



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**HOMOLOGACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA HIDROABANICO - MACAS, MORONA SANTIAGO**

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

AUTOR: ÁLVARO ALEXANDER SALME BAUTISTA

TUTOR: ING. HERNÁN PATRICIO GUILLÉN COELLO, MsC.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Álvaro Alexander Salme Bautista con documento de identificación N° 1715744601 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 27 de abril de 2022

Atentamente,



Álvaro Alexander Salme Bautista

1715744601

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Álvaro Alexander Salme Bautista con documento de identificación N° 1715744601, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Homologación de la malla de puesta a tierra de la Central Hidroeléctrica Hidroabánico - Macas, Morona Santiago”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 27 de abril de 2022

Atentamente,



Álvaro Alexander Salme Bautista

1715744601

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Hernán Patricio Guillén Coello con documento de identificación N° 0102063120, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: HOMOLOGACIÓN DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA HIDROABANICO - MACAS, MORONA SANTIAGO, realizado por Álvaro Alexander Salme Bautista con documento de identificación N° 1715744601, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 27 de abril de 2022

Atentamente,



Ing. Hernán Patricio Guillén Coello, MsC.
0102063120

DEDICATORIAS

Esta tesis está dedicada primeramente a Dios por todas sus bondades y bendiciones hacia mí, a mi familia que con paciencia y comprensión siempre han estado para guiarme y apoyarme en todo momento de mi vida, en especial a mi mamá Nancy que ha sido mi amiga y apoyo indudable y sobre todo el pilar fundamental de este proceso para mí, a mi hermana Angelina y a mi padre Nelson, este proyecto está dedicado a todas aquellas personas que han formado parte de mi formación en proceso como profesional, a mi tutor de tesis por su acompañamiento, paciencia, y sabiduría, a mis docentes que han forjado mis conocimientos a lo largo de estos años para que me convierta en un profesional con ética y moral.

AGRADECIMIENTOS

El esfuerzo, la dedicación y disciplina han logrado llevarme a tan anhelado logro por mi corazón esta meta en mi vida personal, agradezco primeramente a Dios por cada día darme fuerza, vida y sabiduría en el transcurso del proceso y acompañarme siempre. Agradecido enormemente con mi familia por ser el sostén siendo el apoyo incondicional, ese ejemplo e inspiración para mí, y sobre todo por el enorme sacrificio de estos años han realizado para que yo llegue al objetivo final.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VI
INTRODUCCIÓN	VII
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO	X
JUSTIFICACIÓN	X
GRUPO OBJETIVO (BENEFICIARIOS).....	XI
CAPÍTULO 1: MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.....	12
Estudio de la Resistividad del Terreno.....	12
Equipo de Medición	12
Método Utilizado	12
Método Werner	12
Mediciones de Campo.....	14
Consideraciones previas a la Medición de Campo.....	14
Lecturas de Resistividad.....	15
Métodos para la Reducción de la Resistividad del Terreno	19
Tratamiento del suelo	20
Uso de Material en la Superficie del Terreno.....	22
CAPÍTULO 2: CORRIENTE DE FALLA EN UNA HIDROELÉCTRICA	24
Corriente de Falla.....	25
Tipos de fallas	26
Fallas Simétricas	26
Fallas Asimétricas	27
Efectos de la Resistencia de Malla para el Cálculo de la Corriente de Falla	28
Peor tipo de falla y ubicación.....	29
Redes de Secuencia en transformadores trifásicos.....	30
Transformador $Y - \Delta$ con la Y aterrizada	31
Análisis de Corto Circuito.....	31
CAPÍTULO 3: HOMOLOGACIÓN DE LA MALLA PUESTA A TIERRA ACTUAL.....	33
Características de la Malla Actual.....	33

Procedimiento	34
Procedimiento de Diseño	37
Cálculos.....	45
Paso 1: Datos de Campo.....	45
Paso 2: Conductor	45
Paso 3: Tensiones Tolerables	46
Paso 4: Diseño Básico	46
Paso 5: Resistencia de Malla.....	48
Paso 6: Corriente Máxima de Malla.....	48
Paso 7: Potencial Máximo de MPT.....	50
Paso 8: Tensiones Reales	50
Verificación de Tensiones de Paso y Toque de la antigua Malla.....	51
CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA MALLA PUESTA A TIERRA NUEVA	53
Diseño	53
Paso 1: Datos de Campo.....	53
Paso 2: Conductor	53
Paso 3: Tensiones Tolerables	53
Paso 4: Diseño básico.....	54
Paso 5: Resistencia de Malla.....	55
Paso 6: Corriente Máxima de Malla.....	55
Paso 7: Potencial Máximo de MPT.....	55
Paso 8: Tensiones Reales	55
Paso 9: Verificación de Tensión de Toque.....	56
Paso 10: Verificación de Tensión de Paso	56
Conclusión de Diseño.....	56
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
Apéndice A. MEDICIÓN EN EL JARDÍN	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Posicionamiento de electrodos basados en el método de Werner [1].	12
Figura 2. Conexión con el termómetro basado en el método de Werner [1].....	13
Figura 3. Esquema de Ubicación de Medidas	16
Figura 4. Toma satelital con ubicación de medidas.....	16
Figura 5. Esquema de ubicación de medidas en subestación	18
Figura 6.Toma satelital con ubicación de medidas en subestación	18
Figura 7. Efectos de la humedad, temperatura y sales sobre la resistividad del terreno [2]	20
Figura 8. Cortocircuitos trifásicos [6].....	25
Figura 9. Cortocircuito Bifásico [7].	26
Figura 10. Cortocircuito Bifásico con contacto a tierra [7]......	26
Figura 11. Cortocircuito Monofásico a Tierra [7].	27
Figura 12. Cortocircuito con doble contacto a tierra [7].	27
Figura 13. Efectos de la Resistencia de Malla para el Cálculo de la Corriente de Falla [7].	28
Figura 14. Redes de Secuencia en transformadores trifásicos [7]	30
Figura 15. Circuito Unifilar Hidroabanico [7].....	31
Figura 16. Plano de la malla de puesta a tierra existente.....	33
Figura 17. Diagrama de bloques del procedimiento para obtener los datos de la malla puesta a tierra [Autor].	34

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RANGOS DE RESISTIVIDAD	15
TABLA 2. TERRENO SIN RELLENO.....	17
TABLA 3. TERRENO CON RELLENO.....	17
TABLA 4. RESISTIVIDAD DE DIFERENTES MATERIALES.....	22
TABLA 5. ÌNDICE DE PARÁMETROS DE CÁLCULO.....	35
TABLA 6. CONDUCTIVIDAD DE MATERIALES.....	38
TABLA 7. TABLA DE LA DURACIÓN DE LAS FALLAS Y FACTOR DE Df	47
TABLA 8. VALOR DE RESISTENCIA DE CADA UNA DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS.	50
TABLA 9. DATOS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	51
TABLA 10. VALORES DE TENSIONES DE PASO Y TOQUE	53
TABLA 11. TABLA DE RESULTADOS DE LAS TENSIONES DE PASO Y TOQUE	57

RESUMEN

El presente estudio analiza la factibilidad de una malla de puesta a tierra existente en las instalaciones de la central hidroeléctrica Hidroabanico (Macas, Morona Santiago, Ecuador), y se considera como un objetivo analizar si los parámetros de seguridad de la malla actual cumplen con las normas establecidas, o si por el contrario no se ajusta, se procedería a rediseñar una nueva malla que reemplace a la existente para con los ajustes técnicos se alcancen los parámetros de seguridad deseado.

El proceso de cálculo de la nueva malla se realiza como punto de partida la medición de resistividad del terreno más propicio, es decir el espacio aledaño a la casa de máquinas, y contando con esta información encontrar la corriente de falla y las tensiones de toque y paso, de manera que se demuestre el acoplamiento de la nueva malla a la existente con la finalidad de asegurar las instalaciones y del equipo de trabajo de dicha central hidroeléctrica.

ABSTRACT

This study analyzes the feasibility of the existing grounding grid within the Hidroabanico hydroelectric power plant (Macas, Morona Santiago, Ecuador), with the objective of analyzing whether the safety parameters of the current grid comply with the established standards, or in turn redesign a new grid that is coupled to the existing one to obtain the desired safety parameters.

The calculation analysis for the new mesh is performed by measuring the resistivity of the soil surrounding the powerhouse, and then calculating the fault current and the touch and step voltages, to show the coupling of the new mesh to the existing one in order to ensure the safety of the hydroelectric power plant.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS.

Factibilidad

Sistema de Puesta a Tierra

Malla de Puesta a Tierra

Subestación

INTRODUCCIÓN

Se conoce que para la generación de energía se utiliza recursos hídricos desde el año 1882 [1], mediante la utilización de ruedas hidráulicas las cuales ayudan a producir fuerza motriz reduciendo el trabajo manual. Actualmente con el avance de la tecnología se ha logrado alcanzar una excelente eficiencia en la generación de energía hidráulica, así como la instalación de grandes módulos de producción eléctrica [1].

El proyecto hidroeléctrico Hidroabanico se encuentra ubicado en el sur oriental del Ecuador, a 15 kilómetros de la ciudad de Macas (cantón Morona), capital de la provincia de Morona Santiago, esta es una localidad que está cerca de la ciudad[1].

La central Hidroabanico fue constituida en el año 2003 fue creada con el fin de producir energía para el país, ayudando a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, siempre guiados por los principios de responsabilidad social, desarrollo sostenible, y conservación del medio ambiente, es por eso que este proyecto favoreció en la innovación de la infraestructura del sector eléctrico, con la modernización también se pudo ampliar la producción de energía dentro del estado ecuatoriano [1].

El presente análisis se realiza basado en información existente de la malla colocada a tierra mediante el departamento técnico de la central, quienes se encargan de realizar las diferentes actividades de la entidad, una parte de la malla se encuentra conectada debajo de los transformadores y de los generadores siendo esta la parte que se encuentra debajo del concreto, hasta llegar a la subestación que se encuentra separada unos 10 metros aproximadamente, parte de la malla se encuentra debajo de la graba que es la parte que se encuentra a la intemperie y une a la casa de máquinas y la subestación. Se parte de los cálculos obtenidos se calcular los nuevos de redimensionamiento de la nueva malla de puesta a tierra.

Las normas IEEE Std 80 “IEEE Guide for safety in AC Substation grounding” y IEEE Std 837 “Permanent connections for substation earthing”, disponen de los requerimientos y alineamientos necesarios para un correcto dimensionamiento de mallas de puesta a tierra en centrales y subestaciones eléctricas. Es de gran importancia colocar las mallas puestas en tierra de forma que protegen al operario y equipos de la casa de máquinas.

El presente trabajo investigativo tiene como objetivo la homologación de la malla de puesta a tierra de la Central Hidroeléctrica Hidroabanico Macas, Morona Santiago[2].

GLOSARIO.

“SPT: Sistema de puesta a tierra”

“MPT: Malla de Puesta a Tierra”

“S/E: Subestación”

“ ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m.”

