



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Análisis y diagnóstico del sistema de puesta a tierra de la S/E 03 Monay

**Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Eléctrico**

Autor:

Pablo André Ambrosi Bustamante

CI: 0704256973

Director:

Ing. Ciro Mauricio Larco Barros, MSc.

C.I. 0102117082

Tutores:

Ing. Silvio Patricio Quituisaca Astudillo, MSc.

C.I. 0103307054

Ing. Darwin Fernando Illescas Verdugo

C.I. 0102495058

Cuenca - Ecuador

15-octubre-2019



RESUMEN:

La importancia del Sistema de Puestas a Tierra en una Subestación Eléctrica, es primordial para que la S/E continúe con la operación de manera correcta. Ante una falla, el sistema de puestas a tierra debe estar diseñado para soportar la corriente de falla a tierra y proporcionar seguridad tanto como para las personas y para los equipos.

Las tensiones de toque y paso no deben ser mayores a las tensiones permisibles para personas con un peso de 70 kg, la evaluación del sistema de puesta a tierra de la S/E 03 Monay se la realizó mediante el uso de la normativa IEEE Std 80 - 2013. El sistema de puesta a tierra que actualmente se encuentra en funcionamiento se ve comprometido por el deterioro de los materiales y el incremento de la corriente de cortocircuito. En este trabajo, se realiza un estudio y un redimensionamiento para que el sistema de puesta a tierra actual vuelva a cumplir con las condiciones de seguridad y con su correcto funcionamiento ante una posible falla.

Finalmente, la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur podrá revisar los diseños para S/E futuras o S/E que se encuentren en operación mediante el programa realizado para el correcto diseño de los sistemas de puesta a tierra en S/E AC usando la norma IEEE Std 80 - 2013.

Palabras clave:

Centro Sur. Conductor. Corriente de falla a tierra. Electrodo. IEEE Std 80 – 2013. Malla de puesta a tierra. Permisibles. Personas. Seguridad. Sistema de puesta a tierra. Tensiones de paso. Tensiones de toque.



ABSTRACT:

The importance of the System of Grounding in an Electric Substation, is essential for the S/E to continue with the correctly operation. In the event of a fault, the grounding system must be designed to withstand the ground fault current and provide safety for people and equipment.

The touch and step voltages must not be greater than the permissible voltages for people with a weight of 70 kg, the evaluation of the system of earthing of the S / E 03 Monay was made by using the IEEE Std - 2013. The grounding system that is currently in operation is compromised by the deterioration of the materials and the increase of the short-circuit current. In this work, a study is made and then a resizing so that the current grounding system returns to comply with the safety conditions and that it performs its correct functioning in the event of a possible failure.

Finally, the Centro Sur Electric Company may review the designs for future S/E or S/E that are in operation through the program for the correct design of grounding systems in S/E AC using the IEEE Std 80 - 2013.

Keywords:

Ground Fault Current. Conductor. Electrode. Grounding Grid, Grounding System, IEEE Std 80 – 2013. Permissible. People. Safety. Step Voltage. Touch Voltage.



ÍNDICE

RESUMEN:	2
ABSTRACT:	3
ÍNDICE	4
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
AGRADECIMIENTOS	13
DEDICATORIA	14
CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS (S/E) DE CORRIENTE ALTERNA (AC).	15
1.1. Generalidades	15
1.1.1. Resumen	15
1.1.2. Objetivos.....	15
1.1.3. Alcance.....	16
1.1.4. Justificación.....	16
1.1.5. Antecedentes	17
1.2. Conceptos Generales	17
1.2.1. Sistemas de puestas a tierra.	17
1.2.2. Malla de puesta a tierra.....	17
1.2.3. Subestación eléctrica.....	18
1.2.4. Puesta a tierra.....	18
1.2.5. Electrodo de tierra, varilla o pica de tierra.....	18
1.2.6. Margen de potencial a tierra (GPR).....	18
1.2.7. Plano de la subestación eléctrica.....	18
1.3. Objetivos de un sistema de puestas a tierra en subestaciones eléctricas	19
1.4. Resistividad del Terreno.	19
1.4.1. Mediciones de la resistividad del suelo	21
1.4.2. Método de Wenner.....	21
1.4.3. Interpretación de mediciones.....	23
1.5. Modelo del suelo	24
1.5.1. Modelo de suelo uniforme.....	24
1.5.2. Modelo de suelo de dos capas.....	25



1.6.	Seguridad en sistemas de puestas a tierra para subestaciones eléctricas AC	26
1.6.1.	Corriente permisible por el cuerpo	26
1.6.2.	Fórmula de duración	27
1.6.3.	Voltaje de paso	28
1.6.4.	Voltaje de toque o de contacto.....	29
1.6.5.	Valores permisibles o tolerables de tensiones de paso y de contacto	29
CAPÍTULO 2. NORMATIVA IEEE STD 80 – 2013		32
2.1.	Descripción de la normativa.....	32
2.2.	Parámetros para diseño	32
2.2.1.	Corriente Máxima de falla.....	33
2.2.2.	Corriente de Falla IFalla	34
2.2.3.	Factor de decremento Df.....	35
2.3.	Factor de División de Corriente (Sf)	37
2.4.	Duración de Falla t_f y Choque.....	37
2.5.	Medidas de Resistividad del Suelo y Capa Superficial.....	37
2.6.	Modelado del Suelo Bicapa.....	39
2.7.	Selección del conductor	39
2.7.2.	Corrientes Simétricas.....	42
2.8.	Modelado y Geometría de malla del SPT	43
2.8.1.	Voltaje de Malla V_m o contacto.....	44
2.8.2.	Voltaje de Paso V_s	47
2.9.	Valores de voltaje de contacto y de paso permisibles o tolerables	48
2.10.	Criterio de Validación del Diseño	48
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL ACTUAL SISTEMA DE PUESTAS A TIERRA.....		50
3.1.	Análisis de incremento de corriente de corto circuito	50
3.2.	Mediciones de la Resistividad del Suelo.....	58
3.2.1.	Medición de la resistencia de la malla de puesta a tierra	59
3.3.	Recolección de Datos.....	61
3.3.1.	Plano y Área de la Subestación	61
3.3.2.	Área de la Malla del Sistema de Puesta a Tierra original y actual.	64
3.3.3.	Tiempos de despeje de Falla	65
3.4.	Uso de la normativa IEEE Std 80 – 2013 para el análisis.	65
3.5.	Presentación y Verificación de resultados	76
CAPÍTULO 4 “ REDIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA ACTUAL ”		78
4.1.	Uso de la normativa IEEE Std 80 – 2013.	78
4.1.	Selección del conductor:	81



4.2.	Cálculo de valores propios del Sistema de Puesta a Tierra	81
4.3.	Tensiones permisibles de toque y paso:	86
4.4.	Validación, simulación y presentación de resultados.....	87
4.5.	Comparación del diseño actual con sistema de puesta a tierra en funcionamiento	90
4.6.	Ventajas del Redimensionamiento	91
4.7.	Desventajas del redimensionamiento	91
4.8.	Presupuesto del redimensionamiento	92
4.8.1.	Presupuesto eléctrico	92
4.8.2.	Presupuesto de obra civil:	92
4.9.	Factibilidad para desarrollar el proceso de redimensionamiento	93
4.10.	Conclusiones del Proyecto	93
CAPÍTULO 5. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA S/E AC.....		95
5.1.	Presentación del programa.....	95
5.2.	Guía de uso.....	97
5.3.	Ejemplo de aplicación	101
5.4.	Conclusiones.....	110
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		111
6.1	. Conclusiones Generales	111
6.1.1.	Conclusiones Específicas.....	112
6.2	. Recomendaciones	112
Bibliografía.....		114



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Método de Wenner de las 4 puntas o picas [2].....	22
Figura 1. 2. Modelo de suelo de dos capas.....	25
Figura 1. 3. Exposición a la voltaje de paso [1].....	28
Figura 1. 4. Exposición a la voltaje de contacto [1].....	29
Figura 3. 1. Curva de comportamiento de Corrientes de Cortocircuito trifásico para la S/E 03 Monay años 2008 – 2018.....	57
Figura 3. 2. Curva de comportamiento de Corrientes de Cortocircuito monofásico para la S/E 03 Monay años 2008 – 2018.....	57
Figura 3. 3 Ground Tester AEMC Model 6472 [3].....	58
Figura 3. 4. Diagrama de conexión Método de Wenner [3].....	59
Figura 3. 5. Valor de resistividad obtenido mediante medición.....	59
Figura 3. 6. Diagrama de conexión Método Caída de Potencial 62% 3 Polos. Fuente: Manuel de usuario del equipo AEMC 6472 [3].....	60
Figura 3. 7. Valor medido al 62% Caída de Potencial.....	61
Figura 3. 8. Levantamiento Planimétrico S/E 03. Fuente Centro Sur.....	62
Figura 3. 9. Representación del perímetro de toda la S/E 03.....	63
Figura 3. 10. Valores del área y perímetro de la S/E 03.....	63
Figura 3. 11. Dimensiones de la Malla de SPT original de la S/E 03 (1982).....	64
Figura 3. 12. Área y Perímetro de la malla de puesta a tierra actual S/E 03.....	64
Figura 3. 13. Corriente de cortocircuito, calibre de conductor y tiempo de falla [4].....	73
Figura 4. 1. Redimensionamiento de la nueva malla.....	81
Figura 4. 2. Área de la nueva malla en la S/E 03.....	82
Figura 4. 3. Malla de puesta a tierra repotenciada.....	88
Figura 4. 4. Representación del suelo y malla de puesta a tierra redimensionada.....	88
Figura 4. 5. Resultados obtenidos mediante simulación.....	89
Figura 4. 6. Valores obtenidos de la simulación de la malla de puesta a tierra redimensionada.....	89
Figura 5. 1. Cuadrícula con picas verticales de 7.m de longitud [1].....	107



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Valores de resistividad del terreno [6].....	20
Tabla 2. 1. Valores típicos de Df [1].	36
Tabla 2. 2. Constantes de materiales [1].	41
Tabla 2. 3. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, X/R =40; corrientes en kA [1].....	42
Tabla 2. 4. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, X/R =20; corrientes en kA [1].....	42
Tabla 2. 5. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, X/R =10; corrientes en kA [1].....	43
Tabla 2. 6. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, X/R = 0; corrientes en kA [1].....	43
Tabla 2. 7. Tabla resumen de fórmulas.....	48
Tabla 3. 1. Valores de cortocircuito trifásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 1.....	51
Tabla 3. 2. Valores de cortocircuito trifásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 2....	52
Tabla 3.3. Valores de cortocircuito monofásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 1.	53
Tabla 3. 4. Valores de cortocircuito monofásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 2.	54
Tabla 3. 5. Valores de cortocircuito monofásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 3.	55
Tabla 3. 6. Valores de cortocircuito monofásico de máxima generación S/E 03 MONAY – parte 4.....	56
Tabla 3. 7. Tabla Resumen Valores de cortocircuito trifásico y monofásico de máxima generación S/E 03 MONAY.....	56
Tabla 3.8. Medición de resistividad del terreno mediante el Método de Wenner.....	58
Tabla 3.9. Tabla de Registro de Mediciones – Método Caída de potencial 62.....	60
Tabla 3.10. Valores de seteo de protecciones en las S/E de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.....	65
Tabla 3.11. Valores para verificación de diseño.....	66
Tabla 3.12. Calibre del conductor, área nominal y diámetro [6].....	67
Tabla 3.13. Tabla Resumen de presentación de resultados.....	77
Tabla 4. 1. Valores para verificación de diseño.....	79
Tabla 4. 2. Tabla Resumen de presentación de resultados obtenidos mediante cálculo.....	88
Tabla 4. 3. Tabla comparativa entre valores obtenidos por el autor y la simulación.....	89
Tabla 4. 4. Tabla comparativa entre sistema de puesta a tierra actual de la S/E 03 y el diseño propuesto para el redimensionamiento.....	90
Tabla 4. 5. Costo de materiales eléctricos.....	92
Tabla 4. 6. Presupuesto de obra civil.....	93
Tabla 5. 1. Primera hoja de cálculo usada para determinar el calibre mínimo del conductor.....	95
Tabla 5. 2. Segunda hoja de cálculo usada para sistemas de puestas a tierra con forma de cuadrícula y con picas.....	96
Tabla 5.3. Tercera hoja de cálculo usada para sistemas de puestas a tierra con forma rectangular y con picas.	96
Tabla 5.4. Ingreso de Datos.....	98
Tabla 5.5. Tabla 2a y 2b.....	98
Tabla 5.6. Cálculos de tensiones de contacto y paso en las Tablas 3 y 4.....	99
Tabla 5.7. Tensiones permisibles de paso y contacto.....	99



Tabla 5.8. Ingreso de Datos.....	100
Tabla 5.9. Tabla 2a y 2b.....	100
Tabla 5.10. Cálculos de tensiones de contacto y paso en las Tablas 3 y 4.....	101
Tabla 5.11. Tensiones Permisibles de paso y contacto.....	101
Tabla 5.12. Paso 1: llenar datos del área del SPT.....	102
Tabla 5.13. Datos que se deben ingresar para el cálculo del calibre mínimo del conductor.....	104
Tabla 5.14. Valores obtenidos de corriente de falla, impedancia transferida y valor de la relación X/R	104
Tabla 5.15. Datos de ingreso y valor de Cs.....	106
Tabla 5.16. Tensiones permisibles de toque y paso.....	106
Tabla 5.18. En las tablas 2a y 2b se presentan los resultados obtenidos del cálculo de: área del sistema de puesta a tierra, longitud total de conductores, factor K, calibre mínimo del conductor y GPR.....	107
Tabla 5.19. En las tablas 3 y 4 se muestran los valores de los parámetros, voltajes de contacto y de paso para el diseño del sistema de puesta a tierra.....	109



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Pablo André Ambrosi Bustamante en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis y diagnóstico del sistema de puesta a tierra de la S/E 03 Monay", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Octubre 2019

Pablo André Ambrosi Bustamante

C.I: 0704256973



Cláusula de Propiedad Intelectual

Pablo André Ambrosi Bustamante, autor del trabajo de titulación “Análisis y diagnóstico del sistema de puesta a tierra de la S/E 03 Monay”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Octubre 2019

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'Pablo André Ambrosi Bustamante'.

Pablo André Ambrosi Bustamante

C.I: 0704256973



**ESTA TESIS HA SIDO DESARROLLADA DENTRO DEL CONVENIO ENTRE LA
UNIVERSIDAD DE CUENCA Y LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO
SUR C.A.**



AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios y a mis dos ángeles que están en el cielo (Héctor y Celia) por permitirme conseguir uno de los tantos objetivos que tengo en mente.

A mi madre Jenny, a mi padre Pablo, a mi esposa María José, a mi hijo Pablito y a mi familia.

Al Ing. Ciro Larco Barros director de tesis, y al Ing. Walter Dután, por ayudarme y guiarme con el desarrollo de mi trabajo final. Me siento contento que la experiencia y la sabiduría de estos excelentes profesionales formen parte de mi querida Universidad de Cuenca.

A mis tutores empresariales, Ing. Patricio Quituisaca e Ing. Fernando Illescas por la apertura y el apoyo que se me brindó durante el desarrollo de mi tesis. Agradezco a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur por acogerme como pasante y , experiencias que me ayudan a formarme como profesional.

Finalmente, a mis maestros y a mis amigos, que me acompañaron durante estos 5 años en la Universidad de Cuenca.

Pablo André.



DEDICATORIA

A Dios, a Héctor y Celia, que, aunque no estén conmigo físicamente, la luz de sus espíritus me acompaña en mi camino.

Mi trabajo va con especial dedicatoria a mi Madre, Jenny Dolores Bustamante Armijos quien siempre tuvo fe y depositó su confianza en mí. Madre lo que tu sembraste es momento de que lo empieces a cosechar, te amo.

Amores míos, María José, Pablito, la paciencia y el tiempo que me han dado serán recompensados. Los amo.

Familia y amigos lo logré.

Pablo André Ambrosi Bustamante.



CAPÍTULO 1. SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES ELECTRICAS (S/E) DE CORRIENTE ALTERNA (AC).

1.1. Generalidades

1.1.1. Resumen

Se plantea realizar el análisis y el diagnóstico del Sistema de Puesta a Tierra (SPT) de la S/E 03 Monay propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur. El cambio de la matriz energética del país, la inclusión de nuevas centrales de generación, cambios en las topologías de la red y la introducción de nuevos elementos hacen que las corrientes de cortocircuito incrementen notablemente. Esta es la razón por la cual se debe revisar el sistema de puesta a tierra de las S/E de corriente alterna (AC), que tengan algunos años de existencia, en el caso de la S/E 03 está en operación más de 30 años.

La normativa que se usa para realizar el análisis es la IEEE Std 80 – 2013, se usa esta normativa para el sistema de puesta a tierra actual y el sistema redimensionado propuesto.

Al final de este trabajo, se muestra un programa realizado en Excel para el diseño de puestas a tierra de S/E AC, este programa permite la revisión de los diseños futuros de SPT en S/E AC de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

1.1.2. Objetivos

1.1.2.1. Objetivo General

- Realizar el análisis y diagnóstico; técnico y teórico del SPT de la S/E 03 Monay

1.1.2.2. Objetivos Específicos

- Mostrar las falencias que tiene el SPT actual
- Usar la normativa IEEE Std 80 – 2013 para la evaluación y redimensionamiento del SPT.



- Presentar el diseño alternativo que pueda lograr devolver las condiciones de seguridad al SPT actual.
- Usar software para la validación de resultados.

1.1.3. Alcance

El estudio realizado al sistema de puesta a tierra en la S/E 03 Monay permitirá conocer el verdadero estado del mismo.

Brindar solución para que el sistema de puesta a tierra de esta subestación eléctrica vuelva a cumplir con su objetivo principal.

Dar a conocer las ventajas y desventajas del redimensionamiento del SPT

Trabajar con valores reales y no aproximaciones, esto permite que el diseño sea más exacto.

1.1.4. Justificación

La norma IEEE Std 80 – 2013, es una normativa en la cual la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur puede respaldarse para el desarrollo de diseños de sistemas de puesta a tierra en S/E AC, el principal objetivo es brindar criterios de seguridad para personas y equipos que están dentro de la S/E ante una posible falla o perturbación.

El incremento de las corrientes de corto circuito (CC) presentes en los últimos años, hacen que diseños de sistemas de puestas a tierra en S/E AC seguramente no cumplan con el propósito con el cual fueron diseñados. Para ello es necesario revisar estos diseños y validar si aún cumplen con los criterios de seguridad.



1.1.5. Antecedentes

Ante el crecimiento poblacional y de industrias, el factor de demanda es mucho mayor en la actualidad que desde mediados de los 80 en que la S/E 03 empezó su funcionamiento. En la S/E 03 se usó una corriente de cortocircuito de 8kA para el diseño del SPT, actualmente se han registrado corrientes de cortocircuito por encima de los 15 kA. Debido al incremento de la corriente de corto circuito en la S/E es necesario revisar el Sistema de Puesta a Tierra (SPT); las mejoras que se realicen en la S/E 03 deben de ir de la mano con el SPT que cumpla con condiciones actuales y proyecciones de corrientes.

1.2. Conceptos Generales

1.2.1. Sistemas de puestas a tierra.

El sistema de puesta a tierra, es el sistema más básico e indispensable en un circuito eléctrico de corriente alterna. El sistema de puesta a tierra es la conexión o el conjunto de conexiones que se realiza desde el dispositivo o los dispositivos eléctricos o electrónicos hacia el suelo ya sea que estos estén dentro de la instalación o cerca de ella. Básicamente son uniones de conductores enterrados a una misma profundidad que forman mallas, estas mallas son conectadas hacia cada uno de los dispositivos consiguiendo la unión eléctrica del circuito con la tierra. La conexión de los elementos a tierra se da para evitar diferencias de potenciales que afecten a los equipos o al personal que se encuentre dentro de la instalación [5].

1.2.2. Malla de puesta a tierra.

La malla de puesta a tierra o también llamada red de puesta a tierra, es un sistema con interconexiones de arreglos de picas y conductores formando un arreglo en un patrón sobre una superficie específica y enterrada bajo la superficie del suelo [1].



1.2.3. Subestación eléctrica.

Una subestación eléctrica es una exteriorización física de un nodo eléctrico de potencia, en el cual se transforma la energía a niveles de voltaje que permitan realizar su transporte, distribución o consumo, cumpliendo con determinados requisitos de calidad.

1.2.4. Puesta a tierra.

Consiste en que un sistema, circuito o artefacto dotado de una tierra o varias tierras establezca un circuito de retorno por tierra, logrando mantener su potencial aproximadamente igual al potencial de tierra [1].

1.2.5. Electrodo de tierra, varilla o pica de tierra.

Consiste en un conductor incrustado en la tierra y usado para recolectar y drenar la corriente de tierra hacia el suelo.

1.2.6. Margen de potencial a tierra (GPR).

Es el máximo potencial eléctrico que la malla del sistema de puesta a tierra de una subestación eléctrica puede alcanzar en relación a un punto de conexión a tierra lejana localizada al potencial de tierra remota [1].

Es igual a la corriente máxima de la malla por la resistencia de la malla del sistema de puesta a tierra.

1.2.7. Plano de la subestación eléctrica.

El plano de la subestación eléctrica deberá mostrar el área que será ocupada por toda la subestación y su red de puestas a tierra. También este plano debe incluir la distribución física de todos los equipos



eléctricos de potencia con acotaciones a escala, tomando en cuenta que la subestación podría tener cambios a futuro.

1.3. Objetivos de un sistema de puestas a tierra en subestaciones eléctricas.

Los objetivos de un SPT son:

- a) Incrementar la confiabilidad de la operación de la subestación eléctrica reduciendo las interrupciones de servicios causadas por fallas o perturbaciones.
- b) Mantener la seguridad del personal que se encuentra laborando dentro de la subestación eléctrica.
- c) Reducir los daños en los equipos de la subestación eléctrica ocasionados por fallas o perturbaciones.
- d) Mantener la correcta operación del sistema de puesta a tierra con los dispositivos de protecciones.
- e) Disipar descargas atmosféricas en caso de ocurrencia.
- f) Asegurar y mantener la vida útil de los equipos teniendo en cuenta el correcto diseño del sistema de puesta a tierra
- g) Drenar las corrientes de falla a tierra en caso de existir alguna falla [5].

