



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
TUXTLA GUTIÉRREZ

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

REPORTE TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE UNA MALLA DE TIERRAS EN
CUMPLIMIENTO CON LA NOM-001-SEDE VIGENTE

Carrera: Ingeniería eléctrica

Autor: Fabián Alejandro Chacón Ovando.

No. De Control: 14270466

Asesores:

M.C. Karlos Velázquez Moreno.

Ing. Carlos H. Sánchez Coutiño.

Tuxtla Gutiérrez Chiapas, Diciembre de 2018.

INDICE

1. Introducción.	3
1.1 Antecedentes.	3
1.2 Estado del Arte	4
1.3 Justificación.	6
1.4 Objetivo	6
2. Fundamento Teórico	7
2.1 Importancia de un sistema de puesta a tierra.	7
2.2 Componentes un sistema de puesta a tierra.	10
2.2.1 Electrodo	10
2.2.2 Conductores del sistema de puesta a tierra.	17
2.2.3 Conectores	21
2.3 Resistividad del terreno.	27
2.3.1 Variables que afectan la resistividad del terreno.	29
2.4 Medición de la resistividad del terreno.	31
2.4.1 Método de Wenner	32
2.4.2 Método de Schulmbeger-Palmer.	33
2.4.3 Método de la caída porcentual.	34
2.5 Elevaciones de potencial de tierra (GPR).	36
2.6 Tensiones eléctricas en el sistema de puesta a tierra.	38
3. Desarrollo	41
3.1 Diseño de una red de mallas de tierra para una subestación comercial de 75 kva.	41
3.2 Desarrollo de software para diseñar mallas de tierras de subestaciones eléctricas.	60
4. Resultados	66
4.1 resultados	66
4.2 Conclusiones	68
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXO A.	71
ANEXO B.	75
ANEXO C.	79
ANEXO D.	81
ANEXO E.	82

1. Introducción.

Una parte fundamental en un sistema eléctrico es la subestación eléctrica ya que esta es la que recibe la energía eléctrica en altas tensiones y es la que se encarga de transformarla y distribuirla en los niveles de tensión de operación necesaria para los equipos que se encuentren dentro de toda la instalación.

Cuando hablamos de subestaciones eléctricas nos referimos a altas o medias tensiones, las cuales se usan en instalaciones de potencia, industriales o comerciales, en un sistema eléctrico es importante tener protecciones eléctricas adecuadas, existen varios dispositivos de protección para las líneas de transmisión de la energía eléctrica, como son pararrayos o los cortacircuitos, y para las instalaciones eléctricas, uno de los métodos de protección es mediante un sistema de puesta a tierra.

Cuyas funciones son principalmente brindar seguridad a las personas que interactúen dentro y fuera de la subestación, proteger a las instalaciones, equipos y bienes en general, al facilitar y garantizar la correcta operación de los dispositivos de protección y mejorar la calidad del servicio eléctrico.

Un sistema de puesta a tierra es un conjunto de elementos formados de electrodos, cables, conexiones, herrajes y líneas de tierra física de una instalación eléctrica que permite conducir, drenar y disipar una corriente no deseada dentro del sistema, y consiste en la conexión de todos los equipos o artefactos eléctricos y electrónicos así como también la instalación eléctrica a este sistema de puesta a tierra para evitar que sufran daño en caso de ocurrir una falla.

La circulación de corrientes de falla a través de las conexiones a tierra, producen a su vez elevaciones de potencial del equipo conectado a tierra, y gradientes de potencial sobre la superficie del terreno sobre todo cuando esta corriente de falla es provocada por una descarga atmosférica.

Es por esta razón que es fundamental la realización de un sistema de red de malla de tierra con las características adecuadas y normalizadas, que garantice que la instalación eléctrica es segura para cualquier persona que interactúe dentro y fuera de la subestación; y que además brindara una vida útil prolongada a los equipo eléctricos al no exponerlos a un mal funcionamiento ya que las sobretensiones muy elevadas reducen la vida útil de los equipos sobretodo de los transformadores y maquinas rotatorias.

En este proyecto ejemplificaremos el procedimiento de diseño para una subestación comercial en media tensión partiendo del estándar IEEE-80-2013 y cumpliendo con lo requerido en la NOM-001-SEDE-2012.

1.1 Antecedentes.

Cuando Tomas Alva Edison inició su compañía eléctrica de iluminación y el sistema eléctrico de distribución utilizó un conductor aislado (de tierra) para conducir la corriente eléctrica, utilizaba la tierra (terreno natural) como conductor para el retorno de la corriente eléctrica a su origen. Esta corriente que fluía por la tierra no era controlada por lo que

resultaban muchas muertes de personas y animales así fue que entonces, Thomas Alva Edison modifico el sistema eléctrico en 3 fases, similar al que se usa hoy en día.

El mayor debate fue si se debían o no poner a tierra los sistemas eléctricos, hasta que en el año de 1913 el NEC (NATIONAL ELECTRIC CODE) obligaba a que los sistemas eléctricos con una tensión mayor de 150 Volts, medidos de fase a tierra, fueran puestos a tierra. Hoy en día, el documento principalmente utilizado para diseñar un sistema puesta a tierra en subestaciones eléctricas, es el IEEE-STD-80 “Guide ([2] Daza Guzmán Rafael, 2012) for Safety in AC Substation Grounding”. [1]

En 1961 se publicó la primera edición, que se desarrolló del análisis y el compendio de informes elaborados por diferentes autores dedicados al estudio de los sistemas de puesta a tierra, entre ellos están: Sverak Balder Tapar, S. J. Schwarz, E. D. Sunde, F. Dawalibi, A. P. Meliopoulos, R. Rundenburg, entre otros. Esta publicación tiene el propósito de servir como una normativa e información pertinente para el diseño de puesta a tierra en subestaciones eléctricas.

En el año 2000 se publicó la cuarta edición, que es una modificación de las anteriores, en donde se actualizaron tópicos, se redefinieron o simplificaron las ecuaciones para el cálculo de los voltajes de paso y contacto, se presentaron gráficas para ayudar en la determinación de la corriente de falla, así como también cambios en los criterios de selección de conductores y conectores, se adicióno mayor información en la medición de la resistividad, entre otras.

