



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

CARRERA:

Ingeniería en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

TÍTULO:

“Metodología para el cálculo de un sistema de puesta a tierra para subestación de 69 Kv
con diseño de norma IEEE 80-2000”

AUTORA:

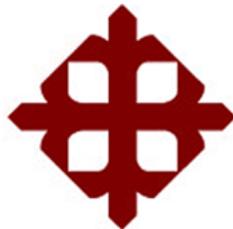
Guzmán Maridueña María José

TUTOR:

Ing. Vallejo Samaniego Luis, M. Sc.

Guayaquil, Ecuador

2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

CARRERA:

Ingeniería en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por María José Guzmán Maridueña, como requerimiento parcial para la obtención del Título de Ingeniera en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial.

TUTOR

Ing. Vallejo Samaniego Luis, M. Sc.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Heras Sánchez Miguel Armando, M. Sc.

Guayaquil, Marzo del año 2015



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

CARRERA:

Ingeniería en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **María José Guzmán Maridueña**

DECLARO QUE:

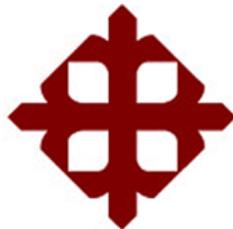
El Trabajo de Titulación “Metodología para el cálculo de un sistema de puesta a tierra para subestación de 69 Kv con diseño de norma IEEE 80-2000” previa a la obtención del Título de Ingeniera en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, Marzo del año 2015

LA AUTORA

María José Guzmán Maridueña



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

CARRERA:

Ingeniería en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

AUTORIZACIÓN

Yo, **María José Guzmán Maridueña**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “Metodología para el cálculo de un sistema de puesta a tierra para subestación de 69 Kv con diseño de norma IEEE 80-2000”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, Marzo del año 2015

LA AUTORA

María José Guzmán Maridueña



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

CARRERA:

Ingeniería en Eléctrico-Mecánica con Mención en Gestión Empresarial Industrial

CALIFICACIÓN

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haber sido uno de los pilares más importantes para desarrollar este proyecto de titulación.

A mis padres, por su apoyo y ayuda en esta etapa de mi vida. A mis hermanos, por brindarme la confianza que necesitaba para seguir adelante y no detenerme a pesar de las adversidades y cansancio. A mi novio, por su apoyo y entendimiento incondicional en este gran momento de mi vida.

A mi tutor, que supo guiarme y darme las pautas necesarias para poder hoy concluir con este proyecto.

Quiero también agradecerle a mis grandes amigos, por siempre brindarme su mano: Israel Monar, Gustavo Negrete, Rafael Terreros, Russell Ordoñez y Karen Saltos.

A todos, gracias.

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado primero a Dios, por brindarme la sabiduría que necesitaba en el momento indicado, por darme la paciencia para continuar en este largo camino.

A mis padres, mis hermanos, mi novio y mis amigos.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Tipo de investigación	2
1.5 Hipótesis.....	2
1.6 Metodología	3
PARTE I MARCO TEÓRICO.....	3
CAPÍTULO 2 ESTUDIO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA..	3
2.1 Introducción al estudio de un sistema de puesta a tierra SPT	4
2.2 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra	4
2.2.1 SPT según su naturaleza.....	4
2.2.2 SPT según su aplicación.....	5
2.3 Elementos que componen una instalación de un SPT.....	6
2.3.1 Terreno.....	6
2.3.2 Tomas de tierra.....	6

2.3.3 Conductores de tierra	6
2.3.4 Bornes de puesta a tierra	7
2.3.5 Conductores de protección.....	7
2.3.6 Conductores equipotenciales.....	8
2.4 Sistema de puesta a tierra al servicio	9
2.4.1 Sistemas puestos a tierra y sistemas aislados.....	9
2.4.1.1 Factores que influyen el aterrizar de una instalación de puesta a tierra.....	9
2.4.2 Configuraciones del neutro de puesta a tierra	10
CAPÍTULO 3 PRINCIPIOS Y MÉTODOS DE CÁLCULO QUE RIGEN LOS SPT..	12
3.1 Parámetros de diseño de los SPT	12
3.1.1 Resistividad del terreno.....	12
3.1.2 Definición.....	13
3.1.3 Factores que influyen en la resistividad del terreno.....	14
3.1.4 Características del suelo y su resistividad.....	15
3.1.5 Influencia de factores externos en la resistividad del suelo.....	16
3.2 Valores de voltajes tolerables.....	17
3.2.1 Tensión de paso.....	18
3.2.2 Tensión de contacto.....	18
3.3 Medición de la resistencia puesta a tierra y resistividad del terreno.....	19

3.3.1 Medidor digital de resistencia a tierra	19
3.3.2 Método de los cuatro puntos o electrodos	22
3.3.2.1 Modelo de Wenner	23
3.3.2.2 Modelo de Schlumberger	25
3.4 Electrodo en los SPT	26
3.4.1 Tipos de electrodos	27
3.4.1.1 Electrodo de varilla.....	28
3.4.1.2 Electrodo de placa.....	29
3.4.1.3 Mallas.....	30
3.4.1.4 Barras copperweld.....	31
3.4.2 Configuración de electrodos	32
3.4.3 Puesta a tierra con electrodos horizontales	33
3.4.4 Puesta a tierra con electrodos verticales.....	33
3.5 Conexiones exotérmicas.....	33
3.5.1 Ventajas de la soldadura exotérmica.....	34
3.5.1.1 Ventajas técnicas de la soldadura exotérmica.....	35
3.5.1.2 Ventajas económicas de la soldadura exotérmica.....	35
3.5.2 Desventajas de la conexión exotérmica	36
3.5.3 Aplicación soldadura exotérmica.....	37

CAPÍTULO 4 NORMAS TÉCNICAS PARA UN SPT	38
4.1 Regulaciones del CONELEC	38
4.1.1 Código Eléctrico Nacional ecuatoriano	39
4.2 Normas que rigen a un SPT	39
4.2.1 Normativa IEEE Std 80-2000.	40
4.2.2 Normativa IEEE Std 142 – 2007.....	42
4.3 Diseño de la malla a tierra con norma IEEE 80-2000.....	43
4.4 Área de estudio de la S/E	46
CAPÍTULO 5 CRITERIOS DE DISEÑO PARA UN SPT DE UNA S/E	48
5.1 Parámetros críticos.....	48
5.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla (I_G).....	48
5.1.2 Corriente simétrica de falla a tierra (I_F).....	49
5.1.3 Factor de decremento (D_f).....	50
5.1.4 Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s).....	51
5.1.5 Efectos de la corriente permisible en el cuerpo humano.....	52
5.2 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.....	54
5.3 Dimensión del área.....	54
5.4 Selección del tamaño del conductor.....	55
5.5 Tensiones presentes en la malla a Tierra.....	57

PARTE II APORTACIONES.....	60
CAPÍTULO 6 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE 69KV	60
6.1 Diagrama de metodología de cálculo para un SPT	60
6.2 Pasos para la metodología de cálculo.....	63
CAPÍTULO 7 MATRIZ DE CÁLCULO DEL MODELO DE PUESTA A TIERRA...	75
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
8.1 Conclusiones	83
8.2 Recomendaciones.....	84
REFERENCIAS.....	85
FIGURAS.....	88
TABLAS	90
GLOSARIO	92
ANEXOS	94

RESUMEN

Desarrollar un modelo óptimo de un sistema de puesta a tierra para una subestación es indispensable para garantizar la operatividad y buen desarrollo del mismo. Por tal motivo se ha considerado seguir una metodología de cálculo en base a una norma implementada en Ecuador; la norma americana IEEE 80-2000, es una norma de diseño en base a una sucesión de pasos que sirve como guía para la seguridad de una puesta a tierra en subestaciones. Esta guía se centra principalmente en subestaciones de corriente alterna.

La intención de este proyecto es proporcionar una orientación e información vital para la práctica de seguridad de conexiones a tierra para el diseño del área que ha sido propuesta para este estudio. Los cálculos para el desarrollo del modelo de malla de puesta a tierra son muy extensos y complejos; por este motivo se desarrolla una matriz de cálculo capaz de realizar los cálculos que propone la metodología para la malla en suelos homogéneos de una forma automatizada, segura y rápida.

ABSTRACT

Develop an optimal model of a grounding system for a substation is essential to ensure good operation and development. Therefore, it was considered to follow a methodology of calculation based on a rule implemented in Ecuador; to American standard IEEE 80-2000, is a design standard based on a sequence of steps, which serves as a guide for safe grounding in substations. This guide focuses primarily on AC substations.

The purpose of this project is to provide guidance and vital information for security practice grounding for the design of the area that has been proposed for this study. The calculations for model development mesh ground, are very extensive and complex; for this reason develop a matrix calculation capable of performing calculations proposed methodology for the mesh in homogeneous soils automated, secure and fast.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El sistema de puesta a tierra tiene como función proteger a las personas y a los equipos eléctricos, que generalmente suelen presentar inconsistencias en dicho sistema ya sea por fenómenos eléctricos transitorios, condiciones de operación o por la forma de alimentación del suministro eléctrico, para evitar o disminuir las perturbaciones que afectan a los equipos eléctricos se debe crear un sistema de puesta a tierra que brinde estabilidad, continuidad y protección al área a proteger pero no solo influye la protección al equipo como tal sino también a la vida de las personas para de esta manera evitar una desgracia o peor aún una pérdida que lamentar.

Es vital conocer los factores que hacen variar la resistencia del sistema, algunos de los factores que pueden afectar a este son el mal estudio de la resistividad del suelo, la compactación del terreno y las características físicas del electrodo de conexión a tierra; también se debe considerar que al montar un sistema de puesta a tierra se debe contar con instrumentos de alta precisión que permitan conocer el estado real del comportamiento del suelo.

Los sistemas de puesta a tierra al pasar de los años se pueden corroer causando la disminución de eficiencia de la malla de tierra, es por esto que el estudio que se va a realizar se basa en Norma IEEE 80-2000, para optimizar la operación del sistema.

1.2 Planteamiento del problema

La problemática del proyecto surge con la necesidad de elaborar una matriz de cálculo que permita realizar el diseño de una malla de puesta a tierra, de manera simplificada y eficiente que cumpla con estándares de calidad en base a normas que gocen de credibilidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar una metodología de cálculo para un sistema de puesta a tierra de una S/E de 69Kv.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer los parámetros críticos de un SPT.
- Analizar las condiciones que propone la norma IEEE Std. 80-2000.
- Elaborar una matriz de cálculo automatizada de un SPT para S/E.

1.4 Tipo de investigación

El tipo de investigación de este proyecto es de carácter documental y analítico debido a que presenta una metodología de diseño a través de una matriz de cálculo basado en la norma americana IEEE Std. 80-2000 para un sistema de puesta a tierra de una S/E.

1.5 Hipótesis

El presente trabajo tiene como finalidad desarrollar una matriz de cálculo ágil y efectiva para el usuario que tenga un conocimiento básico en materia de instalaciones y

distribución eléctrica para el diseño de una malla de puesta a tierra como protección de una S/E.

1.6 Metodología

La metodología de este proyecto se basa en etapas específicas del plan de estudio; parte de la recopilación de una base teórica, lo cual conlleva a la selección de una norma y posteriormente a la realización de un procedimiento vinculado a los sistemas de puesta a tierra para S/E. Se enfoca en la heurística como metodología científica debido a que es aplicable a la elaboración de estrategias que busquen una vía de solución a problemas que no tengan un procedimiento de un algoritmo de solución; a causa de esto, se crea una matriz de cálculo que reduzca el tiempo y minimice el cálculo del usuario que desea desarrollar un malla de puesta a tierra como protección para S/E.

PARTE I MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

2.1 Introducción al estudio de un sistema de puesta a tierra SPT

El propósito de aterrizar los sistemas eléctricos es para limitar cualquier diferencia de potencial elevado, los cuales pueden darse por descargas atmosféricas o fenómenos de contacto no intencionados con cables de voltajes más altos; también existen otros tipos de fallas que pueden presentarse dentro del sistema, como lo son los errores de alambrado. Un SPT es la combinación de conductores eléctricos dicho en otras palabras cables y electrodos que se hallan dentro del terreno y a su vez se encuentran repartidas a lo largo de toda el área de estudio para tolerar corrientes de corto circuito o descargas atmosféricas. Los SPT son de vital importancia a causa de que estos contribuyen a la protección y al desarrollo óptimo de los equipos que requieren el suministro de energía eléctrica. La Norma IEEE Std. 80-2000 permite obtener niveles seguros con respecto a las tensiones de paso y de contacto dentro del área de la S/E y a sus alrededores, la implementación de esta norma de diseño otorga el beneficio de contar con un sistema que brinde seguridad para las personas, animales y bienes que se encuentren en sus proximidades. Por lo tanto desarrollar un óptimo SPT requiere ser diseñado por personas con el conocimiento basto en ésta área. (MARCIAL, 2010) & (CURILLO C. R., 2012)

2.2 Clasificación de los sistemas de puesta a tierra

Los SPT se pueden dividir en dos categorías: según su naturaleza y según la aplicación que se le brinde.

2.2.1 SPT según su naturaleza

Esta división se enfatiza en la naturaleza de los SPT, separándola en dos grupos:

- ✓ Instalación artificial de un SPT: son aquellas instalaciones que se realizan exclusivamente para este fin, utilizando diversas clases de electrodos de puesta a tierra.
- ✓ Instalación natural de un SPT: son elementos externos al sistema que se desea aterrizar, es decir: líneas de tuberías metálicas o estructuras metálicas, vías férreas o de agua; que se puedan o no encontrar dentro de la instalación o en sus alrededores.

2.2.2 SPT según su aplicación

Se vincula con todas aquellas instalaciones que se pueden realizar según su funcionalidad y se dividen en tres ramas esenciales:

- ✓ Sistemas de puesta a tierra de protección: tiene la función de limitar el valor de tensión de oposición tierra, de ciertos elementos del sistema eléctrico que no deben ser aislados y con los cuales el personal puede estar en contacto. Por lo tanto, es vital asegurar el sistema; para que los efectos fisiológicos no dañen a los seres vivos a causa del traspaso de corriente a tierra.
- ✓ Sistemas de puesta a tierra de funcionamiento: sirven para aterrizar determinados puntos del circuito eléctrico por necesidad de funcionamiento: como los transformadores, neutro de generadores y otro tipo de maquinaria eléctrica para la conexión de la tensión contra tierra.
- ✓ Sistemas de puesta a tierra de trabajo: son de aspecto provisional efectuados para poner a tierra una parte de la instalación eléctrica; deben tener fácil acceso para

efectuar labores de mantenimiento preventivo o correctivo, como: las cuchillas de seccionadores, etc.

2.3 Elementos que componen una instalación de un SPT

Las instalaciones de un sistema de puesta a tierra están conformadas por los siguientes elementos:

2.3.1 Terreno

El terreno es aquel que tiene como función disipar las corrientes de falla o fuga y las de origen atmosférico, la resistividad del terreno está definida por la resistencia de paso entre los electrodos y el terreno. La resistencia de paso a tierra es medida en ohmios

2.3.2 Tomas de tierra

Las tomas de tierra son las encargadas de canalizar, absorber y disipar las corrientes de falla que son conducidas por las líneas principales a tierra algunos de los aspectos más importantes al momento de analizar las tomas de tierra son los materiales a utilizar, el tipo y la profundidad de éstas en la tierra debido a que estos pueden ser afectados por cambios climáticos o condicionales naturales propias del suelo las cuales pueden causar corrosión. Todos estos aspectos antes mencionados deben ser previstos para que no aumente su resistencia eléctrica por encima del valor que se va prever para el estudio. La profundidad no debe ser inferior a 0,50 m.

2.3.3 Conductores de tierra

Los conductores de tierra son aquellos que conectan el conjunto de electrodos con el punto de puesta a tierra. La conexión entre los componentes del SPT debe realizarse

con mucho cuidado para de ésta manera garantizar la buena conducción eléctrica y para así mismo evitar el daño en los conductores y electrodos.

2.3.4 Bornes de puesta a tierra

La principal función que nos brinda este elemento es formar una alianza entre la toma de tierra y el circuito del SPT. Al borne principal del SPT se conectan los siguientes conductores: de tierra, de protección, de unión equipotencial principal y los de puesta a tierra.