1.4. Resistividad del Terreno.

Uno de los parámetros y el primero para tomar en cuenta en el diseño de un sistema de puestas a tierra o para el análisis de un sistema ya existente, es el análisis de la resistividad del terreno o suelo.

La resistividad eléctrica del suelo (ρ) es la resistencia de un volumen o porción de suelo con un área unitaria (A) y una longitud unitaria (l).

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (\Omega - m) \quad \text{Ecuación 1. 1 [1]}$$

donde:

R es Resistencia del suelo o terreno (medida)



La resistividad del terreno está determinada principalmente por su composición física del suelo en el lugar donde se realiza la prueba, así como también el clima de la zona (lluvias, humedad, temperatura, sequías, heladas).

Los factores que modifican la resistividad de los terrenos pueden ser:

- La composición
- Las sales solubles y su concentración
- Es estado higrométrico
- La temperatura
- La granulometría
- La compacidad
- La estratigrafía

Para los fines en el diseño e implementación del sistema de puestas a tierra, el suelo debe ser un buen conductor eléctrico (propiedad de alta conductividad eléctrica) [6].

En la Tabla 1.1. se muestran valores típicos de resistividad de terrenos.

Tabla 1. 1. Valores de resistividad del terreno [6]

Valores Típicos de Resistividad de los Terrenos	
Tipo de Suelo	Resistividad ($\Omega - m$)
Húmedo o suelo orgánico	10 – 50
Cultivo arcilloso	100
Arenoso húmedo	200
Arenoso seco	1,000
Con guijarro y cemento	1,000
Rocoso	3,000
Roca compacta	10,000



1.4.1. Mediciones de la resistividad del suelo

Las estimaciones en base a la clasificación del suelo son solamente una aproximación de la resistividad. Se deben realizar mediciones mediante distintas pruebas en varios lugares dentro del área de la subestación. El suelo posee varias capas de distintos valores de resistividad a distintas profundidades, las mediciones que se deben de realizar dependerán mucho de la precisión de los equipos de medida y del método usado para la medición [5].

En caso de que la resistividad varíe considerablemente con la profundidad, se debe de usar un rango más amplio en la separación de las puntas de prueba en los equipos, estas puntas de prueba son más prácticas y mejores cuando su material es de cobre o acero (de bajo valor de resistencia) en forma de varillas con terminación en punta; al tener punta en su lado inferior permiten ser martilladas o incrustadas en el suelo [5].

La norma IEEE Std 81 describe los métodos o técnicas para realizar la medición. El método más usado y que más precisión tiene en la determinación de resistividad de terreno es el Método de Wenner [5].

1.4.2. Método de Wenner.

El Método de Wenner se basa en un proceso en el cual se involucran 4 electrodos o picas de pruebas dispuestos en línea recta y equidistantes entre sí, están ubicados simétricamente con respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del terreno.

Para realizar la medición se debe de usar un telurómetro, el cual usa dos electrodos en los extremos para la inyección de corriente de medida en el terreno y dos electrodos en la parte central para la medición del potencial de tierra; obteniendo como resultado un valor de resistencia óhmica en el instrumento.

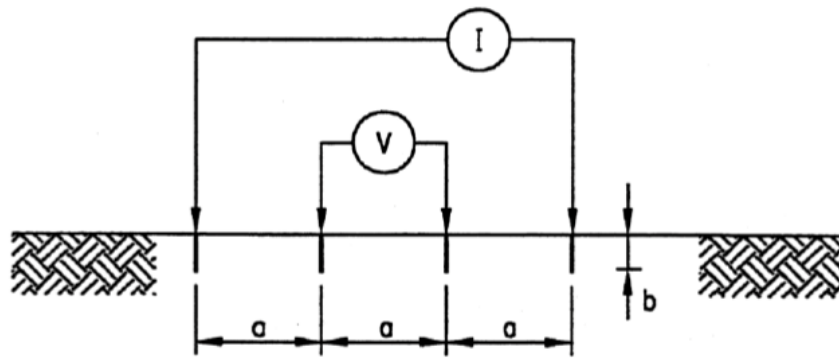


Figura 1. 1. Método de Wenner de las 4 puntas o picas [2].

donde:

a: es la separación entre puntas de prueba en metros

b: es la profundidad de enterramiento de las picas en metros

Se entierran las 4 puntas de prueba a lo largo de una línea recta, separadas a igual distancia (**a**) y a una profundidad (**b**).

A través telurómetro que con su fuente interna hace circular una corriente eléctrica I entre las dos puntas externas que están conectadas a los terminales de corriente, y las dos picas internas a los terminales de potencial. El aparato procesa internamente las mediciones e indica en la lectura el valor de la resistencia eléctrica del terreno [2].

El valor de resistividad obtenido es el resultado de la resistividad promedio del sitio a una profundidad $h=3/4 a$.

Del Método de Wenner se obtiene:

$$\rho_a = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \text{Ecuación 1. 2 [1]}$$

donde:

ρ_a : Resistividad aparente del suelo en ohm-m

R: Resistencia medida en ohm



a: Distancia entre electrodos adyacentes en m

b: Profundidad a la cual se han incrustado los electrodos en m

Si el valor de **b** es pequeña en comparación con **a**, en el caso que la penetración al suelo es una distancia corta, la ecuación 2 puede reducirse a:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad \text{Ecuación 1. 3 [1]}$$

Consideraciones:

- Las picas deben estar alineadas
- Las picas deben estar igualmente separadas
- Las picas deben estar clavados en el suelo a una misma profundidad, se recomienda de 10 a 20 cm.
- Las picas deben estar limpias, libres de óxidos y suciedades en su superficie, esto posibilita un buen contacto con el suelo.
- Se debe de registrar la condición del suelo cuando se realiza la toma de mediciones.
- No se deben realizar las mediciones cuando las condiciones atmosféricas no sean favorables.
- Para el manejo del equipo y la realización de las mediciones se debe de utilizar calzado y guantes de aislamiento.

1.4.3. Interpretación de mediciones.

La derivación a un modelo de suelo que sea lo más aproximado a lo real resulta ser la parte más difícil de la medición. La variación del suelo varia lateralmente y la profundidad en relación con las capas del suelo.

Las condiciones locales pueden variar las mediciones y en casos no favorables incidir directamente en el modelado del suelo. El modelo del suelo que se obtiene por las mediciones es solo una aproximación al suelo real.



Los modelos de suelos más usados son tres: el modelo uniforme, el modelo de suelo de dos capas o bicapa y el modelo de suelo multicapa.

La aplicación del suelo uniforme se limita sólo cuando hay variación moderada en la resistividad aparente del terreno.

La aplicación del suelo bicapa es una buena aproximación del suelo real, este modelo consta de una capa superior de profundidad finita y de resistividad diferente y una capa inferior de un espesor infinito.

La aplicación del suelo multicapa puede ser usado para condiciones de suelo bastante variables o condición de suelo más compleja [6].

1.5. Modelo del suelo

El modelo a tomar del suelo es de vital importancia para el diseño del SPT de la S/E, un mal modelo no permite realizar un correcto diseño.

1.5.1. Modelo de suelo uniforme

Un modelo de suelo uniforme es apropiado cuando la gráfica de mediciones de la resistividad del terreno se aproxima a una línea recta horizontal, suponiendo que el suelo tiene la misma composición, compactación, contenido de humedad y cantidad de componentes químicos en toda el área donde se realizará la instalación del patio de la subestación.

La resistividad del terreno puede obtenerse mediante la adopción de una media aritmética de los datos de resistividad aparente medidos como se muestra en la ecuación 1.4

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad \text{Ecuación 1. 4 [1]}$$

donde:

$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$ son los datos medidos de resistividad aparente obtenida de la medición en ohm – m



n el número total de mediciones.

La mayoría de terrenos no cumplen con el criterio de la ecuación.

1.5.2. Modelo de suelo de dos capas.

El suelo de dos capas o bicapa es el modelo más usado y aceptado, este modelo puede ser representado por una capa superior de suelo con una profundidad finita por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio en el valor de la resistividad en la frontera entre las dos capas está representado por un factor de reflexión K , dada por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{Ecuación 1. 5 [1]}$$

donde:

ρ_1 es la resistividad de la capa superior del suelo, en ohm – m

ρ_2 es la resistividad de la capa de suelo mas bajo, en ohm – m

El factor K es positivo cuando la resistividad del suelo aumenta con la profundidad y es negativo cuando disminuye la profundidad.

El factor de reflexión se utiliza principalmente en el análisis del sistema de puesta a tierra cuando está presente una capa de un material que presente un tipo de propiedad aislante por ejemplo roca o grava [5].



Figura 1. 2. Modelo de suelo de dos capas



1.6. Seguridad en sistemas de puestas a tierra para subestaciones eléctricas AC

El criterio de diseño y seguridad del sistema de puesta a tierra tiene que albergar condiciones normales de operación y también condiciones de falla.

El diseño del sistema tiene que incluir la seguridad en tensiones de contacto y de paso, se tiene que evitar el peligro cuando se esté dentro y alrededor de una subestación.

La seguridad en el diseño debe tomarse en cuenta la seguridad en los equipos y de las personas [5].

1.6.1. Corriente permisible por el cuerpo

Los efectos de la corriente en su paso por el cuerpo humano dependen de la magnitud de la frecuencia, tiempo de duración y la trayectoria a través del cuerpo. La magnitud y duración de la corriente conducida a través del cuerpo humano a 50 Hz o 60 Hz debe ser menor que el valor que puede causar fibrilación ventricular del corazón [1].

Los efectos pueden ir desde una simple percepción hasta una fibrilación ventricular. El rango de frecuencias usados en sistemas eléctricos puede ser de 50 o 60 Hz, estas mismas frecuencias corresponden al rango de frecuencias del corazón humano. El cuerpo humano es capaz de soportar niveles de corriente mucho más altas a frecuencias más bajas (corriente continua) o más altas (transitorios por efectos de un rayo o maniobra) [1].

Las corrientes cuyo valor este por encima de los 60 mA, pueden producir fibrilación ventricular, se considera que el cuerpo humano tiene una resistencia de 1000 ohm en los circuitos de choque eléctrico [1].

La impedancia equivalente en el circuito de choque, es representada por la resistencia del cuerpo R_B y la resistencia de contacto a tierra o resistencia de pie. Para las tensiones de toque y contacto involucra un shock de una mano a ambos pies [1].



Se presentan casos en los que el choque se da de mano a mano, este choque es producto por la transferencia de voltaje por el contacto metal – metal con las manos [1].

1.6.2. Fórmula de duración

Con base en los resultados de los estudios de Dalziel, se supone que el 99.5% de todas las personas puede soportar de forma segura, sin producirse fibrilación ventricular, el paso de una corriente con magnitud y la duración determinada por la fórmula siguiente [1]:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 6 [1]}$$

Dalziel, y otros (Dalziel, Lagen, Thurston); Dalziel y Massogilia, establecen la magnitud de la corriente para no llegar al punto de la fibrilación I_B en periodos de tiempo que van de 0,03 segundos a 3 segundos y se relaciona directamente con la cantidad de energía que absorbe el cuerpo, como se muestra a continuación [1]:

$$S_B = (I_B)^2 t_s \quad \text{Ecuación 1. 7 [1]}$$

donde:

I_B es la magnitud en RMS de la corriente que circula por el cuerpo (Amperios)

t_s es la duración en segundos a la exposición de la falla

S_B es la constante empírica con relación a la energía del choque eléctrico tolerado por un porcentaje de la población

Quedando:

$$k = \sqrt{S_B} \quad \text{Ecuación 1. 8 [1]}$$

Dalziel en su estudio descubrió que la energía de choque a la que puede sobrevivir un 99,5% de las personas con peso aproximado a 50 kg es un valor para $S_B = 0.0135$; obteniendo un valor de $K = 0.116$. Reemplazando en la fórmula de la corriente permitida por el cuerpo [1]:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 9 [1]}$$

Mientras que, para un peso de 70 kg, el valor para $S_B = 0.0246$; obteniendo un valor de $K = 0.157$. Reemplazando en la fórmula de la corriente permitida por el cuerpo [1]:

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 10 [1]}$$

1.6.3. Voltaje de paso

Es la diferencia de potencial en la superficie que experimenta una persona dando un paso de una distancia de 1 metro con los pies sin tocar algún objeto puesto a tierra [1].

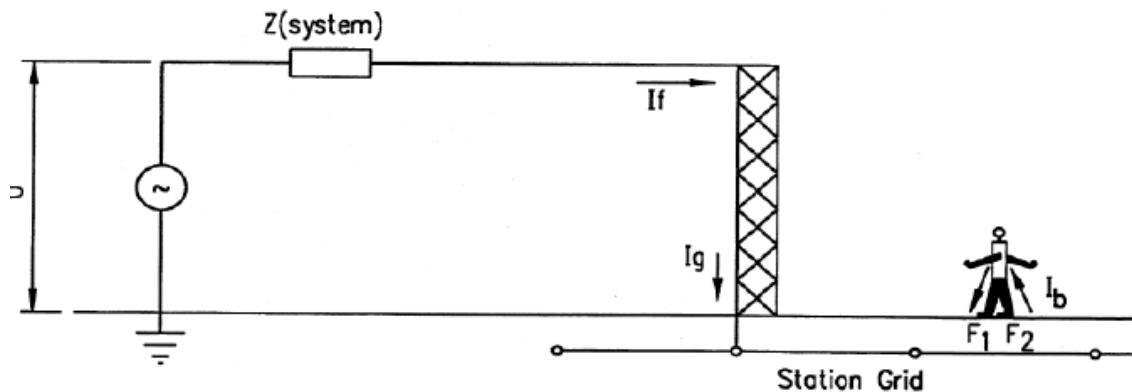


Figura 1. 3. Exposición a la voltaje de paso [1].

1.6.4. Voltaje de toque o de contacto

Es la diferencia de potencial existente entre el GPR y la superficie potencial en el punto donde una persona está de pie con una mano en contacto con una estructura aterrizada [1].

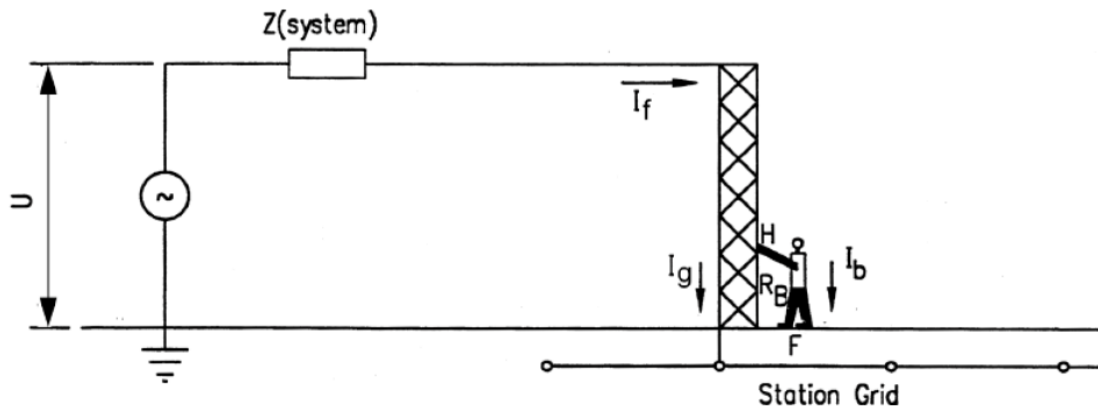


Figura 1. 4. Exposición a la voltaje de contacto [1].

1.6.5. Valores permisibles o tolerables de tensiones de paso y de contacto

La seguridad de las personas depende de la prevención de la cantidad de energía de choque sea absorbida antes de que exista un despeje de falla y el sistema quede sin energía. El voltaje máximo que se puede dar en un circuito accidental no puede superar los límites definidos a continuación:

1.6.5.1. Límite en el Voltaje de Paso y Contacto:

De acuerdo a la IEEE Std 80 – 2013:

$$V_{paso} = (R_B + 2R_f)I_B \quad \text{Ecuación 1. 11 [1]}$$

$$V_{toque} = (R_B + \frac{R_f}{2})I_B \quad \text{Ecuación 1. 12 [1]}$$



donde:

R_B es la resistencia del cuerpo de una persona

R_f es la resistencia de tierra del pie sobre una delgada capa de material superficial.

1.6.5.1.1. Voltaje de Paso para persona con peso corporal de 50 kg.

La IEEE Std 80 – 2013 establece la siguiente fórmula para el cálculo del voltaje de paso para una persona de 50 kg de peso corporal.

$$V_{paso_{50kg}} = (1000 + 6 * C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 13 [1]}$$

1.6.5.1.2. Voltaje de Paso para persona con peso corporal de 70 kg.

La IEEE Std 80 – 2013 establece la siguiente fórmula para el cálculo del voltaje de paso para una persona de 70 kg de peso corporal.

$$V_{paso_{70kg}} = (1000 + 6 * C_s \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 14 [1]}$$

1.6.5.1.3. Voltaje de Contacto para una persona con peso corporal de 50 kg.

La IEEE Std 80 – 2013 establece la siguiente fórmula para el cálculo del voltaje de contacto para una persona de 50 kg de peso corporal.

$$V_{contacto_{50kg}} = (1000 + 1.5 * C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 15 [1]}$$



1.6.5.1.4. Voltaje de Contacto para una persona con peso corporal de 70 kg.

La IEEE Std 80 – 2013 establece la siguiente fórmula para el cálculo del voltaje de contacto para una persona de 70 kg de peso corporal.

$$V_{\text{contacto}_{70\text{kg}}} = (1000 + 1.5 * C_s \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ecuación 1. 16 [1]}$$

donde:

C_s es el factor de reducción que se da debido a la presencia de una capa superficial de material

ρ_s es la resistividad del material superficial en ohm – m

Si existe un recubrimiento con un material en la superficie de la subestación se puede agregar una resistencia significativa al circuito de falla equivalente; si existe una superficie de cubierta bastante delgada, la resistencia del pie puede ser calculada simplemente con el reemplazo del valor de la resistividad del material de recubrimiento y finalmente, si la superficie de la capa superficial no es muy delgada, la resistividad de la capa se reduce por un factor C_s (factor de reducción), que se lo puede obtener a partir de [1]:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad \text{Ecuación 1. 17 [1]}$$



CAPÍTULO 2. NORMATIVA IEEE STD 80 – 2013

2.1. Descripción de la normativa

La Guía IEEE para la Seguridad en las Puestas a Tierra de Subestaciones de CA, es una normativa que su objetivo principal es el correcto diseño de los sistemas de puestas a tierra en Subestaciones Eléctricas de CA de tipo convencionales o aisladas en gas, incluyendo las Subestaciones de distribución, transmisión y las presentes en plantas generadoras.

En esta versión introduce algunas modificaciones, uno de los más importantes es el cálculo de la capacidad térmica por unidad de volumen (TCAP) de materiales no enlistados, también introduce evaluaciones de tipo comparativo de los diseños realizados y los simulados, ayudando a la mejor aplicación de la normativa.

El propósito de esta normativa, es el de dar la orientación e información para obtener instalaciones de puestas a tierra seguras en las Subestaciones Eléctricas de CA.

Básicamente la norma realiza la comparación entre los voltajes permisibles de contacto y de paso con los voltajes de toque y paso que se obtienen a partir del arreglo del sistema de puesta a tierra.

2.2. Parámetros para diseño

Para el diseño del sistema se debe de tener en consideración parámetros como:

- Corriente simétrica y máxima de malla
- Corriente de falla
- Factor de decremento
- Factor de crecimiento



A continuación, se realiza una explicación breve de cada uno de estos parámetros:

2.2.1. Corriente Máxima de falla

Existen dos tipos de corrientes, la primera es la simétrica y la segunda es la corriente de red.

2.2.1.1. Corriente Simétrica de la Malla (I_g)

Es el valor RMS de la corriente simétrica de malla dada en Amperios

2.2.1.2. Corriente Máxima de Red o de Malla (I_G)

La corriente Máxima de Red o de Malla, es la corriente máxima en Amperios de diseño que podrá circular por la malla o la red de puesta a tierra. Se la calcula mediante [1]:

$$I_G = C_p * D_f * I_g \quad \text{Ecuación 2. 1 [1]}$$

Donde los parámetros C_p , D_f e I_g son:

C_p es el factor de proyección para el futuro incremento de la corriente de falla durante el periodo de vida útil de la subestación.

D_f es el factor de decremento para el tiempo de la duración total de la falla t_s

I_g es el valor de la corriente simétrica de la malla



2.2.2. Corriente de Falla (I_{Falla})

Es la corriente que es conducida por la red directamente hacia tierra.

Existen dos tipos de corriente de falla:

2.2.2.1. Corriente de falla asimétrica efectiva (I_F)

Es el valor en RMS de la onda que forma la corriente asimétrica, integrada en el intervalo de tiempo, que es el tiempo que tendría la duración de la falla.

$$I_F = D_f * I_f \quad \text{Ecuación 2. 2 [1]}$$

donde:

D_f es factor de decremento

I_f es corriente de falla simétrica dada en Amperios

2.2.2.2. Corriente de falla simétrica (I_f)

La corriente de máxima en RMS en Amperios después del instante del inicio de la falla a tierra.

En fallas fase – tierra:

$$I_{f(0+)} = 3 I_0'' \quad \text{Ecuación 2. 3 [1]}$$



donde:

$I_{f(0+)}$ es el valor RMS en Amperios de corriente de falla simétrica inicial

I_0'' es el valor RMS de la corriente de falla a tierra simétrica en secuencia cero que se da inmediatamente después del inicio de la falla, esta corriente refleja las reactancias subtransitorias de máquinas rotativas que aportan a la falla.

A esta corriente se la conoce como $3 I_0$, se supone que está corriente inicial simétrica de falla se mantiene constante para el periodo de tiempo que dura la falla [1].

2.2.3. Factor de decremento (D_f)

El factor de decremento, es usado junto con el valor de la corriente de falla simétrica de tierra en los cálculos del sistema de puestas a tierra.

El factor de decremento determina el valor equivalente RMS de la onda de corriente asimétrica para un tiempo t que durará la falla, también representado el efecto que se da por el desplazamiento inicial de corriente continua (DC) y la atenuación durante la falla [1].