El IEEE-STD-80-2000, funciona junto con otros estándares asociados, tales como el STD-81-1983 y STD-81-1991 que da procedimiento para la medición de la resistividad, la resistencia de sistemas de puesta a tierra instalados, los gradientes de superficie y continuidad de los conductores de la rejilla; el STD-142-1991, se conoce también como Green Book.

Libro que cubre algunos de los aspectos prácticos de puesta a tierra y el STD-837-1989 que da pruebas y criterios para seleccionar las conexiones que se usaran en los sistemas de puesta a tierra. Todas estas publicaciones en conjunto nos brindan la información suficiente para poder realizar el diseño de la puesta a tierra para cualquier subestación eléctrica.

1.2 Estado del Arte

Daza Guzmán Rafael, Gómez Cera José, Peña Acosta Yair, Universidad de la Costa. Ese trabajo diseñó el sistema de puesta a tierra de la universidad de la costa de acuerdo a la normatividad vigente, cuyo diseño era necesario realizarlo ya que no cumplía con los requisitos necesarios de seguridad, la finalidad de ese trabajo era el de servir como guía con los criterios técnicos adecuados para el correcto diseño de sistemas de puesta a tierra. Las tensiones de paso y contacto tolerables fueron menores que las tensiones esperadas lo cual significa que los resultados indican que el diseño es seguro. [2]

Daviran Berrospi Pedro Eusebio, Universidad Nacional del Centro del Perú. En ese trabajo se elabora un programa para computadora tomando como base la norma IEEE-STD-80-2000 que sirva para calcular el dimensionamiento y cálculo de mallas de puesta

a tierra en subestaciones eléctricas. Los resultados obtenidos en ese trabajo cumplieron con la metodología y requerimientos del IEEE-STD-80-2000.

Y concluyo que los principales problemas que subsisten en el diseño de mallas de tierra son: la caracterización del terreno, la determinación de las corrientes que debe disipar la malla, y el cálculo de los potenciales de paso, toque y transferidos, Cuando la malla de tierra no presenta las características requeridas para la utilización del método simplificado, o cuando se desea hacer un diseño optimizado se recomienda el uso del modelo de las dos capas. [3]

Jiménez Z. Jonathan M., Pacheco G. Ángel T., Quizhpi P. Flavio A., Universidad Politécnica Salesiana. El artículo presenta los aspectos normalizados en la IEEE para el diseño del sistema de puesta a tierra aplicado en instalaciones de tipo industrial, y desarrolla una aplicación sobre Matlab. La propuesta desarrollada entrega datos que garantizan un diseño con todos los parámetros de seguridad para la implementación de los sistemas de puesta a tierra para sistemas industriales.

En el análisis matemático de la norma IEEE 80-2000 al variar los espaciamientos entre conductores y enterramiento de la malla de puesta a tierra, se observó que los valores de resistencia de la malla varían en un porcentaje bastante bajo. También se demostró, mediante los cálculos realizados por el programa implementado, que al aumentar el espaciamiento entre conductores del sistema de puesta a tierra, se eleva el voltaje de toque, en tanto que, el voltaje de paso disminuye. [4]

Swett Stein Francisco Javier, Universidad de Chile. El trabajo determina la configuración geoelectrica de los estratos que componen un terreno a partir de mediciones de resistividad, mediante el uso de un programa computacional desarrollado especialmente, además de obtener el aumento de potencial y la distribución de las corrientes en los elementos metálicos de una puesta a tierra cualquiera, que se encuentre inmersa en un terreno de dos capas.

Se demostró, que las corrientes en las mallas prefieren los vértices de esta para inyectar corriente al terreno, por lo que se deben instalar extensiones en las esquinas para suavizar los gradientes de potencial en la superficie; las tensiones de paso máximas tienden a ubicarse en el límite de la puesta a tierra, por lo que se debe tener precaución si esa zona está expuesta al público, y también se obtuvo que extender la sección exterior de una malla a una mayor profundidad permite obtener buenos voltajes de paso en lugares que por construcción no son sometidos a voltajes de contacto. [5]

Segura Terán Alfredo, Vitela Arteaga Efrén, De Marcos Miñón Hugo, Instituto Politécnico Nacional. El objetivo de este trabajo es el de determinar las condiciones para el correcto diseño, selección y aplicación de un sistema de tierras, que permita operar en condiciones eficientes, económicas y seguras, y utilizar nuevas tecnologías existentes conforme a la normatividad vigente. El trabajo presenta una forma diferente para el mejoramiento de una puesta a tierra enfocado a las subestaciones de potencia.

Esto utilizando nuevas tecnologías existentes y adoptando el sistema del electrodo unidireccional partiendo del análisis de la subestación Teotihuacán ya que iba a tener un

incremento en la carga y por lo tanto la malla instalada no protegería al 100% al personal o equipo eléctrico cercanos a la malla perimetral. Se obtuvo que el sistema de electrodo unidireccional drena a tierra las corrientes y voltajes inducidos con mayor eficiencia que los sistemas de mallas convencionales. [6]

1.3 Justificación.

Con la próxima actualización de la NOM-001-SEDE (2018) y la llegada del código de red (2016) que tienen como propósito el optimizar y mejorar el sistema eléctrico desde la generación de la energía hasta el punto de suministro de los usuarios, el estudio y diseño de los sistemas de puesta a tierra se convierte en un aspecto relevante y aún más importante al momento de proyectar.

La importancia de un sistema de puesta a tierra esta principalmente en reducir el riesgo de accidente crítico para cualquier persona que se encuentre en la proximidad de las instalaciones conectadas a este diseño de malla de tierras, así como también el proporcionar medios eficaces que conduzcan o drenen en caso de ocurrir una falla eléctrica las sobretensiones, corrientes corto circuito y de falla a tierra a su punto de origen.

Con el fin mantener y evitar exceder los límites normales de operación de los equipos instalados y evitar daños irreparables en estos, logrando evitar estos gastos extraordinarios, así como también mantener constante la continuidad del servicio eléctrico. En otras palabras el principio de sistema de puesta a tierra es el de garantizar la seguridad de la instalación eléctrica y la integridad de las personas dentro y fuera de estas instalaciones.