2.3.5 Conductores de protección

Los conductores de protección son aquellos que enlazan el conjunto de una red junto con las piezas metálicas que puedan prevalecer dentro de estas se pueden considerar las cañerías, calderas y cualquier otro elemento con las líneas de tierra. Los conductores de protección son de cobre aislado, de color amarillo o verde y su sección depende del conductor de fase, es decir cuando los conductores de protección no forman parte de la alimentación del sistema, serán de cobre con una sección mínima de:

- ✓ 2.5 mm², para conductores de protección protegidos mecánicamente.
- ✓ 4 mm², para conductores de protección sin proteger.

Cuando el conductor de protección es común a varios circuitos, la sección debe dimensionarse en función de la mayor. Como conductores de protección se pueden utilizar:

- ✓ Conductores en los cables multiconductores o también se pueden utilizar conductores aislados o desnudos.

Los conductores de protección deben estar salvaguardados contra daños mecánicos, químicos y electroquímicos, todas las conexiones deben tener fácil acceso para la verificación y para las prueba de estudio o funcionamiento a excepción de las cajas selladas con material de relleno o cajas no desmontables. (MARCIAL, 2010)

2.3.6 Conductores equipotenciales.

En un SPT, los conductores equipotenciales son aquellos que conectan eléctricamente todas las masas metálicas del área de estudio con el fin de evitar diferencias de potencial entre los elementos, el conjunto forma una red equipotencial unida a la red de tierra del área de estudio. Hay dos diferentes tipos de conductores equipotenciales para las instalaciones a tierra: el principal y el suplementario:

- ✓ El conductor principal de equipotencialidad: es aquel conductor que no debe tener una sección inferior a la mitad de la del conductor de protección de sección mayor con un mínimo de 6 mm^2 . Sin embargo su sección se puede reducir a $2,5 \text{ mm}^2$, siempre y cuando ésta sea de cobre.
- ✓ El conductor suplementario de equipotencialidad: si este conductor uniera una masa a un elemento conductor, su sección no debe ser inferior a la mitad de la del conductor de protección unido a esta masa, esta unión puede estar asegurada ya sea por conductores no desmontables, por conductores suplementarios o por una combinación de los mismos. (MARCIAL, 2010)

2.4 Sistema de puesta a tierra al servicio

En un SPT se conectara a tierra de servicio todos aquellos dispositivos esenciales que encierran la instalación, entre estos contamos con:

- a) El neutro de los transformadores, en instalaciones o sistemas con neutro aterrizado a tierra de forma directa o por medio de bobinas o resistencias.
- b) El neutro de los alternadores y cualquier dispositivo que lo requiera.
- c) Circuitos de B/T de los transformadores de medición.
- d) Limitadores, descargadores y pararrayos para erradicar sobretensiones o descargas atmosféricas.
- e) Elementos de derivación a tierra de los seccionadores de puesta a tierra.

2.4.1 Sistemas puestos a tierra y sistemas aislados.

Las instalaciones eléctricas y la maquinaria en general, indistintamente de la puesta a tierra de protección, pueden aterrizarse o no con el fin de disminuir las sobretensiones, la detección de fallas y de evitar los gradientes de potencial entre dos sistemas aislados. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

2.4.1.1 Factores que influyen el aterrizar de una instalación de puesta a tierra.

Algunos de los factores que influyen en la decisión de aterrizar o no un sistema a tierra son:

- ✓ Continuidad del servicio: en sistemas aislados la falla que provoque la pérdida de una fase no supone la apertura del circuito lo cual permite que continúe el servicio

a diferencia que en el caso de estar puesto a tierra provocaría el disparo inmediato de las protecciones que tenga el sistema y a consecuencia la pérdida de la carga.

- ✓ Faltas resistivas y arcos: detectar este tipo de fallas en sistemas aislados se torna de una manera complicada; sobre todo en los sistemas de B/T, debido a que la corriente de cortocircuito es similar a la corriente de carga.
- ✓ Detección de faltas: en todo sistema aislado se debe instalar elementos adicionales para detectar o localizar faltas a tierra.
- ✓ Sobretensiones: es común que se produzca una sobretensión en las fases por una falla en los sistemas aislados. No obstante, los aislamientos están experimentados para resistir dicho esfuerzo, su vida útil se ve comprometida, en razón de que se va a disminuir su periodo. (GONZÁLEZ, 2010)

2.4.2 Configuraciones del neutro de puesta a tierra

Existen varios mecanismos para enlazar el neutro de las maquinas a tierra, siempre y cuando estos mecanismos estén sujetos a las características de la red y a las exigencias de los consumidores, se empleará el método que quede acorde.

- ✓ Puesta a tierra rígida: este tipo de mecanismo, relaciona directamente el neutro del elemento a tierra, esto no implica que la impedancia resultante de esta configuración sea nula, a causa de que también se ven expuestas las reactancias internas cuanto más considerable sea la intensidad de falta a tierra en relación con la intensidad de falta trifásica, mayor será el grado de puesta a tierra. En los generadores, la puesta a tierra rígida permite corrientes de cortocircuito superiores

a la intensidad de falla trifásica la cual es la máxima para las que han sido proyectadas. Por este motivo es importante considerar que puede ser necesario aterrizarlos a tierra a través de una reactancia para condicionar la intensidad máxima a la de cortocircuito trifásico.

- ✓ Puesta a tierra a través de resistencias: haciendo uso de las resistencias apropiadas es posible que se consigan tensiones de fase-neutro, en el caso de fallas monofásicas similares a las que se generarían en un sistema aislado de tierra. Se pueden mermar daños por calentamiento, esfuerzos electromecánicos y la circulación de intensidades por tierra añadiendo una resistencia.
- ✓ Puesta a tierra por medio de reactancia: la utilización de este método permite que la intensidad de falta a tierra se reduzca en un máximo de 25% de la falta trifásica y preferiblemente al 60% para evitar sobretensiones peligrosas. Por este motivo no es aconsejable como alternativa el uso de puesta a tierra anterior. Las reactancias solo se pueden emplear en generadores.
- ✓ Puesta a tierra en forma resonante: es la conexión de una reactancia entre neutro y tierra con un valor relativamente alto. Este modelo es aplicado para sistemas de puesta a tierra de neutros de generadores y para puesta a tierra en transformadores de S/E. Los modelos de puesta a tierra con neutro resonante son aquellos que actúan mediante una conexión del neutro a tierra mediante el uso de una reactancia de estimación variable, conocida como bobina Petersen. El factor de inducción de la bobina es regulable, de manera que este resuene con la capacidad a tierra del sistema causando que cuando se produzca falta a tierra, la corriente de falta quede

disminuida a un valor ínfimo resistivo. Regulando el valor de la reactancia se debe conseguir un sistema resonante con la impedancia (de carácter capacitivo) de las fases sanas. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

CAPÍTULO 3

PRINCIPIOS Y MÉTODOS DE CÁLCULO QUE RIGEN LOS SPT

3.1 Parámetros de diseño de los SPT

El factor más importante dentro de este estudio es la resistividad del terreno, no los electrodos en sí debido a que su presencia depende del tipo del suelo en donde se va a realizar su instalación.

3.1.1 Resistividad del terreno

La resistividad del terreno tiene como propiedad la conducción de la corriente eléctrica por lo que se la conoce también como la resistencia específica del terreno, que para el caso de las mediciones eléctricas es necesario considerar los diferentes efectos de

las capas del suelo que componen el terreno del área de estudio, en razón de que los suelos no siempre son homogéneos en su composición.

Expresando la resistividad en función de la resistencia, se obtiene:

$$\rho = \frac{A * R}{L}$$

La resistividad es directamente proporcional a la sección y a la resistencia del conductor e inversamente proporcional a su longitud. La unidad de la resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio-metro ($\Omega \cdot m$). Para diseñar un SPT es importante saber cómo se comporta el terreno, por esto se debe analizar todas las características, la mejor manera de hacerlo es conociendo su valor de resistividad.

Es importante resaltar que el suelo constituye el medio de disipación por el cual las corrientes de falla se conducen a tierra a través de los electrodos de puesta a tierra. (FIERRO ROMERO & FLORES HINOSTROZA, 2010)

3.1.2 Definición

Los diversos estudios de medición de la resistividad del suelo son requeridos para poder llevar a cabo un adecuado y funcional SPT, por lo que para su medición es necesario clasificar los efectos de las diferentes capas que totalizan el terreno del área estudio, debido a que como se mencionó anteriormente, estos no siempre son uniformes. A causa de esta particularidad es conveniente considerar una resistividad aparente, que para el interés de este proyecto será llamada resistividad del terreno, la misma que está relacionada con la topología del terreno. Para hallar el valor de resistividad eléctrica del

suelo es aconsejable realizar tomas de mediciones con métodos y aparatos calificados para este objetivo. (MARCIAL, 2010)

3.1.3 Factores que influyen en la resistividad del terreno.

Los diferentes tipos de suelos naturalmente contienen cantidades variables de electrolitos, los mismos que contribuyen a conducir de forma eficiente la corriente eléctrica por lo que es conveniente el aumento de cantidad de agua al terreno para mejorar las propiedades conductoras; ya que, cuanta mayor humedad embeba el suelo, la resistividad será menor. No obstante, el aumento de humedad en suelos de tipo granito, arenisca y piedra caliza en la superficie, hará que su resistividad se reduzca en un factor mínimo o simplemente no cause efecto alguno.

La temperatura no es un factor que afecta mayormente a la resistividad del suelo; se considera un cambio relevante cuando la temperatura llega a niveles inferiores de 0°C, por tanto la humedad en el terreno se congela. La sal también es un factor que afecta la resistividad del suelo. Cuanto mayor sea la cantidad de sal o electrolitos que se contengan en ese suelo, la resistividad será más baja. (CURILLO, 2012)

Los aspectos imponderables que influyen claramente en la resistividad del terreno son la humedad y las sales solubles la resistividad del terreno se ve reducida aceleradamente en presencia de estos factores, por tal razón es conveniente que el terreno este conformado por elementos de diferente naturaleza, lo cual es observable en terreno con diferentes capas, bolsas, entre otras. Las áreas en las que se colocan la toma de tierra no siempre suelen ser uniformes; por tanto, pueden darse los casos en que estos puedan

o no estar formadas por elementos de la misma naturaleza además están expuestas a los cambios bruscos que pueda presentar el clima. Por este motivo es importante tomar en cuenta los aspectos climáticos del área de estudio. (CURILLO C. R., 2012)

3.1.4 Características del suelo y su resistividad

Los suelos se pueden tornar buenos, regulares o malos conductores de la corriente eléctrica dependiendo de su naturaleza, la resistividad se ve influenciada por la presencia de agua y como la resistividad del agua varía dependiendo de la temperatura a la que se someta, es razonable considerar que la resistividad del suelo varía con la temperatura. La resistividad disminuye cuando la temperatura aumenta. De igual manera la resistividad disminuye cuando las sales y la humedad del suelo aumentan.

El tipo de suelo es muy importante para la determinación del valor de resistividad, lamentablemente el valor de este no está claramente definido; pero si se pueden establecer relaciones cercanas como se muestra en la tabla 3.1: Variación de la resistividad dependiendo del tipo de suelo. (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014)

Tabla 3.1: Variación de la resistividad dependiendo del tipo de suelo.

Tipo de suelo	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Suelos vegetales húmedos	10 a 50
Arcillas, gredas y linos	20 a 60
Arenas arcillosa	80 a 200
Fangos, turbas	150 a 300
Arenas	250 a 500
Suelos pedregosos	300 a 400
Rocas	1000 a 10000

Fuente: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/9054/1/Cabrera_Tituana_Ronny_Israel_Salinas_Rojas_Emilio_Jose.pdf

3.1.5 Influencia de factores externos en la resistividad del suelo.

El cambio de resistividad que se pueda presentar en cuanto a la profundidad puede ser transformado a causa de los diferentes estados de humedad que presente el terreno; un ejemplo práctico a lo mencionado anteriormente es, luego de una etapa extensa de sequía, un temporal humedece la capa superficial del terreno dejando como consecuencia la capa inferior del terreno totalmente seca. La mayor parte de la corriente que normalmente es distribuida hacia los dispersores, influirá solamente en la capa superficial del terreno. El conjunto de sales y de humedad en el terreno afectan directamente a la resistividad. La cantidad de agua en el terreno varía dependiendo de las estaciones climáticas donde este se encuentre y la naturaleza del subsuelo. En la tabla 3.2 se puede apreciar el efecto que provoca la humedad en la resistividad del terreno.

Un incremento en la temperatura disminuye la resistividad del agua. En la tabla 3.3 se puede apreciar la influencia de este factor; podemos observar que al momento de trabajar con agua congelada el valor de la resistividad aumenta notablemente, esto se debe al valor de resistividad del hielo, y si la temperatura sigue decreciendo bajo el punto de congelación, se puede obtener valores relativamente altos de resistividad. (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014)

Tabla 3.2: *Efecto de la humedad en la resistividad del suelo.*

Contenido de humedad % por peso. Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Terreno superficial	Arcilla arenosa
0	1000000000	1000000000
2,5	250000	150000
5	165000	43000
10	53000	22000
15	21000	13000

20	12000	10000
30	10000	8000

Fuente: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/9054/1/Cabrera_Tituana_Ronny_Israel_Salinas_Rojas_Emilio_Jose.pdf

Tabla 3.3: Efecto de la temperatura en la resistividad del suelo.

Temperatura		Resistividad (Ω *cm)
$^{\circ}$ C	$^{\circ}$ F	
20	68	7200
10	50	9900
0,5	32 (agua)	13800
	32 (agua)	30000
	23	79000
-15	14	330000

Fuente: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/9054/1/Cabrera_Tituana_Ronny_Israel_Salinas_Rojas_Emilio_Jose.pdf

3.2 Valores de voltajes tolerables

La posibilidad de que el cuerpo humano este expuesto al recorrido de la corriente eléctrica constituye un riesgo cotidiano en la vida, en el sector industrial representa un riesgo que no es visible al ser humano pero está presente en la mayor parte de las actividades humanas. Su uso generalizado y la propia costumbre hacen que en muchas ocasiones nos comportemos como si esto no representara ningún peligro. Nos olvidamos que la corriente eléctrica siempre presenta un determinado riesgo. Es por esto, que las personas que desempeñan alguna labor de mantenimiento y operación de sistemas eléctricos, tienen como percance común el toque accidental de partes metálicas energizadas.

En una S/E durante una condición de falla producto de una descarga atmosférica, fluyen valores altos de corriente a través de la conexión a tierra lo cual origina el desarrollo de tensiones de paso y contacto. (BUSTAMANTE CUENCA, 2011)

3.2.1 Tensión de paso

Según la normativa de la IEEE 80-2000. “La tensión de paso (figura 3.1), es la variación del potencial en la superficie de la tierra que experimenta una persona a un metro de longitud con el pie, sin estar en contacto con algún elemento que se encuentre aterrizado”. (BUSTAMANTE CUENCA, 2011)

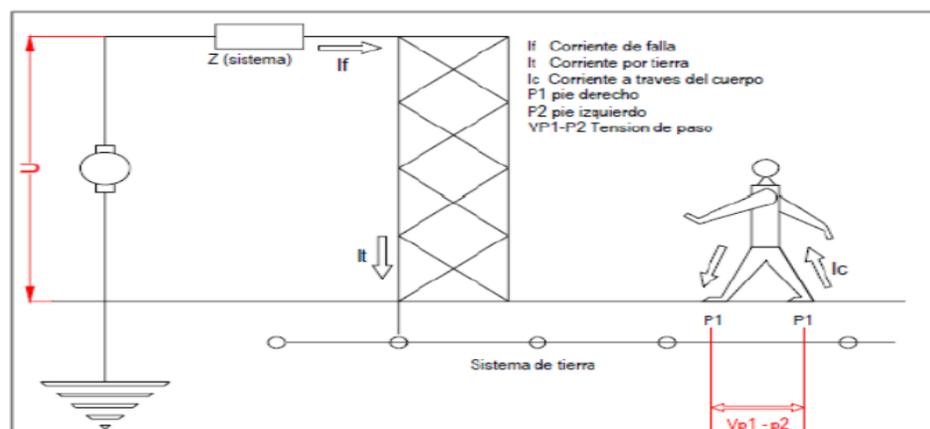


Figura 3.1 Tensión de paso

Fuente: <http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1102/16/UPS-CT002093.pdf>

3.2.2 Tensión de contacto

La norma IEEE Std. 80-2000 define a la tensión de toque o de contacto como: “La tensión de contacto representada en la figura 3.2, es la variación del potencial entre el incremento de potencial de la tierra y el potencial en la superficie terrestre en un punto donde un individuo se encuentre de pie y al mismo tiempo hace contacto con la mano en una estructura aterrizada” (BUSTAMANTE CUENCA, 2011) & (MARCIAL, 2010)

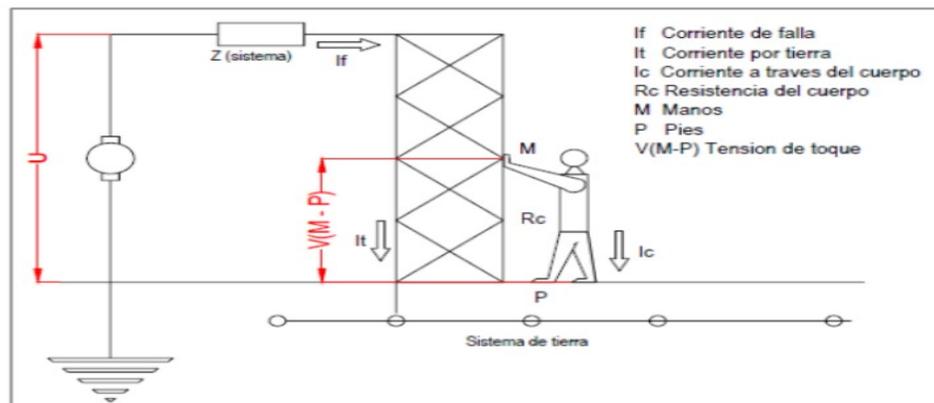


Figura 3.2 Tensión de toque o de contacto

Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1102/16/UPS-CT002093.pdf>

3.3 Medición de la resistencia puesta a tierra y resistividad del terreno

La resistencia de puesta a tierra de una instalación debe de ser medida antes de realizar cualquier tipo de estudio, de este factor depende el buen diseño y funcionamiento de la protección. Existe una gama amplia de métodos para calcular la resistividad del terreno, dentro de los cuales hacemos mención del método de Wenner y Schlumberger.