El factor de decremento está dado por:

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad \text{Ecuación 2. 4 [1]}$$

o

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad \text{Ecuación 2. 5 [1]}$$

donde:



t_f tiempo de duración de la falla en segundos

T_a constante de tiempo subtransitoria del sistema en segundos

$$T_a = \frac{X''}{\omega R''} \quad \text{Ecuación 2. 6 [1]}$$

en frecuencias de 60 Hz se obtiene:

$$T_a = \frac{X''}{120\pi R''} \quad \text{Ecuación 2. 7 [1]}$$

La ecuación 2.5 es usada en el cálculo del factor D_f para relaciones X/R y tiempos dados en las duraciones de fallas específicas. En la tabla 2.1 se muestra valores típicos de factor de decremento en tiempos dados y relaciones X/R conocidas.

Tabla 2. 1. Valores típicos de D_f [1].

Duración de la falla t_f		Factor de decremento D_f			
Segundos	Ciclos de 60 Hz	$\frac{X}{R} = 10$	$\frac{X}{R} = 20$	$\frac{X}{R} = 30$	$\frac{X}{R} = 40$
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
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052



2.3. Factor de División de Corriente (S_f)

El factor de división de corriente representa la relación inversa que existe entre la corriente de falla simétrica con la cantidad de corriente que va por la red de tierra y el suelo [1].

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad \text{Ecuación 2. 8 [1]}$$

ó

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| \quad \text{Ecuación 2. 9 [1]}$$

Donde

Z_{eq} es la impedancia equivalente del sistema

R_g es la resistencia de puesta a tierra

2.4. Duración de Falla t_f y Choque

Es el periodo de tiempo en segundos en el cual se produce la falla del sistema, este tiempo depende netamente del tipo de esquema de protección usado, la ubicación de la falla y el tiempo de despeje que tomaría a la protección de respaldo en actuar (en caso de existir) [1].

El tiempo de duración de la falla afecta directamente al factor de decremento y a los voltajes permisibles o tolerables [1].

2.5. Medidas de Resistividad del Suelo y Capa Superficial.

La interpretación de los valores de las medidas obtenidos en campo, es la parte más compleja en el diseño del sistema de puestas a tierra. El motivo por el cual se presenta la dificultad, es por la variación de la resistividad en algunos terrenos, esta variación depende mucho de la profundidad de enterramiento del electrodo cuando se realiza la medida [5].



Para medir la resistividad del suelo se emplea el uso de Telurómetros, la precisión de la medida depende ampliamente del método usado y la clase del equipo [5].

Para realizar las mediciones se recomienda, realizar en condiciones climáticas favorables (no realizar mediciones cuando existe presencia de lluvia ya que el agua varía las propiedades del terreno, tampoco realizar mediciones cuando existe presencia de fenómenos como descargas atmosféricas por seguridad del personal), seguir una guía en la que se detalle el lugar o los lugares y el valor que resulta de las mediciones [5].

Como se menciona en el capítulo 1.3 de este trabajo, el método más usado es el de Wenner, las mediciones que se realizarán en el capítulo 3 serán realizadas mediante el uso de este método.

La capa superficial es de suma importancia en el modelado del suelo y también para el diseño del sistema de puestas a tierra de la Subestación [5].

El material de la capa superior debe ser más resistente que el de la capa inferior, la altura de la capa superior no debe ser mayor al de la capa inferior ya que si este supera el valor de altura se puede considerar con un suelo de un solo valor de resistividad, este suelo tomará el valor de la resistividad ρ_1 [5].

El material usado en la capa superficial ayuda en la seguridad del personal debido a que limita el paso de la corriente hacia el cuerpo [5].

El espesor y el material de la capa superficial, aumenta la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de la persona que se encuentra dentro de la subestación [5].



2.6. Modelado del Suelo Bicapa

El modelo de suelo bicapa o suelo de dos capas es la representación más exacta de las condiciones del suelo real. Este modelo consta de una capa superior de profundidad finita de resistividad diferente y de una capa

inferior de un espesor infinito [5]. En el punto 1.4.2. de este trabajo se habla con más detalle del modelo de suelo Bicapa.

2.7. Selección del conductor

Se debe realizar una evaluación al material, área del conductor y propiedades de conductor para que este sea parte del sistema de puestas a tierra de la subestación [5].

Los requisitos básicos con las que deben de cumplir los conductores son los siguientes [5]:

- a) Contar con la conductividad suficiente ante el paso de la corriente de falla
- b) Ser resistente a la fusión y deterioro mecánico ante una eventual falla
- c) Ser robustos y mecánicamente fiables
- d) Ser capaces de continuar con su función ante exposiciones de corrosión o fatiga física [5].

Para la selección del conductor se debe de tener en cuenta factores como: corrientes simétricas, corrientes asimétricas y temperatura.

2.7.1. Corrientes Asimétricas

El corto plazo en el que se da el aumento de la temperatura del conductor y la corriente que circula por este son parámetros importantes en la selección del conductor [5].



Mediante el uso de ecuaciones se produce la evaluación de la capacidad de corriente de cualquier tipo de conductor y material del que está hecho [1].

$$I_f = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \quad \text{Ecuación 2. 10 [1]}$$

Donde

I_f es la corriente RMS en kA

A_{mm^2} es la sección transversal del conductor en mm^2

K_o es $\frac{1}{\alpha_o}$ o $\frac{1}{\alpha_r} - T_r$ en $^{\circ}C$

T_r es la temperatura de referencia para las constantes de material en $^{\circ}C$

T_m es la temperatura máxima permitida en $^{\circ}C$

α_o es el coeficiente térmico de la resistividad a $0^{\circ}C$

α_r es el coeficiente térmico de la resistividad de la resistividad a la temperatura de referencia T_r en $1/^{\circ}C$

ρ_r es la resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r en $\mu\Omega * cm$

t_c es la duración de la corriente en s

TCAP es la capacidad térmica por unidad de volumen, se presentan los valores en la tabla 2.2

α_r y ρ_r se encuentran a la misma temperatura de referencia de T_r en grados centígrados.



Tabla 2. 2. Constantes de materiales [1].

Descripción	Conductividad del material (% IACS)	Factor α_r a 20°C (1/°C)	K_o a 0°C	Temperatura de Fusión T_m (°C)	Resistividad a 20°C ρ_r ($\mu\Omega \cdot cm$)	Capacidad Térmica TCAP $\left[\frac{J}{cm^3 \cdot ^\circ C} \right]$
Cobre, recocido suave	100	0.00393	234	1083	1.72	3.4
Cobre, duro comercial	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.4
Alambre de acero revestido de cobre	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.8
Alambre de acero revestido de cobre	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.8
Varilla de acero revestido de cobre	17.0	0.00378	245	1084	10.1	3.8
Alambre de acero revestido de aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Acero, 1020	10.8	0.00377	245	1510	15.90	3.8
Varilla de acero inox	9.8	0.00377	245	1400	17.50	4.4
Varilla de acero galvanizada	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.9
Acero inox, 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.0

Cuando el tamaño del conductor se da en kcmil, la ecuación 2.9 se convierte en:

$$I_f = 5.07 * 10^{-3} A_{kcmil} \sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)} \quad \text{Ecuación 2. 11 [1]}$$

Quedando el calibre del conductor en kcmil de la siguiente manera:

$$A_{kcmil} = I_f * \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r} \ln \left[\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right) \right]}} \quad \text{Ecuación 2. 12 [1]}$$

2.7.2. Corrientes Simétricas

Debido a que el desplazamiento CD en la corriente de falla de corriente continua hará que el conductor alcance una temperatura más alta para las mismas condiciones de falla (duración y magnitud de la corriente de falla), se debe encontrar un valor equivalente de la corriente simétrica en presencia del desplazamiento CD [1].

Las características de fusión para diversos tamaños de conductor de cobre con diversos grados de desplazamiento de CD se presentan en las Tablas 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6. Estas características de fusión se han derivado teóricamente, y luego ampliamente verificadas experimentalmente (Reichman, Vainberg, y Kuffel) [1].

Tabla 2. 3. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, $X/R = 40$; corrientes en kA [1].

Calibre del cable, AWG	Sección nominal, mm^2	6 ciclos (100 ms)	15 ciclos (250 ms)	30 ciclos (500 ms)	45 ciclos (750 ms)	60 ciclos (1 s)	180 ciclos (3 s)
No. 2	33.63	22	16	12	10	9	5
No. 1	42.41	28	21	16	13	11	7
1/0	53.48	36	26	20	17	14	8
2/0	67.42	45	33	25	21	18	11
3/0	85.03	57	42	32	27	23	14
4/0	107.20	72	53	40	34	30	17
250 kcmil	126.65	85	62	47	40	35	21
350 kcmil	177.36	119	87	67	56	49	29

Tabla 2. 4. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, $X/R = 20$; corrientes en kA [1].

Calibre del cable, AWG	Sección nominal, mm^2	6 ciclos (100 ms)	15 ciclos (250 ms)	30 ciclos (500 ms)	45 ciclos (750 ms)	60 ciclos (1 s)	180 ciclos (3 s)
No. 2	33.63	25	18	13	11	9	5
No. 1	42.41	32	22	16	13	12	7
1/0	53.48	40	28	21	17	15	9
2/0	67.42	51	36	26	22	19	11
3/0	85.03	64	45	33	27	24	14
4/0	107.20	81	57	42	35	30	18
250 kcmil	126.65	95	67	50	41	36	21
350 kcmil	177.36	134	94	70	58	50	29



Tabla 2. 5. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, $X/R = 10$; corrientes en kA [1].

Calibre del cable, AWG	Sección nominal, mm^2	6 ciclos (100 ms)	15 ciclos (250 ms)	30 ciclos (500 ms)	45 ciclos (750 ms)	60 ciclos (1 s)	180 ciclos (3 s)
No. 2	33.63	27	19	13	11	9	5
No. 1	42.41	35	23	17	14	12	7
1/0	53.48	44	30	21	17	15	9
2/0	67.42	56	38	27	22	19	11
3/0	85.03	70	48	34	28	24	14
4/0	107.20	89	60	43	36	31	18
250 kcmil	126.65	105	71	51	42	36	21
350 kcmil	177.36	147	99	72	59	51	30

Tabla 2. 6. Capacidad Última de transporte de corriente de cables de tierra de cobre; las corrientes están en valores RMS, para la frecuencia de 60 Hz, $X/R = 0$; corrientes en kA [1].

Calibre del cable, AWG	Sección nominal, mm^2	6 ciclos (100 ms)	15 ciclos (250 ms)	30 ciclos (500 ms)	45 ciclos (750 ms)	60 ciclos (1 s)	180 ciclos (3 s)
No. 2	33.63	31	19	14	11	9	5
No. 1	42.41	39	24	17	14	12	7
1/0	53.48	49	31	22	18	15	9
2/0	67.42	62	39	28	22	19	11
3/0	85.03	79	50	35	28	25	14
4/0	107.20	99	63	44	36	31	18
250 kcmil	126.65	117	74	52	43	37	21
350 kcmil	177.36	165	104	73	60	52	30

2.8. Modelado y Geometría de malla del SPT

Esta guía establece ecuaciones para aproximar la determinación de los parámetros de diseño y el establecimiento de valores correspondientes del voltaje de malla y voltaje de paso.

Se analizan estos valores en esta sección debido a que los valores que se van a calcular dependen netamente de la geometría con la que se diseña la malla.



Los voltajes de contacto y de paso deben compararse con los voltajes máximos permisibles.

2.8.1. Voltaje de Malla V_m o contacto.

El valor de voltaje de malla se obtiene como un producto del factor geométrico (K_m), factor de corrección (K_i), que explica en parte el error introducido por las suposiciones hechas al derivar K_m ; la resistividad del suelo ρ y la corriente promedio por unidad de longitud enterrada efectiva del conductor de puesta a tierra [1].

El voltaje de malla o contacto está dado por la siguiente ecuación:

$$V_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M} \quad \text{Ecuación 2. 13 [1]}$$

Donde:

L_M es la longitud total del conductor de la malla enterrada.

El factor geométrico K_m es:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left(\frac{8}{\pi * (2n-1)} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2. 14 [1]}$$

Donde:

D es la separación entre conductores paralelos en metros.

d es el diámetro del conductor de la malla en metros.

h es la profundidad de los conductores de la malla en metros.



Para las cuadrículas con varillas de tierra a lo largo del perímetro, o para las cuadrículas con varillas de tierra en las esquinas de la cuadrícula, así como a lo largo del perímetro y en toda el área de la cuadrícula $K_{ii} = 1$ [1]

Para cuadrículas sin varillas de tierra o con solamente unas pocas varillas de tierra, pero ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2*n)^2} \quad \text{Ecuación 2. 15 [1]}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \quad \text{Ecuación 2. 16 [1]}$$

h_o es 1m (profundidad de referencia de la cuadrícula) [1]

n es el número efectivo de conductores paralelos en una cuadrícula dada.

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad \text{Ecuación 2. 17 [1]}$$

donde:

$$n_a = 2 * \frac{L_c}{L_p} \quad \text{Ecuación 2. 18 [1]}$$

n_b es 1 para cuadrículas cuadradas

n_c es 1 para cuadrículas cuadradas y rectangulares

n_d es 1 para cuadrículas cuadradas, rectangulares y con forma de L

En otros diseños:



$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad \text{Ecuación 2. 19 [1]}$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0.7 \cdot \frac{A}{L_x \cdot L_y}} \quad \text{Ecuación 2. 20 [1]}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad \text{Ecuación 2. 21 [1]}$$

Donde:

L_c es la longitud total del conductor en la cuadrícula horizontal en m.

L_p es la longitud del perímetro de la cuadrícula en m

A es el área de la cuadrícula en m^2

L_x es la longitud máxima de la cuadrícula en la dirección x en m

L_y es la longitud máxima de la cuadrícula en la dirección y en m

D_m es la máxima distancia entre dos puntos cualquiera de la cuadrícula en m

Para el factor de irregularidad K_i se obtiene mediante:

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad \text{Ecuación 2. 22 [1]}$$

Cuando se tiene cuadrículas sin varillas de tierra, o con solo unas pocas varillas repartidas en toda la red sin estar en las esquinas o a lo largo del perímetro de la cuadrícula, la longitud L_M es igual a [1]:

$$L_M = L_c + L_R \quad \text{Ecuación 2. 23 [1]}$$

Donde L_R es la longitud total de todas las varillas puestas a tierra en metros [1].



Cuando se tiene cuadrículas con varillas de tierra en las esquinas, a lo largo del perímetro de la cuadrícula y dentro de la cuadrícula, L_M es igual a [1]:

$$L_M = L_c + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R \quad \text{Ecuación 2. 24 [1]}$$

donde L_r es la longitud de cada barra de tierra en metros.

2.8.2. Voltaje de Paso V_s .

Los valores de voltaje de paso se obtienen como producto del factor geométrico (K_s); el factor de corrección, (K_i), la resistividad del suelo (ρ), y la corriente media por unidad de longitud del conductor de tierra enterrado del sistema [1].

$$V_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_i}{L_S} \quad \text{Ecuación 2. 25 [1]}$$

En sistemas de puestas a tierra con o sin varillas, la longitud efectiva del conductor enterrado es

$$L_S = 0,75L_c + 0,85L_R \quad \text{Ecuación 2. 26 [1]}$$

El voltaje de paso máximo se supone que ocurrirá a una distancia de 1 m, comenzando en el centro y se extiende hacia fuera del perímetro del conductor en la bisectriz del ángulo de la esquina más extrema de la red [1].

El valor de K_s en profundidad de enterramiento habitual de 0.25 m $< h < 2.5$ m, es:



$$K_S = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} * (1 - 0.5^{n-2}) \right) \text{ Ecuación 2. 27 [1]}$$

2.9. Valores de voltaje de contacto y de paso permisibles o tolerables

En la sección del capítulo 1 en la sección 1.5 se habla sobre los voltajes de contacto y de paso permisibles.

En resumen, se puede decir que:

Tabla 2. 7. Tabla resumen de fórmulas

Persona de 70 kg (aprox)	$V_{paso70kg} = (1000 + 6 * C_s(h_s, k)\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$
	$V_{contacto70kg} = (1000 + 1.5 * C_s(h_s, k)\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$
Persona de 50 kg (aprox)	$V_{paso50kg} = (1000 + 6 * C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$
	$V_{contacto50kg} = (1000 + 1.5 * C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$

Estos valores deben de ser comparados con los voltajes de toque y de paso propios del sistema de puestas a tierra calculado.

2.10. Criterio de Validación del Diseño

Para validar un diseño de un sistema de puesta a tierra se debe de realizar los siguientes pasos:

1. Se debe comparar el GPR del diseño del sistema de puestas a tierra con el voltaje de toque tolerable, y su valor se encuentra por debajo del voltaje de toque tolerable, no es necesario realizar un análisis adicional quedando ya el diseño con la validación.



2. Si el GPR del diseño es mayor al valor del voltaje de toque tolerable se debe volver a rediseñar el sistema de puestas a tierra hasta obtener un valor menor al voltaje de toque permisible.
3. Verificar que el valor del voltaje de malla calculado este por debajo del voltaje de toque permisible. Si esto se cumple el diseño esta completo, pero si, el voltaje de malla del diseño es mayor que el voltaje de toque tolerable, el diseño debe de ser revisado.
4. Si los voltajes de toque y de paso calculados se encuentran por debajo de los valores de voltaje permisibles, el diseño es correcto y solo se necesitaría realizar el refinamiento para proporcionar acceso a zonas de equipamiento. En caso de que no se cumpla esta condición, se debe realizar una nueva revisión y recalculo en el diseño del sistema de puestas a tierra (revisión a la geometría de la malla).
5. El diseño final debe de ser revidado para eliminar los riesgos que se dan debidos a potenciales transferidos [1].

Una vez concluido con la validación del diseño, el sistema de puestas a tierra estaría listo para proceder con su construcción.



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL ACTUAL SISTEMA DE PUESTAS A TIERRA

3.1. Análisis de incremento de corriente de corto circuito

El diseño de la malla de puestas a tierra para la S/E 03 MONAY, fue propuesto en enero de 1982. Ante los más de 30 años de operación de esta S/E es necesario realizar el análisis del incremento de la corriente de corto circuito.

Desde los años 1980 al 2019, el sistema eléctrico nacional ha presentado variaciones debido a la incorporación de nuevas centrales de generación eléctrica y cambio de topología en la red, las mismas que provocan el incremento de las corrientes de cortocircuito.

El análisis se lo realizará a partir del año 2008 que es desde el año que se tiene la recopilación de información.

A continuación, se presenta valores de simulaciones obtenidas en DigSilent PowerFactory para corrientes de corto circuito trifásicas y monofásicas para la S/E 03 MONAY.



Tabla 3. 1. Valores de cortocircuito trifásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte

1. Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Año	Generación	Nombre	Ik"	Ik", Ángulo	Sk"	ip	Rk, Re(Zk)	Xk, Im(Zk)
			kA	Deg	MVA	kA	Ohm	Ohm
2008	Max	Monay-22kV	5.45	- 84.56	207.74	13.55	0.22	2.32
		Monay-69kV	5.82	- 78.29	695.55	12.78	1.39	6.70
	Min	Monay-22kV	5.33	- 84.51	203.11	13.23	0.23	2.37
		Monay-69kV	5.41	- 78.59	646.30	11.91	1.46	7.22
2009	Max	Monay-22kV	6.03	- 85.17	229.64	15.18	0.20	2.31
		Monay-69kV	6.53	- 80.25	780.58	14.85	1.14	6.61
	Min	Monay-22kV	5.45	- 84.56	207.74	13.55	0.22	2.32
		Monay-69kV	5.82	- 78.29	695.55	12.78	1.39	6.70
2010	Max	Monay-22kV	6.53	- 85.27	248.75	16.49	0.18	2.13
		Monay-69kV	8.83	- 78.94	1,055.54	19.64	0.95	4.87
	Min	Monay-22kV	6.47	- 85.23	246.46	16.33	0.18	2.15
		Monay-69kV	8.50	- 79.04	1,015.45	18.93	0.98	5.06
2011	Max	Monay-22kV	7.18	- 86.24	273.50	18.53	0.13	1.94
		Monay-69kV	14.45	- 81.08	1,727.47	33.49	0.47	3.00
	Min	Monay-22kV	7.16	- 86.25	272.73	18.48	0.13	1.95
		Monay-69kV	14.20	- 81.20	1,697.55	32.98	0.47	3.05
2012	Max	Monay-22kV	6.56	- 85.95	250.06	16.84	0.14	1.93
		Monay-69kV	13.58	- 78.98	1,622.81	30.27	0.56	2.88
	Min	Monay-22kV	7.18	- 86.23	273.66	18.55	0.13	1.94
		Monay-69kV	14.50	- 81.00	1,733.48	33.61	0.47	2.98
2013	Max	Monay-22kV	6.59	- 85.95	251.02	16.90	0.14	1.92
		Monay-69kV	13.92	- 78.82	1,663.94	30.94	0.55	2.81
	Min	Monay-22kV	6.57	- 85.96	250.25	16.85	0.14	1.93
		Monay-69kV	13.65	- 79.04	1,631.26	30.44	0.55	2.87
2014	Max	Monay-22kV	7.10	- 85.92	270.49	18.20	0.14	1.96
		Monay-69kV	13.46	- 79.48	1,608.96	30.29	0.59	3.20
	Min	Monay-22kV	7.07	- 85.91	269.43	18.13	0.14	1.97
		Monay-69kV	13.16	- 79.62	1,572.40	29.68	0.60	3.28
2015	Max	Monay-22kV	7.24	- 86.23	275.83	18.70	0.13	1.93
		Monay-69kV	15.26	- 80.70	1,824.24	35.22	0.46	2.83
	Min	Monay-22kV	7.21	- 86.22	274.67	18.62	0.13	1.93
		Monay-69kV	14.85	- 80.83	1,774.57	34.36	0.47	2.91



Tabla 3. 2. Valores de cortocircuito trifásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte
2. Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO S/E 03 MONAY								
Año	Generación	Nombre	Ik"	Ik", Ángulo	Sk"	ip	Rk, Re(Zk)	Xk, Im(Zk)
			kA	Deg	MVA	kA	Ohm	Ohm
2016	Max	Monay-22kV	12.78	- 86.01	486.93	32.86	0.08	1.09
		Monay-69kV	15.85	- 80.54	1,893.80	36.41	0.45	2.73
	Min	Monay-22kV	12.71	- 86.02	484.46	32.70	0.08	1.10
		Monay-69kV	15.54	- 80.68	1,857.28	35.82	0.46	2.78
2017	Max	Monay-22kV	11.58	- 85.24	441.36	29.26	0.10	1.20
		Monay-69kV	11.29	- 80.21	1,349.41	25.76	0.66	3.82
2018	Max	Monay-22kV	10.43	- 84.77	397.29	26.11	0.11	1.21
		Monay-69kV	10.43	- 84.77	397.29	26.11	0.11	1.21
2016	Max	Monay-22kV	12.78	- 86.01	486.93	32.86	0.08	1.09
		Monay-69kV	15.85	- 80.54	1,893.80	36.41	0.45	2.73
	Min	Monay-22kV	12.71	- 86.02	484.46	32.70	0.08	1.10
		Monay-69kV	15.54	- 80.68	1,857.28	35.82	0.46	2.78