Por otro lado el desarrollo del software tiene la finalidad de ser una herramienta útil para los ingenieros a la hora de realizar su estudio y el diseño de su sistema de tierra para sus proyectos, proporcionando la metodología necesaria para poder realizarlo, así como también las tablas y fórmulas requeridas para su uso y así lograr reducir tiempos y esfuerzos importantes para desarrollar un sistema de tierra seguro.

1.4 Objetivo

Realizar un programa para el diseño de las redes de malla de tierras con base en la NOM-001-SEDE VIGENTE.

Los propósitos específicos son:

A) Definir los fundamentos para el diseño y establecer los límites de seguridad de las diferencias de potencial que puedan existir en una subestación en condiciones de falla entre los puntos que pueden ser contactados por el cuerpo humano.

B) Proporcionar un procedimiento para el diseño de sistemas de tierra práctico, basado en los criterios ya establecidos.

C) Desarrollar métodos analíticos mediante el uso de software como una ayuda para el entendimiento y solución de problemas típicos de a la hora de diseñar.

2. Fundamento Teórico

2.1 Importancia de un sistema de puesta a tierra.

En los sistemas eléctricos una parte fundamental es el sistema de puesta a tierra. Un sistema de puesta a tierra consiste en interconectar a todo aquel objeto que pueda servir como conductor de energía eléctrica en caso de que por cualquier motivo (descarga atmosférica, falla en aislamiento de algún conductor, corriente transitoria, etc.) ocurriera una falla eléctrica, a tierra.

Siendo ejemplo de estos los conductores, equipos eléctricos, partes metálicas, electrodos, etc., con el fin de proporcionar un camino seguro para disipar la corriente de falla que se llegara a producir dentro o fuera de la instalación eléctrica, y así evitar daños a equipos y salvaguardar la integridad de las personas que se encuentren dentro y fuera de las instalaciones en ese momento, es por eso que los sistemas de puesta a tierra son una parte muy importante dentro de un sistema eléctrico.

Para el caso de las subestaciones eléctricas se deberá de instalar una red de mallas de tierra dentro de un área determinada, esa malla de tierra, es el conjunto de conductores horizontales y electrodos de tierra uniformemente espaciados formando una cuadrícula o rectángulo, el cual se interconectara al sistema de puesta a tierra de la instalación eléctrica. Este sistema de puesta a tierra proveerá:

- Una conexión de baja impedancia entre el equipo y los objetos metálicos adyacentes para minimizar las descargas eléctricas peligrosas al personal.
- Un camino de retorno de baja impedancia de la corriente de falla para el funcionamiento adecuado de las protecciones automáticas.
- Un camino de baja impedancia a tierra para las corrientes producidas por descargas atmosféricas.
- Un camino de baja impedancia para la descarga de cargas estáticas para evitar que se produzca un arco eléctrico.

Objetivo de la puesta a tierra. Teniendo claro el concepto de sistema de puesta a tierra, se definen los objetivos principales:

- Estabilizar las tensiones a tierra.
- Proveer un camino alternativo que sirva para disipar las corrientes de falla a tierra el cual permitirá que operen los dispositivos de protección contra sobrecorriente y liberen la falla.
- Reducir el daño a los equipos e instalación eléctrica.
- Mantener la calidad en el servicio.
- Garantizar la seguridad de las personas dentro y fuera de las instalaciones.

Seguridad de las personas. El objetivo más importante de un sistema de puesta a tierra es garantizar la integridad de las personas, es por esto que es importante conocer los efectos que causa la circulación de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano. La exposición a altas corrientes puede causar quemaduras eléctricas severas, aunque la

consecuencia más peligrosa de tal exposición es una condición cardíaca conocida como fibrilación ventricular o paro de los latidos del corazón.

Los efectos de una corriente eléctrica que pasa a través de las partes vitales del cuerpo humano dependen de la duración, la magnitud y frecuencia de esta corriente. Las personas somos muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencias de 50 Hz o 60 Hz, las corrientes de aproximadamente 0,1 A pueden ser letales. Sin embargo el cuerpo humano puede tolerar mayores corrientes a 25 Hz y aproximadamente cinco veces valores más altos de corriente continua.

Los efectos fisiológicos más comunes de la corriente eléctrica pasando a través del cuerpo humano conforme aumenta la magnitud de esta corriente, son la percepción en el valor umbral de la corriente, la contracción muscular, pérdida del conocimiento, la fibrilación del corazón, el bloqueo nervioso de la respiración, y las quemaduras eléctricas.

Corriente tolerable por el cuerpo humano. 1 mA de corriente es el umbral de percepción; es decir la magnitud mínima de corriente a la que una persona puede ser capaz de detectar una ligera sensación de hormigueo o cosquilleo en las manos o dedos causado por el paso de la corriente. En general las corrientes de 1 mA a 6 mA son las corrientes que se pueden soltar; aun cuando la sensación es desagradable al sostener esas corrientes, no está en peligro la vida de ninguna persona.

En el rango de 9 mA a 25 mA, las corrientes dolorosas y pueden que sea difícil o imposible de soltar los objetos energizados agarrados con la mano. Para corrientes aún mayores las contracciones musculares podrían dificultar la respiración. Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando se interrumpe la corriente, a menos que la contracción sea muy severa y la respiración se detenga durante algunos minutos en lugar de segundos. Todavía incluso en tales casos, a menudo responden a la resucitación.

En el rango de 60 mA a 100 mA se alcanza la fibrilación ventricular, paro del corazón, o la inhibición de la respiración lo cual puede causar lesiones graves o incluso la muerte. Para estos casos después de retirar la fuente de corriente y sea seguro, una persona capacitada en resucitación cardiopulmonar (RCP) debe administrar RCP, hasta que la víctima pueda ser trasladada a algún centro de salud.

Otro factor a tomar en cuenta es la importancia de la duración de la falla ya que el despeje de alta velocidad de fallas a tierra puede ser ventajoso tomando en cuenta la probabilidad de la exposición a una descarga eléctrica puede ser reducida por el rápido tiempo de despeje de fallas, en contraste con situaciones en las que las corrientes de falla podría persistir durante varios minutos. Las pruebas y la experiencia demuestran que el riesgo de lesiones graves o la muerte pueden ser reducidos si la duración del flujo de corriente a través del cuerpo es muy breve.