3.3.1 Medidor digital de resistencia a tierra

El medidor de resistencia a tierra emplea dos métodos de medida, que difieren en el número de electrodos que se utilizan siendo el más empleado el método de cuatro puntos, por la exactitud que brinda en la mayoría de aplicaciones. Además de este, podemos encontrar varios equipos de medición digital, que usan los diversos modelos existentes para medir la resistencia a tierra. Este medidor digital también conocido como Telurómetro, tiene como función hacer circular una corriente alterna conocida, a una frecuencia mayor a 60Hz; midiendo a través de los dos electrodos la caída de tensión, de tal forma que el cociente entre la tensión medida y la corriente que se hace circular por el

circuito, nos dé como resultado el valor de la resistencia de puesta a tierra. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)



Figura 3.3 *Telurómetro*

Fuente: http://www.megabras.com.br/pdf/TM-25m/TM-25m_E10041501.pdf

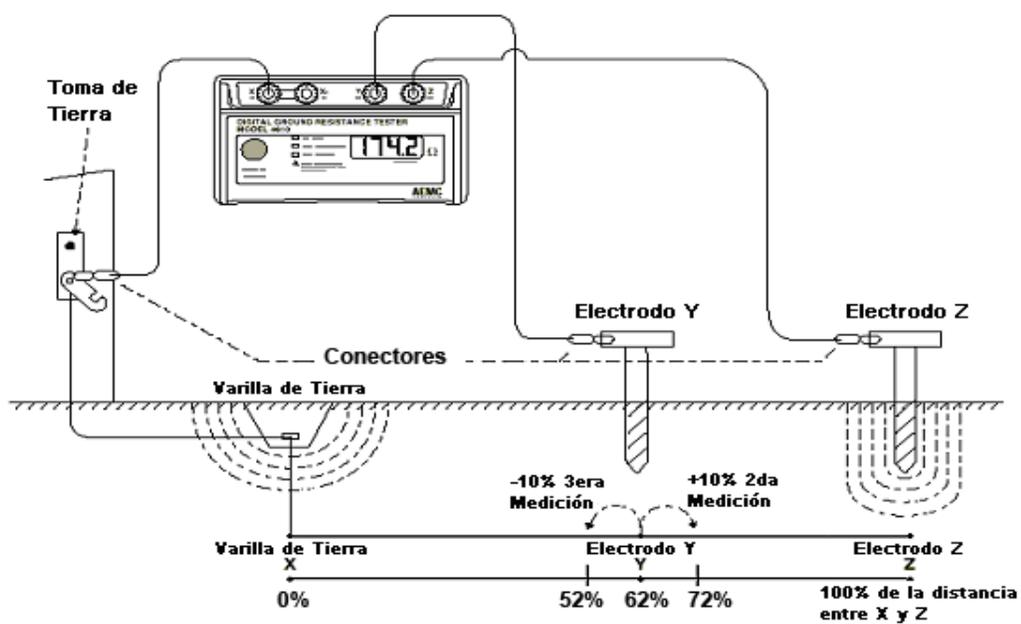


Figura 3.4 *Conexiones del medidor digital de resistencia a tierra.*

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/884/1/T-ESPE-014318.pdf>

Este dispositivo que se muestra en la figura 3.5 cuenta con un generador de corriente alterna (M) cuya corriente circula por el lado primario del transformador de relación 1:1 y por la resistencia (R); este equipo precisa la utilización de dos electrodos fijados en el terreno, como puntos de tierra auxiliares (R_1 Y R_2), además de la toma de tierra que se quiere encontrar (R_t). (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

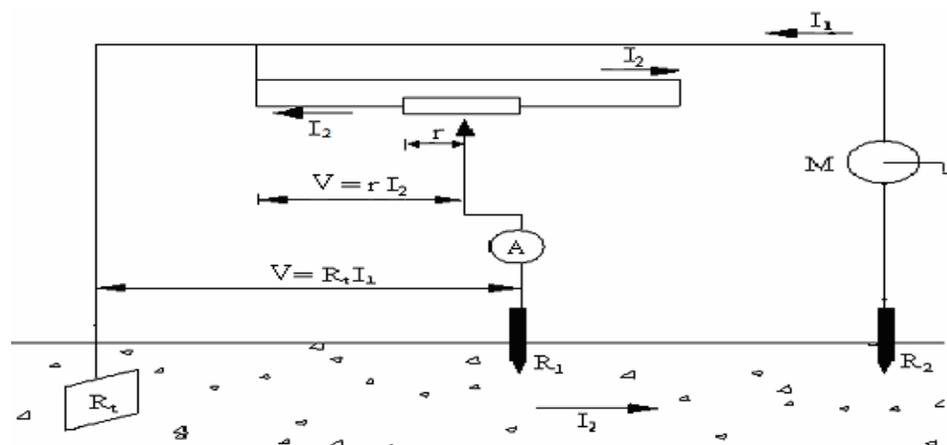


Figura 3.5 Funcionamiento del telurómetro

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/884/1/T-ESPE-014318.pdf>

Girando la manivela del generador (M) y calibrando al mismo tiempo el potenciómetro, de manera que por el galvanómetro (A) no indique paso alguno de corriente, la caída de tensión será igual a $V = r I_2$ y $V = R_t I_1$, cabe recalcar que, las intensidades se consideran iguales, es decir $I_1 = I_2$ obteniendo así:

$$r I_2 = R_t I_1 \ ; \ r I_2 = R_t I_2$$

$$r = R_t$$

La interpretación de la ecuación nos da como resultado que el valor de la resistencia que señale como resultado el potenciómetro será equivalente a la resistencia de la toma de tierra. Estas tres tomas de tierra deberán estar separadas a 10m, para eludir el dominio del campo magnético que se genera en cada toma. También es importante recalcar que se debe utilizar frecuencias diferentes (50 o 60 Hz), para evitar posibles interferencias de otras corrientes que no conciernen a las del telurómetro. En la mayoría de aplicaciones, las frecuencias que utilizan estos aparatos digitales se tornan elevadas, con valores que oscilan entre 500 y 1.200 Hz. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

3.3.2 Método de los cuatro puntos o electrodos

El método consiste en inyectar corriente a través de los electrodos externos y medir la caída de tensión entre los electrodos internos, tal como se puede apreciar en la figura 3.6. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

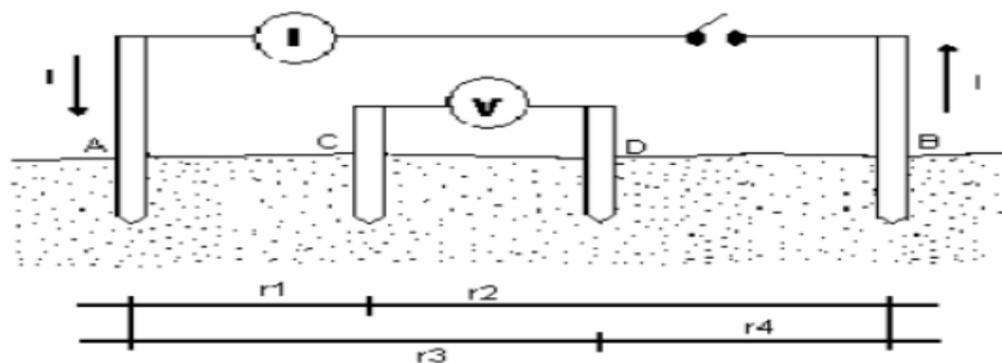


Figura 3.6 Método de cuatro puntos

Fuente: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2835/1/01TESISIE010M56.pdf>

Como se observa en la figura 3.6, en los electrodos A y B circula una corriente I , y entre C y D se mide la diferencia de potencial que existe entre estos electrodos.

Si la separación a la que se encuentran enterrados los electrodos es pequeña en relación a la distancia entre ellos, se puede asumir una distribución radial de corriente y electrodos puntuales, además si se asume la homogeneidad del terreno, se puede obtener que la resistividad sea igual a:

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

Nota: para casos de terrenos no homogéneos, el valor de ρ es irreal y no corresponde a ninguna de las resistividades presentes del terreno. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

3.3.2.1 Modelo de Wenner

La resistividad del terreno comúnmente suele medirse bajo el sistema del método de cuatro electrodos, experimentado por el Dr. Frank Wenner en 1915. Este método es uno de los más confiables en la práctica de este estudio, es decir para medir la resistividad promedio de volúmenes extensos en terrenos habituales. Entre las características tenemos la fijación en el terreno cuatro electrodos pequeños en línea recta, separados a una distancia “a” entre ellos y a una profundidad “b” que está comprendida entre “a” y $\frac{3a}{4}$ como se puede observar en la figura 3.7; se hace circular una corriente de medición “I” que recorre el terreno a través de los dos electrodos externos y simultáneamente se mide la caída de tensión “V” a través del uso de un voltímetro entre los dos electrodos interiores. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

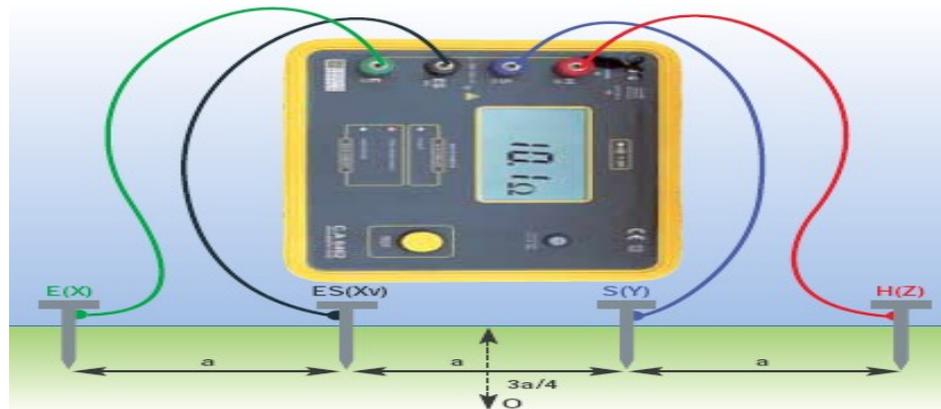


Figura 3.7 Conexión del equipo para medición de resistividad del suelo.

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/884/1/T-ESPE-014318.pdf>

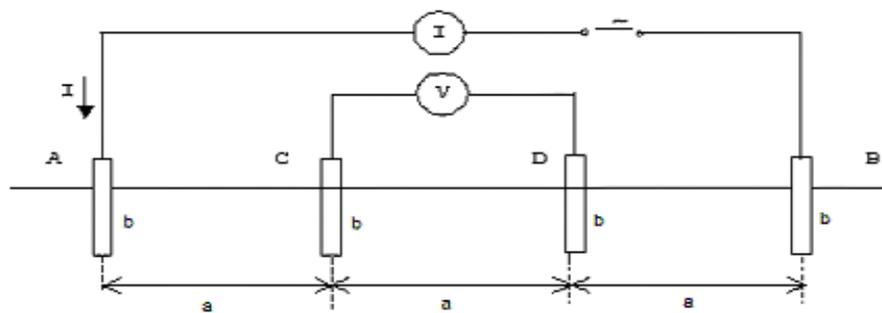


Figura 3.8 Representación del método Wenner

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/884/1/T-ESPE-014318.pdf>

La teoría en unión a la práctica, muestra que la resistividad promedio del terreno

“ ρ ” a una profundidad “ $b = \frac{1}{20a}$ ” equivale aproximadamente a:

$$\rho = 2\pi a R$$

Dónde:

ρ = resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

R = resistencia del electrodo (Ω)

a= distancia (m) entre electrodos

3.3.2.2 Modelo de Schlumberger

El modelo Schlumberger muestra una configuración similar al modelo de Wenner; los electrodos se ubican en la misma posición en línea recta, a diferencia del modelo anterior, este modelo se aplica a un centro de medición elegido. Los electrodos de potencial permanecen fijos, a una distancia de 1 a 3 metros, trasladándose solo los electrodos internos. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

El valor de la resistividad es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$\rho = \pi * c * (c + d) * \left(\frac{R}{d}\right)$$

Donde $c \gg d$

Si se grafican los valores de resistividad obtenidos para los diferentes espaciamientos “c”, se puede conocer cuáles son las características del terreno en estudio. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

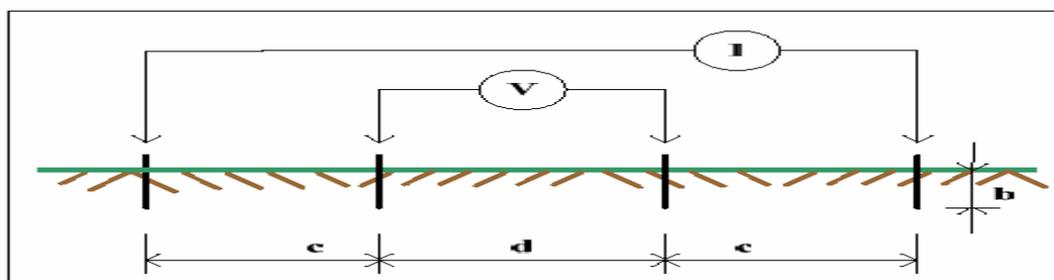


Figura 3.9 Modelo Schlumberger

Fuente: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2835/1/01-TEISISIE010M56.pdf>

3.4 Electrodo en los SPT

La puesta a tierra de un electrodo o de una barra se mide por la resistencia que presente el suelo que está alrededor de este, el mismo que puede estar rodeado por varias capas concéntricas de tierra o suelo, todas de igual espesor. Las capas cercanas a esta barra al tener menor superficie aumentan su resistencia y recíprocamente. La distancia donde se sitúa el área de resistencia efectiva depende directamente del nivel de profundidad que se encuentre fijado el electrodo. El electrodo de puesta a tierra debe ser de cobre debido a su alta resistencia contra la corrosión. En la actualidad, dentro del mercado existen barras electroquímicas que cumplen la función de un electrodo; la única desventaja que presentan estas barras es que deben ser recargadas periódicamente (aproximadamente una vez al año). Se puede mejorar la geometría y capacidad de dispersión haciendo uso de un relleno neutro de baja resistividad (ρr) de modo que su radio (r) pueda ampliarse al máximo ($r \rightarrow R$). (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

Donde:

ρr : Resistividad el relleno neutro

r : radio del electrodo

R : radio de dispersión

La resistencia de la barra está representada de la siguiente manera:

$$R = \rho * \frac{D}{A}$$

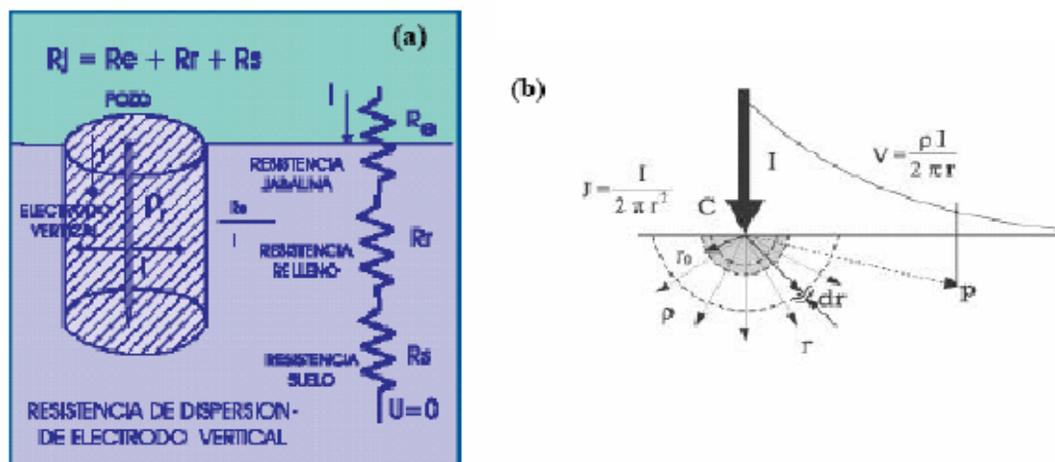


Figura 3.10 (a) Resistencia de dispersión de un electrodo vertical. (b) Dispersión de una corriente por electrodo.