Tabla 3.3. Valores de cortocircuito monofásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 1. Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO S/E 03 MONAY												
Año	Generación	Nombre	Ik" A	Ik", Ángulo A	Sk" A	ip A	Rk0, Im(Zk0)	Xk0, Im(Zk0)	Rk1, Re(Zk1)	Xk1, Im(Zk1)	Rk2, Re(Zk2)	Xk2, Im(Zk2)
			kA	deg	MVA	kA	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm
2008	Max	Monay-22kV	7.42	- 84.74	94.19	18.43	0.03	0.47	0.22	2.32	0.22	2.33
		Monay-69kV	7.27	- 79.09	289.78	15.97	0.36	2.67	1.39	6.70	1.36	6.76
	Min	Monay-22kV	7.26	- 84.69	92.25	18.02	0.03	0.47	0.23	2.37	0.22	2.38
		Monay-69kV	6.83	- 79.30	272.22	15.05	0.36	2.67	1.46	7.22	1.43	7.30
2009	Max	Monay-22kV	8.20	- 85.32	104.19	20.66	0.03	0.47	0.20	2.31	0.19	2.32
		Monay-69kV	8.15	- 80.95	324.77	18.53	0.30	2.65	1.14	6.61	1.10	6.67
	Min	Monay-22kV	7.42	- 84.74	94.19	18.43	0.03	0.47	0.22	2.32	0.22	2.33
		Monay-69kV	7.27	- 79.09	289.78	15.97	0.36	2.67	1.39	6.70	1.36	6.76
2010	Max	Monay-22kV	8.83	- 85.41	112.21	22.32	0.03	0.46	0.18	2.13	0.17	2.13
		Monay-69kV	10.58	- 79.92	421.37	23.52	0.31	2.50	0.95	4.87	0.92	4.87
	Min	Monay-22kV	8.76	- 85.38	111.28	22.12	0.03	0.46	0.18	2.15	0.18	2.15
		Monay-69kV	10.25	- 79.98	408.47	22.84	0.31	2.49	0.98	5.06	0.95	5.07



Tabla 3. 4. Valores de cortocircuito monofásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 2. Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO S/E 03 MONAY												
Año	Generación	Nombre	Ik" A	Ik", Ángulo A	Sk" A	ip A	Rk0, Im(Zk0)	Xk0, Im(Zk0)	Rk1, Re(Zk1)	Xk1, Im(Zk1)	Rk2, Re(Zk2)	Xk2, Im(Zk2)
			kA	deg	MVA	kA	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm
2011	Max	Monay-22kV	9.69	- 86.30	123.07	25.02	0.03	0.45	0.13	1.94	0.12	1.92
		Monay-69kV	16.66	- 81.43	663.69	38.60	0.27	2.00	0.47	3.00	0.43	2.81
	Min	Monay-22kV	9.67	- 86.30	122.78	24.96	0.03	0.45	0.13	1.95	0.12	1.93
		Monay-69kV	16.45	- 81.51	655.46	38.21	0.27	2.00	0.47	3.05	0.44	2.86
2012	Max	Monay-22kV	8.85	- 86.16	112.47	22.72	0.02	0.45	0.14	1.93	0.13	1.91
		Monay-69kV	15.61	- 79.47	621.96	34.81	0.33	1.95	0.56	2.88	0.51	2.70
	Min	Monay-22kV	9.70	- 86.45	123.17	25.04	0.02	0.45	0.13	1.94	0.12	1.92
		Monay-69kV	16.78	- 81.44	668.43	38.89	0.26	1.96	0.47	2.98	0.43	2.80
2013	Max	Monay-22kV	8.89	- 86.16	112.91	22.81	0.02	0.45	0.14	1.92	0.13	1.90
		Monay-69kV	16.03	- 79.27	638.48	35.62	0.33	1.91	0.55	2.81	0.51	2.61
	Min	Monay-22kV	8.87	- 86.17	112.63	22.76	0.02	0.45	0.14	1.93	0.13	1.91
		Monay-69kV	15.80	- 79.42	629.61	35.25	0.33	1.91	0.55	2.87	0.51	2.66



Tabla 3. 5. Valores de cortocircuito monofásico de máxima y mínima generación S/E 03 MONAY – parte 3. Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO S/E 03 MONAY												
Año	Generación	Nombre	Ik" A	Ik", Ángulo A	Sk" A	ip A	Rk0, Im(Zk0)	Xk0, Im(Zk0)	Rk1, Re(Zk1)	Xk1, Im(Zk1)	Rk2, Re(Zk2)	Xk2, Im(Zk2)
			kA	deg	MVA	kA	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm
2014	Max	Monay-22kV	9.56	- 86.16	121.44	24.52	0.02	0.45	0.14	1.96	0.14	1.96
		Monay-69kV	15.57	- 80.34	620.25	35.03	0.26	1.94	0.59	3.20	0.57	3.18
	Min	Monay-22kV	9.53	- 86.15	121.02	24.43	0.02	0.45	0.14	1.97	0.14	1.97
		Monay-69kV	15.30	- 80.43	609.44	34.51	0.26	1.94	0.60	3.28	0.57	3.26
2015	Max	Monay-22kV	9.77	- 86.45	124.10	25.24	0.02	0.45	0.13	1.93	0.12	1.91
		Monay-69kV	17.73	- 81.19	706.47	40.92	0.25	1.82	0.46	2.83	0.42	2.67
	Min	Monay-22kV	9.74	- 86.45	123.66	25.15	0.02	0.45	0.13	1.93	0.12	1.92
		Monay-69kV	17.38	- 81.27	692.56	40.22	0.25	1.82	0.47	2.91	0.43	2.74
2016	Max	Monay-22kV	17.20	218.48	- 86.42	44.23	0.00	0.26	0.08	1.09	0.07	1.08
		Monay-69kV	19.27	767.73	- 81.38	44.28	0.15	1.42	0.45	2.73	0.42	2.60
	Min	Monay-22kV	17.13	217.61	- 86.43	44.07	0.00	0.26	0.08	1.10	0.07	1.08
		Monay-69kV	19.00	757.09	- 81.48	43.80	0.15	1.42	0.46	2.78	0.42	2.64



Tabla 3. 6. Valores de cortocircuito monofásico de máxima generación S/E 03 MONAY – parte 4.

Fuente: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO S/E 03 MONAY												
Año	Generación	Nombre	Ik" A	Ik", Ángulo A	Sk" A	ip A	Rk0, Im(Zk0)	Xk0, Im(Zk0)	Rk1, Re(Zk1)	Xk1, Im(Zk1)	Rk2, Re(Zk2)	Xk2, Im(Zk2)
			kA	deg	MVA	kA	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm
2017	Max	Monay-22kV	15.59	198.03	- 85.68	39.38	0.00	0.27	0.10	1.20	0.10	1.21
		Monay-69kV	13.83	550.79	- 81.22	31.54	0.14	1.69	0.66	3.82	0.65	3.88
2018	Max	Monay-22kV	15.64	198.60	- 85.63	39.46	0.00	0.27	0.10	1.20	0.10	1.20
		Monay-69kV	13.94	555.14	- 81.05	31.70	0.14	1.69	0.67	3.79	0.66	3.84

Tabla 3. 7. Tabla Resumen Valores de cortocircuito trifásico y monofásico de máxima generación S/E 03 MONAY.

RESUMEN CORTOCIRCUITO S/E 03 MONAY				
Año	Generación	Patio	CC trifásico kA	CC monofásico kA
2008	max	22 kV	5.45	7.42
2009	max	22 kV	6.03	8.2
2010	max	22 kV	6.53	8.83
2011	max	22 kV	7.18	9.69
2012	max	22 kV	6.56	8.85
2013	max	22 kV	6.59	8.89
2014	max	22 kV	7.10	9.56
2015	max	22 kV	7.24	9.77
2016	max	22 kV	12.78	17.2
2017	max	22 kV	11.58	15.59
2018	max	22 kV	10.43	15.64

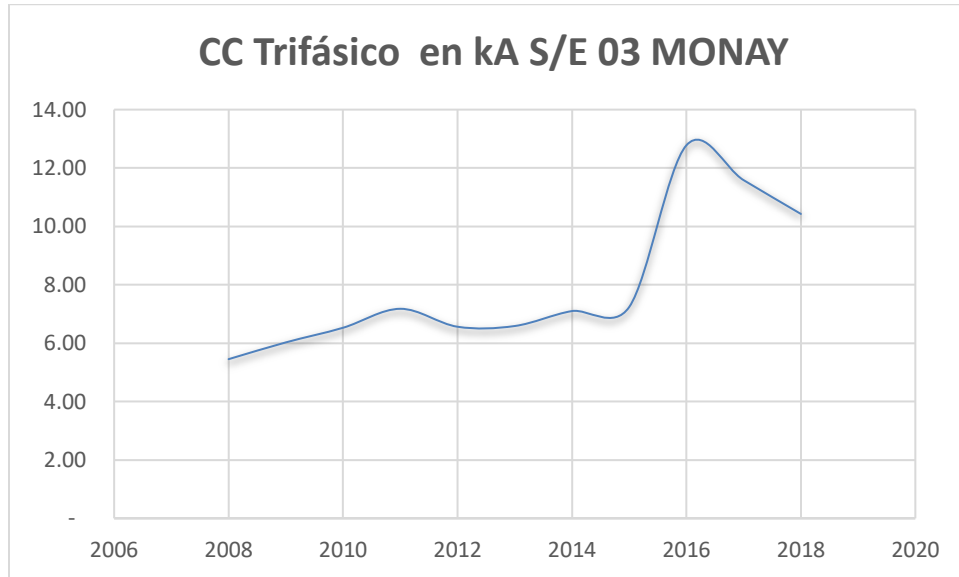


Figura 3. 1. Curva de comportamiento de Corrientes de Cortocircuito trifásico para la S/E 03 Monay años 2008 – 2018

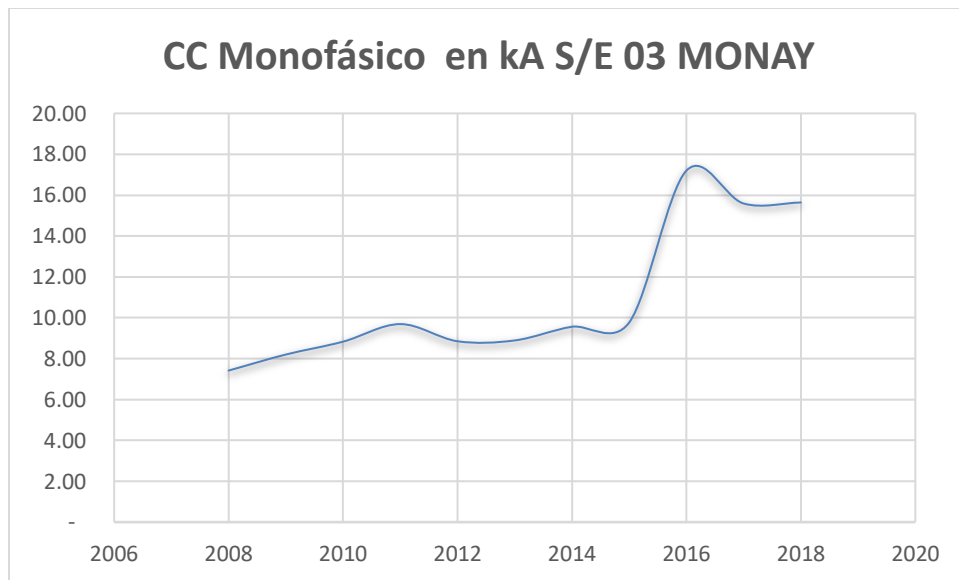


Figura 3. 2. Curva de comportamiento de Corrientes de Cortocircuito monofásico para la S/E 03 Monay años 2008 – 2018

Actualmente, la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur en la S/E 03 Monay se manejan corrientes de cortocircuito monofásica en el patio de 22 kV de 15.64 kA lo que obliga a revisar el sistema de puesta a tierra de esta subestación. Cabe recalcar que la corriente de cortocircuito no es igual a la corriente de falla, pero se parte de esta corriente para realizar los cálculos de la corriente que circularía por la malla ante una posible falla.

3.2. Mediciones de la Resistividad del Suelo

Para la medición de la resistividad del terreno se ocupa el GROUND TESTER marca AEMC modelo 6472.



Figura 3. 3 Ground Tester AEMC Model 6472 [3].

Es necesario recalcar que la medición de la resistividad del terreno no se la realizo en el patio de la S/E debido a que la S/E estaba en operación y existían mallas de puestas a tierra propia de la subestación y de la antigua central térmica que existe en el patio vecino.

El terreno escogido para la realización de la medición fue cercano a la S/E aproximadamente 15 metros de distancia desde el patio de 22 kV.

Tabla 3.8. Medición de resistividad del terreno mediante el Método de Wenner

Método de Wenner – AEMC 6472			
ELECTRODO	DISTANCIA	Distancia Total	Valor de Resistividad (Ωm)
1	referencia	0	133
2	5 m	5 m	
3	5 m	10 m	
4	5 m	15 m	

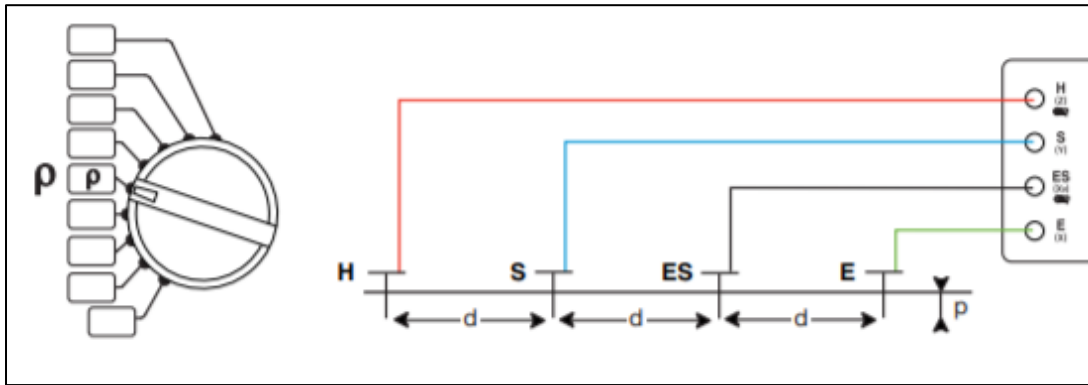


Figura 3. 4. Diagrama de conexión Método de Wenner [3]



Figura 3. 5. Valor de resistividad obtenido mediante medición

3.2.1. Medición de la resistencia de la malla de puesta a tierra

La resistencia de puesta a tierra debe ser medida antes de la puesta en funcionamiento de un sistema eléctrico, como parte de la rutina de mantenimiento o excepcionalmente como parte de la verificación de un sistema de puesta a tierra. Para su medición se debe aplicar el método de Caída de Potencial. El método consiste en pasar una corriente entre el electrodo o sistema de puesta a tierra a medir y un electrodo de corriente auxiliar (C) y medir el voltaje entre la puesta a tierra bajo prueba y un electrodo de potencial auxiliar (P). Para minimizar la influencia entre electrodos, el electrodo de corriente, se coloca generalmente a una sustancial distancia del sistema de puesta a tierra. Típicamente ésta distancia debe ser mínimo 6 veces superior a la dimensión más grande de la puesta a tierra bajo estudio [2].

El electrodo de potencial debe ser colocado en la misma dirección del electrodo de corriente, pero también puede ser colocado en la dirección opuesta. En la práctica, la distancia “d” para el electrodo de potencial se elige aproximadamente al 62% de la distancia del electrodo de corriente. Esta distancia está basada en la posición teóricamente correcta (61.8%) para medir la resistencia exacta del electrodo para un suelo de resistividad homogéneo. La localización del electrodo de potencial es muy crítica para medir la resistencia de una puesta a tierra. La localización debe ser libre de cualquier influencia del sistema de puesta tierra bajo medida y del electrodo auxiliar de corriente. La manera más práctica de determinar si el electrodo de potencial está fuera de la zona de influencia de los electrodos, es obtener varias lecturas de resistencias moviendo el electrodo de potencial en varios puntos entre la puesta a tierra bajo prueba y el electrodo de corriente. Dos o tres lecturas consecutivas aproximadamente constantes pueden asumirse como representativas del valor de resistencia verdadera [2].

Tabla 3.9. Tabla de Registro de Mediciones – Método Caída de potencial 62%

Distancia a Electrodo de Corriente (m)	Porcentaje de Distancia al Electrodo de Potencial (%)	Distancia a Electrodo de Potencial (m)	Valor de R medido (Ω)
50.4	52	26.21	1.76
	62	31.3	2.01
	72	36.3	2.43
	Valor Promedio		2.06

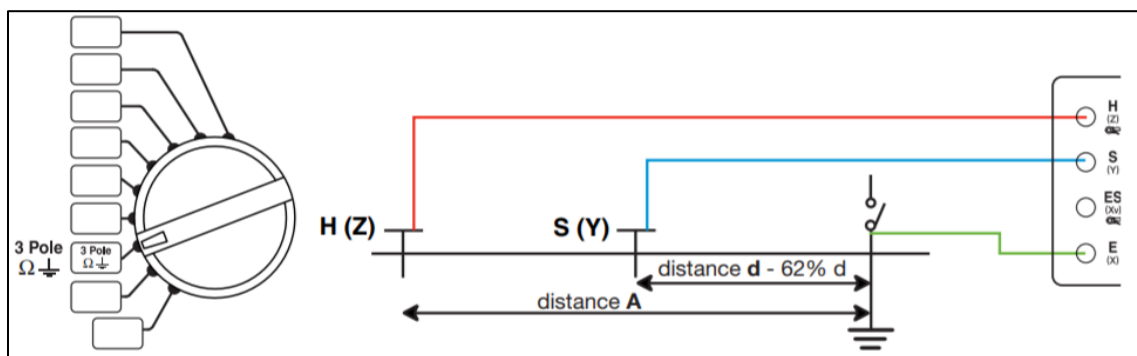


Figura 3. 6. Diagrama de conexión Método Caída de Potencial 62% 3 Polos. Fuente: Manual de usuario del equipo AEMC 6472 [3].



Figura 3. 7. Valor medido al 62% Caída de Potencial

3.3. Recolección de Datos

Los datos que se recolectan son usados para realizar el análisis del sistema de puesta a tierra actual y también son usados para realizar la repotenciación del mismo, en esta sección se recolectaran datos como: área, plano de la S/E 03 Monay y el tiempo de despeje de falla con el que están seteadas las protecciones de la S/E.

3.3.1. Plano y Área de la Subestación

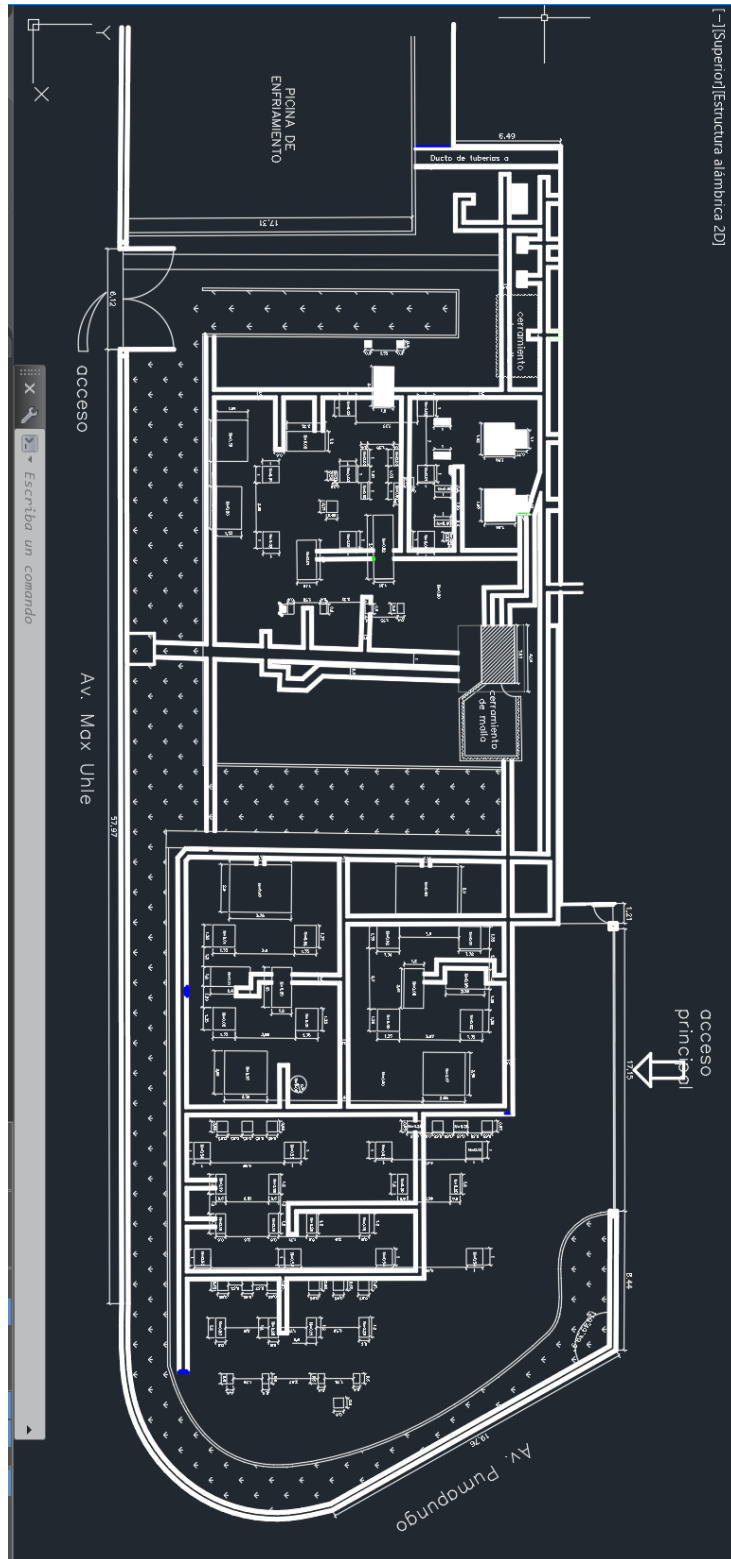


Figura 3. 8. Levantamiento Planimétrico S/E 03. Fuente Centro Sur.