La magnitud y duración de la corriente conducida a través del cuerpo humano a 50 Hz o 60 Hz debe ser menor que el valor que puede causar fibrilación ventricular del corazón. Este valor puede, por lo tanto, estar basado en el tiempo de despeje de las protecciones primarias, o de la protección de respaldo. La siguiente ecuación puede ser usada para

conocer el límite de la corriente tolerable por el cuerpo humano limitada a un rango de tiempo entre 0.03 s y 3.0 s, es obvio que no es válida para duraciones muy cortas o largas.

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}} \quad (2.1)$$

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Para pesos promedio de cuerpos de 50 kg} \quad (2.2)$$

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Para pesos promedio de cuerpos de 70 kg} \quad (2.3)$$

Donde:

I_B Es el límite de la corriente tolerable por el cuerpo humano

K Son las constantes de Dalziel para diferentes pesos promedio.

t_s Es el tiempo de duración de falla en segundos.

Resistencia del cuerpo humano. La resistencia interna del cuerpo es aproximadamente 300Ω , mientras que los valores de resistencia del cuerpo incluyendo el rango de piel es de 500Ω a 3.000Ω . Generalmente las trayectorias de las corrientes típicamente se consideran de mano a pies o de un pie a otro. También cabe mencionar que la resistencia del cuerpo humano se reduce por el daño o punción de la piel en el punto de contacto.

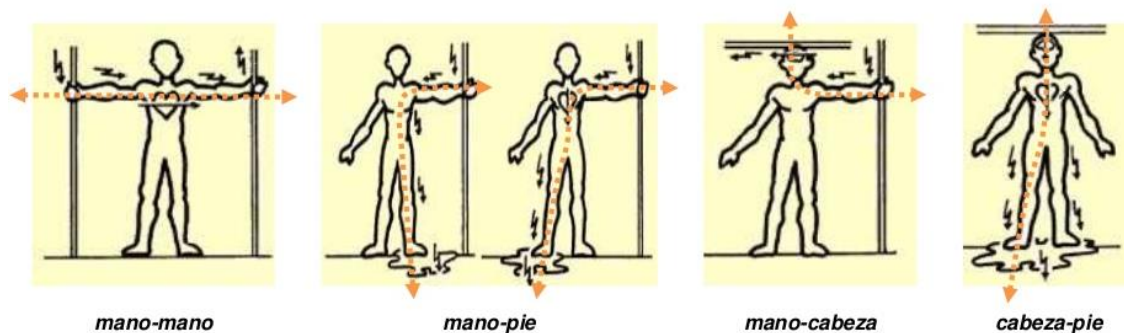


Fig. 2.1 Trayectoria de la corriente en el cuerpo humano.

Una tensión entre los dos pies es dolorosa pero no fatal, y podría dar lugar a una caída que podría causar un flujo de corriente mayor a través de la zona del pecho. El grado de este riesgo dependerá además de la duración de la falla y la posibilidad de otro choque. Aunque los peligros de contacto de pie con pie parecen ser menores que de otro tipo, ya que se han producido muertes por tales casos, es un peligro que no debe ser ignorado.

Se tomara a 1000Ω como el valor promedio de la resistencia del cuerpo humano para todas las trayectorias de la corriente, de mano a pies y de mano a mano o de un pie a otro, etc. $R_B = 1000 \Omega$. Siempre y cuando la piel donde se realice el contacto se encuentre seca. El valor promedio de la resistencia interna de los tejidos y órganos del cuerpo que se tomará será el de 300Ω .

En realidad, los altos gradientes de tierra de fallas suelen ser poco frecuentes, y los choques eléctricos con altos gradientes de tierra también son poco frecuentes. Además, ambos acontecimientos son a menudo de muy corta duración. Por lo tanto, no sería

práctico diseñar contra los choques que no son más que dolorosos y que no causan un grave daño; es decir, para corrientes por debajo del umbral de fibrilación.

2.2 Componentes un sistema de puesta a tierra.

Antes que nada un concepto básico que se debe de entender es el de la tierra física como parte de un sistema de puesta a tierra. Se asume que el planeta tierra tiene un potencial cero, que puede ser un excelente o pésimo conductor eléctrico, esto dependerá de ciertas características, como el grado de humedad, tipo de terreno y otras consideraciones naturales.

Al asumir que el planeta tierra tiene un potencia cero, todas las partes metálicas que normalmente no transportan energía eléctrica de los equipos deberán igualarse al potencial del planeta tierra. [1]

Los principales componentes de un sistema de puesta a tierra son:

- Electrodo
- Conductores
- Conectores

2.2.1 Electrodo

La NOM-001-SEDE-2012 define al electrodo de puesta a tierra como el objeto conductor a tras del cual se establece una conexión directa a tierra. Mientras que el estándar IEEE-80-2013 nos dice que es un conductor incrustado en la tierra y usado para recolectar la corriente de tierra, o la disipación de corriente de tierra hacia el suelo.

Entonces un electrodo de puesta a tierra es un elemento conductor, generalmente metálico, el cual se entierra en el terreno con el fin de drenar las corrientes de falla además de mantener un potencial de tierra (cero) en todos los conductores que estén conectados a él.

Estos electrodos se fabrican de acero, acero galvanizado, acero inoxidable, cobre, o de una combinación de éstos (copperweld). La selección de alguno de estos dependerá de las características del terreno, tomando en cuenta que son mucho más importantes en terrenos con poca vegetación, donde casi no llueve o terrenos secos. A continuación se presentan los electrodos de tierra más comúnmente utilizados.

Varilla Copperweld. Es el electrodo más comúnmente usado ya que es muy económico, este electrodo no tiene mucha área de contacto, pero si una longitud considerable, el cual logra hacer contacto con dos o más capas de tierra (algunas veces más húmedas) y obtener valores bajos de resistencia. Se fabrican de acero cubierto de cobre (copperweld), el cual combina las ventajas del cobre con la alta resistencia mecánica del acero, su longitud es de 3.05 metros y los diámetros comerciales son: 5/8" y 3/4", expresado en milímetros 14.3 mm² y 19 mm².