“A: Distancia entre electrodos en metros.”

“B: Profundidad de enterrado de los electrodos en metros.”

“R: Lectura del termómetro en ohm.”

“ I_{max} : Corriente máxima admisible del elemento”

“ R_E : Resistencia del Elemento”

“I : corriente de falla asimétrica kA”

“ A_{mm^2} : sección transversal del conductor en mm^2 ”

“ T_m : temperatura máxima permisible de fusión en $^{\circ}C$ ”

“ T_a : temperatura de ambiente en $^{\circ}C$ ”

“ T_r : temperatura de referencia de constantes de materiales en $^{\circ}C$ ”

“ α_0 : coeficiente térmico de resistividad a $0^{\circ}C$ en $1/^{\circ}C$ ”

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

“ ρ_r : resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r en $\mu\Omega \cdot cm$ ”

“ E_{paso} : la tensión de paso en V”

“ E_{toque} : la tensión de toque en V”

“ C_s : Factor de reducción de la capa superficial”

“ ρ_s : resistividad de la capa superficial del terreno en $\Omega \cdot m$ ”

“ t_s : tiempo de despeje de la falla en s”

“ C_s : el factor de decremento de la capa superficial”

“ h_s : grosor de la capa superficial en m”

“ K_m : Factor de espaciado”

“ K_i : Factor de corrección para geometría de cuadrícula”

“ L_M : Longitud enterrada efectiva para tensión de toque en m”

“ d : Diámetro del conductor de malla”

“ D : Espacio entre conductores paralelos”

“ D_f : Factor de Decremento”

“ D_m : Distancia máxima entre dos puntos de la malla”

“ $E_{(toque-real)}$: Tensión de toque real”

“ $E_{(paso-real)}$: Tensión de paso de la MPT diseñada”

“ E_{paso50} : Voltaje de Paso tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal”

“ E_{paso70} : Voltaje de Paso tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal”

“ $E_{toque50}$: Voltaje de Toque tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal”

“ $E_{toque70}$: Voltaje de Toque tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal”

“ h : Profundidad de los conductores de la MPT”

“ h_s : Espesor de la capa superficial”

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

El proyecto Hidroeléctrico Abanico utiliza una derivación del Rio Abanico, la captación está ubicada en Macas a 15 kilómetros aproximadamente y a 8 km de la Casa de Maquinas. La central no cuenta con un reservorio, es decir es una central de agua fluyente. La central genera en la primera etapa 15 Mega Watts y la segunda genera 22.5 Mega Watts produciendo en su totalidad entre las dos etapas 37.5 Mega Watts.

La caída es de 350 metros a través de un túnel de 490 metros la cual tolera caudales hasta de 17 m³/seg. Se cuenta con un túnel donde se encuentra una tubería de presión al final, el cual posee una extensión de 2.3 km. En la Casa de Maquinas se encuentran 5 generadores de 7.5 MW tipo PELTON, de fabricación alemana.

Además, se puede enfatizar que la central posee una línea de transmisión de 12 km hasta la S/E MACAS. La primera y segunda etapa fueron terminadas en el 2005 y 2007 respectivamente. La puesta de la malla en tierra tiene más de 12 años en servicio la cual muestra un déficit en la resistencia de toque y paso, por lo cual se pretende realizar un estudio para construir una nueva malla en la casa de máquinas bajo los estándares de la norma “IEEE 80.2013” permite garantizar al operario y maquinaria.

JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfoca en estudiar los posibles desajustes y riesgos de elevación en las resistencias de toque y paso de la central demuestran que es necesario un análisis del diseño y configuración de la puesta en tierra de la malla existente, y con los efectos de dicho análisis se pueda determinar si es necesario el acoplamiento o incorporación de una nueva malla para garantizar la seguridad de la central y del equipo de trabajo. Como parte de dicho análisis se ha definido la existencia de varios factores que afectan la resistencia del terreno entre los cuales estarían: la magnitud de la corriente, el gradiente del campo y la destrucción de la malla.

El deterioro de las condiciones técnicas de la malla se presenta en cuestión de ocurrir un cortocircuito franco ante la baja de una descarga atmosférica cercana que se disipe sobre la misma, lo que también se podría ver agravado por la presencia de corrosión del metal que la constituye. Es por ello que se procederá a realizar un análisis de cálculo y diseño para un

redimensionamiento de la puesta en tierra de la malla, que sea acoplada a la existente con el objetivo de cumplir con los parámetros establecidos en la norma que se detalla a continuación:

- IEEE Std 80 “IEEE Guide for safety in AC Substation grounding”
- IEEE Std 837 “Permanent connections for substation earthing”

GRUPO OBJETIVO (BENEFICIARIOS)

Entre los objetivos específicos esta homologar la puesta de la malla antigua en donde el resultado de esta investigación permitirá analizar la magnitud de corrosión que puede tener la puesta en tierra de la malla después de 12 años en servicio, en las condiciones climatológicas de la zona; así como el diseño de una MPT para una central hidroeléctrica. La Central Hidroeléctrica Hidroabanico se beneficiará económicamente debido al mantenimiento preventivo que se prevé asegurar la vida del personal que labora en las instalaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Homologación de la puesta en tierra de la malla de la Central Hidroeléctrica Hidroabanico Macas, Morona Santiago.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Medir la resistividad del terreno aledaño a la casa de máquinas en la Central Hidroabanico.
- Calcular la corriente de falla en la Central Hidroabanico según las normas IEEE que rigen los cálculos.
- Enlazar la MPT antigua con la nueva en la Central Hidroabanico.
- Diseñar la nueva malla de puesta a tierra según normas IEEE para la Central Hidroabanico.

CAPÍTULO 1: MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

Estudio de la Resistividad del Terreno

“La resistividad del terreno es importante en la resistencia del campo, de manera que desde el punto técnico se recomienda realizar un estudio comprobatorio, el cual ayude a determinar toda característica eléctrica que posea el terreno”[2]

Equipo de Medición

El cálculo para determinar la firmeza del terreno se realiza a través del instrumento de medida: Amprobe GP-2 Geo Test, constituido por cuatro electrodos, el módulo GP-2, y conductores de 20 metros de largo.

El instrumento fue prestado por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

Método Utilizado

Método Werner

“El volumen de las capas del terreno sobre el cual se realiza el estudio de la resistividad depende del contacto que realicen los electrodos con la tierra; de forma que no depende de los electrodos ni tampoco del material. La resistividad que se calculó muestra la resistividad promedio del campo a una profundidad $h=3/4$ ” [2].

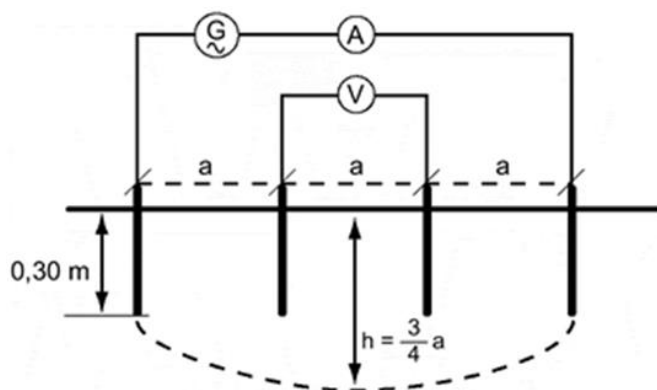


Figura 1. Posicionamiento de electrodos basados en el método de Werner [1].

“El principio básico del método a emplear es la introducción de una corriente continua mediante la tierra conjuntamente con los electrodos de los terminales C1 y C2,

mientras que en el cálculo del potencial de los electrodos P1 y P2, es por eso que la resistencia aparente es denominada como V/I. De esta forma se puede indicar que la resistividad del terreno es la situación de la resistencia y de la geometría del electrodo” [2].

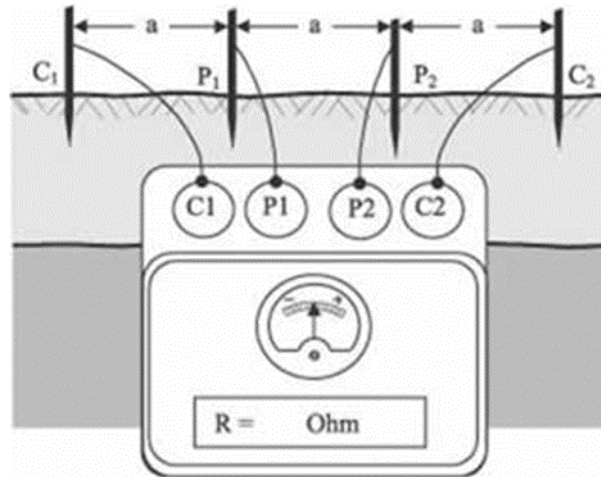


Figura 2. Conexión con el termómetro basado en el método de Werner [1].

La resistividad aparente está dada por la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{4 * \pi * A * R}{\left[1 + \left[\frac{2 * A}{(A^2 + 4 * B^2)^{0.5}} \right] - \left[\frac{2 * A}{(4 * A^2 + 4 * B^2)^{0.5}} \right] \right]} \quad (1)$$

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad (A) en ohm-m.

A: Recorrido en metros del electrodo.

B: Cuenca en metros de entierro de los electrodos.

R: Leída del termómetro en ohm.

Si la superficie enterrada (B) es pequeña con respecto a la separación de la distancia entre electrodos (A), es decir si $A > 20 B$ se puede calcular utilizando la siguiente fórmula [2].

$$\rho = 2 * \pi * A * R \quad (2)$$

“Es recomendable tomar las lecturas en diversos sitios y varios ángulos como 90 grados y otras de diferente ángulo, de manera que no se afecten las estructuras metálicas subterráneas y con ellas obtener el promedio” [2].

Mediciones de Campo.

Consideraciones previas a la Medición de Campo

Se debe tomar varias consideraciones a la hora de realizar las mediciones en el campo para evitar contratiempos [2]:

- En ciertas ocasiones, debido a la topografía del terreno se vuelve difícil encontrar la ubicación perfecta, con la alineación deseada. Cuando esto ocurre, se debe realizar el cálculo con sus respectivas indicaciones que ayuden a su realización. Esto permitirá verificar la validez del cálculo después de todas las mediciones realizadas.
- Mientras mayor sea el número de mediciones los datos serán más precisos, por esto es importante el rango del aparato. Si las capas más profundas del suelo poseen baja resistividad, la resistencia calculada baja al paso que aumenta la distancia respectiva.
- El cálculo se ve afectado cuando existe menor índice de contacto entre los y el terreno. Es normal la utilización de barras verticales como electrodos, los cuales se entierran alrededor de 10 cm bajo el terreno. En el caso de los electrodos de corriente es sugerible una profundidad inferior a 1/10 del espacio de separación.
- Los materiales esenciales para lograr la medición del terreno son los siguientes:
 - Cinta métrica.
 - Juego de 4 Electrodo.
 - Martillo de 5kg.
 - Cubetas con agua.
 - Conductores aislados (la longitud depende del rango del aparato).
- También se debe tomar en cuenta el área en donde se van a realizar las mediciones para considerar precauciones de seguridad para el personal. Especialmente en áreas donde existe maleza. Para esto, se debe tener un botiquín de emergencias médicas cerca (p.7).