Figura 3. 9. Representación del perímetro de toda la S/E 03

```
Espacio: Espacio modelo
Identificador = 9f83
Cerrada
Anchura constante 0.0000
área 2098.8567
perímetro 210.6999
en el punto X=1157.8145 Y= 863.1606 Z= 0.0000
en el punto X=1204.3390 Y= 863.6092 Z= 0.0000
en el punto X=1204.2847 Y= 866.3214 Z= 0.0000
en el punto X=1220.9195 Y= 866.4911 Z= 0.0000
en el punto X=1220.9209 Y= 866.1714 Z= 0.0000
en el punto X=1229.1312 Y= 866.2080 Z= 0.0000
en el punto X=1238.8665 Y= 849.4090 Z= 0.0000
en el punto X=1239.0550 Y= 848.6085 Z= 0.0000
en el punto X=1239.2489 Y= 847.7293 Z= 0.0000
en el punto X=1239.3764 Y= 846.8316 Z= 0.0000
en el punto X=1239.4173 Y= 845.8419 Z= 0.0000
en el punto X=1239.3394 Y= 844.8342 Z= 0.0000
en el punto X=1239.2086 Y= 844.1290 Z= 0.0000
```

Figura 3. 10. Valores del área y perímetro de la S/E 03

Mediante el uso de AutoCad 2019 y el comando “List” se puede obtener el área y el perímetro de la S/E 03 Monay.

Los planos fueron facilitados por medio del personal del departamento de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

En la Figura 3.11, se presenta el plano de la malla original del sistema de puestas a tierra. En base a este plano se realiza el análisis del sistema de puestas a tierra mediante la implementación de la norma IEEE Std 80 – 2013.

3.3.2. Área de la Malla del Sistema de Puesta a Tierra original y actual.

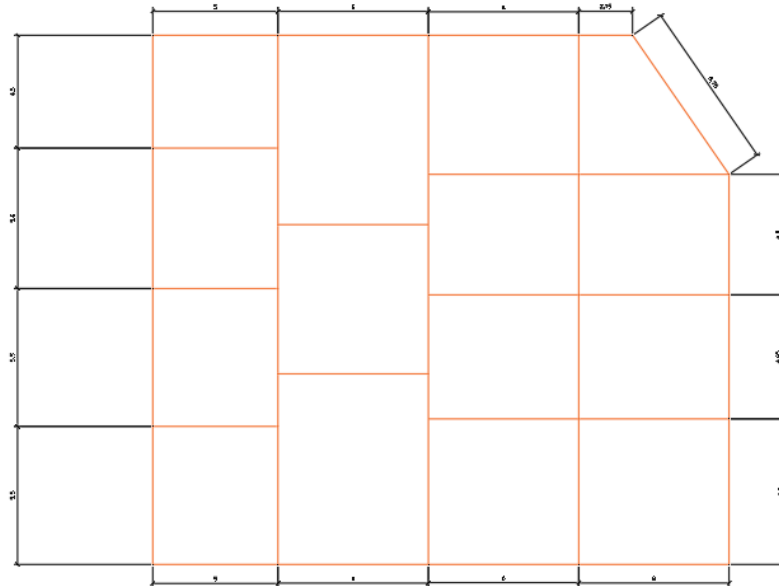


Figura 3. 11. Dimensiones de la Malla de SPT original de la S/E 03 (1982).

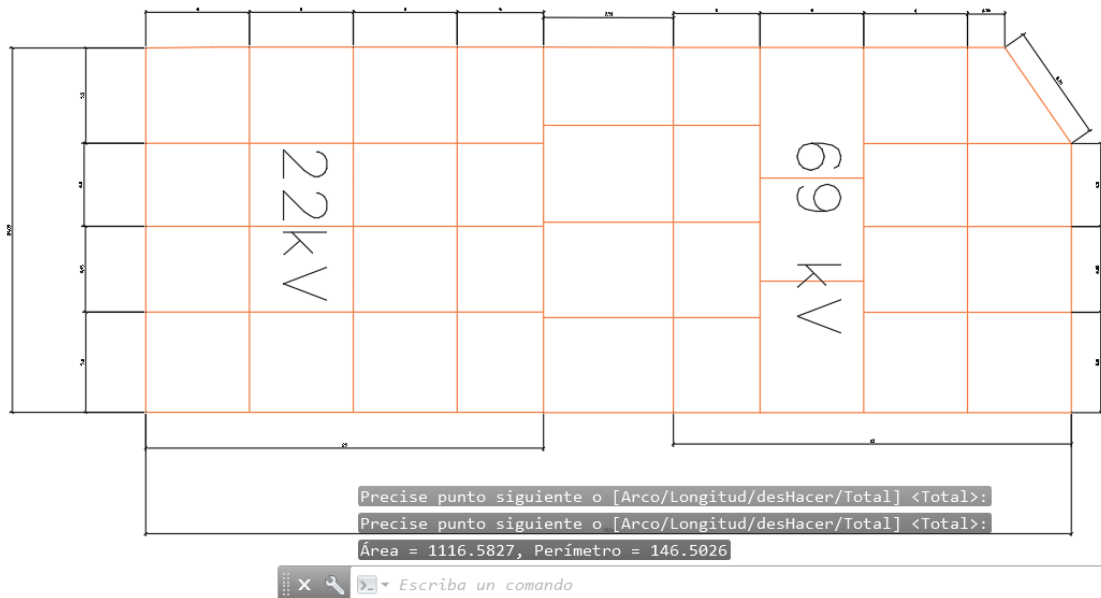


Figura 3. 12. Área y Perímetro de la malla de puesta a tierra actual S/E 03



3.3.3. Tiempos de despeje de Falla

En las subestaciones de distribución eléctrica se debe ajustar la protección principal y de respaldo, de acuerdo a los seteos en las protecciones de la S/E 03 la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur el valor es de 0.737 segundos.

Tabla 3.10. Valores de seteo de protecciones en las S/E de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur – Fuente Departamento de Protecciones.

S/E	Nivel de tensión (kV)	Corriente de Cortocircuito Monofásica (A)	Tiempo de Operación de Protección (s)	Tiempo de Apertura de Interruptores (s)	Total Tiempo (s)
SE01	6.3	9300	0.608	0.063	0.608
SE02	6.3	14360	0.452	0.063	0.452
SE03	22	15640	0.737	0.063	0.737
SE04	22	15590	0.673	0.063	0.673
SE05	22	14540	0.653	0.063	0.653
SE07	22	8000	0.501	0.063	0.501
SE08	22	8326	0.418	0.063	0.418
SE12	22	8830	0.701	0.063	0.701
SE13	22	3475	0.49	0.063	0.49
SE14	22	7160	0.513	0.063	0.513

3.4. Uso de la normativa IEEE Std 80 – 2013 para el análisis.

Paso 1. Datos de campo para diseño.



Tabla 3.11. Valores para verificación de diseño.

Datos necesarios para el diseño de un SPT en una S/E	
Corriente de Cortocircuito monofásico: I_{cc}	15.64 kA
Tiempo de actuación para las protecciones:	0.75s
Dimensiones de la malla:	53.51m * 21.05m = 1126.39 m ²
Profundidad de la grilla: h	0,5m
Resistividad de la capa de grava: ρ_{grava}	2500Ωm
Espesor de la grava: h_s	0.10m
Resistividad aparente del terreno: ρ_a	133Ωm
Temperatura ambiente: t_a	30 °C
Temperatura máxima para suelda exotérmica	450°C
Conexión de la grilla:	Exotérmica
Material de la Malla:	Cobre
Material del conductor:	Copperwell
Resistencia corporal:	1kΩ
Diámetros varillas de puesta a tierra:	16mm = 0,016m
Longitud de las varillas:	2,40 m
Cantidad de varillas:	25
Espaciamiento entre conductores: D	6 m
Impedancia de Secuencia Cero: Z^0	(0.0 + 0.27j)Ω
Impedancia de Secuencia Positiva: Z^+	(0.10 + 1.20j)Ω
Impedancia de Secuencia Negativa: Z^-	(0.10 + 1.20j)Ω
Voltaje: E	22 kV

Paso 2. Tamaño de Conductor. ($I_f = 3I_0$)

$$I_0 = \frac{E}{3 * R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + (X_1 + X_2 + X_0)} \text{ Ecuación 3. 1 [1]}$$



Para el lado de 22 kV:

$$3I_0 = \frac{3 * 22000 V / \sqrt{3}}{(3 * 0)\Omega + (0.10 + 0.10 + 0)\Omega + j(1.20 + 1.20 + 0.27)\Omega}$$

$$|3I_0| = 14.231 \text{ kA}$$

Relación $\frac{X}{R}$:

$$\frac{X}{R} = 13.35$$

Sección del conductor:

Esta sección será calculada con los valores de corriente actuales, la malla original fue diseñada con Cobre # 2/0 AWG

Tabla 3.12. Calibre del conductor, área nominal y diámetro [6].

Calibre del Conductor		Área Nominal <i>mm</i> ²	Diámetro <i>m</i>
MCM	AWG		
350		177.35	0.015
300		152.01	0.0139
250		126.68	0.0127
211.6	4/0	107.22	0.0117
167.8	3/0	85.03	0.0104
133.1	2/0	67.44	0.00958

Para el cálculo del calibre del conductor se usarán las propiedades del conductor de cobre soft – drawn, tomadas de la tabla 2.2.

Así: (reemplazando en la ecuación 2.11)

$$A_{kcmil} = I_f * \frac{197.4}{\sqrt{\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r} \ln \left[\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$



$$A_{kcmil} = 14.231 * \frac{197.4}{\sqrt{\frac{3.4}{0.75 * 0.00381 * 1.78} \ln \left[\left(\frac{242+450}{242+30} \right) \right]}}$$

$$A_{kcmil} = 112.441 \text{ MCM}$$

Puesto que la malla de puesta a tierra ya está en funcionamiento con un conductor de cobre 2/0 AWG, se parte desde los datos de este conductor:

Área

$$A_{kcmil} = 133.1 \text{ MCM}$$

$$d = 0.01m$$

Paso 3. Tensiones de toque y paso permisibles:

Cálculo del factor de reflexión

Capa de grava con una resistividad $\rho_s = 2500 \Omega m$

Capa de suelo bajo la grava $\rho = 133 \Omega m$.

Según la ecuación 1.5:

$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$$k = -0.898$$

Cálculo del factor de reducción

$$h_s = 0,1m$$

La ecuación 1.17:

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



$$C_s = 1 - \left(\frac{0.09 * (1 - (\frac{133}{2500}))}{2 * 0.1 + 0.09} \right)$$

$$C_s = 0.706$$

Cálculo de los máximos voltajes permisibles de paso y contacto

Con el valor del espesor de la grava; factor de reflexión y factor de reducción calculados anteriormente se realizan los cálculos de los voltajes de paso y contacto permisibles.

El tiempo de actuación para las protecciones de 0.75 segundos. Para el cálculo de las tensiones de paso con las ecuaciones 1.14 y 1.16 respectivamente:

$$V_{paso70kg} = (1000 + 6 * C_s(h_s, K)\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$V_{paso70kg} = (1000 + 6 * 0.706 * 2500) * \frac{0.157}{\sqrt{0.75}}$$

$$V_{paso70kg} = 2101.13 V$$

$$V_{contacto70kg} = (1000 + 1.5 * C_s(h_s, K)\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$V_{contacto70kg} = (1000 + 1.5 * 0.706 * 2500) * \frac{0.157}{\sqrt{0.75}}$$

$$V_{contacto70kg} = 661.248 V$$



Paso 4. Análisis de la Malla S/E 03 Monay.

Asumimos una malla de 53.51m * 21.1m, como no es una malla rectangular y las distancias de separación no son iguales, usaremos el valor de medición la longitud total de conductor de cobre de la malla obtenido mediante cálculo de longitudes.

Calculamos la longitud total incluyendo las varillas:

$$L = L_R + L_M$$

$$L_R = L_r * \#picas$$

$$L_R = 2.44 * 25$$

$$L_R = 61m$$

$$L_M = ((21.10 * 9) + (15.55) + (6.75) + (53.51 * 4) + (43.66))m$$

$$L_M = 469.9 m$$

$$L = (61 + 469.9)m$$

$$L = 530.9 m$$

Para el cálculo de la resistencia de tierra de la grilla se tiene:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} * \left(1 + \frac{1}{1+h * \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \text{ Ecuación 3. 2 [1].}$$

Donde:

h = Profundidad enterrada de la malla de tierra en metros

A = Área ocupada por la malla de tierra en m²



$\rho =$ Resistividad aparente de la tierra en Ωm

$$R_g = 133 \left[\frac{1}{530.9} + \frac{1}{\sqrt{20 * 1116.25}} * \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 * \sqrt{\frac{20}{1116.25}}} \right) \right]$$

$$R_g = 1.97 \Omega$$

Nota: Para la evaluación del sistema de puesta a tierra se toma el valor de la resistencia de puesta a tierra medido que es **2.06 Ω** , esto se realiza porque no se tiene el levantamiento de la malla que actualmente está en operación. Tantos años han pasado y con ellos se han realizado cambios de mejoramiento en la malla de puesta a tierra, pero estos cambios no han sido documentados, para el desarrollo de este trabajo se acordó considerar una malla adyacente de iguales características que la de 1982.

$$R_{g\text{medida}} = 2.06 \Omega$$

Se siguen para los cálculos con el valor de la resistencia de puesta a tierra medida.

Paso 6. Cálculo de la máxima corriente de la red I_G

Cálculo de la constante de tiempo subtransitoria (ecuación 2.6)

$$T_a = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f}$$
$$T_a = 13.35 * \frac{1}{2 * \pi * 60} = \mathbf{0.0354}$$

El factor de decremento lo calculamos con la ecuación 2.5:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}})}$$



$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.0354}{0.75} \left(1 - e^{\frac{-2 \cdot 0.75}{0.0354}}\right)} = \mathbf{1.023}$$

Para el cálculo del factor de división de corriente se usa la ecuación 2.9:

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right|$$

$$S_f = \left| \frac{0.11 + 1.21j}{0.11 + 1.21j + 2.06} \right|$$

$$S_f = 0.37 \approx 0.4$$

Esta corriente debe reflejar la máxima corriente cuando se da una falla. Para el cálculo de I_G (ecuación 2.1):

$$I_G = D_f * 3I_0 * S_f * C_P$$

$$I_G = 1.023 * 0.4 * 14.231 \text{ kA}$$

$$\mathbf{I_G = 5.823 \text{ kA}}$$

De acuerdo a los valores máximos permitidos en corriente de corto circuito, tiempo de falla y calibre del conductor mostrados en la Figura 3.14; el cable 2/0 de cobre está soportando la corriente I_G , lo que nos deja en claro el correcto funcionamiento del conductor ante una posible falla.

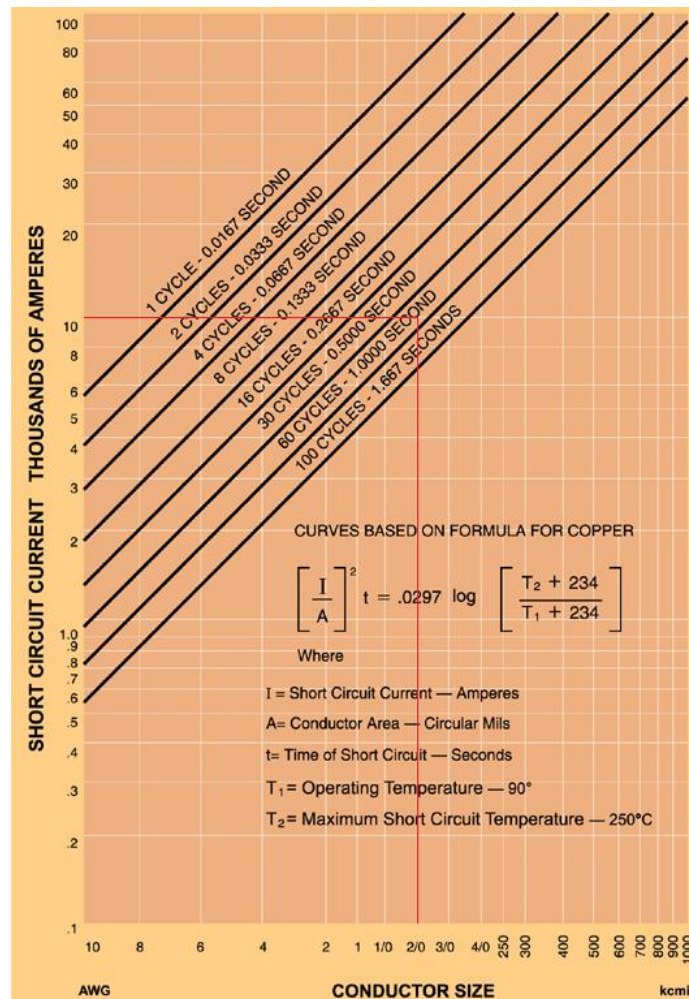


Figura 3. 13. Corriente de cortocircuito, calibre de conductor y tiempo de falla [4].

Nota: Omitimos el valor del factor de proyección ya que se está realizando el análisis al estado actual en el que se encuentra la S/E.

En donde:

C_p = Factor correctivo de proyección (crecimiento futuro de cero $C_p = 1$)
 D_f = Factor de decremento para la duración de t_f en segundos

Paso 7. Cálculo de la elevación de potencial de tierra GPR

$$GPR = I_G * R_G \text{ Ecuación 3. 3 [1]}$$



$$GPR = 5.823 \text{ kA} * 2.06 \Omega$$

$$GPR = 11.996 \text{ kV}$$

Paso 8. Cálculo de las tensiones de contacto y de paso de acuerdo a la geometría de la malla.

Los voltajes de contacto y de paso calculados se deben comparar con los voltajes máximos permisibles.

El voltaje de malla o contacto está dado por la ecuación 2.13:

$$V_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M}$$

Con la ecuación 2.14 se calcula K_m :

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

$$K_{ii} = 1$$

De la ecuación 2.16 se realiza el cálculo de K_h

Con $h_o = 1m$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.225$$

De la ecuación 2.17 se realiza el cálculo del número efectivo de conductores paralelos en la cuadrícula, de las ecuaciones 2.18 a la 2.21 se usan para el cálculo de los factores n_a, n_b, n_c y n_d .



$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

$$n_a = 2 * \frac{469.45}{146.52} = 6.41$$

$$n_b = \sqrt{\frac{146.52}{4 * \sqrt{1116.25}}} = 1.04$$

$$n_c = \left[\frac{53.51 * 21.1}{1116.25} \right]^{0.7 * \frac{1116.25}{53.51 * 21.1}} = 1.01$$

$$n_d = 1$$

Nota: tomamos el valor de 1 suponiendo que la malla se asemeja a una forma rectangular.

$$n = 6.73$$

$$K_m = 0.79$$

Para el cálculo del factor de irregularidad se usa la ecuación 2.22 donde K_i :

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n$$

$$K_i = 1.64$$

L_M : (ecuación 2.24)

$$L_M = 469.45 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.40}{\sqrt{53.51^2 + 21.1^2}} \right) \right] \cdot (25 * 2.40)$$



$$L_M = 565.504 \text{ m}$$

Reemplazando en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$V_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M}$$

$$V_m = \frac{133 * 5.823 * 10^3 * 0.79 * 1.64}{565.504}$$

$$V_m = V_{\text{contacto o toque}} = 1.774 \text{ kV}$$

Voltaje de paso

$$V_{\text{paso}} = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{L_{\text{paso}}}$$

$$L_{\text{paso}} = 0.75 * 469.45 + 0.85 * 60$$

$$L_{\text{paso}} = 403.09 \text{ m}$$

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

$$K_s = 0.42$$

$$V_{\text{paso}} = \frac{133 * 5.823 * 10^3 * 0.42 * 1.64}{403.09}$$

$$V_{\text{paso}} = 1.323 \text{ kV}$$

3.5. Presentación y Verificación de resultados

Después de realizar el análisis al actual sistema de puesta a tierra se obtienen los siguientes resultados:



Tabla 3.13. Tabla Resumen de presentación de resultados

Tensiones	Máximo Permissible (70kg)	Sistema de Puesta a Tierra S/E 03 Monay (actual)
$V_{contacto}$	661.248 V	1.842 kV
V_{paso}	2.101 kV	1.323 kV
GPR	11.103 kV	

Del análisis se puede concluir:

- El GPR es más elevado que el Voltaje de contacto máximo permisible.
- El voltaje de contacto actual es casi 3 veces mayor al valor máximo permisible.
- El voltaje de paso del actual sistema cumple con el valor máximo permisible ya que se encuentra por debajo del valor permisible.

En el capítulo 4 se presenta una alternativa para dar cumplimiento a la normativa de la IEEE Std 80 – 2013 y consigo mejorar la seguridad del personal y equipos que están dentro de la S/E 03.



CAPÍTULO 4 “ REDIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA ACTUAL ”

4.1. Uso de la normativa IEEE Std 80 – 2013.

Para el uso de la normativa IEEE Std 80 -2013 se seguirán los siguientes 9 pasos:

Paso 1. Datos de campo para realizar el diseño.

Paso 2. Cálculo del tamaño o calibre del conductor.

Paso 3. Cálculo de valores máximos permisibles en las tensiones de paso y de contacto.

Paso 4. Diseño inicial de la malla de puesta a tierra.

Paso 5. Determinación de la resistencia de la malla de puesta a tierra.

Paso 6. Cálculo de la corriente máxima en la red.

Paso 7. Cálculo del GPR

Paso 8. Cálculo del voltaje de malla.

Paso 9. Comparación de resultados y validación del diseño.

Partiremos para los datos de campo para realizar el redimensionamiento de la malla.

Tabla 4. 1. Valores para verificación de diseño.