La NOM-001-SEDE-2012, en su artículo 250-53(3) (g). Especifica que este tipo de electrodo se debe de enterrar a una profundidad mínima de 2.44 metros, excepto cuando

se encuentre roca en la parte baja, entonces el electrodo se deberá enterrar en un ángulo oblicuo no mayor a 45 grados en una zanja de por lo menos 75 centímetros de profundidad.



Fig. 2.2 Instalación de electrodo de tierra tipo varilla.

Electrodo tipo Placa. Según la NOM-001-SEDE-2012 Art. 250-52(7). Cada electrodo de placa debe contener mínimo 0.20 m² de superficie expuesta al suelo. Los electrodos de placas de hierro o acero, desnudos o con recubrimiento conductor, deben de tener como mínimo 1.52 milímetros de espesor, además en el art. 250-53(3) (h) se especifica que este tipo de electrodo se debe de instalar a una distancia mínima de 75 centímetros por debajo de la superficie de la tierra. Estos electrodos al tener una gran área de contacto se recomienda que se use en terrenos que tengan una gran resistividad.

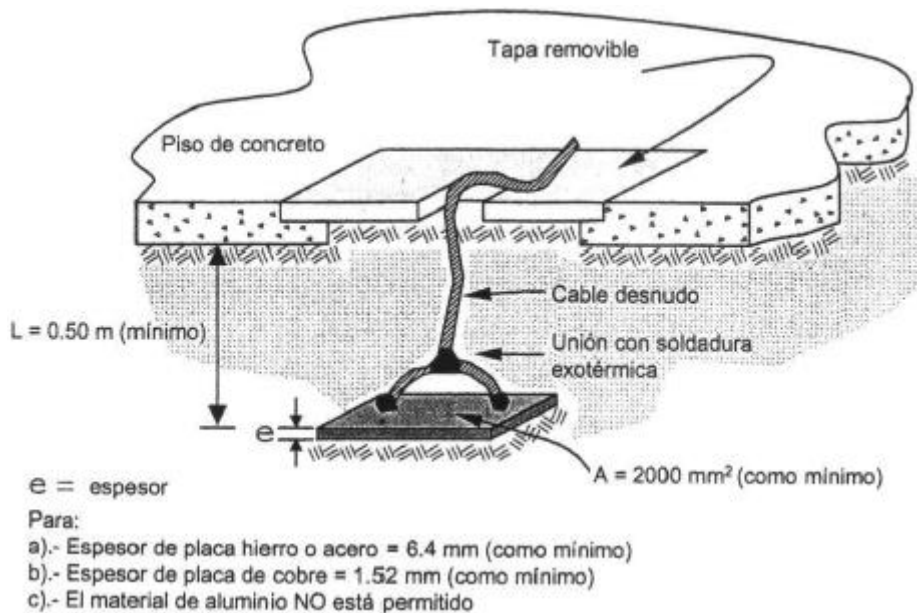


Fig. 2.3 Electrodo de tierra tipo placa.

Anillo de tierra. Es un anillo en contacto directo con la tierra, que rodea el edificio o estructura, con una longitud mínima de 6 metros de conductor de cobre desnudo de tamaño 33.6 mm² (2 AWG) o mayor. Este tipo de electrodo se deberá enterrar a una profundidad mínima de 75 centímetros. Art. 250-52(4) y Art. 250-53(3) (f) (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas , 2012).

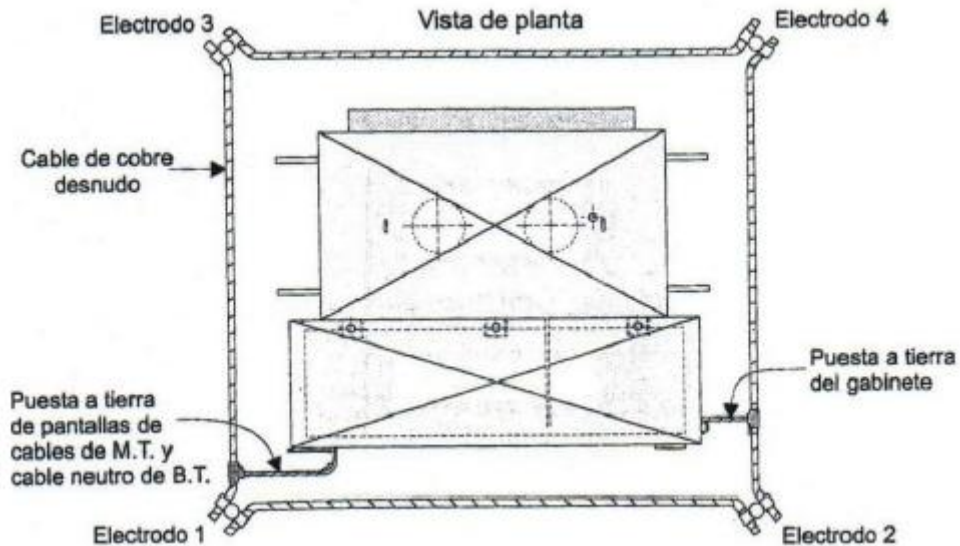


Fig. 2.4 Anillo de tierra.

Los electrodos siguientes son existentes en el mercado pero no están especificados por la NOM-001-SEDE-12.

Rehilete. Este electrodo se conforma de dos placas de cruzadas, las cuales son soldadas con el conductor de puesta a tierra, mediante soldadura exotérmica, la ventaja de este tipo de electrodo es que tiene mucha área de contacto por lo que es bueno para terrenos donde es difícil excavar.