Lecturas de Resistividad

Es inusual encontrar lugares con subestaciones que la tierra puede poseer una resistividad igual. Las apreciaciones fundamentadas en la clasificación del suelo proporcionan un acercamiento de la resistividad, por esta razón se debe realizar medidas de resistividad del suelo en cuestión.

En la siguiente tabla podemos apreciar las estimaciones:

TABLA 1. RANGOS DE RESISTIVIDAD

Tipo de Suelo	Resistividad promedio	
Orgánico Húmedo	10	[ohm * m]
Húmedo	10 ²	[ohm * m]
Seco	10 ³	[ohm * m]
Rocoso	10 ⁴	[ohm * m]

Fuente: [3]

Terreno Sin Relleno

Las mediciones de campo se obtuvieron utilizando el dispositivo Amprobe, con el cual se recorrió el terreno alrededor al lugar donde está la maquinaria las áreas verdes, demostrado en la Ilustración 1 y 2. Tomando 5 mediciones, a una profundidad de 0.6 metros; se realiza una medición en el mismo lugar a 90 grados y se realiza un promedio con los siguientes valores. Se indica en la tabla 2:

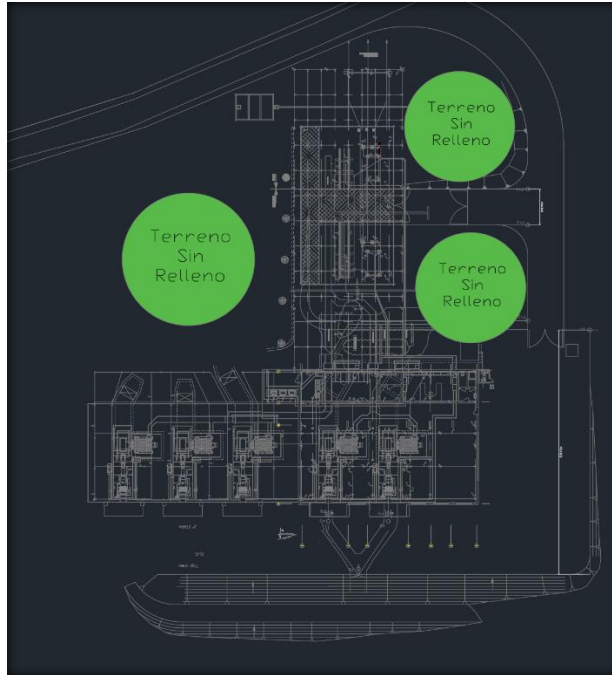


Figura 3. Boceto de Ubicación de Medidas



Figura 4. Toma satelital con ubicación de medidas

TABLA 2. TERRENO SIN RELLENO

Mediciones de campo

Mediciones en el jardín

N° de mediciones	Espacio máximo entre conductores	Profundidad de la MPT	Grado de inclinación	Resistividad
1	2m	60 cm	0°	420 [ohm*m]
2	3m	60 cm	0°	363 [ohm*m]
3	4m	60 cm	0°	205 [ohm*m]
4	2m	60 cm	90°	282 [ohm*m]
5	3m	60 cm	90°	184,8 [ohm*m]

Fuente: El autor

Terreno con Relleno

Luego se realiza mediciones en el terreno con ripio, en la subestación de la carretera que ingresa a las oficinas y el estacionamiento. Se efectúa las mediciones con espaciamiento entre electrodos de 2m, 3m y 4m. Las lecturas son las siguientes:

TABLA 3. TERRENO CON RELLENO

Mediciones en la subestación

N° de mediciones	Espacio máximo entre conductores	Profundidad de la MPT	Grado de inclinación	Resistividad
1	2m	60 cm	0°	181,2 [ohm*m]
2	3m	60 cm	0°	167,3 [ohm*m]
3	4m	60 cm	0°	113,3 [ohm*m]
4	2m	60 cm	90°	49,1 [ohm*m]
5	3m	60 cm	90°	36,1 [ohm*m]

Fuente: El autor

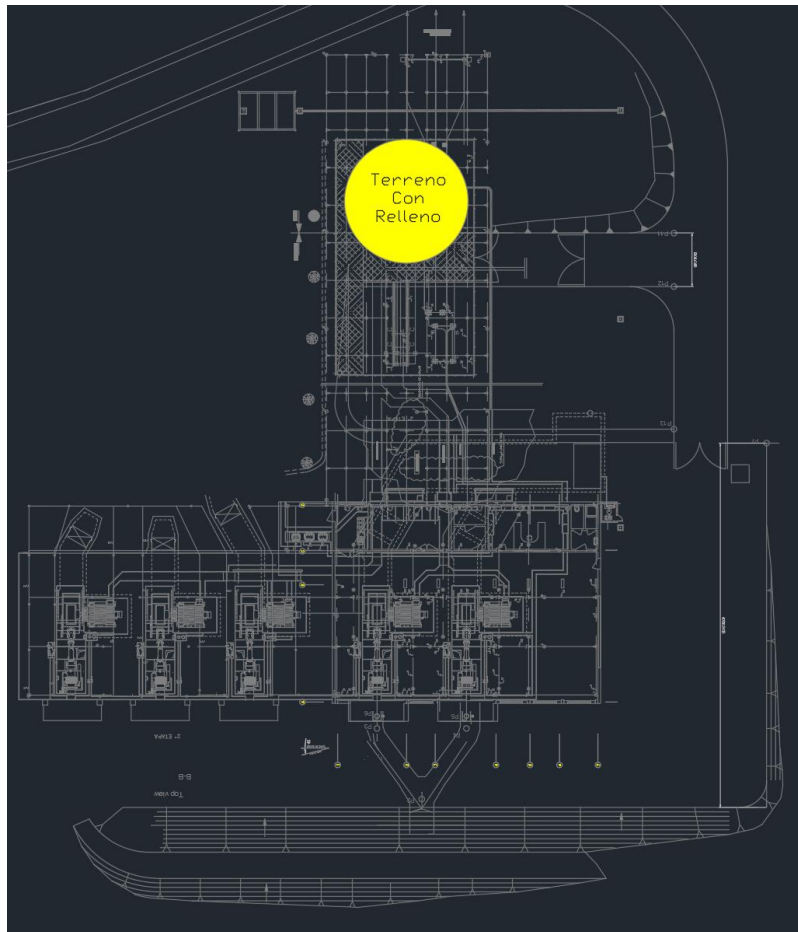


Figura 5. Esquema de ubicación de medidas en subestación



Figura 6. Toma satelital con ubicación de medidas en subestación

Valor Final de la Resistividad del Terreno

De las lecturas en la sección 1.4.2.1 y 1.4.2.2 se adquieren de un promedio de las medidas de resistividad del terreno, con un valor de:

$$\rho = 200 [\Omega * m]$$

Métodos para la Reducción de la Resistividad del Terreno

Este es uno de los factores de gran importancia, de forma que es la base para el diseño de sistema puesta a tierra eficiente. En la vida real el terreno no es completamente homogéneo debido a factores como[3]:

- Tipo de terreno
- Contextura química
- Firmeza del material
- Temperatura
- Humedad
- Composición química de los materiales de humedad del terreno.

Los métodos mencionados son sustancias congénitas de la formación geológica del terreno; aunque no suelen ser constantes su variación debida que permanecerá fijo en el momento de diseñar este tipo de sistemas.

Los efectos de la temperatura, humedad y composición química se deben a que la dirección eléctrica en los terrenos es importante. La resistividad de los diferentes suelos incrementa cuando su humedad posee menos del 115% de su peso. Así también su humedad se basa de la compacidad, tamaño del grano, la curva 2 de la siguiente figura, mientras que la resistividad es la que menos se afecta cuando la humedad supera el 22%, como se puede observar en la norma IEEE Std 142-1991[4]

El efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo es nulo, siempre y cuando tenga una temperatura superior a 0°C, de manera que el agua tiende a refrigerarse y la resistividad aumenta de forma rápida. La curva 3 muestra esta modificación común para un suelo arenoso que contiene 15.2% de humedad por peso[4].

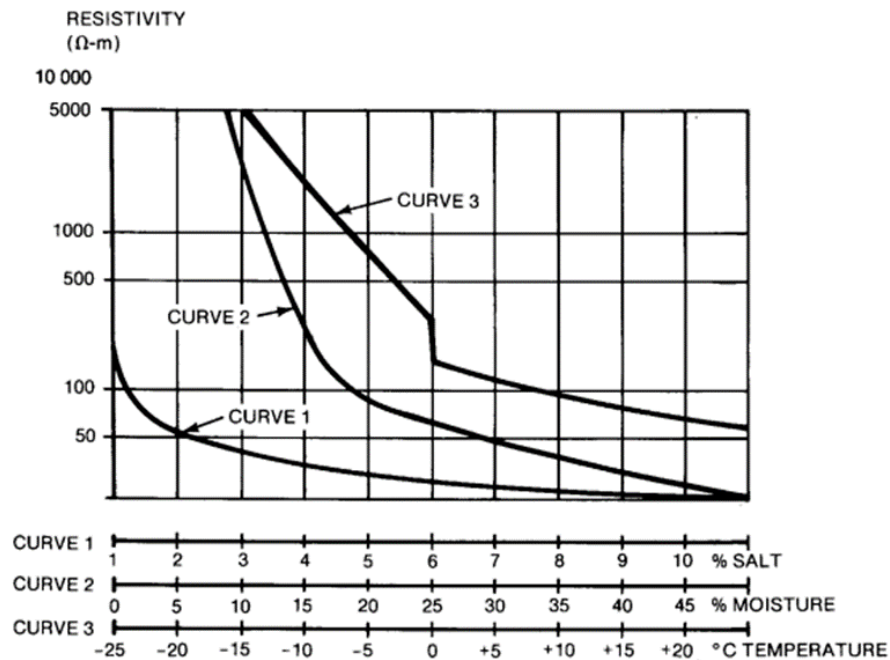


Figura 7. Efectos de la humedad, temperatura y sales sobre la resistividad del terreno [2]

La estructura y el conjunto de ácidos, sales, o álcalis solubles que están en el suelo son los que afectan su resistividad. La curva 1 que se muestra en la Figura 7 muestra un caso general de cloruro de sodio, sobre la resistividad de un suelo que posee 30% de humedad en peso. La figura 7 no es apta para fines de cálculo [3].

Para establecer la resistividad real del suelo, se deben realizar en el lugar pruebas como las detallados en el literal 1.3.1.