Fuente: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2835/1/01-TESESIE010M56.pdf>

La figura 3.10 (a), muestra que la resistencia de dispersión del electrodo está compuesta por la resistencia propia del electrodo, la resistencia eléctrica del suelo y la resistencia del tipo de relleno; la cual se consigue añadiendo suplementos químicos en torno al electrodo, lo cual nos da como beneficio la mejora de su conductividad eléctrica. La figura 3.10 (b), ilustra como se disipa la corriente del electrodo de forma radial dentro del terreno. (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

3.4.1 Tipos de electrodos

El electrodo de tierra es uno de los elementos más importantes del sistema de puesta a tierra; cuando el electrodo está en contacto directo con el suelo, este proporciona un medio para disipar cualquier tipo de corrientes de falla a tierra. Los electrodos para puesta a tierra deben cumplir las características propias, tanto como propiedades eléctricas y mecánicas apropiadas para actuar satisfactoriamente a las fallas que se puedan presentar.

El material más implementado es el cobre, los electrodos pueden adoptar varias formas dentro de estas se pueden mencionar barras verticales, placas, conductores horizontales y una combinación entre conductores horizontales y barras verticales, también llamada mallas de tierra. (TIUQUINGA, 2010)

3.4.1.1 Electrodo de varilla

Los electrodos de varilla son aplicables a suelo regulares mediante percusión, hasta que estos alcancen una profundidad apropiada, y para el caso de terrenos rocosos los electrodos de varilla no deben ser enterrados de esta manera; por lo que de realizarse así se corre el riesgo de que se doblen o solamente no pueden ser fijados dentro del área. Si se halla una roca a menos de 1.80 m, estos electrodos pueden fijarse formando una diagonal con un ángulo aproximado de hasta 45° con relación a la vertical, como se muestra en la figura 3.11. La resistencia de contacto de una varilla está representada por la ecuación de Dwight:

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

Donde:

ρ : Resistividad del terreno en ($\Omega * m$)

L: longitud de la varilla (m)

r: radio de la varilla (m)

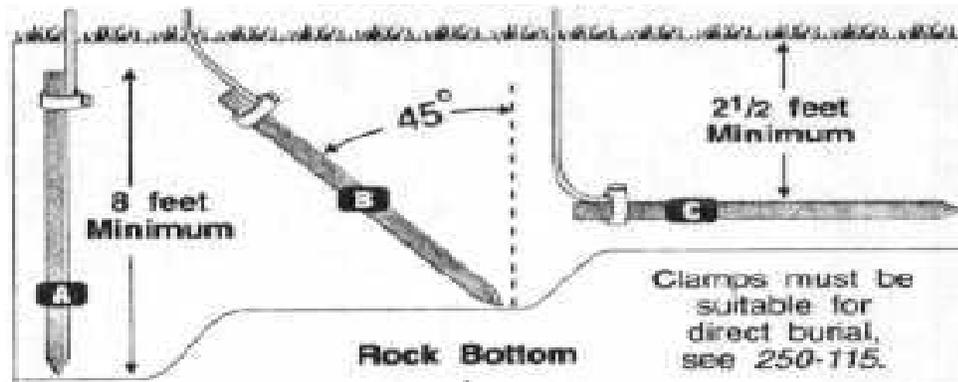


Figura 3.11 Electrodo de pica

Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/618/1/38T00232.pdf>

3.4.1.2 Electrodo de placa

El electrodo de placa no deber tener una distancia inferior a 0.2 m^2 de superficie en contacto con el suelo, y sus placas de acero o hierro deben ser fabricadas con un mínimo de 6.4 mm de espesor, si no son de hierro, deberán tener por lo menos 1.52 mm de espesor. Para hacer uso de una placa como electrodo, debe considerarse una ubicación óptima, la cual corresponde a una forma vertical, instalándose aproximadamente a 2.0 m de profundidad. (TIUQUINGA, 2010)

Se recomienda que en los terrenos vegetales su posición óptima vertical debe ser de 1 a 1.5 m de profundidad. La resistencia de tierra es:

$$R_T = 0,8 \left(\frac{\rho_T}{P} \right)$$

Donde:

R_T → Resistencia de tierra

$\rho_T \rightarrow$ Resistencia del terreno ($\Omega * m$)

P \rightarrow Perímetro de la placa (m)

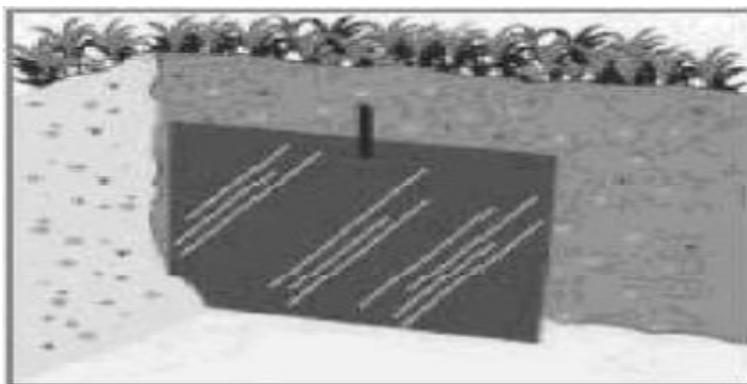


Figura 3.12 *Electrodo de placa vertical.*

Fuente: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/618/1/38T00232.pdf>

3.4.1.3 Mallas

La malla se la realiza en base a una construcción de red de conductores de cobre desnudo y esta puede ser mejorada con la implementación de algunos electrodos; es muy utilizada en S/E y centrales eléctricas debido a que reduce el nivel de descargas. La malla está compuesta por una red de conductores enterrados a una profundidad promedio en un rango de 0,50 a 1,0 m, situados en forma paralela y perpendicularmente, con una dimensión adecuada a la resistividad del terreno y predominando que la malla forme retículas cuadradas. El conductor que se distribuye a lo largo del perímetro exterior de la malla debe ser continuo, de tal forma que integre por completo el área donde se encuentre el equipo eléctrico de la S/E. Gracias a esta consideración, se evitan altas congregaciones de corriente y gradientes de potencial dentro del área y sus proximidades. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

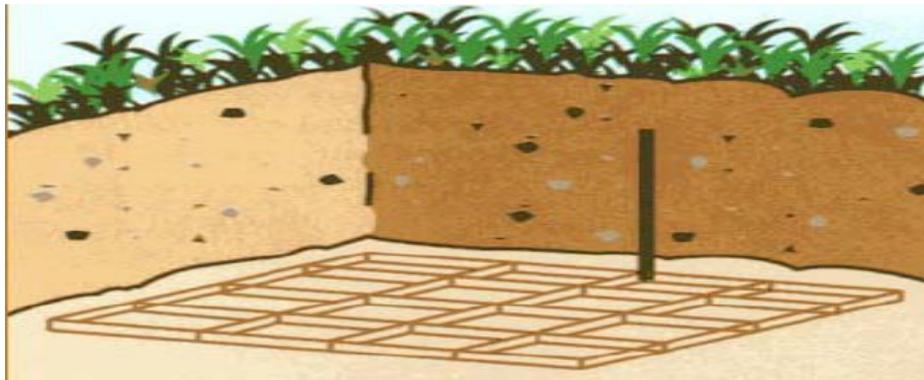


Figura 3.13 *Conexión de una malla*

Fuente: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/884/1/T-ESPE-014318.pdf>

El cruce que se da en los conductores de malla debe ser empalmado sólidamente con soldadura exotérmica entre sí y en puntos críticos; es decir, donde se van a conectar aquellos equipos que puedan presentar posibles fallas o también puede realizarse en las esquinas de la malla. Los conductores deben estar conectados a los electrodos de varilla o tubos con una distancia mínima de 2,4 metros fijados verticalmente. Los conectores empleados para mallas de los sistemas de tierra de una S/E deben ser de tipo de compresión o soldables, actualmente se usa soldadura exotérmica. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

3.4.1.4 Barras copperweld

La varilla copperweld es una de las más implementadas a causa de que es uno de los electrodos más económicos dentro del mercado. Este tipo de electrodo está compuesto por acero y recubierto por una capa de cobre con una longitud de 2,44 metros y diámetro de 5/8”.

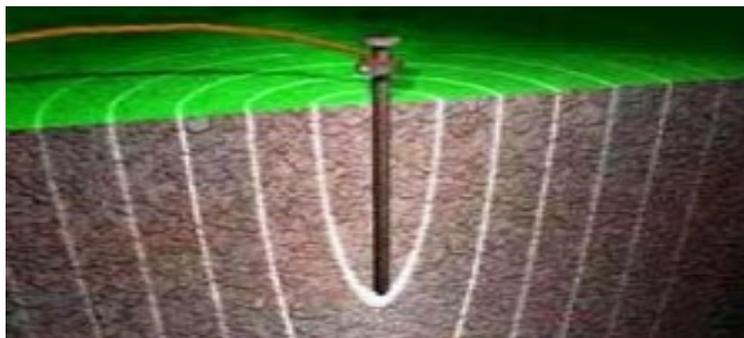


Figura 3.14 *Barra Copperweld*

Fuente: http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/04%20CAP%203%20GEDIWELD%202007.pdf

3.4.2 Configuración de electrodos

El objetivo de la barra copperweld, es permanecer en contacto con las capas húmedas de la tierra, para conseguirlo se recomienda instalar la barra en forma vertical, fijada como mínimo a 2.4 metros (figura 3.15), cumpliendo esta condición, se obtiene un valor bajo de resistencia; si no se logra el objetivo con una barra, pueden colocarse más barras conectadas a través de un conductor de cobre desnudo en diferentes configuraciones dejando un espacio igual a la longitud del electrodo. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

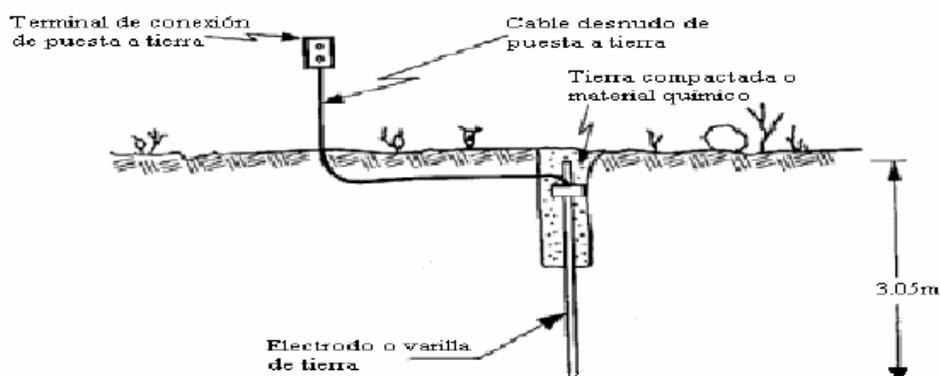


Figura 3.15 *Instalación de Varilla Copperweld*

Fuente: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2835/1/01-TESESIE010M56.pdf>

3.4.3 Puesta a tierra con electrodos horizontales

El presente tipo de puesta a tierra no es muy útil dentro de este campo, únicamente es implementado cuando el subsuelo o segundo estrato es rocoso; se ejecuta empleando un electrodo simple de cobre fijándose en forma paralela a la superficie del suelo a un valor de profundidad determinado. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

3.4.4 Puesta a tierra con electrodos verticales

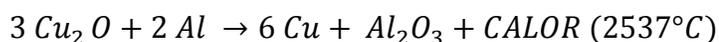
La puesta a tierra con electrodos verticales es una de las más empleadas debido a que necesitan un espacio mínimo para ser instaladas, se emplea una varilla de cobre fijado perpendicularmente a la superficie del suelo a una profundidad determinada para alcanzar un valor óptimo de resistencia de dispersión. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

3.5 Conexiones exotérmicas

Los conectores sirven para conectar los electrodos entre si, hay conectores mecánicos llamados Tipo AB que dependen de un perno para la sujeción de los componentes y los Exotérmicos que unen los elementos mediante soldadura. El tipo de conector más recomendable según el punto de vista de aplicación es la soldadura exotérmica puesto que es permanente pero esta requiere de un equipo especial para su instalación lo cual hace que los conectores AB o fijadores mecánicos sean los elegidos para un sistema residenciales pero hay que volver a hacer hincapié en el tema de la corrosión siendo el perno del conector y los puntos de contacto con metales disímiles las partes más vulnerables

El principal problema de los sistemas de puesta a tierra es el incremento de la resistencia de contacto por causa de empalmes malogrados que se dan entre conductores; las conexiones eléctricas mediante la utilización de soldadura exotérmica, se da mediante un proceso en el cual se hace un empalme eléctrico al verter una aleación muy abrasadora de cobre fundido en el interior de un perímetro; en el cual se encuentran alojados los conductores que se desean empalmar. Esta aleación de cobre fundido, contenida y controlada dentro de un molde de grafito diseñado especialmente para este proceso, permite que los conductores se fundan. Una vez enfriados, los conductores han sido empalmados mediante soldadura de fusión.

El metal fundido se crea a causa de una reacción química entre el aluminio y óxido de cobre. Este proceso hace provecho de partículas de aluminio finalmente divididas a medida que el agente reductor junto con el óxido de cobre, produce la siguiente reacción:



Esta reacción química produce una desmesurada cantidad de calor, por naturaleza los metales fundidos generalmente alcanzan temperaturas aproximadas de $2200^{\circ}C$. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

3.5.1 Ventajas de la soldadura exotérmica

Cuando se realizan conexiones eléctricas mediante soldadura exotérmica y son efectuadas debidamente, éstas presentarán propiedades eléctricas muy semejantes a las conexiones soldadas. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

Debido a que este proceso es una soldadura molecular cuyo material utilizado tiene igual punto de fusión del cobre y cuando la soldadura está terminada, su sección transversal es el doble que la de los conductores que están siendo empalmados, nos ofrece grandes ventajas técnicas como también económicas. Entre estas podemos mencionar las siguientes:

3.5.1.1 Ventajas técnicas de la soldadura exotérmica

1. Las conexiones exotérmicas tienen el beneficio de poder conducir la corriente eléctrica de manera que sea, mayor o igual a los conductores que la integran.
2. La conexión no se puede aflojar o desajustar debido a que es una unión molecular permanente.
3. La soldadura exotérmica puede emplearse para el empalme de aleaciones de cobre, materiales de cobre, acero revestido con cobre, acero de diferentes aleaciones incluyendo el inoxidable entre otros.
4. No necesita hacer uso de una fuente de energía externa o generación de calor para fraguar la conexión. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

3.5.1.2 Ventajas económicas de la soldadura exotérmica

1. Brindan mayor seguridad por consiguiente menos supervisión de la misma.
2. La calidad del estado de las conexiones pueden hacerse en base a una inspección visual, sin recurrir al uso de algún instrumento.
3. La utilización del molde de grafito permite la realización de más de cincuenta conexiones.