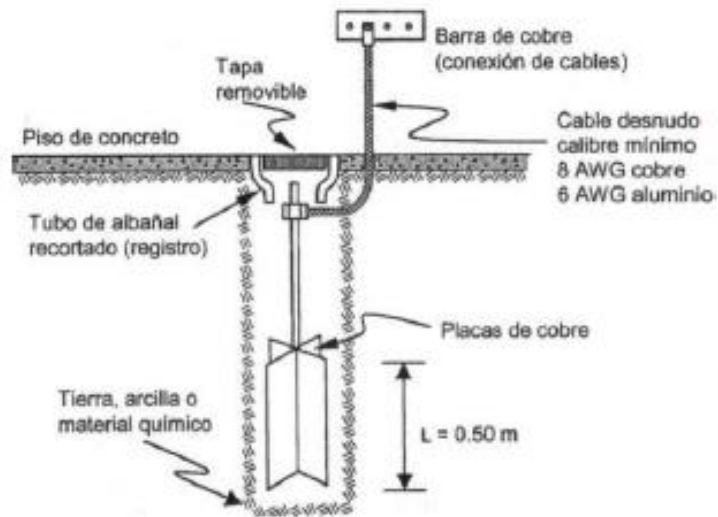


Fig. 2.5 Electrodo de tierra tipo rehilete.

Electrodos químicos Estos electrodos son compuestos químicos que se adiciona a los electrodos para aumentar su conductividad y de esta forma disminuir el valor de resistencia, la ventaja al usar este tipo de electrodos es que se obtienen resultados favorables de inmediato sin embargo requieren ser vigilados semestralmente para garantizar su efectividad, estos electrodos químicos se componen de:

- A) Carbón mineral (coke).-Este material sustituye al carbón vegetal por tener mejores cualidades aunque requiere de cierta forma de la humedad.
- B) Grafito rígido.- La ventaja de este material es que al estar constituido de grafito es que no le afecta tanto la corrosión a diferencia de los metales.

Existen otros materiales que se usaron anteriormente como compuestos de estos electrodos químicos como los sulfatos, estos eran altamente corrosivos en los metales y particularmente sobre el cobre, este compuesto además de ser corrosivo se diluye fácilmente con el agua.

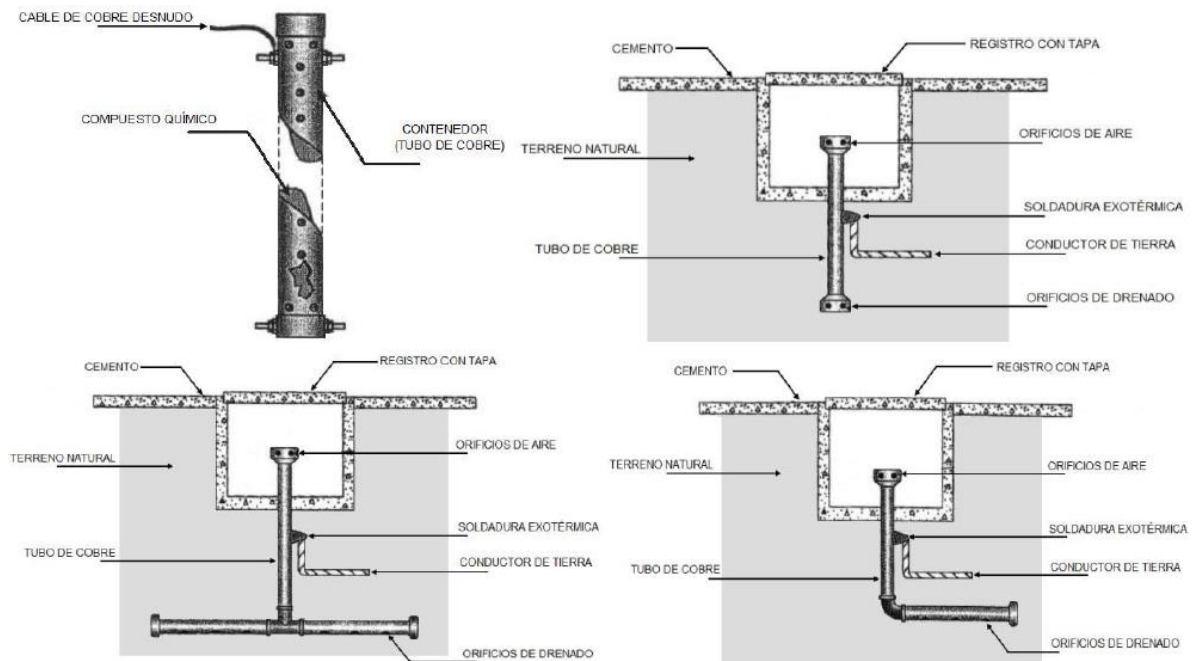


Fig. 2.6 Electrodo químicos.

Otros electrodos. Cabe mencionar que la NOM-001-SEDE-2012, en su artículo 250-52(a) establece que además de los electrodos ya antes mencionados también se pueden usar como electrodo de puesta a tierra los siguientes:

- Las tuberías metálicas para agua siempre y cuando estén en contacto directo con la tierra 3 metros o más.
- Las estructuras metálicas de los edificios solo si está conectada a tierra mediante alguno de los siguientes métodos:
 - (1) Cuando menos un elemento metálico estructural está en contacto directo con la tierra 3 metros o más, con o sin recubrimiento.
 - (2) Los tornillos de sujeción de alguna estructura están conectados a un electrodo recubierto en concreto, y este está localizado en los pilotes o la cimentación. Estos tornillos deberán estar conectados por medio de soldadura autógena, eléctrica o por soldadura exotérmica.
- Electrodo recubierto en concreto, estos electrodos deben de consistir al menos de:
 - (1) Una o más barras o varillas reforzadas de acero, desnudas o galvanizadas con zinc u otro recubrimiento eléctricamente conductor, de al menos 13 milímetros de diámetro e instaladas en una longitud continua de 6 metros.

(2) Conductor desnudo de cobre no menor que 21.2 mm² (4 AWG).

No permitido para uso como electrodo de puesta a tierra. Los siguientes materiales no podrán ser usados como electrodos de puesta a tierra de acuerdo con el Art. 250-52(b):

1. Sistemas de tubería metálica subterránea para gas.
2. Aluminio.

Resistencia del electrodo. Un electrodo contiene tres elementos: La resistencia del electrodo de puesta a tierra y sus conectores; La resistencia de contacto entre el electrodo de puesta a tierra y la tierra adyacente a él; La resistencia de la tierra alrededor del electrodo.