Tratamiento del suelo

“A menudo, es poco convencional la obtención de una reducción requerida de la resistencia de tierra al agregar conductores y varillas de tierra a la malla. Una solución alternativa es incrementar de manera efectiva el diámetro de los electrodos, modificando el suelo alrededor del electrodo. Los métodos más conocidos son los siguientes”[4]:

A) El manejo de bentonita, arcilla natural compuesta de montmorillonita, creada por un hecho volcánico desde tiempos atrás, determinado un componente no corrosivo, sostenido con una resistividad de 2.5 Ω-m al 300% de humedad. Con origen natural higroscópico [4].

B) El aprovechamiento de sales, tales como magnesio, cloruro de sodio, sulfato de cobre, para aumentar la conductividad del suelo en donde se encuentra el electrodo. Teniendo a las sales como emigrantes hacia diferentes zonas [4].

C) El empleo de electrodos de uso químico que implican un tubo de cobre llenado de NaCl. Los hoyos en el tubo dan paso a la entrada de la humedad, dispersan las sales permitiendo que la solución salina haga una inmersión en la tierra [4].

Materiales sintéticos de tierra con menor índice de resistividad ubicados en torno a las varillas y de los conductores en la fosa [4]. Electrodo cubiertos de hormigón, donde el concreto al ser un material de sustancia higroscópica atrayente a la humedad, enterrándose en el suelo tiende a tener un comportamiento semiconductor mediano con una resistividad de 30 a 90 Ω -m que da paso a la corrosión [4].

Uso de Material en la Superficie del Terreno

Se debe hacer uso de un modelo de suelo estándar específicamente cuando exista una modificación moderada en la resistividad aparente. Si existe una modificación moderada en la resistividad aparente medida, tiene menor índice de probabilidad que el modelo de suelo estándar tenga como resultados exactos. Se puede disponer de una presentación más exacta del estado real del suelo con el estudio de un modelo de dos capas. El estudio de dos capas mismo que cuenta con una capa superior de profundidad finita con distinta resistividad que una capa inferior de grosor infinito[4].

Los revestimientos de grava o material de superficie, por lo general entre 0,08 y 0,15m de fondo, son muy convenientes para demorar la disipación de la humedad y por consiguiente una limitación en el secado de las capas hondas del suelo a lo largo de un tiempo prolongado de clima seco [5].

Las indagaciones de resistividad de un lugar de subestación son fundamentales para identificar tanto la composición general del suelo, y el grado de uniformidad. Las demostraciones de pruebas perforadas y otros análisis geológicos frecuentemente ofrecen información oportuna sobre la existencia de algunas capas y la naturaleza del suelo, lo que nos lleva sobre algunas ideas sobre el nivel de resistividad del lugar [5]

TABLA 4. RESISTIVIDAD DE DIFERENTES MATERIALES [12]

Tipo de Material Superficial	Resistividad (ohm*m)	
	Seco	Húmedo
Triturado de granito con finura	140x10 ⁶	1300
(0.04m) Triturado de granito con finura	4000	1200
(0.02m - 0.025m) Triturado de Granito con finura	4000	6513
(0.025m - 0.05m) Granito Lavado	1.5x10 ⁶ - 4.5x10 ⁶	5000
(0.05m - 0.1m) Granito Lavado	2.6x10 ⁶ -3x10 ⁶	10000
Piedra Caliza Lavada	7x10 ⁶	2000-3000
(0.02m) Granito lavado, similar a la grava	2x10 ⁶	10000
Granito lavado, similar al guisante	40x10 ⁶	5000
(0.02m) Granito Lavado	190x6	8000
Asfalto	2x10 ⁶ - 30x10 ⁶	10000-6x10 ⁶
Concreto	1x10 ⁶ - 1x10 ⁹	21-100

Fuente: [5]

CAPÍTULO 2: CORRIENTE DE FALLA EN UNA HIDROELÉCTRICA

“Las fallas en un sistema eléctrico se deben estudiar con mucha cautela, ya que según estas corrientes podemos dimensionar y seleccionar equipos de protección. Las fallas que se originan debido a distintos fenómenos pueden durar entre 20 ms a 1 s, esto depende del accionar de los interruptores. En el tiempo que se demora en despejarse la falla se aprecian distintos componentes en las ondas de intensidad “[13].

Las fallas de cortocircuito generan corrientes que exceden los valores nominales, este exceso de corriente genera sobrecargas térmicas y electrodinámicas elevadas, estas generan demandas asombrosas a los componentes eléctricos.

Los tipos de componentes eléctricos son [11]:

- Demanda Eléctrica
- Demanda Térmica
- Demanda Mecánica
 - Externa
 - Interna

La **demanda eléctrica:** genera deficiencia en la separación de elementos consecuente de los campos eléctricos afectados. Los modelos comunes de los mismos son; perforación de aisladores contacto de tierra de espira de transformadores o generadores después de la perforación de la vaina separadora, o sea componentes que serán remitidos de forma constante a diferencia de tensión.[6]

La **demanda térmica:** refiere a que cada componente tiene una determinada capacidad máxima de mitigar calor como energía térmica, esto se puede ver mediante la siguiente ecuación: [6]

$$I_{max}^2 * R_E (3)$$

Donde:

I_{max} : “Corriente máxima admisible del elemento”

R_E : “Resistencia del elemento”

El elemento es capaz de soportar la temperatura siempre y cuando no se exceda la corriente máxima, es decir, si se excede la corriente el componente no será apto de soltar la energía restante y se elevará su temperatura hasta que se rompa la constitución química del elemento causando averías en el sistema.[6].

La demanda mecánica que producen las corrientes eléctricas causa efectos de tracción, compresión e impacto, estas fuerzas pueden ser de dos tipos [6]:

- Origen Externo:
 - Debido a la mala práctica en el campo, causando averías en las líneas de tensión.
- Origen Interno:
 - Efectos magnéticos entre conductores.

Corriente de Falla

“Los cortocircuitos ocurren en sistemas de energía causan grandes corrientes transitorias decrecientes, generalmente muy por encima de las corrientes de carga del sistema. Estos resultan en tensiones electrodinámicas y térmicas disruptivas que son potencialmente dañinas. Los riesgos de incendio y explosiones son inherentes” [6].

Se intenta limitar los cortocircuitos a la sección defectuosa del sistema eléctrico mediante dispositivos de conmutación adecuados capaces de operar en condiciones de cortocircuito sin daño y aislando solo la sección defectuosa, de modo que no se intensifique una falla. Cuanto más rápido sea el funcionamiento de los dispositivos de detección y conmutación, menor será el daño por falla y mayor será la posibilidad de que los sistemas se mantengan unidos con pérdida de sincronismo [12].

“En un sistema trifásico, una falla puede involucrar igualmente a las tres fases. Una falla atornillada significa que las tres fases están conectadas con enlaces de impedancia cero antes de la falla. Es decir, la impedancia de falla en sí es cero y la falla está limitada únicamente por las impedancias del sistema y la máquina. Tal falla se llama falla atornillada simétrica de tres fases o falla sólida, estas fallas son poco comunes. Generalmente, tales fallas dan las corrientes máximas de cortocircuito y forman la base de los cálculos de las tareas de cortocircuito en los dispositivos de conmutación” [6].

Las fallas que involucran una o más de una fase y tierra se denominan fallas asimétricas. Bajo ciertas condiciones, la falla de línea a tierra o las corrientes de falla de línea a tierra doble pueden exceder las corrientes de falla simétricas trifásicas. Las fallas asimétricas son más comunes en comparación con las fallas trifásicas, es decir, un aislante de soporte en una de las fases de una línea de transmisión puede comenzar a parpadear a tierra, lo que finalmente resulta en una sola falla de línea a tierra [6].

Los cálculos de cortocircuito son, por lo tanto, el estudio principal siempre que se diseña un nuevo sistema de energía o se planifica una expansión y actualización de un sistema existente.

En general el cálculo de cortocircuitos debe:

- Encontrar la corriente en el punto de falla
- Encontrar la potencia de cortocircuito en el punto de falla
- Encontrar la distribución de corrientes post-falla en todas las líneas del sistema eléctrico de potencia [6].

Tipos de fallas

Fallas Simétricas

Cortocircuito Trifásicos

“Se puede indicar que este tipo de cortocircuitos son los únicos que sufren como un sistema equilibrado de manera que todas las fases son igualmente afectadas. Es por eso que se puede observar en este tipo de cortocircuito si se genera dentro de la tierra o fuera son nulas es por eso que se denomina el más violento”. [7].

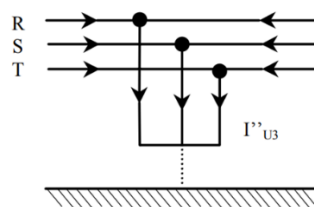


Figura 8. Cortocircuitos trifásicos [6].

Fallas Asimétricas

Cortocircuito Bifásico sin contacto a tierra

“Este tipo se caracteriza por ser menores al del fallo trifásico, aunque este tipo se haya originado en la inmediación de la maquinaria, de forma que de presentarse este tipo de cortocircuito serán mayores a los trifásicos, al presentarse 2 de 3 fases obligando al sistema a utilizar dos tipos de red” [8].

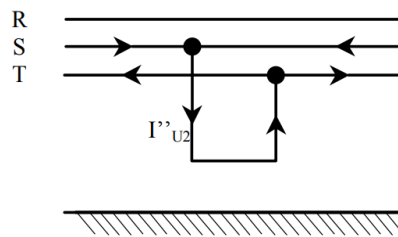


Figura 9. Cortocircuito Bifásico [7].

2.2.2.2 Cortocircuito Bifásico con contacto a tierra

“Este tipo tiene como característica un corto circuito bifásico, en este sentido la pérdida de energía se dirige a tierra” [8].

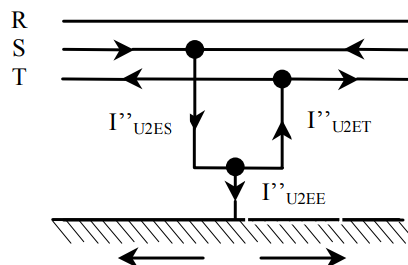


Figura 10. Cortocircuito Bifásico con contacto a tierra [7].

2.2.2.3 Cortocircuito Monofásico a Tierra

Este tipo de cortocircuito es el que se presenta más frecuentemente y por ende es el más violento, de forma que son redes que se encuentran rígidamente en tierra. Para su cálculo, al ser desequilibrado y con pérdida de energía, son necesarias las tres redes de secuencia (directa, inversa y homopolar) [8].

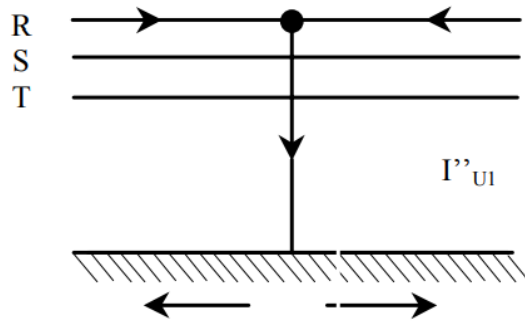


Figura 11. Cortocircuito Monofásico a Tierra [7].

