 2.203,42 lo que se puede considerar un ahorro considerable en material.

3.1.1 Comparación de vida útil

El SPT de acero inoxidable incrementa linealmente al considerar el costo anual del mantenimiento predictivo y preventivo, esto es un factor común para las hipótesis planteadas, sin embargo, debido a que el costo inicial de inversión para ambos sistemas es distinto se tiene que decidir cuál es el más rentable, el SPT de acero inoxidable tiene un valor inicial de \$4.064,23 en el año cero y termina su vida útil con un costo total de \$6.265,03, en cambio, si se tiene un mantenimiento correctivo cada dos años para alargar la vida útil del SPT convencional con un costo inicial de \$11.662,31 terminará con un costo de \$16.151,81 en los 15 años de vida útil del sistema referencial, la última alternativa y la poco viable es esperar a que se corroe completamente el material de cobre del SPT convencional para realizar la reparación y renovación del sistema cada 5 años, esta es la alternativa con el mayor costo final de \$35.930,13.

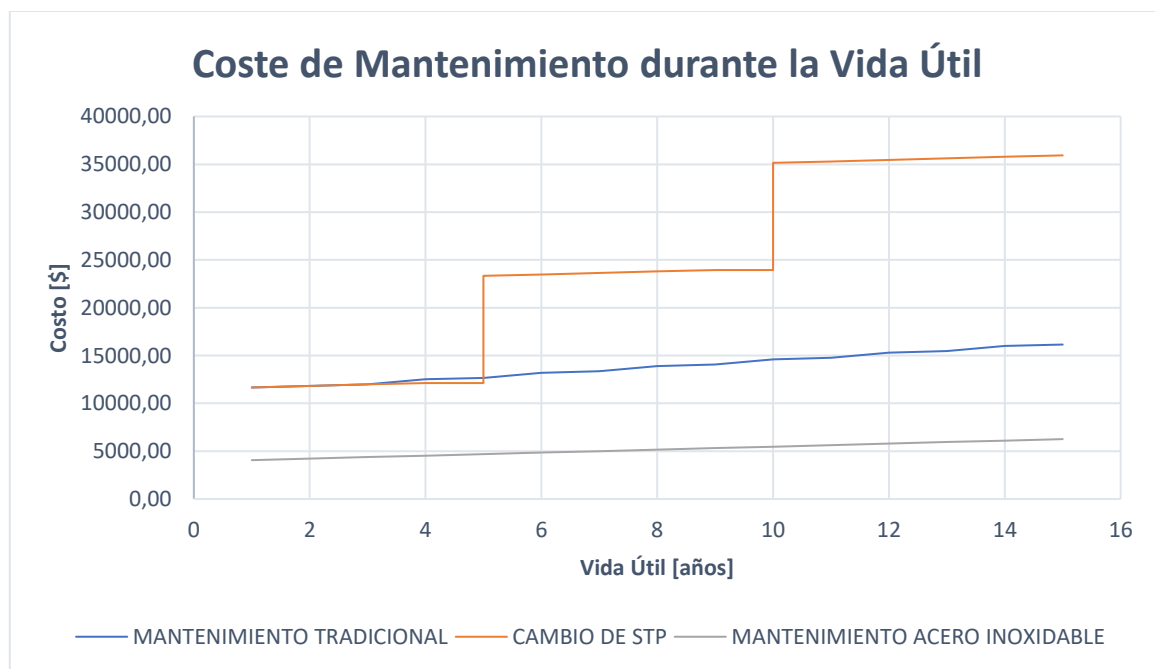


Imagen 11. Comparación de vida útil entre materiales

El resultado visible de los costos de mantenimiento durante la vida útil que tiene el SPT de acero inoxidable muestra el beneficio que esta entrega a la instalación, la resistencia a la corrosión aumenta su propuesta de valor, ya que, comparado al mantenimiento del sistema convencional con la reposición del sistema, se está ahorrando aproximadamente 2.5 veces el costo inicial del SPT de acero inoxidable.