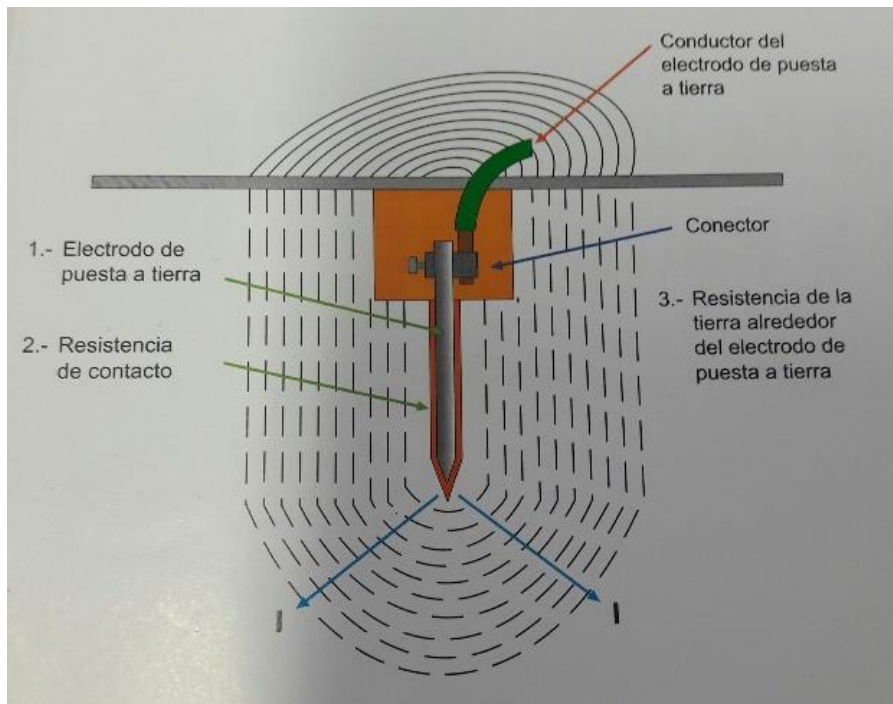


Fig. 2.7 Componentes del electrodo de puesta a tierra.

Resistencia del electrodo de puesta a tierra. Es la resistencia del cualquier electrodo que sea seleccionado, ya antes descrito, (varillas, anillos, estructuras, tuberías, etc.). Estos son generalmente de una sección transversal para que su resistencia sea una parte menor de la resistencia total del sistema de tierra.

Resistencia de contacto entre el electrodo de puesta a tierra y la tierra. Si el electrodo de puesta tierra está libre de pintura y grasa o de cualquier otro recubrimiento y la tierra se encuentra compactada, se puede concluir que la resistencia de contacto es despreciable.

Resistencia de la tierra alrededor del electrodo de puesta a tierra. La resistencia de la tierra generalmente es mayor que los tres componentes que conforman la resistencia de una conexión a tierra. Esto dependerá de factores naturales como el tipo de terreno, el grado de humedad y de la temperatura. Los valores que generalmente se manejan son de 50 a 50000 ohms-m.

Resistencia de un Sistema de electrodos de puesta a tierra. Para instalaciones eléctricas la NOM-001-SEDE-2012 Art. 250-50 dice que todos los electrodos de puesta a tierra, que estén presentes en cada edificio o estructura alimentada se deben unir entre sí para así formar el sistema de electrodos de puesta a tierra. Cuando no existe ninguno de estos electrodos de puesta a tierra, se debe instalar y usar uno o más de los electrodos de puesta a tierra.

En ningún caso, el valor de resistencia a tierra del sistema de electrodos de puesta a tierra puede ser mayor que 25 ohms.

Comportamiento de los electrodos de puesta a tierra. Se debe de entender que 25 ohms no es el valor más óptimo, lo se desea es que el valor de la resistencia a tierra sea el más bajo posible. Para lograr esto se debe considerar algunos de los efectos en los electrodos:

- Aumento de la sección transversal de un electrodo: aunque normalmente se obtiene muy poco valor en reducción de resistencia a tierra aumentando la sección transversal de los electrodos, es muy necesario hacerlo de acuerdo a los requisitos mecánicos y de corrosión.
- Profundidad de enterramiento: mientras más grande sea la profundidad de enterramiento, menor será el valor obtenido de resistencia. Esto es uno de los motivos por lo que generalmente se entierran a 3 metros.
- Proximidad entre electrodos: si se utilizan 2 o más electrodos de puesta a tierra conectados al mismo sistema de tierra (asumiendo que son de la misma longitud y están enterradas a la misma profundidad), proveerá caminos en paralelo. Esto es, que el valor de resistencia a tierra del conjunto de estas varillas no es la mitad de la resistencia de una sola.
- El artículo 250-53(3) (b) especifica que cuando se usan múltiples electrodos de puesta a tierra, se deben espaciar mínimo 1.80 metros, sin embargo lo más óptimo sería espaciarlas por lo menos la longitud de ellas. Por ejemplo si se tienen 2 varillas espaciadas a 3 metros, la resistencia bajara aproximadamente 60%, si el espacio se incrementa a 6 metros, la reducción será aproximadamente del 50% [1]

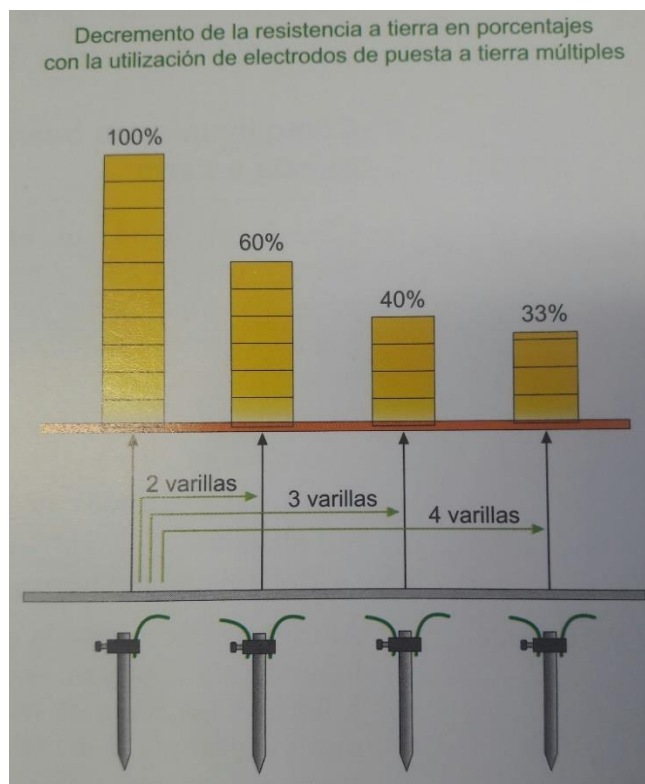


Fig. 2.8 Comportamiento de múltiples electrodos de puesta a tierra en paralelo.