2.2.2.4 Cortocircuito con doble contacto a tierra.

En redes con neutro aislado o puesta a tierra con impedancias de gran valor, puede aparecer el doble contacto a tierra. Este tipo de cortocircuito origina valores bajos de corriente con relación a los demás cortocircuitos [8].

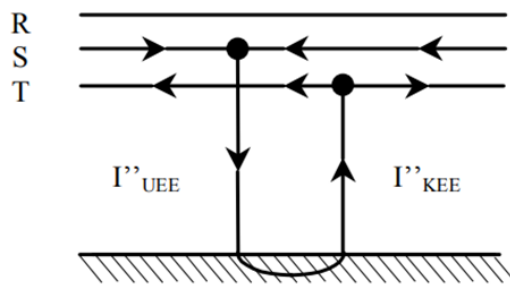


Figura 12. Cortocircuito con doble contacto a tierra [7].

Efectos de la Resistencia de Malla para el Cálculo de la Corriente de Falla

Si la falla es una ruptura del aislamiento dentro de la subestación local, la única suposición segura es que la resistencia de la falla se suponga cero.

En el caso de una falla al margen de la subestación local, en una línea conectada al bus de la subestación (Figura 12), es tolerable, si se puede establecer un valor conservador (mínimo) de resistencia de falla R_f , usarlo en el cálculo de corriente de falla a tierra. Sin embargo, si la resistencia de falla real no conserva un valor al menos elevado como el valor de R_f usado en los cálculos, entonces se debe despreciar la resistencia de falla. Cualquier error por descuidar R_f será, por supuesto, del lado de la seguridad [7].

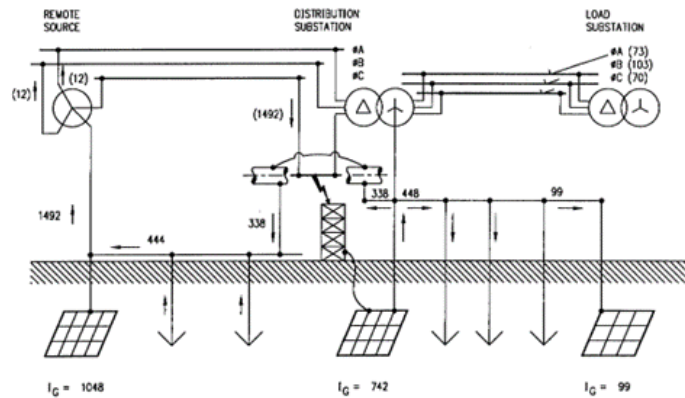


Figura 13. Efectos de la Resistencia de Malla para el Cálculo de la Corriente de Falla [7].

Peor tipo de falla y ubicación

Se puede indicar que el peor error para el sistema puesta a tierra da como efecto el valor más alto de corriente I_G . Este tipo de corriente es conveniente a la secuencia 0, mientras que la corriente es independiente se denomina como resultante $3I_0$, en la secuencia cero[5].

En el lugar que se presenta una falla de línea a tierra causará una falla terrible si $Z_1 Z_0 > Z_2^2$, mientras que existe una falla bifásica siempre que $Z_1 Z_0 > Z_2^2$. Por su parte si se supone que Z_2 y Z_1 son iguales, las relaciones anteriores se simplifican a $Z_0 > Z_1$ y $Z_0 < Z_2$, respectivamente [7].

Z_1, Z_0, Z_2 son definidos como:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (4)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (5)$$

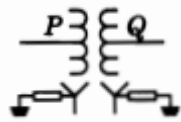
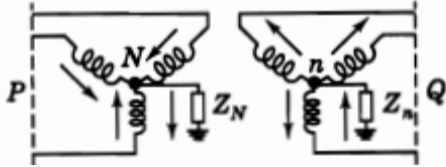
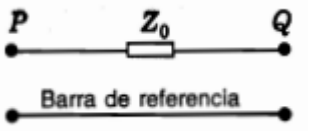
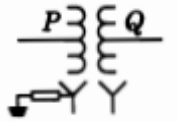
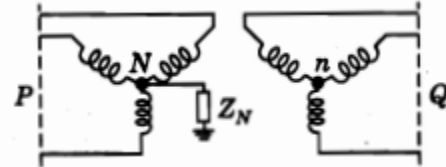
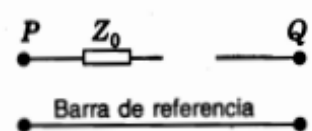
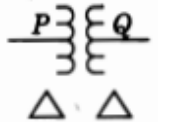
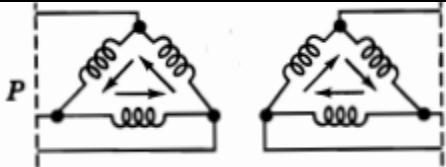
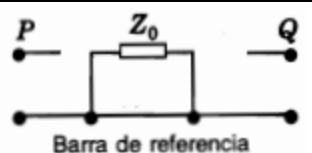
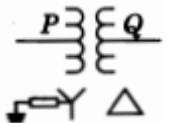
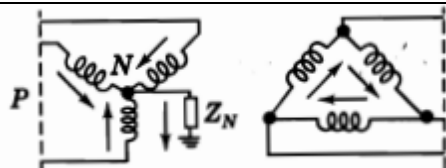
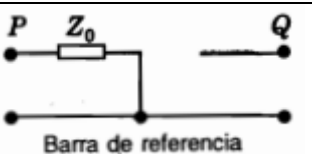
$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (6)$$

El lugar de la falla que causa corriente máxima de red I_G implica variados análisis. Una falla, ya sea que se produzca en el lado elevado de voltaje o bajo voltaje, sería igualmente perjudicial, y de igual manera si la falla se produce en una línea exterior de la subestación o en el interior de la misma.

Redes de Secuencia en transformadores trifásicos

El diagrama de configuración para una red de secuencia cero, así como el desfaseamiento en circuitos, tanto en secuencia positiva como negativa, viene principalmente determinado por las conexiones en los devanados primarios y secundarios de los transformadores[5].

Es importante tomar en cuenta que, si el valor de la corriente magnetizante es despreciable por ser demasiado bajo, en el transformador no circula corriente en el devanado primario a no ser que circule corriente en el devanado secundario. Se tiene que tomar en consideración que existen parámetros que determinan la corriente en el devanado primario, como lo son la corriente circulante en el devanado secundario y la relación del número de vueltas entre los dos devanados, si es que se estima como insignificante la corriente magnetizante. Estos parámetros funcionan como la una pauta para analizar casos específicos [7].

Tipo de Conexión	Diagramas de Conexión	Circuitos Correspondientes de Secuencia Cero
		
		
		
		

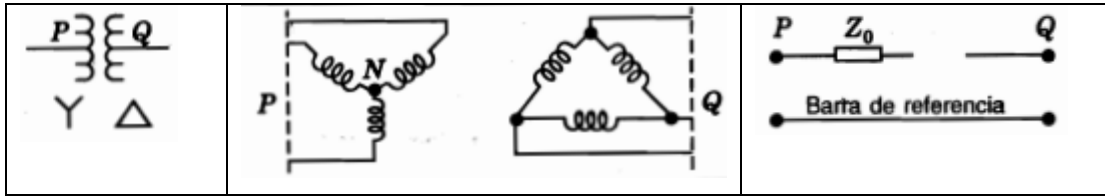


Figura 14. Redes de Secuencia en transformadores trifásicos [7]

Se puede indicar que los circuitos que proceden de la secuencia 0 de transformadores trifásicos, conjuntamente con los símbolos y conexiones unifilares. En este caso es aplicable que la impedancia Z_0 tome en consideración, en el neutro las impedancias $3Z_N$ y $3Z_N$, así como también la impedancia de dispersión Z [6].

Transformador Y – Δ con el Y aterrizado

“En este caso tenemos aterrizado el neutro Y – Δ. Existe circulación de corriente con un trayecto hacia tierra a través de la Y de secuencia cero, por lo que las respectivas corrientes inducidas pueden transitar en la Δ. Para el devanado en Δ circula una corriente de secuencia cero, balanceando en Y de forma magnética dicha corriente, pero no fluye así en las líneas Δ conectadas” [6].

Análisis de Corto Circuito

Para el valor de la corriente de cortocircuito se debe considerar cuidadosamente la configuración del sistema:

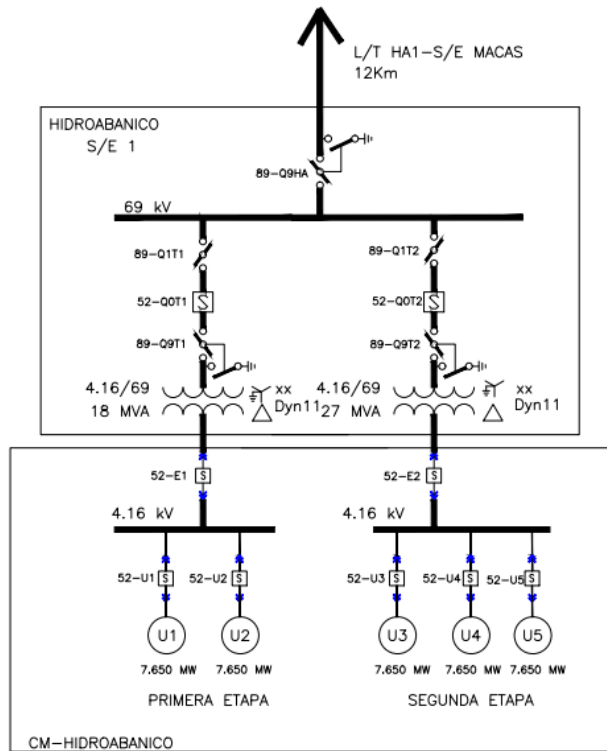


Figura 15. Circuito Unifilar Hidroabánico [7].

Tenemos los siguientes criterios para determinar la corriente de falla:

- Los transformadores elevadores tienen configuración delta estrella con el lado de 4.16kV en delta esto significa que la corriente de falla de secuencia cero no tiene aporte desde el Sistema Nacional Interconectado[6].
- Los generadores no están firmemente aterrizados sino conectados a través de una impedancia por lo que la corriente de falla está limitada por esta.

“De esta manera, la corriente de secuencia cero se ve drásticamente limitada respecto al valor de la corriente de cortocircuito trifásico o bifásico. Debido a que el Feeder de la segunda etapa está conectado a 3 generadores y es ahí donde se concentra la corriente de las 3 unidades de generación. Cada generador tiene una corriente de falla de 10955 amperios, esta corriente de falla fue proporcionada por el fabricante WKV (empresa alemana dedicada a fabricación de rodetes y generadores). Debido a que los tres generadores están conectados en paralelo a la barra de la segunda etapa se suma y nos da una corriente de falla de:”

$$I_{CC} = 32.865 [kA]$$

CAPÍTULO 3: HOMOLOGACIÓN DE LA MALLA PUESTA A TIERRA A TIERRA ACTUAL

Debido a que existen diversos factores que afectan un sistema de puesta a tierra es conveniente verificar las mallas existentes en la Central Hidroabancico. Se debe contrastar el cumplimiento de características con arreglo a las normas IEEE 80 e IEEE 837. Efectuando el cálculo para verificar sus voltajes de toque y de paso con las dimensiones demostradas en el siguiente plano:



Figura 16. Plano de la malla de puesta a tierra existente.