4. El material que se emplea para la realización de la conexión tiene una durabilidad igual o mayor a los materiales conectados. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

3.5.2 Desventajas de la conexión exotérmica

La mayor de las desventajas que presenta el uso de este tipo de conexión, es el costo. El costo que presenta realizar esta conexión exotérmica es mayor a otros medios de conexión similares debido a lo extenso que se puede presentar el proceso, a los requerimientos de moldes y a la suspensión ocasionada por los inciertos cambios del clima; es decir por las condiciones de humedad en el área de trabajo. Entre las desventajas que nos presenta este tipo de conexión podemos mencionar las siguientes:

1. Los cambios climáticos incurren directamente en la elaboración de la obra y pueden posponer el trabajo durante varios días.
2. El calor desmesurado que se genera durante la reacción requiere de supervisión debido a los riesgos inherentes de seguridad hacia el personal que se encuentra en el área.
3. Los materiales deben ser almacenados en lugares donde permanezcan secos, es decir donde no penetre la humedad del clima; ya que estos están sujetos a daños por calor y humedad.
4. El calor intenso generado durante el proceso del empalme puede dañar el aislamiento del conductor cuando este está presente. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

3.5.3 Aplicación soldadura exotérmica

La soldadura exotérmica tiene una amplia gama de usos y aplicaciones, tanto en el campo de la electricidad como también en otras actividades. Dentro del campo eléctrico su fundamental empleo, está en la interconexión de conductores. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

Entre las conexiones más importantes podemos mencionar:

- ✓ Cable a cable
- ✓ Cable a barras rectangulares de cobre y aluminio
- ✓ Cable a barra copperweld para puesta a tierra
- ✓ Barra copperweld a barra copperweld
- ✓ Barra a barra rectangular de cobre y aluminio
- ✓ Conexiones mediante soldadura exotérmica para la utilización de conexiones subterráneas aisladas de alto voltaje
- ✓ Para rellenos de piezas metálicas. (GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A., 2007)

CAPÍTULO 4

NORMAS TÉCNICAS PARA UN SPT

4.1 Regulaciones del CONELEC

La Ley de Régimen del Sector Eléctrico (LRSE), en el Capítulo I, Art. 1, establece: "El Estado, por intermedio del Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) podrá delegar a la iniciativa privada la generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, mediante el otorgamiento de concesiones, licencia, autorizaciones y permisos, y en los términos que señalan la Ley de Régimen del Sector Eléctrico y la Ley de Modernización del Estado, Privatizaciones y Prestación del Servicio Público por parte de la Iniciativa Privada.", es decir que la obligación del estado es satisfacer las necesidades de energía eléctrica del país. En el Capítulo II, Art 5, literal a, señala que el servicio de energía debe cumplir con requerimientos de calidad y, en el Art. 7, puntualiza que el Estado es el encargado de garantizar la continuidad del servicio de energía eléctrica. En cumplimiento con las atribuciones concedidas por la LRSE, el CONELEC ha dictado varias resoluciones dirigidas a la regulación, planificación y control de los servicios públicos del suministro de energía eléctrica. En la regulación del CONELEC 008/12, cláusula decima primera, de los derechos y responsabilidades del consumidor, se establece que el consumidor deberá responsabilizarse de que las instalaciones eléctricas interiores, incluido el sistema de puesta a tierra estén en óptimas condiciones para recibir el servicio de electricidad. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

4.1.1 Código Eléctrico Nacional ecuatoriano

El NEC (Código Eléctrico Nacional ecuatoriano) adoptado por el INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), en su Artículo 250 describe los requisitos generales para el SPT y sus sistemas eléctricos. Este artículo señala las formalidades generales para la puesta a tierra y sus conexiones en las instalaciones eléctricas. Este código está elaborado para que sea empleado por instituciones que tengan jurisdicción legal sobre las instalaciones eléctricas y posteriormente para que pueda ser aplicado por personal acreditado. El agente que tenga la autoridad para hacer cumplir la jurisdicción sobre la ejecución de este código, debe ser gestor de interpretación de las reglas; de tener capacidad para la aprobación de los equipos y materiales; además de otorgar permisos especiales que consideran algunas de estas reglas. El agente con jurisdicción puede pasar por alto algunos requisitos del código o permitir que se realicen tácticas alternativas, cuando esté seguro de que se pueden lograr objetivos iguales, creando y manteniendo una seguridad efectiva. Este código puede pretender el uso de nuevos productos, construcciones o materiales que quizás no se encuentren disponibles en el momento de ejecución del mismo. En tal caso, el agente puede autorizar el uso de productos, construcciones o materiales que cumplan con los objetivos de garantizar seguridad. (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014) & (INEN)

4.2 Normas que rigen a un SPT

Los estándares internacionales son basados, probados y experimentados en teorías científicamente y con técnicos de todo el mundo, teniendo en consideración la experiencia internacional que tienen dentro de este campo.

Estos estándares muestran los requisitos mínimos para establecer el diseño e instalación de protección de los SPT, entre otros. Para realizar la evaluación en lo que concierne a las condiciones en las que se encuentra el SPT, es necesario hacer mención en la teoría de referencia de las normativas y reglamentos actualizados, que estén probados y rijan procedimientos adoptados en todo el mundo. Es por esto, que se ha precisado las siguientes publicaciones:

- ✓ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- ✓ Normas IEC (International Electrotechnical Commission)
- ✓ Código Eléctrico Nacional (Ecuatoriano) NEC.

4.2.1 Normativa IEEE Std 80-2000.

La norma IEEE Std 80-2000, está enfocada en el diseño de mallas de puesta tierra para S/E o lugares donde se requieran complejos sistemas de puesta a tierra; en el caso de este, el estudio de un sistema de puesta a tierra para S/E; la explicación detallada sobre las mediciones de resistividad del terreno así como el moldeamiento de las mediciones son base importante para cualquier diseño de puesta a tierra indistintamente cual sea su complejidad. Se establecen dos principios para el diseño del SPT, los cuales se establecen bajo condiciones normales y de falla. La norma IEEE Std. 80-2000 es una guía que detalla los aspectos técnicos más relevante para el aterrizaje en S/E y sistemas eléctricos. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006) & (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014)

Incluye formulaciones vitales para la realización de cálculos referentes a los SPT. El objetivo de esta norma es brindar pautas para desarrollar un SPT óptimo y confiable para el diseño de la S/E. (BUSTAMANTE CUENCA, 2011)

Los principios elementales de esta norma son:

- a) Determinar como fundamento para el diseño, límites seguros de las variaciones del potencial que puedan hallarse dentro de la S/E en condiciones de falla; entre los puntos que el ser humano se puede hallar en contacto.
- b) Mostrar una metodología de diseño para sistemas prácticos de aterrizaje basados en los criterios propios de la norma. (BUSTAMANTE CUENCA, 2011)

Los objetivos para realizar el diseño de la puesta a tierra son:

- ✓ Proporcionar un medio de disipación para corrientes eléctricas a tierra sin exceder los valores nominales de los equipo.
- ✓ Asegurar que una persona cerca de una instalación eléctrica no se exponga al peligro de un choque eléctrico.
- ✓ Establecer límites de seguridad bajo condiciones de falla en la subestación eléctrica.

Bajo el criterio de ésta norma se abordan cálculos de parámetros críticos; dentro de los cuales podemos mencionar:

- ✓ Máxima corriente de malla
- ✓ Tiempo de despeje de falla

- ✓ Geometría de la malla
- ✓ Resistividad del suelo
- ✓ Resistividad de la capa superficial

Dentro de los parámetros que deben ser considerados para el diseño según la norma son:

- a) La condición geométrica, el diseño de la malla que se requiera debe ser cuadrado, rectangular o en forma de L.
- b) Capa superficial, este componente sirve de garantía para la seguridad de las personas; se puede dejar una capa de caucho o de gravilla. En caso de S/E interiores con piso de concreto, con el fin de cumplir con los límites de tensiones de seguridad, una vez instalados los equipos, se debe tener en consideración que sea de alta resistividad, mayor a $3000 \Omega * m$ y baja sensibilidad a los cambios de humedad a los que puede estar expuesto. También se recomienda tener en cuenta que el espesor de la capa puede variar entre 10 y 20 cm.
- c) Conducto, se acostumbra a utilizar como mínimo el calibre 2/0 AWG de cobre de siete hilos; para mejorar la rigidez mecánica de malla y la protección contra el agente corrosivo. (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014)

4.2.2 Normativa IEEE Std 142 – 2007.

La norma IEEE Std. 142-2007 es una recomendación práctica para el aterrizamiento de sistemas de potencial industrial y comercial, esta norma discute los puntos favorables y desfavorables de un SPT frente a los sistemas sin conexión a tierra, se proporciona información sobre como aterrizar diferentes sistemas y equipos eléctricos,

tales como: motores, interruptores, transformadores, cables, conducto, entre otros. Describe los fundamentos de la interconexión o sistemas de conexión a tierra entre los aparatos eléctricos y las varillas de tierra. Se tratan problemas de electricidad estática; la forma en que se genera, los procesos y causas que lo producen, como se mide y que se debe hacer para prevenir su generación o para drenar las cargas estáticas a tierra. La conexión a tierra o el sistema de electrodos, tiene que tener una resistencia lo suficientemente baja para permitir la operación rápida de los dispositivos de protección del circuito en caso de una falla a tierra, para proveer la seguridad necesaria de choque para el personal, conductores, equipos o de los propios electrodos y para limitar las sobretensiones transitorias. (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014)

El sistema con una resistencia de tierra menor a 1ohmio puede obtenerse usando un número de electrodos individuales conectados entre sí. Una resistencia tan baja solo podrá ser requerida para grandes subestaciones, líneas de transmisión o estaciones de generación. Las resistencias del rango de 1-5ohmios son convenientes generalmente para edificio, plantas industriales e instalaciones comerciales. (CABRERA TITUANA & SALINAS ROJAS, 2014)

4.3 Diseño de la malla a tierra con norma IEEE 80-2000

La norma IEEE Std. 80 -2000 es una guía para el diseño de mallas de puesta a tierra en alta tensión. De esta guía se han tomado los criterios de seguridad, diseño y evaluación que garanticen un óptimo sistema de puesta a tierra. Los criterios de seguridad usados tienen que ver principalmente con el cálculo del máximo voltaje de toque y de paso

tolerable al ser humano. De los criterios de diseño de una malla de puesta a tierra se toma la selección del modelo de suelo y los criterios del diseño geométrico de la malla. La norma IEEE Std. 80 establece una metodología de cálculo, mediante el trabajo a través de una sucesión de pasos y controles del diseño. (MOGOLLÓN ESCOBAR, 2006)

Los pasos que propone la norma IEEE Std. 80-2000 son los siguientes:

Paso 1 - Datos del área de estudio, y características físicas que conforman el terreno.

Paso 2 - Dimensión del conductor que se usará para la red de tierra, a partir de datos preliminares de corriente de falla y duración de la falla, necesarios para el cálculo.

Paso 3 – Valores permisibles de tensiones de paso y de contacto. Las tensiones límites peligrosas definidas por la IEEE Std. 80–2000 se dan para distintos pesos: 50 y 70 kg.

Paso 4 - Diseño Básico.

Paso 5 - Resistencia de la malla de tierra.

Paso 6 –Corriente máxima de la malla.

Paso 7 – Potencial máximo de la malla.

Paso 8 – Tensiones de paso y contacto reales.

Paso 9 y 10 – Acciones de Seguridad.

Paso 11 – Mejoras del sistemas.

Paso 12 - Aterrizaje de los equipos.

El diseño de la norma IEEE Std. 80-2000 presenta algunas cláusulas, como principales consideraciones del diseño los aspectos básicos del diseño de la malla.

- a) El conductor correspondiente a la malla de puesta a tierra, debe rodear el perímetro para encerrar gran cantidad de área como sea práctico.
- b) Dentro de la malla, los conductores se extienden en líneas paralelas a lo largo de la estructura o fila de equipos para proporcionar conexiones cortas a tierra.
- c) Una malla de puesta a tierra para una S/E puede incluir conductores de cobre desnudo #4/0 AWG, enterrados 0,3m a 0,5m, debajo de nivel del suelo; con un espaciamiento de 3m a 15m de distancia. En conexiones de cruces, los conductores deben estar empalmados. Las varillas o electrodos de tierra pueden estar en las esquinas de la malla y en los puntos de unión a lo largo del área de estudio.
(BUSTAMANTE CUENCA, 2011)

Un buen sistema de aterrizaje provee una baja resistencia hacia tierra para limitar el aumento del potencial a la misma. Los valores aceptables para un buen sistema de tierra recomendable en una S/E son:

Tabla 4.1 *Valores de resistencia de puesta a tierra en S/E.*

Denominación	Resistencia a tierra
Subestaciones de transmisión y subtransmisión	1 Ω o menos
Subestaciones de distribución pequeñas	desde 1 Ω hasta 5 Ω

Fuente: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1102/16/UPS-CT002093.pdf>

Cuando se pretende hacer el cálculo de la malla de puesta a tierra, se habla del cálculo del valor de resistencia a tierra mínimo establecido para reducir costos por falla en los equipos o accidentes. Los datos necesarios para calcular una malla de tierra son:

- ✓ Corriente de falla a tierra
- ✓ Tiempos en que intervienen las protecciones
- ✓ Valores máximos permisibles de tensiones de paso y contacto
- ✓ Valor de la resistividad del terreno, donde va a ir colocada la malla de puesta a tierra.
- ✓ Perímetro externo de la S/E
- ✓ Área de la S/E.

Una vez conocidos estos valores, se puede realizar el diseño de la malla. (BUSTAMANTE CUENCA, 2011)

4.4 Área de estudio de la S/E

Al momento de realizar un estudio de diseño para un SPT, se debe considerar las siguientes variables: terreno, corriente, electrodos, geometría, entre otros; todas estas variables son de vital importancia para calcular de la malla por la metodología de cálculo, que en este caso es la norma de diseño IEEE Std. 80-2000. El conductor que conforma el perímetro exterior de la malla de tierra debe cumplir la características de ser continuo y de encerrar toda el área ocupada por los equipos de la S/E, como se mencionó anteriormente; si cumplimos con estas condiciones podemos evitar grandes concentraciones de corriente y elevados gradientes de potencial dentro del área de estudio

y en sus alrededores. La malla de puesta a tierra debe estar compuesta por cables colocados paralela y perpendicularmente, con una separación entre ellos de 2.5 a 3.0 m de distancia o a una distancia igual a la longitud del electrodo, para que no provoque interferencia entre los gradientes de potencial y a su vez no se vea reducida su eficiencia individual. (BUSTAMANTE CUENCA, 2011) & (COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, 2005)

Los cables que forman la malla para tierra deben situarse a lo largo de las líneas de estructuras para de esta forma inicializar la instalación de puesta a tierra de los mismos; en cada cruce de conductores de la malla, estos deben conectarse rígidamente mediante conectores o haciendo uso de la soldadura exotérmica según sea el caso y la condición del clima. Las estructuras metálicas de la S/E, así como las partes metálicas de los equipos deben estar aterrizadas a tierra para evitar accidentes a causa de descargas eléctricas en caso de falla. Los elevados rangos de potencial que se presenten, dependen en su gran mayoría de la geometría y la localización en la que se encuentren los electrodos y de las características del terreno, que determinan lo apto que se pueda encontrar el sistema. Durante condiciones comunes de falla a tierra, el flujo de corriente a tierra va a producir gradientes de potencial dentro y fuera de la S/E. Estos gradientes pueden ir aumentando a lo largo de la superficie del terreno de tal manera que se vea expuesto el personal que se halle en el lugar. (COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, 2005) & (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

CAPÍTULO 5

CRITERIOS DE DISEÑO PARA UN SPT DE UNA S/E

5.1 Parámetros críticos.

El presente muestra una descripción de los criterios de diseño de un SPT en base a la normativa IEEE Std. 80-2000. Como se citó en el capítulo IV, un SPT se debe instalar adecuadamente para poder disminuir los gradientes de potencial de tierra a valores de tensión y corriente que no afecten el bienestar tanto de las personas como la seguridad de los equipos bajo niveles normales y de falla. Los parámetros que se van a mencionar a continuación, dependen de la ubicación de la S/E. (RAMÍREZ CASTAÑO & CANO PLATA, 2010)

5.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla (I_G)

El valor máximo permisible de diseño de la corriente de falla a tierra que circula por medio de la malla de la S/E a tierra está representada por la siguiente ecuación:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p$$

Donde:

$I_F = 3I_o \rightarrow$ Corriente simétrica de falla a tierra (A)

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento

$S_f \rightarrow$ Factor de división de corriente

C_p → Factor de crecimiento futuro de la S/E, considera el incremento futuro de la corriente de falla.