3.2 Comparación entre una instalación convencional de Cobre Vs instalación alternativa De Acero Inoxidable

3.2.1 Instalación de Sistema de Puesta a Tierra en Babahoyo

La resistencia de puesta a tierra instalada en acero inoxidable (Imagen 13) no presenta diferencias que podrían ser consideradas como dañinas para el sistema al igual que la resistencia encontrada en el sistema convencional (Imagen 12); debido a que ambas instalaciones se encuentran dentro de los valores reglamentarios establecido por el criterio de la norma IEEE Standard 80.



Imagen 12. Sistema de puesta a tierra convencional para un transformador en La Ventura en la ciudad de Babahoyo



Imagen 13. Sistema de puesta a tierra en acero inoxidable en La Ventura en la ciudad de Babahoyo

3.2.2 Instalación de Sistema de Puesta a Tierra para un Transformador en Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas

Debido a que en ambientes de alta salinidad un sistema de cobre y copperweld se deteriora con gran facilidad, la resistencia de estos ya no presentarán valores óptimos para la instalación (Imagen 14); de modo que, para estos ambientes salinos, el acero inoxidable austenítico 304 (Imagen 15) es el más idóneo gracias a su alta resistencia a la salinidad del ambiente, además, de la buena resistencia obtenida para el sistema de puesta a tierra del transformador en la instalación.



Imagen 14. Medida registrada el 09 de enero del año 2019 en sistema de puesta a tierra convencional deteriorada en la Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas



Imagen 15. Medida registrada en diciembre del 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en la Playa Mar Bravo

3.2.3 Instalación de Sistema de Puesta a Tierra para Poste 326 de Línea de Transmisión vía Salinas en la provincia de Santa Elena

El sistema de puesta a tierra de acero inoxidable, en un terreno óptimo para su instalación, podría llegar a presentar una resistencia más que aceptable (Imagen 17), que en muchos casos podría llegar a ser incluso mejor que la de un sistema de puesta a tierra convencional de cobre y copperweld en sitio (Imagen 16); demostrando que la brecha de diferencia que tenían estos materiales cada vez es menor en cuanto a diferencias eléctricas y condiciones físicas se refiera.



Imagen 16. Sistema de puesta a tierra convencional en cobre y copperweld para estructura en el POSTE 326 vía Salinas



Imagen 17. Sistema de puesta a tierra en acero inoxidable para estructura en el POSTE 326 vía Salinas

3.3 Análisis de estado de un SPT en Acero Inoxidable previamente instalado

3.3.1 Sistema de Puesta a Tierra en reconectador de Línea de 69kV ubicado en Vía a la Costa en la ciudad de Guayaquil

La resistencia del SPT en acero inoxidable instalado en sitio (Imagen 18 e Imagen 19) se mantiene en valores reglamentarios por el criterio de la norma IEEE std 80, incluso tomando en cuenta las condiciones a las que se encuentra expuesta, dado que observamos, que para las fechas en las que se registró la medición, se ha producido un cambio de estación, por lo cual se ve afectada la resistencia del terreno.



Imagen 18. Medida registrada el 1 de marzo del año 2019 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en Vía a la Costa en Guayaquil



Imagen 19. Medida registrada el 24 de noviembre del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en Vía a la Costa en Guayaquil

3.3.2 Sistema de Puesta a Tierra en transformador de Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas

Se registra una elevación en la medida de la resistencia de puesta a tierra (Imagen 20 e Imagen 21) debido a la variación de fechas en las que se registró la medición, dado que se han producido cambios de estación, por lo cual el terreno se ve afectado; las condiciones del ambiente de la región y el margen de error del equipo de medición provocan que la precisión de este varíe, por lo cual la medición será aproximada, sin embargo, la nueva medida de resistencia se mantiene aceptable.



Imagen 20. Medida registrada el 8 de febrero del año 2019 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en la Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas



Imagen 21. Medida registrada el 17 de diciembre del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en la Playa Mar Bravo en la ciudad de Salinas

3.3.3 Sistema de Puesta a Tierra para Poste 326 de Línea de Transmisión vía Salinas en la provincia de Santa Elena

La resistencia del SPT en acero inoxidable instalado (Imagen 22 e Imagen 23) presenta una elevación en la medida de la resistencia de puesta a tierra debido a los cambios de estaciones de la región, dichas variaciones produjeron ese cambio de medición debido a la afectación del terreno, como también se debe considerar el margen de error del equipo de medición, sin embargo, la nueva medida registrada de la resistencia se encuentra en valores reglamentarios.