Fuente: [Autor]

Características de la Malla Actual

La malla actual tiene una forma de L con un largo de 185 m y un ancho de 63 m, está a una profundidad de 0.6 m.

Conductor utilizado.

Longitud Total: 1420 m

Tipo: Acero Galvanizado \varnothing 1/2"

Varillas.

Numero: 52 varillas

Tipo: Varilla de Acero Galvanizado \varnothing 3/4" x 2.44 m

Procedimiento

El diagrama de bloques ilustra una guía procedimental para el diseño de mallas de tierra, la parametrización usada para estructurar el diagrama está descrita en la Tabla 2 y 3. A continuación, en la figura 12 se describe cada paso del procedimiento.

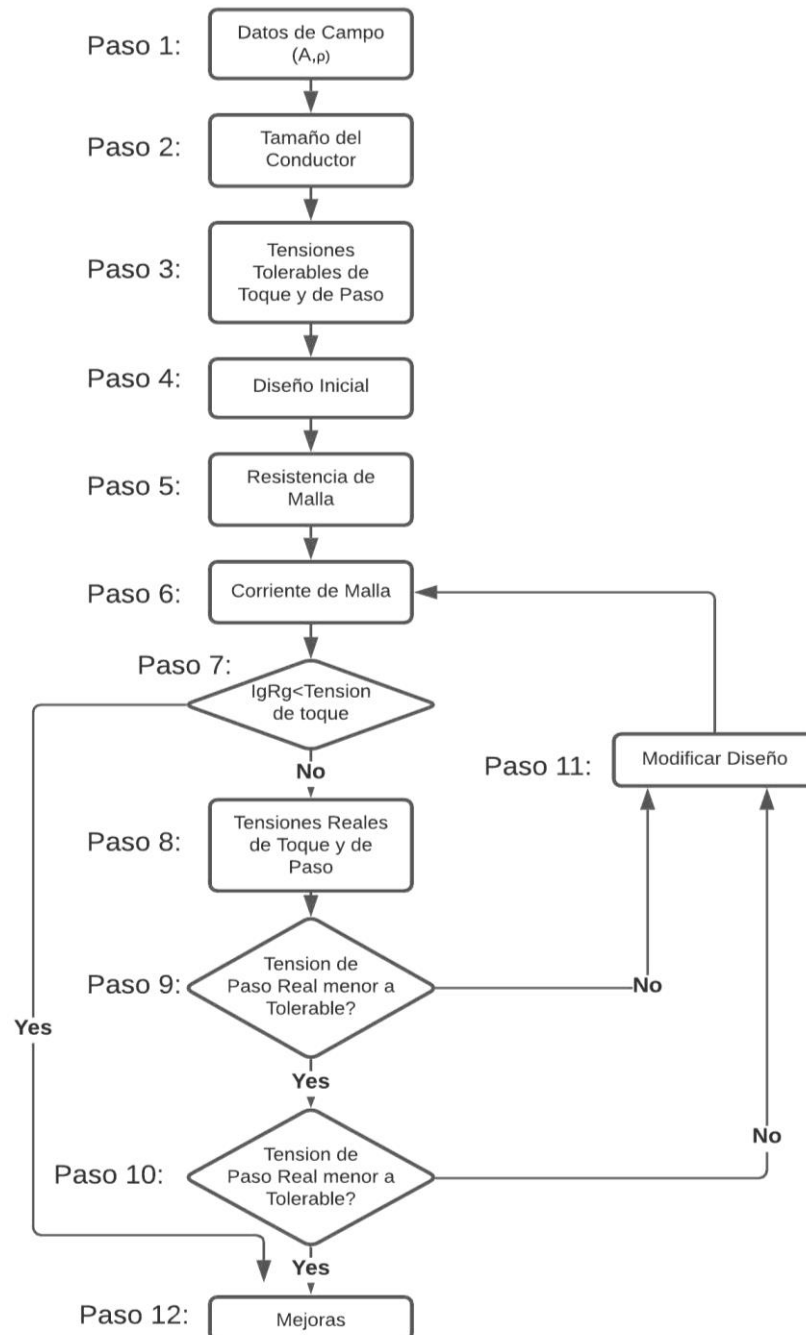


Figura 17. Diagrama de bloques del procedimiento del testeo de datos de la malla puesta a tierra [Autor].

TABLA 5. ÍNDICE DE PARÁMETROS DE CÁLCULO [2]

Símbolo	Descripción	Unidad	# Clausula en IEEE-80 2000
ρ	“Resistividad del Terreno”	$\Omega \cdot m$	13
ρ_s	“Resistividad en capa superficial”	$\Omega \cdot m$	7.4,12.5
$3I_0$	“Corriente en falla simétrica”	A	15.3
A	“Área Ocupada por la MPT”	m^2	14.2
C_s	“Factor de reducción en la capa superficial”		7.4
d	“Diámetro del conductor de malla”	m	16.5
D	“Distancia entre conductores paralelos”	m	16.5
D_f	“Factor de Decremento”		15.1.4, 15.10
D_m	“Distancia máxima entre dos puntos de la malla”	m	16.5
$E_{toque-real}$	“Tensión de toque real”	V	16.5
$E_{paso-real}$	“Tensión de paso de la MPT diseñada”	V	16.5
E_{paso50}	“Voltaje de Paso tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal”	V	8.3
E_{paso70}	“Voltaje de Paso tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal”	V	8.3
$E_{toque50}$	“Voltaje de Toque tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal”	V	8.3
$E_{toque70}$	“Voltaje de Toque tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal”	V	8.3

h	“Profundidad de los conductores de la MPT”	m	14.2
h_s	“Espesor en capa superficial”	m	7.4
I_G	“Corriente de red máxima que circula entre la red de tierra y la tierra circundante (incluida la compensación de CC)”	A	15.1.4
I_g	“Corriente de Red”	A	15.1.6
K	“Factor de reflexión entre distintas resistividades”		7.4
K_h	“Factor de ponderación correctivo”		16.5
K_i	“Factor correctivo para geometría de malla”		16.5
L_r	“Longitud de la varilla”	m	14.3, 16.5
L_S	“Longitud enterrada efectiva para voltaje de paso real”	m	16.5
L_T	“Longitud total de los conductores y de las varillas”	m	14.2
L_x	“Longitud máxima del conductor de red en dirección x”	m	16.5
L_y	“Longitud máxima del conductor de red en dirección y”	m	16.5
n	“Factor geométrico”		16.5
R_G	“Resistencia de la MPT”	Ω	14.1-14.4
t_c	“Duración de corriente de falla para dimensionar el conductor hacia tierra”	s	11.3
t_f	“Duración de la corriente de falla para dimensionar un factor de decrement”	s	15.1

t_s	“Duración de una descarga para dimensionar corriente corporal acceptable”	s	5.2-6.3
-------	---	---	---------

Fuente: El autor. [2]

Procedimiento de Diseño

Paso 1: Se necesita el plano de la propiedad, la ubicación, la prueba de resistividad que se detalló en el capítulo 1.

Datos Importantes: A , ρ

Paso 2: El conductor se determina mediante el análisis y desarrollo de la ecuación de corriente para falla $3I_0$. El tiempo t_c debe mostrar el tiempo máximo de despeje factible (incluido el respaldo).

Datos Importantes: t_c , d

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)} \quad (7)$$

Donde:

I “corriente de falla asimétrica kA ”

A_{mm^2} “sección transversal del conductor en mm^2 ”

T_m “temperatura máxima permisible de fusión en $^{\circ}C$ ”

T_a “temperatura de ambiente en $^{\circ}C$ ”

T_r “temperatura de referencia de constantes de materiales en $^{\circ}C$ ”

α_0 “coeficiente térmico de resistividad a $0^{\circ}C$ en $1/^{\circ}C$ ”

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

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

K_0 “es $1/\alpha_0$ o $(1/\alpha_r) - T_r$ en $^{\circ}C$ ”

t_c “tiempo de duración de la corriente de falla en s ”

$TCAP$ “factor de capacidad térmica por unidad de volumen obtenido de la tabla 6 en $J/(cm^3 \cdot ^{\circ}C)$ ” [2]

En la tabla 6 se observa la conductividad de varios materiales junto con su factor de capacidad térmica, temperatura de fusión y resistencia.

TABLA 6. CONDUCTIVIDAD DE MATERIALES

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α_r a 20°C ($1/^{\circ}\text{C}$)	K_0 a 0°C (0°C)	Temperatura de fusión T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ρ_r a 20°C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Capacidad térmica $TCAP$ en $(\frac{J}{\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}})$
“Cobre destemplado trenzado suave”	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42
“Cobre comercial trenzado duro”	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42
“Alambre de acero revestido de cobre”	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85
“Alambre de acero revestido de cobre”	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85
“Varilla de acero con revestimiento de cobre”	20	0,0078	245	1084	8,62	3,85
“Aluminio de grado EC”	61	0,00403	228	657	2,86	2,56
“Aleación de aluminio 5005”	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6
“Aleación de aluminio 6201”	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6
“Alambre de acero con revestimiento de aluminio”	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58
“Acero 1020”	10,8	0,0016	605	1510	15,9	3,28
“Varilla de acero con revestimiento inoxidable”	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44

“Varilla de acero con capa de zinc”	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93
“Acero Inoxidable 304”	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03

Fuente: El Autor. [4]

Paso 3: El toque y paso se calculan mediante las ecuaciones (8) y (10). La elección del tiempo, t_s , se basa en el juicio del ingeniero de diseño, con la orientación de las secciones 5.2 a 6.3 del estándar IEEE 80-2000.

Datos Importantes: E_{paso70} , E_{paso50} , $E_{toque70}$, $E_{toque50}$, t_s

El voltaje de conducción máximo de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites definidos a continuación:

El límite de voltaje de paso para una persona de 50 kg es:

$$E_{paso50} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (8)$$

El límite de voltaje de paso para una persona de 70 kg es:

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (9)$$

El límite de voltaje de toque para una persona de 50 kg es:

$$E_{toque50} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (10)$$

El límite de voltaje de toque para una persona de 70 kg es:

$$E_{toque70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (11)$$

Donde:

E_{paso} : “el voltaje de paso en V ”

E_{toque} : el voltaje de toque en V

- C_s : calculada por la ecuación (12)
- ρ_s : resistividad de la capa superficial del terreno en $\Omega \cdot m$
- t_s : tiempo de despeje de la falla en s

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (12)$$

Donde:

- C_s : el factor de decremento de la capa superficial
- h_s : grosor de la capa superficial en m

Si no se utiliza una capa de superficie protectora, entonces $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$. [6]

Paso 4: Los cálculos obtenidos mediante el cálculo inicial se deben fundamentar en el área de la malla de puesta a tierra y en la corriente I_G .