5.1.2 Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)

Existen varios tipos de fallas a tierra, las cuales han sido divididas por categorías; es recomendable hacer un análisis de las siguientes categorías:

- a) Falla línea – tierra, depreciando el valor la resistencia de la falla y la resistencia de puesta tierra de la S/E:

$$(I_F)_{L-T} = 3I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

- b) Falla línea – línea – tierra, depreciando el valor de la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la S/E:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3I_0 = \frac{3 * E * Z_2}{Z_1 * (Z_0 + Z_2) + Z_2 * Z_0}$$

Donde:

I_0 → Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla (A)

E → Tensión fase – neutro RMS (V)

Z_1 → Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla

Z_2 → Impedancia equivalente de secuencia (-) del sistema en el punto de falla

Z_0 → Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla

En una posición determinada una falla simple de línea – tierra será la que más perjuicio provoque si $Z_1 Z_0 > (Z_2)^2$ en el punto de la falla y una falla línea – línea – tierra será la que cause más deterioro si $Z_1 Z_0 < (Z_2)^2$. Es común que en un sistema dado $Z_1 = Z_2$. (RAMÍREZ CASTAÑO & CANO PLATA, 2010)

5.1.3 Factor de decremento (D_f)

El diseño que se prevé realizar de la malla a tierra debe estimar la corriente asimétrica de falla, la cual es el resultado de una multiplicación entre la corriente simétrica de falla y el factor de decremento, cuyas relaciones están determinadas por la ecuación que se indica a continuación:

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

Donde:

t_f → Duración de la falla (s)

T_a → Constante de tiempo

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f}$$

X, R → Componentes de la impedancia subtransitoria de falla, que se usa para determinar la relación X/R .

Para duraciones de fallas muy elevadas el efecto de la compensación de DC puede asumirse como si estuviera más que compensado por la reducción de la componente subtransitoria de AC. Un factor de decremento 1,0 puede utilizarse para duraciones de fallas entre 30 ciclos o más. En la tabla 5.1 podemos observar valores de D_f , t_f y X/R . (GONZÁLEZ M. Á., 2010)

Tabla 5.1 Valores típicos del factor de decremento D_f

Duración de la falla		Factor de decremento			
(s)	Ciclos a (60Hz)	X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0,0033	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

Fuente: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2835/1/01-TEISISIE010M56.pdf>

5.1.4 Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s)

La duración que tome la falla y el choque comúnmente son de igual valor, siempre y cuando cumpla la condición de que la duración de la falla sea la sumatoria de los choques continuos, como los que son producidos por los recierres automáticos de los interruptores (recloser). Los reclosers funcionan mediante transformadores de corriente montados en los bornes del lado de la fuente, el interruptor automático de recierre será capaz de detectar corrientes de fallas mayores que un valor mínimo de disparo previamente programado

para una o más fases y mediante señales emitidas por el sistema de control electrónico activará las funciones de disparo y cierre del mismo. La selección de t_f puede reflejar tiempos de despeje rápidos de la S/E de transmisión y tiempo de despejes lentos para la S/E de distribución e industriales. Valores típicos para t_f y t_s están en el rango de 0.25 s a 1 s. (RAMÍREZ CASTAÑO & CANO PLATA, 2010)

5.1.5 Efectos de la corriente permisible en el cuerpo humano.

El incremento de las corrientes a tierra en las instalaciones eléctricas a causa de descargas atmosféricas o fallas de maniobra implica tomar provisiones para precautelar a las personas y a los equipos debido a que cuando se producen corrientes de miles de amperios estos ocasionan gradientes de potencial elevados en su alrededor o en los puntos donde existan contactos a tierra. Cuando son generados estos gradientes de potencial y una persona se sitúa entre dos puntos en los que exista una diferencia de potencial, este individuo puede estar expuesto a una descarga que puede sobrepasar su límite de contracción muscular y posteriormente su caída causando que la corriente aumente a medida que esta circula por el cuerpo humano; causando de tal manera que atraviese su corazón, provocando la muerte.

El valor de percepción se acepta generalmente en una aproximación de 1mA. La ecuación que combina los parámetros de intensidad de corriente permisible y el tiempo que puede ser tolerado por un individuo es:

$$I_c = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Donde:

I_c → Valor efectivo de corriente que circula por el cuerpo (A)

t → tiempo de duración del choque eléctrico (s)

Tabla 5.2 *Efecto de corriente en el cuerpo humano*

Corriente eléctrica	Efectos
1 mA	Leve sensación de hormigueo.
5 mA	Leve sensación de choque, no doloroso pero si incómodo. La persona puede soltar la fuente de la corriente eléctrica.
6-30 mA	Pérdida del control muscular y choque doloroso, conocido como una corriente paralizante.
30 a 80 mA	Perturbaciones del ritmo cardiaco y respiratorio, con posibles paradas temporales del corazón y respiración.
80 mA a 3A	Corriente peligrosa, puede ocasionar fibrilación ventricular; de consecuencias mortales en la mayoría de casos.
> a 3 A	Posibilidad de parálisis cardiaca y quemaduras severas.

Elaboración: Autor.

Fuente: <http://dSPACE.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/694/1/te326.pdf>

5.2 Cálculo de la resistencia de puesta a tierra

El principal objetivo de la puesta a tierra es asegurar la seguridad de las personas dentro y fuera de la S/E. Este objetivo obliga a que se debe hacer una deferencia importante, determinando una resistencia objetiva. Por tanto, los siguientes valores que se recomiendan en la tabla 5.2, los cuales surgen de ejemplos prácticos. (RAMÍREZ CASTAÑO & CANO PLATA, 2010)

Tabla 5.3 *Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.*

UTILIZACIÓN	VALOR MÁXIMO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA (Ω)
Estructuras de líneas de transmisión	20
S/E en alta y extra alta tensión; $V \geq 115KV$	1
S/E en M/T de uso exterior en poste	10
S/E de M/T de uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida en B/T	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

Fuente: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/3/eduardoantoniocanoplata.2010.pdf>

5.3 Dimensión del área

La dimensión del área de estudio establece según el diseño de la norma IEEE Std. 80-2000, que la resistividad medida a una distancia de separación entre picas representa la resistividad del terreno a una profundidad igual a la distancia de separación de las picas, de igual forma; la norma establece rangos de profundidad en las que debe ser enterrada la malla, las cuales difieren entre 0.5m a 1.5m. (QUEZADA, 2013)

5.4 Selección del tamaño del conductor

El incremento de temperatura de corto plazo en un conductor de tierra o el tamaño del conductor que se requiere debe estar en función de la corriente de falla que circula por este; se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde:

I_F → Corriente asimétrica de falla RMS (KA)

A_{MCM} → Área del conductor (MCM)

T_m → Máxima temperatura disponibles o temperatura de fusión (°C)

T_a → Temperatura ambiente (°C)

α_r → Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia (T_r) $1/^\circ C$

T_r → Temperatura de referencia para las constantes del material (°C)

ρ_r → Resistividad del conductor de tierra a temperatura de referencia (T_r) $\mu\Omega\text{-cm}$

K_0 → $1/\alpha_0$ Ó $[(1/\alpha_0) - T]$ (°C)

t_c → Duración de la corriente (s)

$TCAP$ → Capacidad térmica por unidad de volumen $[J/(cm^3 * ^\circ C)]$

Tabla 5.4 Constantes de los materiales conductores

DESCRIPCION	Conductividad del material (%)	Factor α_r a 20°C (1/°C)	K_0 a 0°C (°C)	Temperatura de fusión T_m (°C)	ρ_r a 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	Capacidad térmica TCAP [$\text{J}/\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C}$]
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 con revestimiento de cobre	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85
Alambre de acero con revestimiento 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: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/3/eduardoantonioacanoplata.2010.pdf>

La Tabla 5.4, proporciona los valores para las constantes: α_r , K_0 , T_m , ρ_r y TCAP.

Simplificando la fórmula, obtenemos una aproximación de:

$$A_{MCM} = I_F * K_f * \sqrt{t_C}$$

Donde:

K_f → Constante para el material indicado en la Tabla 5.1, usando una $T_a = 40$ °C.

Tabla 5.5 Dimensiones comunes de los conductores de puesta a tierra

CALIBRE DEL CONDUCTOR		ÁREA NOMINAL mm^2	DIÁMETRO m
MCM	AWG		
350		177,35	0,015
300		152,01	0,0139
250		126,68	0,0127
211,6	4/0	107,22	0,0117
167,8	3/0	85,03	0,0104
133,1	2/0	67,44	0,0093

Fuente: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/3/eduardoantonioacanoplata.2010.pdf>

Se recomienda utilizar un calibre mínimo de # 4/0 AWG de cobre de 7 hilos, aplicando esta recomendación, obtenemos una mejora de la rigidez mecánica de la malla y a su vez la prevención por corrosión. La tabla 5.2 indica dimensiones comunes en los conductores empleados para los SPT.

5.5 Tensiones presentes en la malla a Tierra

La seguridad de las personas está vinculada directamente a la prevención de valores críticos de energía de toque que puedan ser absorbidas por el cuerpo humano antes de que incurra la falla, siendo esta despejada y a su vez provocando que el sistema se desenergice.

Los valores máximos admisibles para una persona con un peso corporal de 50Kg, durante cualquier evento accidental no deben rebasar los siguientes límites:

La tensión de paso límite permisible para un cuerpo de 50Kg. de peso corporal es:

$$E_{p_{50}} = (1000 + 6C_S \rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

La tensión de paso límite permisible para un cuerpo de 70Kg. de peso corporal es:

$$E_{p_{70}} = (1000 + 6C_S \rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

La tensión de contacto límite permisible para un cuerpo de 50Kg. de peso corporal es:

$$E_{c_{50}} = (1000 + 1.5C_S \rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

La tensión de contacto límite permisible para un cuerpo de 70Kg. de peso corporal es:

$$E_{c_{70}} = (1000 + 1.5C_S \rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Donde:

$R_B = 1000\Omega$ → Resistencia promedio del cuerpo humano

$I_B = \frac{0.116}{t_s}$ → Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo (A)

T_s → Duración del choque (s)

$6C_S \rho_S = 2R_f \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1 metro sobre la capa superficial.

$1.5C_S \rho_S = R_f/2 \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies juntos en serie sobre la capa superficial.

$R_B = \rho/4b \rightarrow$ Resistencia a tierra de un disco metálico de radio b (b= 0.08m) sobre la superficie de una malla homogénea de resistividad ρ .

$C_S \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial.

$$C_S = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_S}\right)}{2h_s + 0.09}$$

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

$\rho_S \rightarrow$ Resistividad de la capa superficial ($\Omega \cdot m$)

$h_s \rightarrow$ Espesor de la capa superficial.

Las tensiones de paso y contacto reales deben ser inferiores a los valores de límites máximos permisibles para el ser humano; para que de esta manera garantice la seguridad del sistema. (RAMÍREZ CASTAÑO & CANO PLATA, 2010)

PARTE II APORTACIONES

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE PUESTA A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE 69KV

6.1 Diagrama de metodología de cálculo para un SPT

El procedimiento que se propone para realizar el cálculo de un SPT en base a una norma de diseño implementada en Ecuador, es la IEEE Std. 80-2000; nos permite mediante una sucesión de pasos realizar el diseño antes mencionado.

El estudio de la norma IEEE Std. 80-2000 indica que toda instalación eléctrica debe contar con una protección o instalación de una malla de puesta a tierra diseñada de tal manera que no se vea afectada la seguridad de las personas por causa de tensiones peligrosas en cualquier punto de acceso para el individuo, ya sea en el interior o el exterior del área donde la S/E va a estar ubicada.

El siguiente diagrama de flujo muestra una pauta de los datos que se necesitan para realizar el cálculo y una secuencia lógica para desarrollar el diseño.

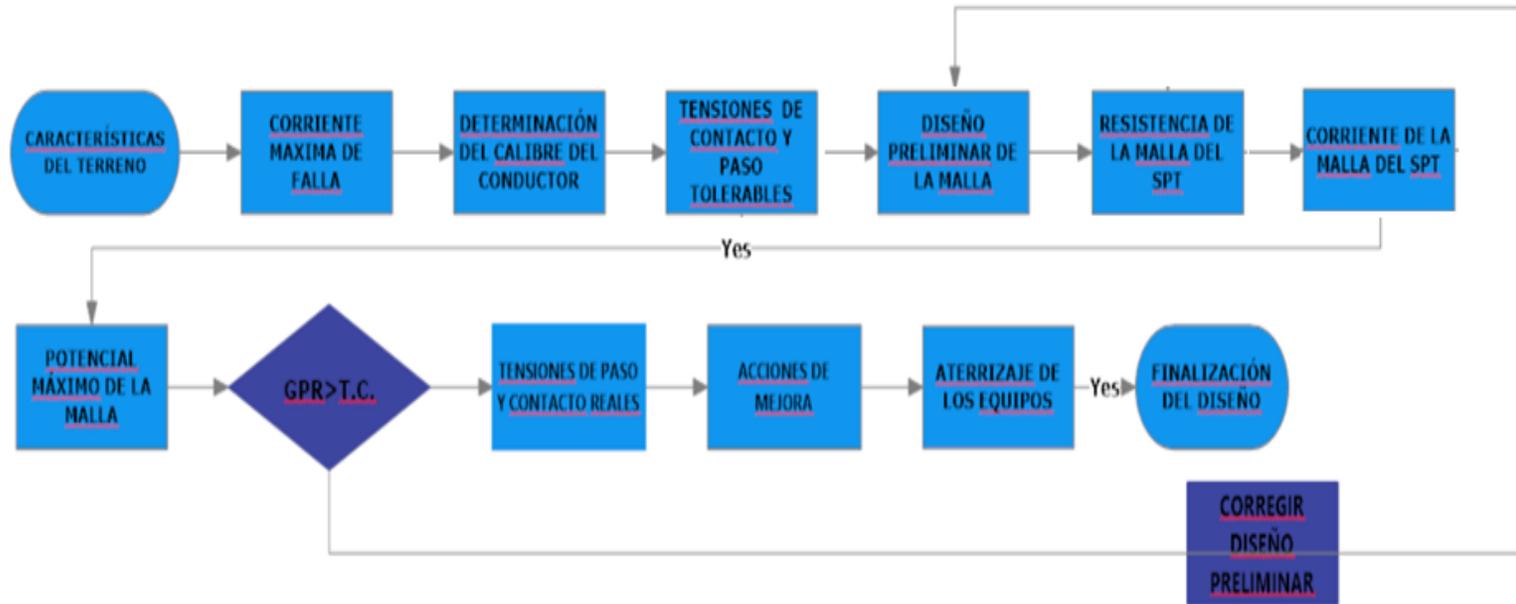


Figura 6.1: Diagrama de proceso para la metodología de cálculo del diseño de la malla del SPT.
Fuente: Autor

Para el diagrama se consideraron variables relativamente importantes y muy fáciles de identificar; una de estas y la primordial para poner en práctica este diseño es el terreno donde se va a ubicar la S/E, otras variables que cabe recalcar son: corrientes, tensiones, electrodos, geometría del terreno, etc. Gracias al análisis de todas estas variables se puede determinar valores máximos permisibles para las personas, de manera que no perjudiquen su condición de vida además de garantizar el bienestar de los equipos, todo esto se realiza con la finalidad de no alcanzar valores gradientes de potencial a causa de una descarga atmosférica o valores de corrientes superiores en condiciones de falla, que no son considerados como tolerables dentro del estudio.

6.2 Pasos para la metodología de cálculo

El cálculo de una malla de puesta a tierra enmarca la razón del diseño del mismo, gracias a este análisis determinamos que surge de la necesidad hallar un valor de resistencia a tierra mínimo. La pregunta esencial y fácil de otorgar una respuesta, ¿Por qué se debe obtener una baja resistencia a tierra? debido a que gracias al valor mínimo de este, se pueden reducir daños y costos por fallas en los equipos causando que no atraviesen por daños lamentables o irreparables. Para mejorar las características conductivas del suelo se recomienda el uso de Gel conductor mejoradores de tierra.

Paso 1: área de estudio.

Para determinar con exactitud el área de estudio donde se va a situar la S/E se debe contar con un mapa de ubicación, una orientación del lugar o el plano donde ésta se va a situar y donde se va a construir la malla de puesta a tierra.

Para efectuar el cálculo de la malla a tierra se requiere que los siguientes valores sean conocidos para poder dar pie al diseño, aparte del plano antes mencionado, necesitamos conocer la máxima corriente de falla en la malla de tierra, tiempo máximo de efecto de la falla, temperatura en °C del suelo, medida de resistividad del suelo y la resistividad de las capas superficiales del terreno.

Paso 2: calibre del conductor.