Imagen 22. Medida registrada el 19 de enero del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en el Poste 326 de línea de transmisión vía Salinas en Santa Elena



Imagen 23. Medida registrada el 17 de diciembre del año 2020 en sistema de puesta a tierra de acero inoxidable instalado en el Poste 326 de línea de transmisión vía Salinas en Santa Elena

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema de puesta a tierra de acero inoxidable presenta una resistencia similar al de un sistema convencional de cobre y copperweld, que en muchos casos podría llegar a ser mejor que esta, siendo afectados únicamente por la resistividad del terreno dependiente del clima o estado estacionario, manteniendo una resistividad dentro de los valores reglamentarios por el criterio de la norma IEEE-std 80.

La permanencia en sitio que ofrece un sistema de puesta a tierra de acero inoxidable es mayor gracias a su alto punto de fusión que presenta este material, que una presentada por materiales de cobre y copperweld, haciéndolo inviable para los chatarreros que buscan eliminar su trazabilidad para su reventa, ayudando además a que las instalaciones se encuentren protegidas ante fallas; gracias a esto, la vida útil de estos sistemas es incluso mayor que sus competencias, ahorrando los costos que implicaría el darle mantenimientos o reemplazar estos sistemas.

La equivalencia física y mecánica del conductor de cobre desnudo frente al fleje de acero inoxidable presenta un ahorro considerable, por cada metro de conductor de cobre se tiene un aproximado de cinco metros de fleje de acero inoxidable costando solamente un 13% del valor por metro de cobre, por esta razón, en una malla de puesta a tierra donde el conductor desnudo de cobre es el 75% del costo total de materiales se ve notablemente la reducción económica respecto al acero inoxidable, es por esto que la diferencia económica de 16% entre el electrodo de acero inoxidable respecto a la de copperweld se compensa en una malla de tierra. Lo que resulta ser más económica la cotización de materiales para una malla de puesta a tierra de una subestación.

Si consideramos el problema de hurto de materiales donde se tiene solamente un electrodo y una bajante, la cotización de materiales cambia, al ser el electrodo el elemento más costoso de ese sistema, el costo de materiales de la alternativa propuesta es mayor a la alternativa convencional de cobre y copperweld, pero debido a la baja demanda que tiene este material en las chatarrerías hacen poco rentable su extracción

por lo que el costo adicional que presenta es suplido por la permanencia que tiene en el sitio instalado, demostrando así la ventaja económica que tiene al corto y largo plazo.

Se recomienda hacer mediciones trimestrales de la resistividad y salinidad del terreno de la instalación para asegurar que este se encuentre trabajando en rangos óptimos, ya que dependiendo de la estación se tendrá una resistencia adecuada para nuestro sistema.

Se recomienda considerar instalaciones de puesta a tierra de acero inoxidable en ambientes con altas tasas de salinidad, debido a la alta resistencia a la corrosión del material, manteniendo su permanencia y funcionalidad en la instalación durante la vida útil estimada por fabricante, ahorrando la reposición de elementos corroídos que sí tendríamos en un sistema de puesta a tierra convencional de cobre y copperweld.

Se recomienda el uso de flejes de acero inoxidable en reemplazo de conductor de cobre desnudo 4/0 para la instalación de una malla de puesta a tierra, ya que debido a su forma rectangular se disminuye el efecto piel manteniendo la capacidad de conducir corriente, disminuyendo directamente la cantidad de material necesario y con ello el precio de este.

El acero inoxidable no es hurtado porque no tiene valor de reventa, ya que su punto de fusión es mucho más alto, lo que implica que se tiene que invertir mayor energía para poder fundirlo a comparación del cobre puro, afectando además a sus propiedades en el proceso de fundición, llegando a perder las mismas.