Datos Importantes: D, n, L_c, L_T, h

- D : espaciamiento debe tener de 3m a 15m de distancia.
- h : debe ser enterrado de 0,3m a 0,5m

El número necesario de conductores paralelos para una malla n es:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (13)$$

Donde:

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (14)$$

- L_p : longitud perimetral en m

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (15)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad (16)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (17)$$

$n_b = 1$ mallas cuadradas

$n_c = 1$ mallas rectangulares y cuadradas

$n_d = 1$ mallas rectangulares y en forma de L

Paso 5: La resistencia del sistema de puesta a tierra se calcula a partir de la ecuación siguiente:

Dato Importante: R_g

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (18)$$

Paso 6: La corriente I_G está determinada por la ecuación (7).

Datos Importantes: I_G, t_f

Resistencia equivalente de los hilos de guarda:

$$Z = \sqrt{Z_1 * R_2} \quad (19)$$

Donde:

Z : Impedancia correspondiente de los hilos guarda-torres en Ω

Z_1 : Impedancia propia del hilo de guarda en Ω/km

R_2 : $\frac{R_{torre}}{\text{valor promedio de torres}}$ en Ω (20)

Cálculo para el factor de división de corriente de falla:

$$S_f = \left| \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \right| \quad (21)$$

Donde:

Z_{eq} : Resistencia equivalente de los hilos de guarda en Ω

R_g : Resistencia de la MPT en Ω

Corriente máxima de malla:

$$I_G = D_f \times I_g = D_f \times S_f \times I_f \quad (22)$$

Donde:

$$I_f = 3I_0 \quad (23)$$

Paso 7: Si es innecesario realizar análisis adicionales cuando el GPR del boceto preliminar está bajo el nivel tolerable. Solo se necesita un conductor adicional para proporcionar acceso a la tierra del equipo. Si el GPR es mayor se sigue con el paso 8.

$$GPR = I_G \cdot R_g \quad (24)$$

Donde:

GPR : Potencial (en voltios) máximo de la malla

Paso 8: El cálculo de voltajes de toque y paso reales se puede realizar con las siguientes ecuaciones:

Datos Importantes: $E_{toque-real}$, $E_{paso-real}$

Tensión de toque real:

$$E_{toque-real} = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (25)$$

Donde:

ρ : “Resistividad de terreno $\Omega \cdot m$ ”

K_m : “Factor de espaciado”

K_i : “Factor de corrección para geometría de cuadrícula”

L_M : “Longitud enterrada efectiva para tensión de toque en m ”

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \cdot n - 1)} \right) \right] \quad (26)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}, h_0 = 1 \quad (27)$$

En la cual:

h_0 : “Profundidad referencial de la malla en m ”

Para MPT con varillas de tierra en la longitudinalidad del perímetro o para MPT en las esquinas de la cuadrícula, así como en toda el área de la MPT.

$$K_{ii} = 1 \quad (28)$$

$$L_m = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (29)$$

Para MPT sin varillas o MPT con pocas varillas, ningunas colocados a lo largo del perímetro o esquinas de la MPT.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (30)$$

$$L_m = L_C + L_R \quad (31)$$

El factor correctivo en la geometría de la malla

$$K_i = 0.644 + 0.148 \cdot n \quad (32)$$

Tensión de paso real:

$$E_{paso-real} = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (33)$$

Para MPT con o sin varillas, la longitud enterrada efectiva para la tensión de paso es:

$$L_s = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R \quad (34)$$

Se supone que el voltaje de paso máximo ocurre en un espacio de 1 m, empezando en el conductor perimetral y extendiéndose fuera del mismo en el ángulo que biseca el vértice más extremo de la cuadrícula. Para la distancia de enterramiento usual de 0,25 m <math>h < 2,5 \text{ m}</math>.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (35)$$

Paso 9: Si el voltaje de toque real es menor al tolerable entonces proceder al **paso 10**, si no es así ir al paso 11.

Paso 10: Si el voltaje de paso real es menor al tolerable, entonces proceder al **paso 12**, si no es el caso ver paso 11.

Paso 11: Realizar acciones de mejora como:

Disminuir la resistencia total de la red: disminuirá el GPR máximo y, en consecuencia, el voltaje transferido máximo. La forma más efectiva de reducir la resistencia en la red de tierra es aumentando el área ocupada por la red[3].

Cálculos

Paso 1: Datos de Campo

El área utilizada por la MPT antigua fue proporcionada mediante los planos de la empresa Hidroabanico S.A.:

$$A = 2238.796 \text{ [m}^2\text{]}$$

La resistividad del terreno se obtuvo en el capítulo 1:

$$\rho = 200 \text{ [\Omega} \cdot \text{m]}$$

Para la resistividad de la capa superficial se utilizó la tabla 3 de la sección 1.6, piedra caliza lavada:

$$\rho_s = 3000 \text{ [\Omega} \cdot \text{m]}$$

La medida en el campo el grosor de la capa superficial da:

$$h_s = 0.15 \text{ [m]}$$

Paso 2: Conductor

Se utiliza los datos proporcionados por la empresa HIDROABANICO S.A. debido a que es la homologación de la malla antigua.

El tiempo de duración de la corriente de falla:

$$t_c = t_f = 0.5 \text{ [s]}$$

TABLA 7. TABLA DE LA DURACIÓN DE LAS FALLAS Y FACTOR DE Df

Duración de la falla t_f	Factor de decremento D_f
0.08 [s]	1.65
0.10 [s]	1.25

0.20 [s]	1.20
0.25 [s]	1.10
0.5+ [s]	1

Fuente: [9]

Mediante la tabla 7 se aprecia que el factor de decremento es:

$$D_f = 1$$

En la MPT antigua el conductor utilizado es de acero galvanizado 2/0 con los siguientes datos:

$$A_{mm^2} = 124 [mm^2]$$

$$d = 0.011684 [m]$$

Paso 3: Tensiones Tolerables

Factor de decremento de la capa superficial, mediante la ecuación (12):

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{200}{3000})}{2 * 0.15 + 0.09}$$

$$C_s = \mathbf{0.784615385}$$

Tiempo de despeje de falla igual al tiempo de duración de la falla:

$$t_s = 0.5 [s]$$

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{paso70} = \mathbf{3357.799897[V]}$$

$$E_{toque70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{toque70} = \mathbf{1005.973621 [V]}$$

Paso 4: Diseño Básico

Espaciamiento máximo entre conductores paralelos:

$$D = 5 [m]$$

Profundidad a la cual se encuentra enterrada la malla puesta a tierra.

$$h = 0.5 [m]$$

Longitud total de los conductores:

$$L_c = 1420 [m]$$

Longitud perimetral:

$$L_p = 269.42 [m]$$

Longitud de cada varilla:

$$L_r: 2.44 [m]$$

Número de varillas a utilizar:

$$Nv: 52$$

Longitud total de todas varillas:

$$L_R = 126.88 [m]$$

Longitud máxima en el eje x:

$$L_x = 71.36 [m]$$

Longitud máxima en el eje y:

$$L_y = 63.42 [m]$$

Longitud máxima entre dos puntos:

$$D_m = 88 [m]$$

Longitud total de varillas y conductores enterrados:

$$L_T = 1546.88 [m]$$

El número necesario de conductores paralelos para una malla n con las ecuaciones (9) (10) (11) (12) (13):

$$n = 16.04786$$

Donde:

$$n_a = 10.54$$

$$n_b = 1.193$$

$$n_c = 1.27499$$

$$n_d = 1$$

Paso 5: Resistencia de Malla

$$R_g = 1.976971729[\Omega]$$

Paso 6: Intensidad de Corriente Máxima de Malla

La impedancia de los hilos de guarda con las ecuaciones (19), primero se obtiene la tabla 8 de la siguiente forma:

$$Z = \sqrt{Z_1 * R_2}$$

Las resistencias de las torres de la línea de transmisión y los valores se obtienen del mantenimiento en las torres de transmisión hechos recientemente:

TABLA 8. VALOR DE RESISTENCIA DE CADA UNA DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS.

Estructura	Resistencia	Unidad
E0001	10.37	Ω
E0002	12.19	Ω
E0003	14.35	Ω
E0004	21.97	Ω

E0005	19.41	Ω
E0006	12.82	Ω
E0007	2.02	Ω
E0008	4.89	Ω
E0009	1.98	Ω
E0010	10.73	Ω
E0011	61.08	Ω
E0012	5.99	Ω
E0013	7.12	Ω
E0014	29.02	Ω
E0015	6.51	Ω
E0016	8.75	Ω
E0017	3.02	Ω
E0018	8.04	Ω
E0019	20.19	Ω
E0020	12.73	Ω
E0021	34.66	Ω
E0022	3.11	Ω
E0023	17.59	Ω
E0024	12.92	Ω
E0025	6.2	Ω
E0026	17.36	Ω
E0027	3.1	Ω

Fuente: El Autor

Promedio de torres: 13.63 [Ω]

TABLA 9. DATOS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Datos de Línea de Transmisión

Línea de transmisión	Resistencia aproximada de la torre [Ω]	Longitud de la línea [km]	# Total, de torres en la línea de transmisión	Valor promedio de torres por km de hilo de guarda [torres/km]
Hidroabánico	13.63	11	27	3

Fuente: El Autor

$$R_2 = 4.5433 [\Omega]$$

Para Z_1 primero se obtiene el calibre del hilo de guarda y se procede a utilizar una tabla, se obtiene que $Z_1 = 3.19 \left[\frac{\Omega}{km}\right]$

$$Z = 3.806998 [\Omega]$$

La impedancia total equivalente es el cálculo en paralelo de todos los hilos de guarda:

$$Z_{eq} = Z \quad (36)$$

$$Z_{eq} = 3.806998 [\Omega]$$

Para el cálculo de la corriente máxima de malla se necesita de los tres siguientes datos:

Cálculo del factor de división de la corriente de falla, con la ecuación (21), da $S_f = 0.658198116$.

Factor de decremento obtenido de la tabla 7 ya que el tiempo de despeje de la falla es de 0.5 segundos, $D_f = 1$.

Corriente de falla obtenida en el capítulo 2, $I_f = 32865 [A]$.

$$I_G = 21631.68109 [A]$$

Paso 7: Potencial Máximo de MPT

Al utilizar la ecuación (24), tenemos, $GPR = 42765.22197V$.

El GPR es mayor a la tensión de toque tolerable, así que se prosigue a verificar si las tensiones reales son menores a las tolerables.