Datos necesarios para el diseño de un SPT S/E	
Corriente de Cortocircuito monofásico: I_{CC}	15.64 kA
Tiempo de actuación para las protecciones:	0.75 s
Dimensiones de la malla:	Por determinar
Profundidad de la grilla: h	0,5 m
Resistividad de la capa de grava: ρ_{grava}	2500 Ω m
Espesor de la grava: h_s	0.15 m
Resistividad aparente del terreno: ρ_a	50 Ωm
Temperatura ambiente: t_a	30 °C
Temperatura máxima para suelda exotérmica	450 °C
Conexión de la grilla:	Exotérmica
Material de la Malla:	Cobre
Material del conductor:	Copperwell
Resistencia corporal:	1k Ω
Diámetros varillas de puesta a tierra:	16mm = 0,016m
Longitud de las varillas:	2,40 m
Cantidad de varillas:	30
Espaciamiento entre conductores: D	6 m
Impedancia de Secuencia Cero: Z^0	(0.0 + 0.27j) Ω
Impedancia de Secuencia Positiva: Z^+	(0.10 + 1.20j) Ω
Impedancia de Secuencia Negativa: Z^-	(0.10 + 1.20j) Ω
Voltaje: E	22 kV



Cálculo de corriente de falla.

Para el lado de 22 kV:

$$3I_0 = \frac{3 * 22000 \text{ V} / \sqrt{3}}{(3 * 0)\Omega + (0.10 + 0.10 + 0)\Omega + j(1.20 + 1.20 + 0.27)\Omega}$$

$$|3I_0| = 14.231 \text{ kA}$$

Relación $\frac{X}{R}$:

$$\frac{X}{R} = 13.35$$

Cálculo de la máxima corriente de la red I_G

$$T_a = 13.35 * \frac{1}{2 * \pi * 60} = 0.0354$$

El factor de decremento es:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.0354}{0.75} (1 - e^{\frac{-2*0.75}{0.0354}})} = 1.023$$

Factor de división de corriente:

$$S_f = 0.4$$

Esta corriente debe reflejar la máxima corriente cuando se da una falla. Para el cálculo de I_G :

$$I_G = 1.023 * 0.4 * 14.231\text{kA}$$

$$I_G = 5.823 \text{ kA}$$



4.1. Selección del conductor:

Asumiendo un el peor de los casos un $t_c = 1s$

$$A_{kcmil} = 14.231 * \frac{197.4}{\sqrt{\frac{3.4}{1*0.00381*1.78} \ln \left[\left(\frac{242+450}{242+30} \right) \right]}}$$

$$A_{kcmil} = 129.835 \text{ MCM}$$

Área

$$A_{kcmil} = 133.1 \text{ MCM}$$

$$d = 0.01m$$

Tomando en cuenta que la malla base se encuentra con conductor calibre # 2/0, la porción de malla que se debe de añadir también será de 2/0.

4.2. Cálculo de valores propios del Sistema de Puesta a Tierra

En esta sección se propone implementar una malla cuadrada y anexarla a la malla anterior, resultando el diseño final en forma de L, a continuación, se muestra como quedaría la malla propuesta ya con el anexo:

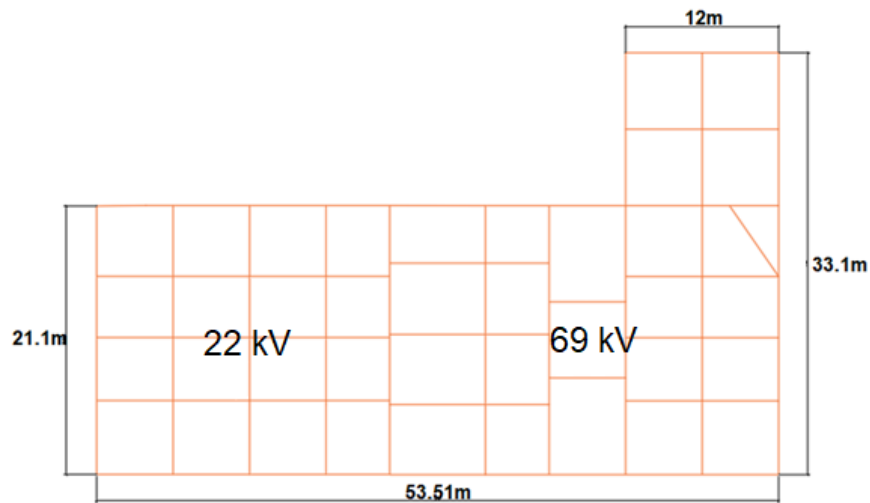


Figura 4. 1. Redimensionamiento de la nueva malla

Calculamos la longitud total incluyendo las varillas:

$$L = L_R + L_M$$

$$L_R = L_r * \#picas$$

$$L_R = 72 \text{ m}$$

$$L_M = L_{\text{malla_actual}} + L_{\text{malla_nueva}}$$

$$L_M = 532.55 \text{ m}$$

$$L = 611.3 \text{ m}$$

Para el cálculo de la resistencia de tierra de la grilla se tiene:

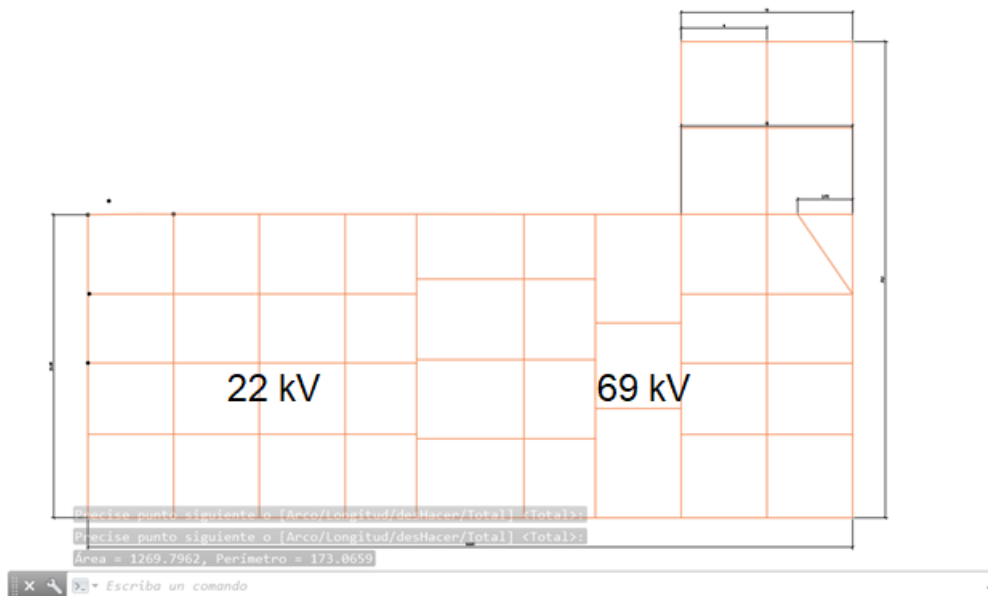


Figura 4. 2. Área de la nueva malla en la S/E 03



Nota: debido a que el espacio en la S/E 03 es pequeño y no existe la posibilidad de aumentar considerablemente la longitud de la malla existente, se opta por aumentar una malla de forma cuadrada de 12 m * 12 m con cuadrículas de 6 m y 5 varillas en las esquinas del perímetro de la nueva malla y en el centro de la misma.

Para dar el cumplimiento de los valores de seguridad en tensiones de toque se da como solución alternativa la mejora de la resistividad del suelo (de 133 Ω m a 50 Ω m), con esta mejora se reduce la resistencia a tierra de la malla, el GPR y también las tensiones de toque y contacto.

Esta mejora permite que la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur pueda seguir manteniendo en servicio la S/E 03 Monay ya que cumpliría con los parámetros de seguridad para las puestas a tierra de la norma IEEE Std 80 - 2013.

$$R_g = 50 \left[\frac{1}{611.3} + \frac{1}{\sqrt{20 * 1270}} * \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 * \sqrt{\frac{20}{1270}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.68 \Omega$$

Cálculo de la elevación de potencial de tierra GPR

$$GPR = 5.823 \text{ kA} * 0.68 \Omega$$

$$GPR = 3.959 \text{ kV}$$

Cálculo de las tensiones de contacto y de paso de acuerdo a la geometría de la malla.

Los voltajes de contacto y de paso calculados se deben comparar con los voltajes máximos permisibles.



El voltaje de malla o contacto

$$V_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M}$$

Cálculo de K_m :

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

$$K_{ii} = 1$$

Cálculo de K_h :

Con $h_o = 1m$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.225$$

Cálculo de los factores n_a, n_b, n_c y n_d .

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d$$

$$n_a = 2 * \frac{539.3}{173.1} = 6.23$$

$$n_b = \sqrt{\frac{173.1}{4 * \sqrt{1270}}} = 1.10$$



$$n_c = \left[\frac{53.51 \cdot 33.1}{1270} \right]^{0.7 \cdot \frac{1270}{53.51 \cdot 33.1}} = \mathbf{1.18}$$

$$n_d = \mathbf{1}$$

Nota: tomamos el valor de 1 suponiendo que la malla se asemeja a una forma rectangular.

$$n = 8.09$$

$$K_m = 0.77$$

Para el cálculo del factor de irregularidad se usa la ecuación 2.22 donde K_i :

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n$$

$$K_i = 1.84$$

$$L_M = 539.3 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{2.40}{\sqrt{53.51^2 + 33.1^2}} \right) \right] \cdot (30 \cdot 2.40)$$

$$L_M = 654.251 \text{ m}$$

Reemplazando en la ecuación se tiene lo siguiente:

$$V_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M}$$

$$V_m = \frac{50 \cdot 5.823 \cdot 10^3 \cdot 0.77 \cdot 1.84}{654.251}$$

$$V_m = V_{\text{contacto}} = \mathbf{630.5 \text{ V}}$$



Voltaje de paso

$$V_{\text{paso}} = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{L_{\text{paso}}}$$

$$L_{\text{paso}} = 0.75 * 539.1 + 0.85 * 72$$

$$L_{\text{paso}} = 465.53 \text{ m}$$

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

$$K_s = 0.42$$

$$V_{\text{paso}} = \frac{50 * 5.823 * 10^3 * 0.42 * 1.84}{465.53}$$

$$V_{\text{paso}} = 483.53 \text{ V}$$

4.3. Tensiones permisibles de toque y paso:

Cálculo del factor de reflexión

Capa de grava con una resistividad $\rho_s = 2500 \Omega \text{ m}$

Capa de suelo bajo la grava $\rho = 50 \Omega \text{ m}$

$$K = -0.96$$



Cálculo del factor de reducción

$$h_s = 0,15 \text{ m}$$

$$C_s = 0.77$$

Cálculo de los máximos voltajes permisibles de paso y contacto

Con el valor del espesor de la grava; factor de reflexión y factor de reducción calculados anteriormente se realizan los cálculos de los voltajes de paso y contacto permisibles.

El tiempo de actuación para las protecciones de 1 segundo.

$$V_{\text{paso}_{70\text{kg}}} = (1000 + 6 * C_s(h_s, k)\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$V_{\text{contacto}_{70\text{kg}}} = (1000 + 1.5 * C_s(h_s, k)\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Por lo tanto:

$$V_{\text{paso}_{70\text{kg}}} = 2.275 \text{ kV}$$

$$V_{\text{contacto}_{70\text{kg}}} = 704.757 \text{ V}$$

4.4. Validación, simulación y presentación de resultados

Después de realizar el análisis al actual sistema de puesta a tierra se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4. 2. Tabla Resumen de presentación de resultados obtenidos mediante cálculo.

Tensiones	Máximo Permissible (70kg)	Sistema de Puesta a Tierra S/E 03 Monay (redimensionado)
V_{contacto}	704.757 V	630.5 V
V_{paso}	2.275 kV	483.53 V
GPR	3.959 kV	

Se validarán los cálculos mediante el uso de software especializado ETAP, a continuación, se muestran los gráficos de la malla del SPT propuesto y los valores obtenidos:

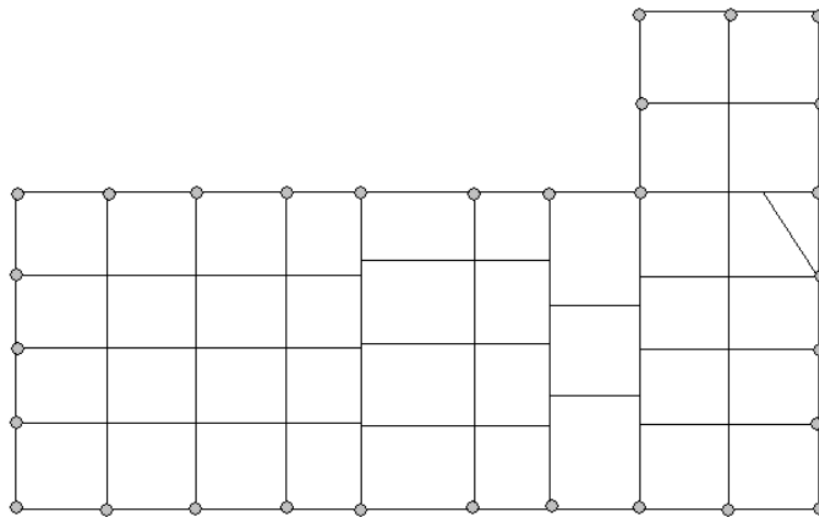


Figura 4. 3. Malla de puesta a tierra repotenciada

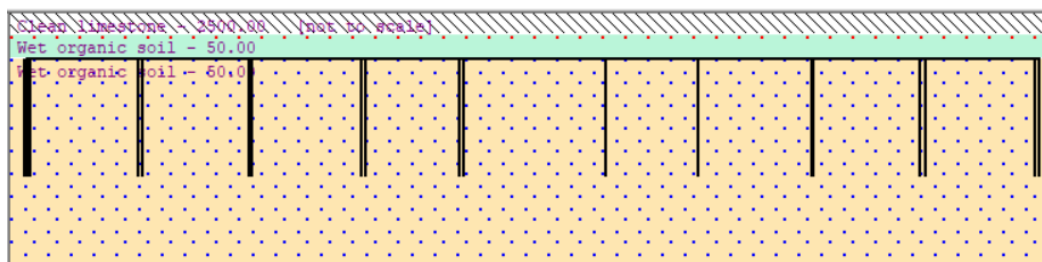


Figura 4. 4. Representación del suelo y malla de puesta a tierra repotenciada.

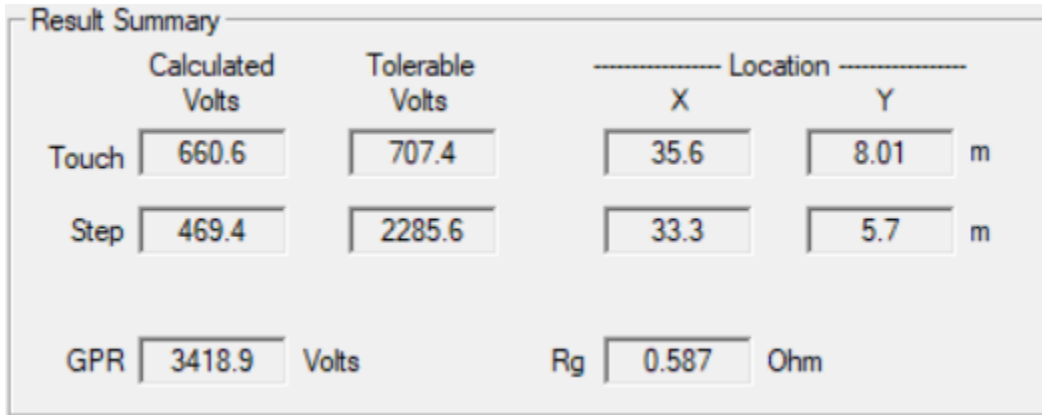


Figura 4. 5. Resultados obtenidos mediante simulación

R _g Ground Resistance ohm	GPR Ground Potential Rise Volts	Maximum Touch Potential					Maximum Step Potential				
		Tolerable Volts	Calculated Volts	Calculated %	Coordinates (m)		Tolerable Volts	Calculated Volts	Calculated %	Coordinates (m)	
					X	Y				X	Y
0.587	3418.9	707.4	660.6	93.4	35.6	8.0	2285.6	469.4	20.5	33.30	5.70

Total Fault Current	14.231 kA	Reflection Factor (K):	-0.961
Maximum Grid Current	5.826 kA	Surface Layer Derating Factor (Cs):	0.774
		Decrement Factor (Df):	1.023

Figura 4. 6. Valores obtenidos de la simulación de la malla de puesta a tierra redimensionada.

Tabla 4. 3. Tabla comparativa entre valores obtenidos por el autor y la simulación.

Parámetro	Simulación	Cálculo (autor)
GPR	3418.9 V	3959 V
Resistencia de tierra R_g	0.59 Ω	0.68 Ω
Máxima corriente de red I_G	5.826 kA	5.823 kA
Factor de reflexión K	-0.961	-0.96
Factor de reducción C_s	0.774	0.77
Factor de Decremento D_f	1.023	1.023
Voltaje de toque V_{toque70kg}	660.6 V	630.5 V
Voltaje de paso V_{paso70kg}	469.4 V	483.5 V
Voltaje de toque permisible V_{toque_permisible70kg}	707.4 V	704.8 V
Voltaje de paso permisible V_{paso_permisible70kg}	2285.6 V	2275 V



De acuerdo a la tabla 4.3. se puede ver que el diseño del nuevo sistema de puestas a tierra es validado mediante el uso de software apropiado para este tipo de estudios.

El nuevo sistema propuesto cumple con las condiciones de seguridad que recomienda la normativa IEEE Std 80 - 2013.

4.5. Comparación del diseño actual con sistema de puesta a tierra en funcionamiento

En la tabla 4.4. se presentan los parámetros del sistema de puesta a tierra que se encuentra en funcionamiento actualmente en la S/E 03 Monay y el diseño propuesto como alternativa a una probable mejora o redimensionamiento del sistema.

Tabla 4. 4.Tabla comparativa entre sistema de puesta a tierra actual de la S/E 03 y el diseño propuesto para el redimensionamiento.

Parámetro	Sistema en Funcionamiento	Diseño Mejorado
GPR	11996 V	3959 V
Resistencia de tierra R_g	2.06 Ω	0.68 Ω
Máxima corriente de red I_G	5.823 kA	5.823 kA
Factor de reflexión K	-0.899	-0.96
Factor de reducción C_s	0.706	0.77
Factor de Decremento D_f	1.023	1.023
Voltaje de toque $V_{toque70kg}$	1774 V	630.5 V
Voltaje de paso $V_{paso70kg}$	1323 V	483.5 V
Voltaje de toque permisible $V_{toque permisible70kg}$	661.25 V	704.8 V
Voltaje de paso permisible $V_{paso permisible70kg}$	2101.13 V	2275 V

En el sistema de puesta a tierra actual no se cumplen los parámetros de seguridad requeridos por la norma IEEE Std 80 - 2013, no cumplen voltajes de toque y de paso tolerables, claramente se puede observar que los valores son bastante elevados con relación a sus valores permisibles; en el diseño mejorado estos parámetros de seguridad se cumplen y devuelven la operatividad al sistema de puesta a tierra que actualmente tiene la S/E.



4.6. Ventajas del Redimensionamiento

El sistema una vez cumplido con el redimensionamiento ofrecerá las siguientes ventajas:

- Cumplirá con los criterios de seguridad tanto para personal y equipos que estén dentro de la S/E 03 Monay.
- No será necesario cambiar el calibre del conductor de la malla de puesta a tierra.
- Ante la necesidad de realizar la excavación para el cambio de terreno se podrá verificar con certeza el estado de todo el sistema de puesta a tierra.
- Al no ser necesario reemplazar la malla anterior con una nueva malla con un calibre 4/0 se ahorraría dinero en la construcción de esta nueva malla.
- Se puede inspeccionar y a su vez mejorar el estado de las uniones en las cuadrículas del sistema de puesta a tierra.
- En el redimensionamiento del sistema de puesta a tierra anexando una cuadrícula de 12 m*12 m con separaciones internas de 6 m y del mismo calibre del conductor de la malla anterior, el sistema de puesta a tierra vuelve a ser operativo.
- Otra de las ventajas es que se logra bajar la resistencia de puesta a tierra a menos de 1 Ω , lo que ayuda a que los voltajes de paso y de contacto estén dentro de los valores permisibles.
- Aumentando solo 5 centímetros de material en la capa superficial se permite tener valores tolerables más altos en los voltajes.
- Finalmente, el GPR se reduce con el nuevo redimensionamiento.

4.7. Desventajas del redimensionamiento

Las desventajas de este redimensionamiento serían los siguientes:

- Es necesario realizar excavaciones y movimiento de tierras.
- Se corre el riesgo de una falla eléctrica cuando se esté realizando el proceso (riesgo de electrocución).
- Uso de recursos humanos y maquinaria para realizar el movimiento de tierras.
- Elaboración de cronogramas de trabajo, evaluación de riesgos y elaboración de programas de prevención de riesgos laborales.
- Cuando se esté realizando la excavación, los obreros y la maquinaria estarían expuestos a voltajes de paso y de contacto elevados.



- Se necesita un área de 144 m² adicionales para anexarle una malla del mismo calibre de la malla anterior.
- Uso de equipo especial en los obreros para realizar el trabajo.

4.8. Presupuesto del redimensionamiento

4.8.1. Presupuesto eléctrico

Para el redimensionamiento de la malla de puesta a tierra actual se estima un presupuesto de:

Tabla 4. 5. Costo de materiales eléctricos

Cantidad	Material	Costo unitario	Costo Total
10 cartuchos	Cartucho Suelta Exotérmica	\$ 7.92	\$ 79.20
70 metros	Conductor 2/0 AWG	\$ 6.25	\$ 437.50
10 varillas	Electrodo de puesta a tierra de 5/8	\$ 6.50	\$ 65.00
Total			\$ 581.70

Se deberá de tomar en cuenta costos adicionales por mano de obra, equipos de protección, herramientas y materiales adicionales en caso de ser requeridos. Cuando se realice el movimiento de tierras y se pueda constatar el estado real de la malla de puesta a tierra puede ser necesario material eléctrico adicional para poder realizar correcciones en la malla, éstas correcciones son necesarias en las uniones de las cuadrículas formados por los conductores, realizar cambios en las bajantes de tierra en los equipos o instalaciones aterradas, ya que al estar expuestas a la intemperie corren el riesgo de oxidarse y perder propiedades.