Se recomienda el uso del acero inoxidable como material alternativo en instalaciones residenciales, ya que la brecha de diferencia en precios que presentarán estos con respecto a los sistemas convencionales de cobre y copperweld estará justificada al tener una vida útil mayor que los convencionales, compensando esta diferencia de precio en el ahorro debido al mantenimiento o reposición de partes desgastadas o hurtadas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. García Márquez, *LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELECTRICAS*, MARCOMBO S. 1999.
- [2] J. S. Ramírez Castaño and E. A. Cano Plata, *SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA : Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*, Editorial. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES, 2010.
- [3] G. Moreno Ospina, J. Valencia Velásquez, C. Cárdenas Agudelo, and W. Villa Acevedo, "Fundamentos e ingeniería de las puestas a la tierra," *Univ. Antioquia*, 2007.
- [4] C. A. Agudelo Carvajal and G. A. Hincapié Bernal, "Diseño de una herramienta de simulación que permita seleccionar sistemas de puesta a tierra para aplicaciones en baja tensión," INSTITUTO TECNOLOGICO METROPOLITANO, 2018.
- [5] J. H. Briceño Méndez, "Sistemas de Conexión a Tierra en 60Hz," 2003. <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/2161>.
- [6] J. Montaña, *Teoría de puestas a tierra*, ECOE EDICI. 2011.
- [7] C. R. Astudillo Ochoa and M. V. Cajamarca Curillo, "Cálculo de sistemas de puesta a tierra aplicación de la norma IEEE 80-200," Universidad de CUenca, 2012.
- [8] M. E. Hueta Serrano, "Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones," Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008.
- [9] M. P. Idrovo Naranjo, "ESTUDIO DE CORROSION EN MALLAS DE TIERRA," ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, 2001.
- [10] E. D. Padilla, "APLICACIONES DE LOS ACEROS INOXIDABLES," *Rev. del Inst. Investig. (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, vol. 2, 1999.
- [11] E. N. Caliente, S. E. R. V. I. C. lo, S. O. L. Dab, and I. L. Id, "FICHA TECNICA DEL ACERO INOXIDABLE," *Carbone Stainless Steel*, 2010. www.empresascarbhone.com.
- [12] R. A. Chiriboga Guaras, "PROYECTO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMALIZADA PARA CENTROS DE TRANSFORMACION EN EL SECTOR DEL NUEVO AEROPUERTO DE QUITO PARROQUIA DE PABABELA," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008.
- [13] J. Rault Martín, "Pruebas y puesta en servicio del equipo de una subestación," 2001.

- [14] A. R. Nuñez Alvarado, R. F. Reaño Pastor, E. A. Cubas Purihuaman, A. B. Agreda Ramos, and L. J. Otoyá Zegarra, "Analysis of Electrical Grounding for Mining Operations," 2018.
- [15] G. Castellanos, *MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DE TERRRENOS E IMPEDANCIAS DE PUESTA A TIERRA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES, 1993.
- [16] C. Aliau and A. Ramon Pallñas, "Efectos de las capacidades parásitas a tierra en las medidas de impedancia eléctrica con dos terminales," 2011.
- [17] G. Enriquez Harper, *Manual del Técnico en subestaciones eléctricas*, LIMUSA. 2008.

ANEXOS

Anexo 1: Evidencias de problemas internos del país



Imágenes de hurto de materiales estratégicos instalados en sitio



Imágenes de degradación de materiales eléctricos debido a alta salinidad en ambiente



Imágenes de degradaciones en uniones de sistemas de aterramientos debido a par galvánico provocado por junta de metales diferentes

Anexo 2: Imágenes de sistema de puesta a tierra en acero inoxidable



Instalación de SPT de acero inoxidable de estructura de transmisión vía Santa Elena, parte 1



Instalación de SPT de acero inoxidable de estructura de transmisión vía Santa Elena, parte 2



Instalación de SPT de acero inoxidable de estructura de transmisión vía Santa Elena, parte 3

Anexo 3: Mediciones de resistencia en SPT de acero inoxidable



Resistencias de puesta a tierra en acero inoxidable instaladas