Paso 8: Tensiones Reales

Tensión de toque real:

Debido a que la ecuación (33) de toque necesita los siguientes parámetros; K_m, K_i, L_m , se emplea las ecuaciones (27)(28)(29):

$$K_h = 1.22474$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_m = 0.599591$$

$$L_m = 1620.62$$

$$K_i = 3.019083$$

$$E_{toque-real} = 4832.473483 [V]$$

Tensión de paso real:

La ecuación de paso real es similar a la de toque, pero lo que le diferencia es K_m y L_m por K_s y L_s respectivamente, utilizamos las ecuaciones (30)(31)(32):

$$L_s = 1172.848$$

$$K_s = 0.439843$$

$$E_{paso-real} = 4898.361719[V]$$

Debido a que, esta es la homologación para poder luego diferenciar las tensiones tolerables con las reales se finaliza el cálculo en el paso 8.

Verificación de Tensiones de Paso y Toque de la antigua Malla

De la sección 3.2 en la tabla 10 se aprecia los siguientes valores de tensión de paso y toque.

TABLA 10. VALORES DE TENSIONES DE PASO Y TOQUE

Tensiones	Valor Real [V]	Valor Tolerable [V]	Cumple
-----------	----------------	---------------------	--------

Paso	4898.361719	3357.799897	No
Toque	4832.473483	1005.973621	No

Fuente: El Autor

Tanto la tensión de paso como de toque no cumplen, se recomienda cambiar la malla.

CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA MALLA PUESTA A TIERRA NUEVA

Diseño

Paso 1: Datos de Campo

Para encontrar el área total se suma al área de la malla actual con el área de la vieja malla:

$$A = 7120.046 [m^2]$$

$$\rho = 200 [\Omega \cdot m]$$

$$\rho_s = 3000 [\Omega \cdot m]$$

$$h_s = 0.15 [m]$$

Paso 2: Conductor

$$AMCM = 10955 \cdot \left(\frac{33 \cdot 5}{\log\left(\frac{250 - 27}{234 + 27} + 1\right)} \right)^{\frac{1}{2}} = 85.925 MCM$$

Se utiliza un cable de calibre # 4/0 AWG debido a que es el mínimo recomendado por la norma IEEE STD. 80-2013.

Paso 3: Tensiones Tolerables

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{200}{3000})}{2 * 0.15 + 0.09}$$

$$C_s = 0.784615$$

Tiempo de despeje de falla igual al tiempo de duración de la falla:

$$t_s = 0.5 [s]$$

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{paso70} = 3357.8 [V]$$

$$E_{toque70} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{toque70} = 1005.974[V]$$

Paso 4: Diseño básico

Espaciamiento máximo entre conductores paralelos:

$$D = 2.5 [m]$$

Profundidad a la cual se encuentra enterrada la malla puesta a tierra.

$$h = 0.5 [m]$$

Longitud total de los conductores:

$$L_c = 5530 [m]$$

Longitud perimetral:

$$L_p = 610 [m]$$

Longitud de cada varilla:

$$L_r: 2.44 [m]$$

Número de varillas a utilizar:

$$Nv: 916$$

Longitud total de todas varillas:

$$L_R = 2235.04 [m]$$

Longitud máxima en el eje x:

$$L_x = 151 [m]$$

Longitud máxima en el eje y:

$$L_y = 110[m]$$

Longitud máxima entre dos puntos:

$$D_m = 170 [m]$$

Longitud total de varillas y conductores enterrados:

$$L_T = 7765.04 [m]$$

El número necesario de conductores paralelos para una malla n con las ecuaciones 13:

$$n = 31.42885$$

Donde:

$$n_a = 18.13114754$$

$$n_b = 1.34435579$$

$$n_c = 1.289403698$$

$$n_d = 1$$

Paso 5: Resistencia de Malla

$$R_g = 1.072068649[\Omega]$$

Paso 6: Corriente Máxima de Malla

$$I_G = 25643.63184[A]$$

Paso 7: Potencial Máximo de MPT

$$GPR = 27491.73373 [V]$$

Paso 8: Tensiones Reales

Tensión de toque real:

Debido a que la ecuación de toque, necesita los siguientes parámetros; K_m, K_i, L_m , se utiliza las ecuaciones (27)(28)(29)(30)(31)(32):

$$K_h = 1.22474$$

$$K_{ii} = 1$$

$$K_m = 0.309684764$$

$$L_m = 9029.925612$$

$$K_i = 5.295469107$$

$$E_{toque-real} = 931.428741[V]$$

Tensión de paso real:

La ecuación de paso real es similar a la de toque, pero lo que le diferencia es K_m y L_m por K_s y L_s respectivamente, utilizamos las ecuaciones (25):

$$L_s = 6047.284$$

$$K_s = 0.551737136$$

$$E_{paso-real} = 2477.911657[V]$$

Paso 9: Verificación de Tensión de Toque

$$E_{toque-real} = 931.428741[V] < E_{toque70} = 1005.974[V]$$

Voltaje de toque real es **menor** al voltaje de toque tolerable.

Paso 10: Verificación de Tensión de Paso

$$E_{paso-real} = 2477.911657[V] < E_{paso70} = 3357.8 [V]$$

Tensión de paso real es **menor** a la tensión de paso tolerable.

Conclusión de Diseño

Debido a que las tensiones de paso y de toque cumplen con los requisitos se termina el cálculo de la malla.

TABLA 11. TABLA DE RESULTADOS DE LAS TENSIONES DE PASO Y TOQUE

Tensiones	Valor Real [V]	Valor Tolerable [V]	Cumple
Paso	2477.911657	3357.8	Si

Toque	931.428741	1005.974	Si
--------------	------------	----------	----

Fuente: El Autor

Para el diseño de ESG, la cuadrícula rectangular tiene un valor mínimo de resistencia del sistema de conexión a tierra (R_g), aumento de potencial de tierra (GPR) y máximo contacto (E_m) y voltaje de paso (E_s) que el diseño de cuadrícula en forma de L y cuadrado. En ESG, los conductores en la periferia de la red tienen una corriente bastante mayor que los conductores intermedios de la red, por lo que la distribución de potencial sobre la superficie de la red se vuelve extremadamente no uniforme, por lo que su rendimiento no es mejor que la red de puesta a tierra desigualmente espaciada [8]. La rejilla desigualmente espaciada minimiza el potencial de conexión a tierra y la hace más uniforme y proporciona un sistema de conexión a tierra óptimo y seguro.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El análisis muestra los métodos y cálculos de diseño para una nueva malla de puesta a tierra en la central Hidroabánico, y como algunos de los aspectos y parámetros físicos con el pasar del tiempo han influido en el desempeño de funcionamiento de la malla dentro de la central de generación.

Dentro del análisis de datos obtenidos se observa que debajo del espacio físico de la central de generación, el terreno no presenta una resistividad uniforme. Por lo que los resultados muestran que existen altos valores de resistividad, situación que es desfavorable y poco adecuada desde el punto de vista de diseño ya que se necesita una resistividad baja para obtener una malla de baja resistencia según la norma que rige este tipo de diseños.

Al realizar el cálculo del sistema de puesta a tierra de la malla antigua, se encuentra que las tensiones de paso y toque muestran los siguientes resultados 4898.36 V y 4832.47 V respectivamente, incumpliendo los valores tolerables, sobrepasando los valores de 3357.8 V tensión de paso y 1005.974 tensión de toque, valores referenciales. Por lo que se evidencia que tras 12 años de uso el sistema de puesta a tierra muestra fallas.

Las tensiones de paso y toque no cumplieron con las mínimas reguladas por las normas IEEE Std 80 “IEEE” y IEEE Std 837, como se puede observar en lo antes mencionado por lo cual se procede a diseñar una malla de puesta a tierra que cumpla con los parámetros y a la misma vez tenga una dimensión correcta para precautelar la seguridad. Se realiza la homologación de la malla de puesta a tierra de la Central Hidroeléctrica Hidroabánico – Macas, Morona Santiago, en donde partiendo de los datos existentes y tras la obtención de nuevos datos se realiza el cálculo de la resistividad del terreno aledaño a la casa de máquinas, continuación de la malla existente en la central, utilizando el método de Wenner, obteniendo como resultado una resistividad de $200 [\Omega * m]$.

La corriente de corto circuito resultante tras tomar en cuenta la conexión de los transformadores (delta – estrella) con el lado de 4.16kV en delta significa que la corriente de falla de secuencia cero no tiene aporte desde el Sistema Nacional Interconectado, por lo tanto, no afecta a la corriente de cortocircuito.

La corriente de corto circuito de 32.865 [kA] es el resultado de los tres generadores conectados en paralelo a la barra de la segunda etapa

Los resultados de las tensiones de paso y toque en la malla nueva son: 2477.91 V y 931.42 V respectivamente, encontrándose por debajo de los máximos permisibles, por tanto, permite asegurar la integridad del personal y de los equipos que se encuentran en funcionamiento. A su vez se puede afirmar que el diseño y la modelación realizados cumplen los requerimientos de seguridad que las normas exigen en este tipo de diseños y puede mantener un control de potencias anormales y corrientes de falla en los parámetros de operación de la central.

5.2. RECOMENDACIONES

Realizar estudios periódicos sobre la malla de puesta a tierra ya que es una manera de mitigar daños a los equipos y sobre todo al personal. Debido a que la tensión de paso y tensión de toque de la malla antigua no cumple con el mínimo requerimiento establecidos en la norma “IEEE 80.2013”.

Debido a la ubicación de la malla antigua se debería añadir la nueva malla a la antigua mediante conexiones a soldadura.

Ejecutar estudios de puesta a tierra con un enfoque de crecimiento para evitar inconvenientes como se mencionó en el análisis.

Realizar continuamente los mantenimientos preventivos para obtener datos y condiciones actuales en las que opera la central.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hidroabanico, “Central hidroabanico.” <https://hidroabanico.com.ec/proyecto/>.
- [2] IEEE Substations Committee, *Standard 80-2000 Guide for Safety in AC substation grounding*, vol. 56. 2000.
- [3] “[PDF] método para medir la resistencia de puesta a tierra de grandes - Free Download PDF.” .
- [4] IEEE-std80, “Guide for safety in AC substation grounding,” vol. 80–2000, 1991.
- [5] IEEE, “Resistividad- Rangos de resistividad,” *paf 53*. .
- [6] Electronicshub.org, “Types of Faults in Electrical Power Systems,” 2015. <https://www.electronicshub.org/types-of-faults-in-electrical-power-systems/>.
- [7] J. D. ROJAS HUAMAN , «Universidad Nacional del Centro del Peru Repositorio Institucional,» 2009. [En línea]. Available: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3566/Rojas%20Human.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 01 Septiembre 2021].
- [8] H. Briceño , Manual para la medición de la resistividad del suelo, Mérida: Universidad de los Andes, 2014.
- [9] IEEE Standards Board, *IEEE Guide for Generating Station Grounding*, New York,: IEEE Standards Board, 2001.
- [1] J. Celi, Estudio del sistema de puesta en marcha a tierra de la subestación de 5 MVA 0 A 69/13.8KV, a implementarse en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil: Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2015.
- [1] E. Hammond y T. Robson, «Comparison of electrical properties of coments and 1] concretes,» *The Engineer*, nº 78-80, 1955.
- [1] H. Gullen , «Configuraciones, subestaciones elèctricas,» 1999.
2]