El calibre del conductor es uno de los parámetros más relevantes para el diseño de la malla; la corriente de falla futura debe ser la máxima esperada para que esta pueda ser conducida por la sección transversal del conductor, la cual se va a determinar mediante la siguiente fórmula, para que esta no afecte al conductor del sistema de tierra. En cuanto a la selección del calibre del conductor se utilizara como mínimo 4/0 por razones mecánicas. La temperatura es una variable que se debe considerar dentro de este parámetro, la mínima sección del conductor capaz de soportar la temperatura adiabática es:

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

$$K_0 = \frac{1}{\alpha_r} (^\circ C)$$

A diferencia de un cable normal, la temperatura límite podría causar un daño permanente en el aislamiento del cable; el límite de temperatura para conductores de

puesta a tierra es el punto de fusión del conductor, es decir en caso de una falla seria desfavorable que el conductor se funda.

Paso 3: valores de tensiones permisibles.

Los valores de tensiones de contacto y paso permisibles reglamentadas por la IEEE Std. 80-2000 se establecen para dos diferentes pesos corporales los cuales son calculables para personas con un peso de 50 o 70 Kg. que se encuentren expuestos. Un ejemplo práctico de causa de riesgo es cuando la electricidad se genera en forma remota y en el cual no existe un medio de retorno para la corriente de falla a tierra que la misma tierra, en estas condiciones existe riesgo que estas corrientes provoque gradientes de tensiones peligrosas en la tierra. Esto provocaría que si una persona se encuentra en la cercanía del punto de la falla, esta pueda verse afectada.

Para una persona con un peso corporal de 50 Kg:

$$E_{p_{50}} = (1000 + 6C_S \rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{p_{50}} = (1000 + 6C_S \rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Para una persona con un peso corporal de 70 Kg:

$$E_{c_{50}} = (1000 + 1.5C_S \rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{c_{50}} = (1000 + 1.5C_S \rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Paso 4: diseño básico.

El diseño inicial para la S/E debe incluir una malla de tierra, la cual debe estar formada por conductores que permitan el acceso de la puesta a tierra de los equipos y las estructuras para lo cual se añadió el cálculo del número mínimo de varillas para la malla del SPT.

$$N_v = 0.60 * \sqrt{A_t}$$

A_t → Área total del terreno.

N_v → Número de varillas.

Paso 5: resistencia de malla.

La resistividad del suelo puede ser medida empleando los modelos mencionados en la parte I de este proyecto de investigación como por ejemplo el método de Wenner, el método de cuatro electrodos. Se debe considerar que el valor que arroje este método puede no ser muy preciso debido a las corrientes dispersas en la tierra a causa de la salinidad, condiciones propias del suelo y corrientes de retorno a tierra. Estas corrientes se manifiestan como una caída de potencial entre los electrodos de potencial sin el uso de inyección de la corriente que requiere el uso de este método para evitar esta complicación, el instrumento debe tener una frecuencia diferente a la de esas corrientes.

El valor preliminar de la resistencia de puesta a tierra en condiciones de un terreno uniforme, se determina mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

$R_g \rightarrow$ Resistencia de la malla del SPT (Ω)

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

$L_T \rightarrow$ Longitud total de los conductores enterrados (m)

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla (m)

$A \rightarrow$ Área de la malla (m^2)

Nota: La longitud total de los conductores enterrados en la malla, es la sumatoria de todas las distancias desde los equipos hasta el punto de conexión de la malla de puesta a tierra como se muestra en la figura 6.2.

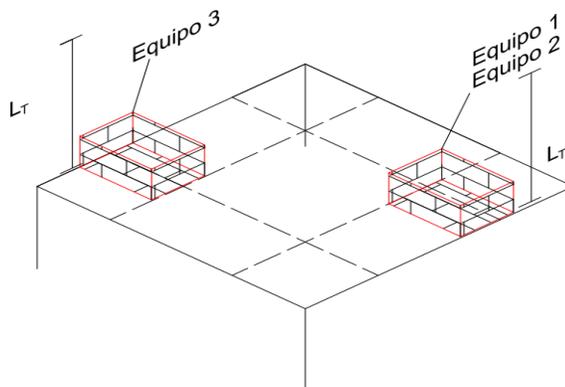


Figura 6.2: Longitud total de los conductores por equipo.
Elaborado por: Ma. José Guzmán Maridueña.

Paso 6: corriente máxima de malla.

Es la corriente máxima de falla (I_G) que puede circular en una malla de tierra en casos de falla. Por cada falla I_G y conociendo la duración de la falla (t_f), se debe determinar el factor de decremento (D_f)

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

$$T_a = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f}$$

$$I_G = I_f * D_f$$

$\frac{X}{R}$ → Es la relación del sistema en el lugar para algún tipo de falla.

Paso 7: potencial máximo de la malla (GPR)

El valor del potencial máximo de la malla es calculable bajo el modelo de la siguiente ecuación:

$$GPR = I_G * R_g$$

Cuando el valor de la elevación del potencial a tierra en el diseño preliminar es inferior al valor de la tensión de contacto tolerable para el cuerpo humano, ya no necesita realizar análisis alguno; solo se precisan conductores adicionales para aterrizar los equipos.

Paso 8: tensiones de paso y de contacto reales.

- Para calcular la tensión de paso real, utilizamos la siguiente ecuación;

$$E_s = \frac{\rho * K_s * K_i * I_G}{L_s}$$

Donde:

E_s → Tensión de paso (V)

ρ → Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

K_s → Factor de espaciado para la tensión de paso

K_i → Factor de corrección para la geometría de la malla.

I_G → Corriente máxima de falla (A)

L_s → Longitud efectiva del conductor para la tensión de paso (m)

Para los diferentes tipos de malla, ya sea con o sin varillas de aterrizaje; la longitud enterrada efectiva L_s , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_s = [(0.75 * L_C) + (0.85 * L_R)]$$

Donde:

L_C → Longitud total del conductor de la malla (m)

L_R → Longitud total de todas las varillas de aterrizaje (m)

La longitud total del conductor de la malla L_C , es calculable mediante la siguiente ecuación:

$$L_C = [(n * X) + (m * Y)]$$

Donde:

n → Número de conductores en paralelo de longitud X.

m → Número de conductores en paralelo de longitud Y.

El factor de espaciamiento para la tensión de paso K_s , se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

h → Profundidad a la que se encuentra enterrada la malla (m)

D → Espaciamiento entre conductores paralelo (m)

n → Número efectivo de conductores paralelos en la malla.

El valor de profundidad de enterramiento de la malla se recomienda que sea igual o mayor a 0.5m.

El factor de corrección para la geometría de la malla K_i , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_i = 0.644 + (0148 * n)$$

- Para calcular la tensión de contacto real, utilizamos la siguiente ecuación;

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

Donde:

E_m → Tensión de contacto (V)

K_m → Factor de espaciamento para la tensión de contacto

L_m → Longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto (m)

El factor de espaciamento K_m para la tensión de contacto, es calculable mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

d → Diámetro del conductor de la malla (m)

K_{ii} → Factor de ponderación correctivo que se justifica para efectos de conductores internos

K_h → Factor de ponderación correctivo para efectos de profundidad de la malla del SPT

El factor de ponderación correctivo K_{ii} para las mallas que contengan varillas de aterrizaje a lo largo del área de la S/E, o para mallas que contengan varillas en sus esquinas o dentro de la misma, su valor es de:

$$K_{ii} = 1$$

Las mallas que no contengan varillas de aterrizaje o con pocas varillas de aterrizaje que no estén colocadas en las esquinas del perímetro o dentro de este, el valor de factor de ponderación correctivo es:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * n)^{2/n}}$$

El valor de K_h , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} \therefore h_o = 1m \text{ (profundidad de referencia de la malla)}$$

El número efectivo de los conductores en paralelos que se encuentran en la malla es:

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

Donde:

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_p}$$

$n_b = 1$; para mallas cuadradas

$n_c = 1$; para mallas cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$; para mallas cuadradas, rectangulares y en forma de L.

$L_C \rightarrow$ Longitud total del conductor de la malla (m)

$L_p \rightarrow$ Longitud perimetral de la malla (m)

La longitud efectiva del conductor de la malla L_m , para calcular la tensión de contacto en mallas sin varillas de aterrizaje o mallas que presenta pocas varillas dispersas a lo largo del perímetro es:

$$L_m = L_C + L_R$$

Donde:

$L_C \rightarrow$ Longitud total del conductor de la malla (m)

$L_R \rightarrow$ Longitud total de todas las varillas de aterrizaje (m)

La longitud efectiva del conductor de la malla L_m , para calcular la tensión de contacto en mallas con varillas de aterrizaje en las esquinas, así como a lo largo del perímetro y sobre toda la malla es:

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

Donde:

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla de aterrizaje (m)

$L_x \wedge L_y \rightarrow$ Longitud máxima de conductores en “X” y en “Y”

Paso 9 y paso 10: control de seguridad.

El caso en donde los valores de tensión de contacto y tensión de paso son inferiores a los valores de tensiones de paso y contacto tolerables para el cuerpo humano, el diseño necesita solamente proporcionar la puesta a tierra de los equipos, como indica el paso 12. Si este no fuera el caso, el diseño tiene que ser revisado en el paso 11.

Paso 11: acciones para mejora.

El caso en donde se exceden los valores tolerables de las tensiones de paso o de contacto, requiere una revisión del diseño de la malla. La revisión debe incluir pequeños espaciamientos entre los conductores, electrodos o varillas de aterrizaje adicionales e incrementar el área ocupada por la malla.

Paso 12: aterrizaje de los equipos.

Una vez cumplido los requisitos de tensiones de paso y de contacto se debe adicionar los conductores necesarios para poner a tierra todos los equipos que se encuentren en la S/E dentro de la malla. Se debe incluir las varillas de aterrizaje necesarias cerca de los equipos como: los descargadores de sobretensión, neutro de transformadores, etc. Además de la conexión exotérmica o conectores para unir los conductores, varillas, etc.

CAPÍTULO 7

MATRIZ DE CÁLCULO DEL MODELO DE PUESTA A TIERRA

El procedimiento para realizar el cálculo del diseño de un SPT para S/E obedece a la metodología de cálculo de la norma IEEE Std. 80-2000 para lo cual he desarrollado una matriz que permita realizar este diseño de una manera fácil y ágil. Debemos obedecer la sucesión de pasos que propone esta norma americana para obtener el diseño que se espera.

Para poder iniciar el análisis de este diseño, primero debemos reconocer cuales son las variables que debemos ingresar; es decir, diferenciar de las constantes que nos proporciona la matriz para el diseño del cálculo de la malla de puesta a tierra. Es por esto que dentro de este sistema, encontrarán como se puede identificar una de la otra.

Tabla 7.1 *Identificación de la variable y constante*

IDENTIFICACIÓN	
DATO A INGRESAR	
DATO ESPERADO	
VALOR CALCULADO	

Fuente: Autor

Primer paso: área de estudio.

Este primer paso, es la parte fundamental del diseño; en el encontramos las variables indispensables que debemos conocer para empezar el cálculo de la protección para la S/E. La figura 7.2 nos muestra como es el ingreso de la información, según las variables y unidades de medida.

Tabla 7.2 *Área de estudio*

1ER PASO: ÁREA DE ESTUDIO			
DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	IDENTIFICACIÓN DEL PARÁMETRO	DATO	UNIDAD
LONGITUD DEL ÁREA DE ESTUDIO:	X		m
ANCHO DEL ÁREA DE ESTUDIO:	Y		m
CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA	I_f		A
FACTOR DE DECREMENTO	D_f		-
TIEMPO MÁXIMO DE EJECUCION DE FALLA	t_f		seg
NIVEL DE TENSION DEL PRIMARIO	V_p		KV
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	ρ		$\Omega * m$
FACTOR DE DIVISIÓN DE LA CORRIENTE	S_f		-
RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL DEL TERRENO	ρ_s		$\Omega * m$
TEMPERATURA AMBIENTE	T_a		°C

Fuente: Autor

Como se puede observar, esta matriz cuenta con un fácil ingreso de la información de los parámetros como el área del terreno donde se va a situar la S/E, la corriente máxima de falla, el factor de división de la corriente, el factor de decremento, entre otros. Su ágil reconocimiento de las variables nos permite ir obteniendo valores de los posteriores pasos, los cuales son indispensables de este proyecto.

Segundo paso: calibre del conductor.

El primer paso de esta matriz solicitaba información preliminar para diseño; con esta información básica ya se podía obtener valores para calcular la sección transversal de varios tipos de material, La figura 3.2 nos muestra el área transversal para varios tipos de materiales, según sea la necesidad del diseño que desea la persona que realiza el cálculo; además nos permite ingresar , si así lo desea el valor de la temperatura referencia de la constante del material según sea el clima en donde se va a instalar la malla de puesta a tierra; por lo contrario tomaría el valor que ofrecen las constantes del material.

Tabla 7.3 Calibre del conductor según el material

2DO PASO: CALIBRE DEL CONDUCTOR														
TIPO DE MATERIAL		COBRE DESTEMPLADO TRENZADO SUAVE	COBRE COMERCIAL TRENZADO DURO	ALAMBRE DE ACERO CON REVESTIMIENTO DE COBRE	ALAMBRE DE ACERO CON REVESTIMIENTO DE COBRE	VARILLA DE ACERO CON REVESTIMIENTO DE COBRE	ALUMINIO DE GRADO EC	ALEACIÓN DE ALUMINIO 5005	ALEACIÓN DE ALUMINIO 6201	ALAMBRE DE ACERO CON REVESTIMIENTO DE ALUMINIO	ACERO 1020	VARILLA DE ACERO CON REVESTIMIENTO INOXIDABLE	VARILLA DE ACERO CON CAPA DE ZINC	ACERO INOXIDABLE 304
CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA ASIMETRICA	I_F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TEMPERATURA MÁXIMA PERMISIBLE DE FUSION	T_m	1083	1084	1084	1084	1084	657	652	654	657	1510	1400	419	1400
TEMPERATURA DE AMBIENTE	T_a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TEMPERATURA DE REFERENCIA DE CONSTANTE DEL MATERIAL	T_r													
COEFICIENTE TÉRMICO DE RESISTIVIDAD	α_o	0,004273504	0,004132231	0,004081633	0,004081633	0,004081633	0,004385965	0,003802281	0,003731343	0,003875969	0,00165289	0,001652893	0,00341297	0,00133511
COEFICIENTE TÉRMICO DE RESISTIVIDAD A LA TEMPERATURA DE REFERENCIA	α_r	0,00393	0,00381	0,00378	0,00378	0,0078	0,004063	0,00353	0,00347	0,0036	0,0016	0,0016	0,0032	0,0013
RESISTIVIDAD DEL CONDUCTOR DE TIERRA A TEMPERATURA REFERENCIA	ρ_r	1,72	1,78	4,4	5,86	8,62	2,86	3,22	3,28	8,48	15,9	17,5	20,1	72
TCAP	TCAP	3,42	3,42	3,85	3,85	3,85	2,56	2,6	2,6	3,58	3,28	4,44	3,93	4,03
SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CONDUCTOR A_{mm^2} [mm^2]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DIÁMETRO DEL CONDUCTOR	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autor

Tercer paso: tensiones admisibles.

Este paso permite hallar las tensiones de paso y tensiones de contacto para una persona con una masa corporal de 50Kg y 70Kg. El usuario solo debe ingresar el valor de la variable del espesor de la capa superficial del terreno obedeciendo a normas o a valores en donde se encuentre el área de estudio.

Tabla 7.4 Tensiones admisibles para el cuerpo humano

3ER PASO: TENSIONES ADMISIBLES			
RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL DEL TERRENO	ρ_s	0	$\Omega * m$
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	ρ	0	$\Omega * m$
TIEMPO MÁXIMO DE EJECUCIÓN DE FALLA	t_s	0	seg
ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL	h_s		m
FACTOR DE DECREMENTO DE LA CAPA SUPERFICIAL	C_s	0	-
TENSIÓN DE PASO 50 Kg	E_{paso} [V]	0	
TENSIÓN DE CONTACTO 50Kg	$E_{contacto}$ [V]	0	
TENSIÓN DE PASO 70Kg	E_{paso} [V]	0	
TENSIÓN DE CONTACTO 70Kg	$E_{contacto}$ [V]	0	

Fuente: Autor

Automáticamente, después de ingresar el valor de la variable de h_s , obtendremos los valores de tensiones de paso y contacto que necesitamos para el cálculo; según sea el caso del requerimiento del estudio.

Cuarto paso: diseño preliminar.

El diseño básico de este estudio que se nos presenta como el cuarto paso, es la acumulación de la información que pudimos obtener del área transversal del conductor y las tensiones de paso y de contacto; he añadido a este estudio, el cálculo de las varillas mínima para el área de estudio según el área total del terreno donde se va a encontrar la S/E.