4.8.2. Presupuesto de obra civil:

- Actividad 1: Recolección de material de la capa superficial (roca triturada) de toda el área de la S/E (que presenta una profundidad de 0.10 m) en 2 días de 8 horas de trabajo por día, esta actividad se la realiza con 5 personas de las cuales dos se encargarán del traslado, apilamiento del material y otras tres restantes realicen labores de remoción y retiro del material.
- Actividad 2: Se necesita excavar aproximadamente 1270 m² de área a una profundidad de 0.50 m, para esto se requiere el uso de maquinaria tales como un retroexcavador tipo BOBCAT, 2 volquetas de 12m³ para traslado de material que realicen 53 viajes y 3 obreros para que donde sea dificultoso la intervención de ellos realicen el trabajo manualmente. El tiempo estimado para realizar estas actividades es de una semana.



- Actividad 3: Se necesita 54 viajes de tierra negra (similar a la tierra usada en los cultivos de papa), cada viaje con material se le estima un costo de 100 dólares.
- Actividad 4: Una vez que el material llegue a la los patios de la S/E se requiere 5 personas para que el material sea esparcido y compactado por toda el área de la S/E. Para realizar esta actividad se calcula un tiempo de 4 días.
- Actividad 5: Al final se necesita esparcir roca triturada en la capa superficial. Adicional al material que se retiró en la actividad 1 se requieren 7 viajes de volquetas de 12 m³ de roca triturada, cada viaje de estos está en un costo de 90 dólares.

Tabla 4. 6. Presupuesto de obra civil.

Cantidad	Material	Costo unitario	Costo Total
54 viajes	Tierra negra	\$ 100	\$ 5400
2 semanas	BOBCAT	\$ 25*hora	\$ 2000
54 viajes	Material de desalojo	\$ 50	\$ 2700
7 viajes	Roca triturada	\$ 90	\$ 630
5	Obreros * 2 semanas	\$ 20 * día	\$ 1000
Total			\$ 11730

4.9. Factibilidad para desarrollar el proceso de redimensionamiento

El redimensionamiento se puede realizar siempre y cuando la S/E se encuentre fuera de servicio, el tiempo estimado para realizar las actividades requeridas es de aproximadamente dos semanas. Se tendría que tomar la decisión por parte de la CENTROSUR si es que resulta factible dejar por dos semanas fuera de servicio esta S/E para realizar los cambios en la malla. Si se toma la decisión de dejar fuera de servicio y realizar el cambio en la malla, esta S/E entraría a ser operativa nuevamente cumpliendo ya con los criterios de seguridad de la norma IEEE Std 80 - 2013. El costo de construir una nueva S/E para aliviar la cargabilidad de la S/E 03 es muy elevado, alrededor \$ 12500 más las pérdidas que se darían por mantener la S/E 03 fuera de servicio.

4.10. Conclusiones del Proyecto

- Para que la S/E 03 Monay cumpla con los parámetros de seguridad es necesario realizar el redimensionamiento y cambio del terreno de la S/E.
- **La norma IEEE Std 80 - 2013 establece los criterios de seguridad que se deben de cumplir en el diseño de sistemas de puesta a tierra ante posibles fallas, si se presenta una falla en la S/E 03 el sistema de puesta a tierra no va a cumplir con su objetivo.**



- **Este análisis realizado al redimensionamiento de la malla de puesta a tierra cumple con el objetivo de devolver la operatividad a la S/E 03 en términos de seguridad.**
- **Si se deja la malla de puesta a tierra tal y como se encuentra actualmente se corre el riesgo de perder vidas humanas y perder gran parte de equipos que están dentro de la S/E 03.**
- **El cambiar el calibre al conductor no baja los niveles de voltajes de paso ni de toque, estos valores están directamente relacionados con la geometría de la malla y resistividad del terreno.**
- El valor de corriente de falla es bastante alto, se debería verificar si existe la posibilidad de reducir esta corriente para que la malla de puesta a tierra sea operativa.
- **Los cambios que se tienen que hacer en la malla y en el patio de la S/E 03 deben realizarse cuando esta esté en estado off. Al momento de realizar mediciones en el patio de la subestación se pudo medir una corriente parásita de 2 Amperios que circulaba por los conductores bajantes de puestas a tierra.**



CAPÍTULO 5. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA PARA S/E AC

5.1. Presentación del programa

Para la verificación y realización de nuevos diseños de sistemas de puestas a tierra para Subestaciones Eléctricas AC en la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur es necesario que se tenga un programa con el cual se pueda revisar estos diseños.

El programa para la verificación y realización de sistemas de puestas a tierra, fue realizado en Microsoft Excel. La primera hoja de cálculo es dedicada al cálculo del calibre mínimo del conductor que se debe de usar en la malla del sistema de puesta a tierra, la segunda hoja presenta el cálculo del sistema de puesta a tierra compuesto por malla y picas verticales que tienen forma cuadrícula, y en la tercera hoja se puede realizar el cálculo del sistema de puestas a tierra compuesto por la malla y picas verticales, pero con forma rectangular.

Tabla 5. 1. Primera hoja de cálculo usada para determinar el calibre mínimo del conductor.

Cálculo del Mínimo Calibre del Conductor para SPT en S/E de la EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR			Table 1—Material constant						
			Description	Material ¹ conductivity (% IACS)	a. factor ² at 20 °C (1/°C)	R_0 at 0 °C (°C)	Fusing ³ temperature T_m (°C)	Resistivity ⁴ at 20 °C ρ_r ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Thermal ⁵ capacity $TcAP$ $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
D a t o s	Impedancia de Secuencia Positiva Equivalente Z1 Ω	4+10j	Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.4
	Impedancia de Secuencia Negativa Equivalente Z2 Ω	4+10j	Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.4
	Impedancia de Secuencia Cero Equivalente Z0 Ω	10+40j	Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084 ⁶	4.40	3.8
	Factor de División de Corriente Sf	0.6	Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084 ⁶	5.86	3.8
	Resistencia de Falla Rf	0	Copper-clad steel rod	17.0	0.003 78	245	1084 ⁶	10.1	3.8
	Voltaje Línea Línea de la peor localización de la Falla AT V	115000	Aluminum-clad steel wire	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
	Voltaje Línea Línea de la peor localización de la Falla MT V	13000	Steel, 1020	10.8 ⁸	0.003 77	245	1510	15.90	3.8
	Impedancia del Transformador Z1 y Z0 en el lado de MT Ω	0.034+1.014j	Stainless-clad steel rod ⁷	9.8	0.003 77	245	1400 ⁹	17.50	4.4
	Potencia del Transformador MVA	15	Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419 ¹⁰	20.10	3.9
	Conexión del Transformador	Delta / Y	Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.0
	Tiempo de falla Tc	0.5							
	Temperatura Ambiente °C	40							
	Material:	CCS							
	Conductividad del Material	30							
	Factor αR a 20°C:	0.00378							
K0 a 20°C:	245								
Temperatura de Fusión Tm °C:	1084								
Resistividad a 20°C ρ_r ($\mu\Omega/\text{cm}$):	5.862								
Capacidad Térmica Tcap:	3.85								
Corriente de Falla If = 3 I0 A (Lado de AT)	3180								
Z1 Ω (Transferida al Lado de MT)	0.0852+1.142j								
Corriente de Falla If = 3 I0 A (Lado de MT)	6814.3								
Calibre conductor		65.91							

CALIBRE DEL CONDUCTOR	AREA NOMINAL	DIAMETRO
MCM	mm ²	m
350	177,35	0,015
300	152,01	0,0139
250	126,68	0,0127
211,6	107,22	0,0117
167,8	85,03	0,0104
133,1	67,44	0,0093



Tabla 5. 2. Segunda hoja de cálculo usada para sistemas de puestas a tierra con forma de cuadrícula y con picas.

EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR S.A. DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMA IEEE 80 STD 2013					
Corriente de falla 3 I0 (A):	3180	Profundidad de enterramiento (m):	0.5	Relación X/R	16.1
Corriente de Tierra IG (A)	1908	Resistividad de la grava (Ω.m):	2500	Separacion de Cuadrículas	7
Tiempo de reacion de las protecciones (s):	0.5	Espesor de la capa superficial (m)	0.102	Diámetro del conductor en metros.	0.01
Resistividad aparente del terreno pa (Ω.m):	400	Cs	0.74	# de conductores a lo ancho de la malla Y	11
Temperatura ambiente (°C):	40	# de Varillas copperweld a utilizar:	20	# de conductores a lo largo de la malla X	11
Material del conductor:	CCS	Diámetro de la varilla (m):	0.016	Factor de decremento Df	1
Dimensiones de la malla (ancho Y ; largo X m*m):	70	Longitud de la varilla (m):	7.5	Factor de proyeccion Cp	1
	70				Sf
Tabla 1					
Tensión de malla, toque o contacto					
L malla	1786.4	$V_{malla-toque} = \frac{\rho_a K_m K_i I_G}{L_{malla}}$	747.4	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)	
Kh	1.225			1540	
Kii	1			Longitud conductores en m (Lt)	
n	11			1630	
d (diametro) m	0.01			2.75	
Ki	2.272				
Km	0.77	Tabla 2a			
ho	1	Tabla 2b			
Tabla 3					
Tension de paso					
L paso	1282.5	$V_{paso} = \frac{\rho_a K_s K_i I_G}{L_{paso}}$	548.3	Tensiones Permisibles de Paso y Contacto	
Ki	2.272			Voltaje de paso 50 Kg [V]	1985.0
Ks	0.406			Voltaje de paso 70 Kg [V]	2686.6
Tabla 4					
Datos del SPT (geometría)		Área m ²	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)		
Bg =		4900	1540		
Corriente máxima en la red		IG =	1908		
Área del Calibre mínimo del conductor		A mm ² =	33		
Factor de reflexion		K =	-0.72		
GPR (V) =		5.247			
Tabla 5					

Tabla 5.3. Tercera hoja de cálculo usada para sistemas de puestas a tierra con forma rectangular y con picas.

EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR S.A. DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMA IEEE 80 STD 2013					
Corriente de falla 3 I0 (A):	3180	Profundidad de enterramiento (m):	0.5	Relación X/R	0
Corriente de Tierra IG (A)	1908	Resistividad de la grava (Ω.m):	2500	Separacion de Cuadrículas	7
Tiempo de reacion de las protecciones (s):	0.5	Espesor de la capa superficial (m)	0.102	Diámetro del conductor en metros.	0.01
Resistividad aparente del terreno pa (Ω.m):	400	Cs	0.74	# de conductores a lo ancho de la malla Y	13
Temperatura ambiente (°C):	40	# de Varillas copperweld a utilizar:	38	# de conductores a lo largo de la malla X	10
Material del conductor:	CCS	Diámetro de la varilla (m):	0.016	Factor de decremento Df	1
Dimensiones de la malla (ancho Y ; largo X m*m):	63	Longitud de la varilla (m):	10	Factor de proyeccion Cp	1
	84				Sf
Tabla 1. Datos					
Tensiones de toque o de malla					
L malla	2292.2	$V_{malla-toque} = \frac{\rho_a K_m K_i I_G}{L_{malla}}$	595.8	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)	
Kh	1.225			1659	
Kii	1			Longitud conductores en m (Lt)	
na	11.29			2039	
nb	1.005			2.62	
nc	1				
nd	1	Tabla 2a			
n	11.35	Tabla 2b			
d (diametro) m	0.01				
Ki	2.324	Tabla 2c			
Km	0.77	Tabla 2d			
ho	1	Tabla 2e			
Tabla 3					
Tensiones de Paso					
L paso	1567.25	$V_{paso} = \frac{\rho_a K_s K_i I_G}{L_{paso}}$	459.4	Tensiones Permisibles de Paso y Contacto	
Ki	2.3238			Voltaje de paso 50Kg [V]	1985.0
Ks	0.406			Voltaje de paso 70 Kg [V]	2686.6
Tabla 4					
Datos del SPT (geometría)		Área m ²	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)		
Rg (Ω) =		5292	1659		
Corriente máxima en la red		IG =	1908		
Área mínima del Calibre del Conductor		mm ² =	33		
Factor de reflexion		K =	-0.72		
GPR (V) =		4.999			
Tabla 5					



5.2. Guía de uso

- a) En la primera hoja se puede realizar el cálculo del calibre mínimo del conductor que se debe de usar en la malla de puesta a tierra, a continuación, se detallan los pasos que se deben de seguir para que el programa realice el cálculo:
- En la sección de la tabla donde se encuentra la etiqueta datos, se deben ingresar todos los datos necesarios tales como: impedancia de secuencia positiva, negativa y cero; factor de división de corriente S_f , valor de la resistencia de falla R_f , valor del voltaje de AT y MT de la S/E, potencia del transformador y tipo de conexión en MVA, tiempo de falla en segundos T_c , valor de la temperatura ambiente T_A , y datos de las propiedades del material del que está hecho el conductor.
 - En la sección de cálculos se podrán encontrar parámetros necesarios para determinar el calibre del conductor, parámetros como: corriente de falla I_f , valor de la impedancia de secuencia positiva transferida al lado de MT, el valor de la relación X/R , y en las tres últimas de las filas se encuentra el valor del mínimo calibre requerido, estos valores se encuentran en Kcmil, mm^2 y el diámetro mínimo en metros.
- b) En la segunda hoja de cálculo se puede realizar el análisis a los distintos diseños de sistemas de puestas a tierra en S/E Ac que contengan picas o varillas de tierra y que presenten un diseño cuadrangular en la malla de puesta a tierra.

Se deben de seguir los siguientes pasos para que el programa realice el cálculo:

- Debemos tener los datos de corrientes de falla, tiempos de actuación de protecciones, tipo de material que se usará en la malla, diámetro del conductor en metros, valores de resistividad de terreno y de la capa superficial, profundidad a la que se encuentra o encontrará la malla de puesta a tierra, dimensiones de la S/E (en caso de que se cubra todo el área de la S/E con malla de puesta a tierra) o dimensión del área que es o será cubierta por la malla de puesta a tierra, espesor de la capa superficial de la grava o roca triturada, cantidad de varillas o picas de tierra que están instaladas o que se van a usar, separación de las cuadrículas interiores de la malla, factor de división de corriente S_f , factor de decremento D_f y factor de proyección C_p ($C_p = 1$ si no se consideran crecimientos futuros en la subestación) y la cantidad de conductores que van a lo largo y ancho de la malla (x y y). Todos estos datos deben de ser ingresados en la Tabla 1, en donde se muestren textos de color rojo.

Tabla 5.4. Ingreso de Datos

EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR S.A. DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMA IEEE 80 STD 2013					
Corriente de falla 3 I0 (A):	3180	Profundidad de enterramiento (m):	0.5	Relación X/R	16.1
Corriente de Tierra IG (A)	1908	Resistividad de la grava (Ω.m):	2500	Separacion de Cuadrículas	7
Tiempo de reaccion de las protecciones (s):	0.5	Espesor de la capa superficial (m)	0.102	Diametro del conductor en metros.	0.01
Resistividad aparente del terreno pa (Ω.m):	400	Cs	0.74	# de conductores a lo ancho de la malla Y	11
Temperatura ambiente (°C):	40	# de Varillas copperweld a utilizar:	20	# de conductores a lo largo de la malla X	11
Material del conductor:	CCS	Diámetro de la varilla (m):	0.016	Factor de decremento Df	1
Dimensiones de la malla (ancho Y ; largo X m²m):	70	Longitud de la varilla (m):	7.5	Factor de proyeccion Cp	1
	70			Sf	0.6

Tabla 1

- En las tablas 2a y 2b se encuentran los datos calculados tales como:
 - o Área del SPT
 - o Longitud total en metros de conductores presentes en la malla del SPT (L_c)
 - o Longitud total en metros del SPT (L_t)
 - o Corriente máxima en la red del SPT
 - o Calibre mínimo requerido para la malla del SPT
 - o Valor del Factor de reflexión K
 - o Valor del GPR

Tabla 5.5. Tabla 2a y 2b

Datos del SPT (geometría)	Área m ²	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)	
		1540	
Rg =	4900	Longitud conductores en m (Lt)	
		1690	
		2.75	
Tabla 2a			
Corriente máxima en la red	IG =	1908	
Área del Calibre mínimo del conductor	A mm ² =	33	
Factor de reflexion	K =	-0.72	
GPR (V) =		5,247	
Tabla 2b			

- Las tablas 3 y 4 muestran valores propios de factores usados para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto, así como también muestran el valor de tensiones de contacto y de paso para el sistema de puesta a tierra.
- La tabla 5 muestra los valores permisibles de tensiones de paso y de contacto.
- EL resultado del voltaje de contacto de la tabla 3 debe de ser comparado con el valor del voltaje de contacto para una persona de 70 kg de la tabla 5 (celdas de color naranja).
- El resultado del voltaje de paso de la tabla 4 de ser comparado con el valor del voltaje de paso para una persona de 70 kg de la tabla 5 (celdas color azul).



- Si los valores de las tensiones de contacto y de paso obtenidos en las tablas 3 y 4 son inferiores a los valores de tensiones permisibles de la tabla 5, el diseño queda completamente validado y listo para su implementación.

Tabla 5.6. Cálculos de tensiones de contacto y paso en las Tablas 3 y 4.

Tensión de malla, toque o contacto				
L malla	1786.4	$V_{malla-toque} = \frac{\rho_a K_m K_i I_G}{L_{malla}}$		
Kh	1.225			
Kii	1			
n	11			
d (diametro) m	0.01			
Ki	2.272			
Km	0.77			
ho	1	Voltaje de malla (contacto) [V]	747.4	
Tabla 3				
Tension de paso				
L paso	1282.5	$V_{paso} = \frac{\rho_a K_s K_i I_G}{L_{paso}}$		
Ki	2.272			
Ks	0.406			
			Voltaje de paso [V]	548.9
Tabla 4				

Tabla 5.7. Tensiones permisibles de paso y contacto

Tensiones Permisibles de Paso y Contacto	
Voltaje de paso 50 Kg [V]	1985.0
Voltaje de paso 70 Kg [V]	2686.6
Voltaje de contacto 50 Kg [V]	619.3
Voltaje de contacto 70 Kg [V]	838.2
Tabla 5	

- c) En la tercera hoja de cálculo se puede realizar el análisis a los distintos diseños de sistemas de puestas a tierra en S/E Ac que contengan picas o varillas de tierra y que presenten un diseño rectangular en la malla de puesta a tierra.

Se deben de seguir los siguientes pasos para que el programa realice el cálculo:

- Debemos tener los datos de corrientes de falla, tiempos de actuación de protecciones, tipo de material que se usará en la malla, diámetro del conductor en metros, valores de resistividad de terreno y de la capa superficial, profundidad a la que se encuentra o encontrará la malla de puesta a tierra, dimensiones de la S/E (en caso de que se cubra todo el área de la S/E con malla de puesta a tierra) o dimensión del área que es o será cubierta por la malla de puesta a tierra, espesor de la capa superficial de la grava o roca triturada, cantidad de varillas o picas de tierra que están instaladas o que se van a usar, separación de las cuadrículas interiores de la malla,



factor de división de corriente S_f , factor de decremento D_f y factor de proyección C_p ($C_p = 1$ si no se consideran crecimientos futuros en la subestación) y la cantidad de conductores que van a lo largo y ancho de la malla (x y y). Todos estos datos deben de ser ingresados en la Tabla 1, en donde se muestren textos de color rojo.

Tabla 5.8. Ingreso de Datos

EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR S.A. DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMA IEEE 80 STD 2013					
Corriente de falla 3 I0 (A):	3180	Profundidad de enterramiento (m):	0.5	Relación X/R	0
Corriente de Tierra IG (A)	1908	Resistividad de la grava (Ω.m):	2500	Separación de Cuadrículas	7
Tiempo de reacción de las protecciones (s):	0.5	Espesor de la capa superficial (m)	0.102	Diámetro del conductor en metros.	0.01
Resistividad aparente del terreno pa (Ω.m):	400	Cs	0.74	# de conductores a lo ancho de la malla Y	13
Temperatura ambiente (°C):	40	# de Varillas copperweld a utilizar:	38	# de conductores a lo largo de la malla X	10
Material del conductor:	CCS	Diámetro de la varilla (m):	0.016	Factor de decremento Df	1
Dimensiones de la malla (ancho Y ; largo X m²m):	63	Longitud de la varilla (m):	10	Factor de proyección Cp	1
	84			Sf	0.6

Tabla 1. Datos

- En las tablas 2a y 2b se encuentran los datos calculados tales como:
 - o Área del SPT
 - o Longitud total en metros de conductores presentes en la malla del SPT (L_c)
 - o Longitud total en metros del SPT (L_t)
 - o Corriente máxima en la red del SPT
 - o Calibre mínimo requerido para la malla del SPT
 - o Valor del Factor de reflexión K
 - o Valor del GPR

Tabla 5.9. Tabla 2a y 2b

Datos del SPT (geometría)	Área m^2	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)	
		1659	
		Longitud conductores en m (Lt)	
	5292	2039	
Rg Ω =	2.62		
Tabla 2a			
Corriente máxima en la red		IG =	1908
Área mínima del Calibre del Conductor		$mm^2 =$	33
Factor de reflexión		K =	-0.72
GPR (V) =		4,999	
Tabla 2b			

- Las tablas 3 y 4 muestran valores propios de factores usados para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto, así como también muestran el valor de tensiones de contacto y de paso para el sistema de puesta a tierra.
- La tabla 5 muestra los valores permisibles de tensiones de paso y de contacto.



- EL resultado del voltaje de contacto de la tabla 3 debe de ser comparado con el valor del voltaje de contacto para una persona de 70 kg de la tabla 5 (celdas de color naranja).
- El resultado del voltaje de paso de la tabla 4 de ser comparado con el valor del voltaje de paso para una persona de 70 kg de la tabla 5 (celdas color azul).
- Si los valores de las tensiones de contacto y de paso obtenidos en las tablas 3 y 4 son inferiores a los valores de tensiones permisibles de la tabla 5, el diseño queda completamente validado y listo para su implementación.

Tabla 5.10. Cálculos de tensiones de contacto y paso en las Tablas 3 y 4.

Tensiones de toque o de malla			
L malla	2292.2	$V_{malla-toque} = \frac{\rho_a K_m K_i I_G}{L_{malla}}$	
Kh	1.225		
Kii	1		
na	11.29		
nb	1.005		
nc	1		
nd	1		
n	11.35		
d (diametro) m	0.01		
Ki	2.324		
Km	0.77		
ho	1	Voltaje de malla (contacto) [V]	595.8
Tabla 3			
Tensiones de Paso			
L paso	1567.25	$V_{paso} = \frac{\rho_a K_s K_i I_G}{L_{paso}}$	
Ki	2.3238		
Ks	0.406		Voltaje de paso [V]
Tabla 4			

Tabla 5.11. Tensiones Permisibles de paso y contacto

Tensiones Permisibles de Paso y Contacto	
Voltaje de paso 50Kg [V]	1985.0
Voltaje de paso 70 Kg [V]	2686.6
Voltaje de contacto 50Kg [V]	619.3
Voltaje de contacto 70Kg [V]	838.2
Tabla 5	

5.3. Ejemplo de aplicación

El ejemplo de aplicación es tomado de la Guía IEEE Std 80 – 2013.



Se desea realizar un diseño de un sistema de puesta a tierra para una S/E que tiene los siguientes datos:

- Tiempo de falla t_f : 0.5 segundos
- Impedancia equivalente de secuencia positiva Z^1 : $4.0+j10\Omega$ (lado de 115 kV)
- Impedancia equivalente de secuencia negativa Z^2 : $4.0+j10\Omega$ (lado de 115 kV)
- Impedancia equivalente de secuencia cero Z^0 : $10+j40\Omega$ (lado de 115 kV)
- Factor de división de corriente S_f : 0.6
- Voltaje línea – línea localizado en la peor falla: 115000 V
- Resistividad del suelo ρ : 400 $\Omega.m$
- Resistividad de la capa superficial ρ_s : 2500 $\Omega.m$
- Altura de la capa superficial h_s : 0.102 m
- Profundidad de la malla h : 0.5 m
- Área disponible para el sistema de puesta a tierra: 63 m*84 m
- Impedancia del transformador (Z^1 y Z^0): $0.034+j0.14 \Omega$ (13kV)
- Potencia del transformador: 15 MVA
- Lado de AT: 115 kV
- Lado de MT: 13 kV

Para este ejemplo se toma en consideración que la duración de la falla y del choque eléctrico es el mismo, además se omite el factor de crecimiento de la subestación durante los próximos 25 años debido a que las impedancias equivalentes de falla del sistema y el factor de división de corriente se determinan para la peor ubicación y tipo de falla, incluidas las adiciones posibles del sistema de la S/E en los próximos 25 años.

- Paso 1: **Datos de Campo:** se tiene que el área para la S/E es de 63 m * 84 m, para el diseño inicial se asume un área cuadrangular de 70 m * 70 m, se usaran picas verticales. En la hoja de cálculo Cuadrícula_varillas, Tabla 1 ingresamos el valor de ambos lados en metros.

Tabla 5.12. Paso 1: llenar datos del área del SPT.

EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR S.A. DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMA IEEE 80 STD 2013					
Corriente de falla 3 I0 (A):	3180	Profundidad de enterramiento (m):	0,5	Relación X/R	16,1
Corriente de Tierra IG (A)	1908	Resistividad de la grava (Ω.m):	2500	Separación de Cuadrículas	7
Tiempo de reacción de las protecciones (s):	0,5	Espesor de la capa superficial (m)	0,102	Diametro del conductor en metros.	0,01
Resistividad aparente del terreno pa (Ω.m):	400	Cs	0,74	# de conductores a lo ancho de la malla Y	11
Temperatura ambiente (°C):	40	# de Varillas copperweld a utilizar:	20	# de conductores a lo largo de la malla X	11
Material del conductor:	CCS	Diámetro de la varilla (m):	0,016	Factor de decremento Df	1
Dimensiones de la malla (ancho Y ; largo X m*m):	70	Longitud de la varilla (m):	7,5	Factor de proyeccion Cp	1
	70			Sf	0,6



- Paso 2: **Tamaño del conductor:** Se ignora el valor de la resistencia de falla y se procede a calcular la corriente simétrica de falla a tierra

$$3I_0 \approx I_f$$

$$I_0 = \frac{3 * \frac{115000}{\sqrt{3}}}{3 * 0 + (4 + 4 + 10) + j(10 + 10 + 40)}$$

$$|3I_0| = 3180 \text{ A}$$

$$\frac{X}{R} = 3.33$$

Se procede a calcular las impedancias equivalentes en el lado de MT de 13 kV, debido a que la conexión del transformador es Delta – Y, solo se transfiere la impedancia equivalente de secuencia positiva.

$$Z^1 = \left(\frac{13}{115}\right)^2 (4 + j10) + (0.034 + j1.014)$$

$$Z^1 = 0.085 + j1.142$$

$$Z^0 = 0.034 + j1.014$$

$$I_0 = \frac{3 * \frac{13000}{\sqrt{3}}}{3 * 0 + (0.085 + 0.085 + 0.034) + j(1.142 + 1.142 + 1.014)}$$

$$|3I_0| = 6814 \text{ A}$$

$$\frac{X}{R} = 16.2$$

En el programa se debe de ingresar los datos requeridos en la hoja Calibre conductor y en la zona de cálculos se obtienen las respuestas anteriormente presentadas en el ejemplo.

Tabla 5.13. Datos que se deben ingresar para el cálculo del calibre mínimo del conductor

Cálculo del Mínimo Calibre del Conductor para SPT en S/E de la EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR		
		
D a t o s	Impedancia de Secuencia Positiva Equivalente Z1 Ω	4+10j
	Impedancia de Secuencia Negativa Equivalente Z2 Ω	4+10j
	Impedancia de Secuencia Cero Equivalente Z0 Ω	10+40j
	Factor de División de Corriente Sf	0,6
	Resistencia de Falla Rf	0
	Voltaje Línea Línea de la peor localización de la Falla ATV	115000
	Voltaje Línea Línea de la peor localización de la Falla MTV	13000
	Impedancia del Transformador Z1 y Z0 en el lado de MT Ω	0.034+1.014j
	Potencia del Transformador MVA	15
	Conexión del Transformador	Delta / Y
	Tiempo de falla Tc s	0,5
	Temperatura Ambiente °C	40
	Material:	CCS
	Conductividad del Material	30
	Factor αR a 20°C:	0,00378
	K0 a 20°C:	245
Temperatura de Fusión Tm °C:	1084	
Resistividad a 20°C pr (μΩ/cm):	5,862	
Capacidad Térmica Tcap:	3,85	

Tabla 5.14. Valores obtenidos de corriente de falla, impedancia transferida y valor de la relación X/R

C á l c u l o s	Corriente de Falla If = 3 IO A (Lado de AT)	3180
	Z1 Ω (Transferida al Lado de MT)	0.0852+1.142j
	Corriente de Falla If = 3 IO A (Lado de MT)	6814,3
	Valor de la Relación X/R Lado de MT	16,1
	Área mínima del Calibre del conductor en Kcmil	65,91
	Área mínima del Calibre del conductor en mm ²	33,4
Diámetro mínimo m:	0,0065	

Con las constantes del material anteriormente ingresadas se procede al cálculo del calibre mínimo del conductor que se debe de usar en la malla de puesta a tierra.

$$A_{kcmil} = 6.814 * \frac{197.4}{\sqrt{05 * 0.00378 * 5.862 * \ln \frac{245 + 700}{245 + 40}}}$$



$$A_{kcmil} = 65.905 \text{ kcmils}$$

Pasando de *kcmils* a mm^2 :

$$A_{mm^2} = 33,4$$

Resultando un diámetro mínimo en metros de:

$$\phi = 0.0065 \text{ m}$$

Se va a usar un diámetro de 0.0105 metros, que resulta ser el conductor número 2/0 AWG. Este calibre es el mínimo calibre usado en sistemas de puestas a tierra en S/E AC.

- Paso 3: **Criterio de valores máximos permisibles en tensiones de toque y de paso:** Se usa una capa superficial de $2500 \Omega \text{ m}$ cuya altura es de 0.102 m y debajo de esta capa se presenta un suelo de resistividad de $400 \Omega \text{ m}$.

$$K = \frac{400 - 2500}{400 + 2500}$$

$$K = -0.72$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{400}{2500}\right)}{2 * 0.102 + 0.09}$$

$$C_s = 0.74$$

Para una persona de 70 kg de peso:

$$E_{paso} = (1000 + 6 * 0.74 * 2500) * 0.157 / \sqrt{0.5}$$



$$E_{paso} = 2686.6 V$$

$$E_{toque} = (1000 + 1.5 * 0.74 * 2500) * 0.157 / \sqrt{0.5}$$

$$E_{toque} = 838.2 V$$

Tabla 5.15. Datos de ingreso y valor de Cs.

EMPRESA ELECTRICA REGIONAL CENTRO SUR S.A. DISEÑO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMA IEEE 80 STD 2013					
Corriente de falla 3 Ø (A):	3180	Profundidad de enterramiento (m):	0,5	Relación X/R	16,1
Corriente de Tierra IG (A)	1908	Resistividad de la grava (Ω.m):	2500	Separación de Cuadrículas	7
Tiempo de reacción de las protecciones (s):	0,5	Espesor de la capa superficial (m)	0,102	Diametro del conductor en metros.	0,01
Resistividad aparente del terreno pa (Ω.m):	400	Cs	0,74	# de conductores a lo ancho de la malla Y	11
Temperatura ambiente (°C):	40	# de Varillas copperweld a utilizar:	20	# de conductores a lo largo de la malla X	11
Material del conductor:	CCS	Diámetro de la varilla (m):	0,016	Factor de decremento Df	1
Dimensiones de la malla (ancho Y ; largo X m*m):	70	Longitud de la varilla (m):	7,5	Factor de proyección Cp	1
	70			Sf	0,6

Tabla 1

Tabla 5.16. Tensiones permisibles de toque y paso.

Tensiones Permisibles de Paso y Contacto	
Voltaje de paso 50 Kg [V]	1985,0
Voltaje de paso 70 Kg [V]	2686,6
Voltaje de contacto 50 Kg [V]	619,3
Voltaje de contacto 70 Kg [V]	838,2

- Paso 4: **Diseño inicial:** En el diseño inicial se presenta una malla en forma de cuadrícula con 20 varillas de puesta a tierra (7.5 m de largo) clavadas al contorno del perímetro de la malla, con 11 conductores a lo largo del eje X y Y, y cuadrículas interiores de 7 metros de largo y ancho.

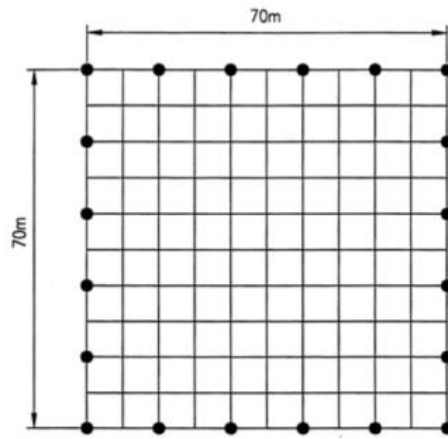


Figura 5. 1. Cuadrícula con picas verticales de 7.m de longitud [1].

- Paso 5: **Cálculo del valor de resistencia del sistema de puesta a tierra:** se calcula la longitud total de todos los conductores del sistema de puesta a tierra y luego este es usado para el cálculo del valor de la resistencia.

$$L_T = (11 * 70 + 11 * 70 + 20 * 7.5) m$$

$$L_T = 1690 m$$

$$R_g = 400 \left[\frac{1}{1690} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right]$$

$$R_g = 2.75 \Omega$$

Tabla 5.17. En las tablas 2a y 2b se presentan los resultados obtenidos del cálculo de: área del sistema de puesta a tierra, longitud total de conductores, factor K, calibre mínimo del conductor y GPR.

Datos del SPT (geometría)	Área m ²	Longitud de conductores horizontales en m (Lc)	
	4900	1540	
		Longitud conductores en m (Lt)	
		1690	
Rg =	2,75		
Tabla 2a			
Corriente máxima en la red	IG =	1908	
Área del Calibre mínimo del conductor	A m ² =	33	
Factor de reflexion	K =	-0,72	
GPR (V) =	5.247		
Tabla 2b			



- Paso 6 y 7: **GPR**: Se calcula el valor del GPR y luego se lo compara con el voltaje de contacto permisible. En la Figura 5.18 se muestra el valor del GPR.

$$GPR = 1908 * 2.75$$

$$GPR = 5247 V$$

Como: $GPR > V_{toque\ 70\ kg}$, se debe seguir con calculando el voltaje de toque y de paso propio del sistema de puesta a tierra.

- Paso 8: **Voltaje de toque y paso**: Se debe de calcular los voltajes de toque y de paso (Sistema de Puesta a Tierra) que estarán presentes en caso de una falla.

$$K_{ii} = 1.0$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1.0}}$$

$$K_h = 1.225$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right] + \frac{1.0}{1.225} \ln \left[\frac{8}{\pi(2 * 11 - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.77$$

$$V_{m\ o\ toque} = \frac{400 * 1908 * 0.77 * 2.272}{1540 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] 150}$$

$$V_{m\ o\ toque} = 747.4 V$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11-2}) \right]$$

$$K_s = 0.406$$



$$V_{s o p a s o} = \frac{400 * 1908 * 0.406 * 2.272}{0.75 * 1540 + 0.85 * 150}$$

$$V_{s o p a s o} = 548.9 V$$

Tabla 5.18. En las tablas 3 y 4 se muestran los valores de los parámetros, voltajes de contacto y de paso para el diseño del sistema de puesta a tierra.

Tensión de malla, toque o contacto					
L malla	1786,4	$V_{malla-toque} = \frac{\rho_a K_m K_i I_G}{L_{malla}}$	<table border="1"> <tr> <td>Voltaje de malla (contacto) [V]</td> <td>747,4</td> </tr> </table>	Voltaje de malla (contacto) [V]	747,4
Voltaje de malla (contacto) [V]	747,4				
Kh	1,225				
Kil	1				
n	11				
d (diametro) m	0,01				
Ki	2,272				
Km	0,77				
ho	1				
Tabla 3					
Tension de paso					
L paso	1282,5	$V_{paso} = \frac{\rho_a K_s K_i I_G}{L_{paso}}$	<table border="1"> <tr> <td>Voltaje de paso [V]</td> <td>548,9</td> </tr> </table>	Voltaje de paso [V]	548,9
Voltaje de paso [V]	548,9				
Ki	2,272				
Ks	0,406				
Tabla 4					

- Paso 9: **Voltajes de toque:** Se debe de realizar la comparación entre ambos voltajes de toque, si el voltaje de toque que se calculó para el sistema de puesta a tierra es menor que el voltaje permisible, el diseño es válido.
- Paso 10: **Voltajes de paso:** Una vez verificado el voltaje de toque, se tiene que comparar ambos voltajes de paso para validar el diseño, en este caso el voltaje de paso del diseño del sistema de puesta a tierra es menor al voltaje de paso permisible.

Con este ejemplo de aplicación, se pueden realizar y revisar diseños de puesta a tierra para S/E AC de propiedad de la empresa eléctrica Centro Sur.



5.4. Conclusiones

- Mediante el uso de este programa se puede verificar si el diseño que se realiza para un sistema de puestas a tierra de S/E AC cumple con la normativa IEEE Std 80 - 2013.
- Es posible realizar diseños futuros de sistemas de puesta a tierra en S/E cuya forma sea cuadrangular o rectangular con presencia de picas verticales.
- El programa realizado permite el cálculo de factores propios del diseño, se puede ver también la longitud total de conductor usado en el sistema.
- Mediante la validación del diseño, el sistema de puesta a tierra será seguro tanto como para personal y equipos.
- Es necesario introducir parámetros reales y válidos para que el diseño de puesta a tierra nos muestre resultados que estén más apegados a la realidad.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones Generales

- La norma IEEE Std 80 - 2013 nos sirve como guía para el cálculo y el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones eléctricas AC.
- En todos los diseños de puestas a tierra se debe de cumplir con los criterios de seguridad, estos son: las tensiones de contacto y de paso para el sistema de puesta a tierra debe de ser menor a las tensiones permisibles.
- En el caso de la S/E 03 Monay, el sistema de puesta a tierra con el pasar de los años se ve deteriorado a causa de los años del material, los incrementos de corrientes de cortocircuito producto del crecimiento de la generación y entrada de nuevos componentes al SIN. Es necesario verificar, evaluar y diagnosticar si este sistema de puesta a tierra está cumpliendo con su principal objetivo.
- El incremento del calibre del conductor en la malla, no reduce el voltaje de paso y de contacto, ya que estos parámetros son inversamente proporcionales a los valores de las tensiones.
- Al incrementar el área de la malla de puesta a tierra y picas verticales se puede bajar las tensiones de paso y contacto.
- El sistema de puesta a tierra actual, en su medición presentó un valor mayor a los 2Ω en su resistencia, la norma establece que una S/E debe de tener un valor máximo de 1Ω en su resistencia.
- En la S/E 03 Monay se presenta la dificultad de que no existe la suficiente área adicional para incrementar o redimensionar a longitudes mayores el sistema de puesta a tierra, en este caso se propone cambiar el suelo de la S/E, el suelo que está en el patio por medida se determinó un valor de $133 \Omega m$. Se puede realizar el cambio a un suelo que presente una resistividad aproximada a $50 \Omega m$, con esto se logra que la resistencia de todo el sistema de puesta a tierra sea menor a 1Ω .
- Se puede limitar la corriente de falla, esto quiere decir que mediante el uso de reactores limitadores de corriente o aumentando la impedancia de falla. Limitando la corriente de falla se tendría que hacer un nuevo análisis al sistema de puesta a tierra y verificar si cumple o no con el objetivo ante la nueva corriente de falla.
- También se podría lograr disminuir el valor de la resistencia de puesta a tierra mediante el uso de geles o tratamiento de suelos.
- En el redimensionamiento propuesto en el capítulo 4 de este trabajo, se trabaja con un tiempo de 0.25 segundos mayor a los 0.75 segundos que demoran las protecciones en actuar, se hizo esta suposición para verificar si el calibre del conductor 2/0 AWG cumple como calibre mínimo para su uso en el sistema de puesta a tierra, se logró verificar que el calibre 2/0 AWG supera el calibre mínimo requerido.



- Con el programa realizado, la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur podrá realizar las verificaciones para las futuras S/E.
- La norma IEEE Std 80 - 2013, es solo una guía en la cual la Empresa Eléctrica se puede regir para verificar la seguridad en los diseños de los futuros sistemas de puestas a tierra en S/E AC.
- Los trabajos que se deben de realizar en la S/E 03 Monay en caso de que se opte por redimensionar el sistema de puesta a tierra, deben de hacerse con la S/E fuera de servicio. Existen 2 amperios de corrientes de fuga en las bajantes de tierra de los elementos de la S/E, el riesgo de sufrir algún incidente como la electrocución es alta por lo que se recomienda realizar operaciones de mantenimiento en el sistema de puesta a tierra cuando la S/E este en OFF.
- Otra alternativa sería el reemplazo de la S/E, construir una S/E con un sistema de puesta a tierra apto para los niveles de corrientes de falla proyectadas a futuro.

6.1.1. Conclusiones Específicas

- **Para que la S/E 03 Monay cumpla con los parámetros de seguridad es necesario realizar el redimensionamiento y cambio del terreno de la S/E.**
- **La norma IEEE Std 80 - 2013 establece los criterios de seguridad que se deben de cumplir en el diseño de sistemas de puesta a tierra ante posibles fallas, si se presenta una falla en la S/E 03 el sistema de puesta a tierra no va a cumplir con su objetivo.**
- **Si se deja la malla de puesta a tierra tal y como se encuentra actualmente se corre el riesgo de perder vidas humanas y perder gran parte de equipos que están dentro de la S/E 03.**
- **El cambiar el calibre al conductor no baja los niveles de voltajes de paso ni de toque, estos valores están directamente relacionados con la geometría de la malla y resistividad del terreno.**
- El valor de corriente de falla es bastante alto, se debería verificar si existe la posibilidad de reducir esta corriente para que la malla de puesta a tierra sea operativa.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda el uso de la normativa IEEE Std 80 - 2013 para el diseño de los sistemas de puestas a tierra en subestaciones eléctrica AC y tipo GIS.
- Para subestaciones de más de 20 años es recomendable hacer un análisis al sistema de puesta a tierra.
- Si la S/E presenta crecimiento, se requiere la verificación y análisis a todo el sistema de puesta a tierra.



- Otra de las recomendaciones es que la Empresa Eléctrica tenga un levantamiento de todos los sistemas de puestas a tierra de las subestaciones eléctricas y los cambios que se han realizado al pasar de los años para cuando se requiera realizar un estudio, este sea más exacto porque se contaría ya con información que aporta a que los resultados sean más confiables.
- Se puede usar la hoja de cálculo para la aceptación de diseños de puesta a tierra en S/E AC propuestos por consultores externos.



Bibliografía

- [1] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, no. February. 2013.
- [2] Área Ingeniería Distribución - EPM, “RA6-015 Normas Técnicas-Medida De Resistencia De Puesta a Tierra,” pp. 1–17, 2001.
- [3] C. Arnoux and C. A, *Óhmetro De Tierra Y De Resistividad C . a 6471. .*
- [4] "Conductor Currents", *Okonite.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.okonite.com/about/engineering-technical-center/conductor-currents>. [Accessed: 24- Feb- 2019].
- [5] M. Salgado, Notas de clase del curso de Sistemas de Puesta a Tierra, Universidad de Cuenca 2017.
- [6] S. Ramirez Castaño y E. A. Cano Plata, *Sistemas de Puesta a Tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*, núm. Septiembre. 2010.
- [7] P. Espinosa, “Sistema De Puesta a Tierra En Subestaciones Eléctricas”, p. 26.
- [8] F. M. Sinchi, “Diseño y determinación de sistemas de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la región, incluyendo GEM y electrodo químico”, 2017.
- [9] J. Guillermo y B. Barrios, “Subestación Guatemala Este”, 2012.
- [10] J. A. Bustamanante Cuenca, “Evaluación y diagnóstico de la malla de puesta a tierra de la subestación Obrapia con niveles de tensión de 69kv y 13,8kv perteneciente a la E.E.R.S.S.A., para cumplir con los parámetros establecidos por la norma IEEE Std. 80-2000 (Guide for Safety in AC Substation Grounding)”, 2011.
- [11] J. Gravelle, E. Ramirez-Bettoni, y P. J. Gravelle, “Substation Grounding Tutorial”, 2017.
- [12] C. R. Astudillo y M. V. Cajamarca, “Cálculo de Sistemas de Puesta a Tierra Aplicación de la Norma IEEE 80 - 2000”, 2012