Tabla 7.5 *Diseño preliminar*

4TO PASO: DISEÑO PRELIMINAR			
NÚMERO DE VARILLAS	N_v		0

Fuente: Autor

Quinto paso: resistencia de la malla.

El cálculo de la resistencia de la malla requiere de valores de la longitud total del conductor y de la profundidad de la malla de tierra; aconsejo utilizar un valor promedio de 0.5m a 1.5m para el valor de h.

Tabla 7.6 *Resistencia de la malla*

5TO PASO: RESISTENCIA DE MALLA			
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	ρ	0	$\Omega * m$
LONGITUD TOTAL DE LOS CONDUCTORES ENTERRADOS	L_T		m
LONGITUD TOTAL DE VARILLAS DE ATERRIZAJE	L_R	0	m
PROFUNDIDAD DE LA MALLA DE TIERRA	h		m
ÁREA DE LA MALLA DE TIERRA	A	0	m^2
RESISTENCIA DE LA MALLA	R_g [Ω]		0

Fuente: Autor

Sexto paso: corriente máxima de malla.

La corriente máxima de la malla, es un valor que se obtiene de manera ágil debido a que son datos preliminares que ingresamos en el primer paso.

Tabla 7.7 *Corriente máxima de la malla*

6TO PASO: CORRIENTE MÁXIMA DE MALLA			
FACTOR DE DECREMENTO	D_f	0	-
FACTOR DE DIVISIÓN DE LA CORRIENTE	S_f	0	-
CORRIENTE DE FALLA	I_f	0	A
CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA	I_G [A]		0

Fuente: Autor.

Séptimo paso: potencial máximo de la malla (GPR)

EL GPR se lo conoce por valores que ya han sido calculados en los pasos quinto y sexto; si el valor del GPR es menor al valor de las tensiones admisibles por el cuerpo humano, según su peso corporal; ya no es necesario realizar ninguno de los pasos siguientes, solo se requieren conductores extras para el aterrizaje de los equipos que se van a encontrar en la S/E.

Tabla 7.8 GPR

7MO PASO: POTENCIAL MÁXIMO DE LA MALLA GPR			
CORRIENTE MÁXIMA DE LA MALLA	I_G	0	A
RESISTENCIA DE LA MALLA	R_g	0	Ω
GPR [V]		0	

Fuente: Autor

Octavo paso: tensiones de paso y contacto reales.

Si no se cumplió la condición de séptimo paso, debemos continuar el diseño que nos presenta la matriz de cálculo, es decir el cálculo de las tensiones de paso y contacto reales para el SPT. El espaciamiento entre los conductores debe ser de acuerdo al diseño del usuario; es decir, la matriz nos indica el valor de varillas que debe contar el sistema pero el usuario es quien distribuye de la forma más conveniente ese número. El diámetro del conductor de la malla, es un parámetro que se añadió al segundo paso según el material a utilizar para el diseño. Para la longitud de cada varilla de aterrizaje es aconsejable usar la de copperweld, es una varilla que tiene una longitud de 2.44 m.

Tabla 7.9 Tensiones de paso y contacto reales

8VO PASO: TENSIÓN DE PASO Y CONTACTO REALES			
RESISTIVIDAD DEL TERRENO	ρ	0	$\Omega * m$
CORRIENTE MÁXIMA DE MALLA	I_G	0	A
ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES PARALELOS	D		m
PROFUNDIDAD DE LA MALLA	h	0	m
DIÁMETRO DEL CONDUCTOR DE LA MALLA	d		m
LONGITUD EFECTIVA DEL CONDUCTOR PARA T.PASO	L_s	0	m
LONGITUD DE CADA VARILLA DE ATERRIZAJE	L_r		m
LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR DE LA MALLA	L_C		m
LONGITUD PERIMETRAL DE LA MALLA	L_p		m
TENSIÓN DE PASO REAL	E_s [V]	0	

Fuente: Autor

La longitud total del conductor de la malla, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_C = [(n * X) + (m * Y)]$$

Donde:

n → Número de conductores en paralelo de longitud X.

m → Número de conductores en paralelo de longitud Y

Para este cálculo, también se necesita conocer la resistencia efectiva del conductor de malla; hay dos casos, según sea el requerimiento del usuario.

Caso 1: para pocas varillas de aterrizaje que no se encuentren en las esquinas de la malla.

Caso 2: para varillas de aterrizaje dentro y en las esquinas de la malla.

Tabla 7.10 Longitud efectiva del conductor de la malla.

LONGITUD EFECTIVA DEL CONDUCTOR DE LA MALLA T. CONTACTO L_M			
MALLA CON POCAS VARILLAS DE ATERRIZAJE (CASO 1)		MALLAS VARILLAS DE ATERRIZAJE EN LAS ESQUINAS (CASO 2)	
L_C	0	L_C	0
L_R	0	L_r	0
L_M CASO 1 [m]	0	L_x	
		L_y	
LONGITUD MÁXIMA DE CONDUCTORES X, L_x		L_M CASO 2 [m]	0
LONGITUD MÁXIMA DE CONDUCTORES Y, L_y		T.CONTACTO REAL (CASO 1)	E_m [V] 0
		T.CONTACTO REAL (CASO 2)	E_m [V] 0

NOTA: EL DIAMETRO DE CONDUCTOR (d), SE OBTIENE DEL PASO 2, TOMAR EL VALOR SEGÚN EL MATERIAL DE PREFERENCIA

Fuente: Autor

Noveno y décimo paso: acciones de seguridad.

Se realiza una comparación entre las tensiones de paso y contacto admisible para el cuerpo humano y las tensiones de paso y contacto reales. Si se cumple la condición de acciones de seguridad, el diseño solo necesita proporcionar la puesta a tierra de los equipos; sino se cumple la condición, el sistema debe ser revisado nuevamente.

Tabla 7.11 Acciones de seguridad

9NO Y 10MO PASO: ACCIONES DE SEGURIDAD		
CONDICIÓN		
T. PASO TOLERABLE	<	T. PASO REAL
T. CONTACTO TOLERABLE	<	T. CONTACTO REAL
SI CUMPLE LA CONDICIÓN, EL DISEÑO NECESITA UNICAMENTE PROPORCIONARLE LA PUESTA A TIERRA DE LOS EQUIPOS, SINO CUMPLE LA CONDICIÓN; EL SISTEMA DEBE SER REVISADO		

Fuente: Autor

Décimo primer paso: revisión de mejoras para el diseño.

Se recomienda ampliar el área del terreno ocupada por la malla, adicionar electrodos de aterrizaje e incrementar los espacios entre conductores.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- La visión con la que se encaminó este proyecto fue para desarrollar en las personas la idea de que todo sistema eléctrico o maquina eléctrica debe estar protegido pero sobre todo se debe tener un sistema que garantice la vida de las personas que puedan encontrarse dentro y fuera de la S/E.
- Mostrar una metodología de estudio para poder comprender los pasos fundamentales que permiten elaborar el cálculo de un SPT en base a la normativa IEEE Std. 80-2000.
- Establecer una hoja electrónica de cálculo automatizado que permite realizar el diseño de la malla de una S/E, la cual está orientada al cumplimiento de la norma americana IEEE Std. 80-2000 utilizada en la mayoría de los países de Latinoamérica, inclusive es un modelo que se implementa en Ecuador a pesar de que las empresas eléctricas no den el mandato para su uso, si habilitan su ejecución.
- La matriz de cálculo desarrollada en este proyecto en base a la norma IEEE Std. 80-2000, está diseñada para realizar los cálculos necesarios, para conocer los valores de: resistencia de puesta a tierra, tensiones de paso y de contacto, la resistencia de la malla, el máximo gradiente de potencial de la misma, entre otros; mucho más rápido que los cálculos que se realizarían si se los realizan

manualmente. La inspección del SPT debe realizarse periódicamente, con el objetivo de controlar el correcto funcionamiento de la protección.

8.2 Recomendaciones

- Para realizar un SPT es imprescindible tener un valor real de la resistividad del terreno donde se va a instalar la malla de puesta a tierra, debido a que de este factor depende tener un óptimo sistema; es decir, un sistema que preste: confiabilidad, continuidad y efectividad.
- El calibre del conductor del SPT debe ser el adecuado, de tal manera que éste pueda soportar los valores elevados que presente la corriente eléctrica que circula por éste.
- Se recomienda la construcción de la malla de puesta a tierra tomando en consideración los parámetros críticos señalados en el desarrollo del marco teórico de este proyecto; analizando la geometría del terreno del área de estudio, usando los materiales y calibres de conductores más convenientes, según sea el caso.
- Es recomendable seguir los pasos de la metodología de cálculo de la matriz al pie de la letra, para obtener valores reales del sistema para el desarrollo confiable y continuo de la malla.
- Para la realización de la soldadura exotérmica, se debe tener mucho cuidado debido a los valores altos de temperatura que se manejan; por este es aconsejable trabajar con personal capacitado para desarrollar esta labor.

REFERENCIAS.

BUSTAMANTE CUENCA, J. A. (2011). *EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE LA MALLA PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN OBRAPÍA CON NIVELES DE TENSIÓN DE 69KV Y 13.8KV PERTENECIENTE A LA E.E.R.S.S. PARA CUMPLIR CON LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS POR LA NORMA IEEE STD- 80-2000.* Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1102/16/UPS-CT002093.pdf>

CABRERA TITUANA, R. I., & SALINAS ROJAS, E. J. (2014). *METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA BAJA TENSIÓN.* Obtenido de http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/9054/1/Cabrera_Tituana_Ronny_Israel_Salinas_Rojas_Emilio_Jose.pdf

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (2005). *SISTEMA DE TIERRA PARA PLANTAS Y SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.* Obtenido de <http://lapem.cfe.gob.mx/normas/nrf/pdfs/u/NRF-011.pdf>

COMPONENTES PRINCIPALES Y FUNCIÓN DE LOS MISMOS DENTRO DE UNA SUBESTACIÓN EN EL SISTEMA. (s.f.). Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/848/A4.pdf?sequence=4>

CURILLO, C. R. (2012). *CÁLCULO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA APLICACIÓN DE LA NORMA IEEE 80-2000.* Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/694/1/te326.pdf>

FIERRO ROMERO, R., & FLORES HINOSTROZA, M. (MARZO de 2010). *DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DEL NUEVO CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA - SEDE GUAYAQUIL*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2096/12/UPS-GT000149.pdf>

GEDISA GENERAL DISTRIBUIDORA S.A. (2007). *MANUAL DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA*. Obtenido de http://www.gedisa.com.ve/recientes_aun/catalogos/electricos/libreria_gediweld/libreria/00%20MANUAL%20GEDIWELD%202007%20COMPLETO%20B.pdf

GONZÁLEZ, A. P. (6 de MARZO de 2010). *ESTUDIO GENERAL DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS. ELABORACIÓN DE HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE CÁLCULO CON APLICACIÓN A DIFERENTES CONFIGURACIONES*. Obtenido de http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10867/PFC_Andres_Paniagua_Gonzalez.pdf?sequence=1

GONZÁLEZ, M. Á. (JUNIO de 2010). *ELABORACIÓN DE UN PROGRAMA COMPUTARIZADO PARA EL CÁLCULO ELÉCTRICO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA PARA SUBESTACIONES BASADOS EN LA NORMA IEEE 80-2000*. Obtenido de <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2835/1/01-TEISISIE010M56.pdf>

INEN. (s.f.). *CÓDIGO ELÉCTRICO NACIONAL*. Obtenido de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.cpe.19.1.2001.pdf>

MARCIAL, D. G. (2010). *ANÁLISIS DE CONTINGENCIAS ELÉCTRICAS EN CENTROS COMERCIALES*. Recuperado el 30 de OCTUBRE de 2014, de <https://www.yumpu.com/es/document/view/14407815/analisis-de-contingencias-electricas-en-centros-comerciales>

MOGOLLÓN ESCOBAR, M. B. (2006). *DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y PARARRAYOS PARA EL EDIFICIO “BLOQUE DE AULAS A Y B” DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/884/1/T-ESPE-014318.pdf>

QUEZADA, J. F. (ABRIL de 2013). *DISEÑO ELÉCTRICO DE LA SUBESTACIÓN EL BOSQUE DE 20/24 MVA a 69KV CON 4 CIRCUITOS DE SALIDA DE 13,8 KV EN LA CIUDAD DE MACHALA*. Obtenido de <http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4271/1/UPS-CT002611.pdf>

RAMÍREZ CASTAÑO, J. S., & CANO PLATA, E. A. (2010). *SISTEMA DE PUESTA A TIERRA: DISEÑADO CON IEEE 80 Y EVALUADO CON MEF*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/3/eduardoantonioacanoplata.2010.pdf>

TIUQUINGA, M. D. (2010). *SISTEMA PUESTA A TIERRA PARA EL LABORATORIO DE MÁQUINASELÉCTRICAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA*. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/618/1/38T00232.pdf>

FIGURAS

Capítulo 3

Figura 3.1: Tensión de paso.....	19
Figura 3.2: Tensión de toque o de contacto.....	19
Figura 3.3: Telurómetro.....	21
Figura 3.4: Conexiones del medidor digital de resistencia a tierra.....	21
Figura 3.5: Funcionamiento del telurómetro.....	22
Figura 3.6: Método de cuatro puntos.....	23
Figura 3.7: Conexión del equipo para medición de resistividad del suelo.....	25
Figura 3.8: Representación del método Wenner.....	25
Figura 3.9: Modelo Schlumberger.....	26
Figura 3.10: (a) Resistencia de dispersión de un electrodo vertical. (b) Dispersión de una corriente por electrodo.....	28
Figura 3.11: Electrodo de pica.....	30
Figura 3.12: Electrodo de placa vertical.....	31
Figura 3.13: Conexión de una malla.....	32
Figura 3.14: Barra copperweld.....	33

Figura 3.15: Instalación de varilla copperweld.....33

Capítulo 6

Figura 6.1: Diagrama de flujo para el diseño y cálculo de la malla del SPT.....62

Figura 6.2: Longitud total de los conductores por equipo.....67

TABLAS

Capítulo 3

Tabla 3.1: Variación de la resistividad dependiendo del tipo de suelo.....16

Tabla 3.2: Efecto de la humedad en la resistividad del suelo.....17

Tabla 3.3: Efecto de la temperatura en la resistividad del suelo.....17

Capítulo 4

Tabla 4.1: Valores de resistencia de puesta a tierra en S/E.....46

Capítulo 5

Tabla 5.1: Valores típicos del factor de decremento D_f52

Tabla 5.2: Efecto de corriente en el cuerpo humano.....54

Tabla 5.3: Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.....55

Tabla 5.4: Constantes de los materiales conductores.....57

Tabla 5.5: Dimensiones comunes de los conductores de puesta a tierra.....58

Capítulo 7

Tabla 7.1: Identificación de la variable y constante.....75

Tabla 7.2: Área de estudio76

Tabla 7.3: Calibre del conductor según el material.....77

Tabla 7.4: Tensiones admisibles para el cuerpo humano.....	78
Tabla 7.5: Diseño preliminar.....	79
Tabla 7.6 Resistencia de la malla.....	79
Tabla 7.7: Corriente máxima de la malla.....	79
Tabla 7.8 GPR.....	80
Tabla 7.9: Tensiones de paso y contacto reales.....	81
Tabla 7.10: Longitud efectiva del conductor de la malla.....	82
Tabla 7.11: Acciones de seguridad.....	82

GLOSARIO

SPT: Sistema de puesta a tierra.

S/E: Subestación eléctrica.

AWG: American Wire Gauge, calibre de alambre estadounidense.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding: IEEE Guía para Protección de Tierras en Subestaciones

Std.: standard, estándar.

Grafito: El grafito es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono junto al diamante.

Gravilla: Mezcla de piedras muy pequeñas o macadas, que se usa para pavimentar caminos y en la mezcla del hormigón.

Caliza: es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos.

Arenisca: La arenisca o psamita es una roca sedimentaria de tipo detrítico, de color variable, que contiene clastos de tamaño arena.

Soldadura: Es un proceso de fabricación en donde se realiza la unión de dos o más piezas de un material, (generalmente metales o termoplásticos), usualmente logrado a través de fusión, en la cual las piezas son soldadas fundiendo, se puede agregar un material de aporte (metal o plástico), que, al fundirse, forma un charco de material fundido entre las piezas a soldar (el baño de soldadura) y, al enfriarse, se convierte en una unión fija.

Sección: Separación que se hace en un cuerpo sólido con un instrumento cortante

ANEXOS

Anexo 1: Vista general de la matriz de cálculo para el diseño del SPT con diseño de norma IEEE Std 80-2000.

Anexo 2: Ejemplo práctico ejecutado en la matriz de cálculo.