Malla de Tierra. Es una rejilla formada por la unión de conductores horizontales normalmente según direcciones perpendiculares y uniformemente espaciados con electrodos verticales generalmente varillas. Se utiliza especialmente cuando el objetivo principal de la puesta a tierra es mantener un control de potenciales en la superficie del terreno, con un bajo valor de resistencia.

Este tipo de arreglo es muy usado en subestaciones eléctricas ya que reduce los gradientes de potencial y los voltajes de paso y contacto que puedan ocurrir durante una descarga atmosférica.

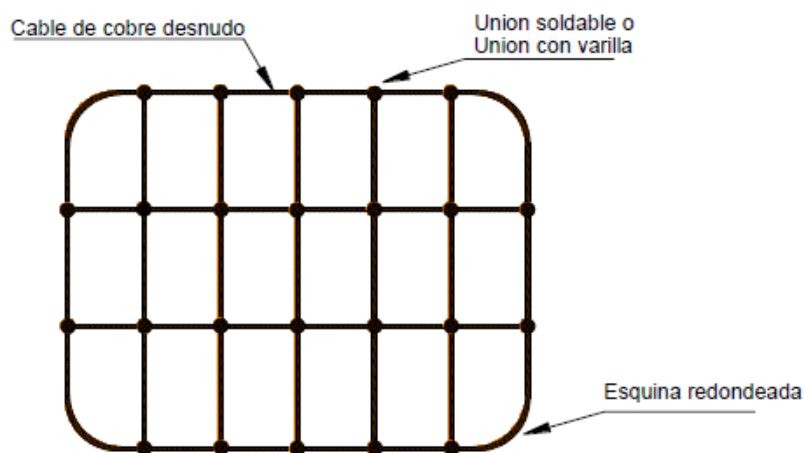


Fig. 2.9 Malla de tierra.

2.2.2 Conductores del sistema de puesta a tierra.

Para formar un sistema de puesta a tierra eficiente, se debe interconectar el conductor de puesta a tierra de equipos al conductor del electrodo de puesta a tierra formando puentes de unión. El Material del conductor del electrodo de puesta a tierra debe ser cobre, aluminio o aluminio revestido de cobre.

El material seleccionado debe ser resistente a cualquier condición corrosiva existente en la instalación o debe estar protegido adecuadamente contra la corrosión artículo 250-62 de la NOM-001-SEDE-2012. El conductor del electrodo de puesta a tierra debe estar dimensionado de acuerdo a la tabla 250-66 de la NOM-001-SEDE-2012.

Tamaño del mayor conductor de entrada a la acometida o área equivalente para conductores en paralelo ^a				Tamaño del conductor al electrodo de puesta a tierra			
Cobre		Aluminio		Cobre		Aluminio ^b	
mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil
33.6 o menor	2 o menor	53.50 o menor	1/0 o menor	8.37	8	13.3	6
42.4 o 53.5	1 o 1/0	67.40 o 85.00	2/0 o 3/0	13.3	6	21.2	4
67.4 o 85.0	2/0 o 3/0	107 o 127	4/0 o 250	21.2	4	33.6	2
Más de 85.0 a 177	Más de 3/0 a 350	Más de 127 a 253	Más de 250 a 500	33.6	2	53.5	1/0
Más de 177 a 304.0	Más de 350 a 600	Más de 253 a 456	Más de 500 a 900	53.5	1/0	85.0	3/0
Más de 304 a 557.38	Más de 600 a 1100	Más de 456 a 887	Más de 900 a 1750	67.4	2/0	107	4/0
Más de 557.38	Más de 1100	Más de 887	Más de 1750	85.0	3/0	127	250

Tabla 2.1. Conductor del electrodo de puesta a tierra para sistemas de corriente alterna. Tabla 250-66. NOM-001-SEDE-2012.

Para el caso del conductor de puesta a tierra de equipos, el material usado puede ser cobre, aluminio, o aluminio recubierto de cobre. Puede ser sólido o cableado, aislado, cubierto o desnudo, en forma de un alambre o una barra de cualquier forma. En caso de que se usen conductores cubiertos o aislados individualmente deben tener un acabado exterior continuo color verde.

El tamaño de los conductores de puesta a tierra de equipos no debe ser menor a los mostrados en la tabla 250-122 pero en ningún caso se exigirá que sean mayores a los conductores que alimentan al equipo.

Un conductor de puesta a tierra de equipo no se debe utilizar como conductor del electrodo de puesta a tierra. Cuando se incrementa el tamaño de los conductores de fase, también se debe incrementar el tamaño de los conductores de puesta a tierra de equipos

Capacidad o ajuste del dispositivo automático de protección contra sobrecorriente en el circuito antes de los equipos, canalizaciones, etc., sin exceder de: (amperes)	Tamaño			
	Cobre		Cable de aluminio o aluminio con cobre	
	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil
15	2.08	14	—	—
20	3.31	12	—	—
60	5.26	10	—	—
100	8.37	8	—	—
200	13.30	6	21.20	4
300	21.20	4	33.60	2
400	33.60	2	42.40	1
500	33.60	2	53.50	1/0
600	42.40	1	67.40	2/0
800	53.50	1/0	85.00	3/0
1000	67.40	2/0	107	4/0
1200	85.00	3/0	127	250
1600	107	4/0	177	350
2000	127	250	203	400
2500	177	350	304	600
3000	203	400	304	600
4000	253	500	380	750
5000	355	700	608	1200
6000	405	800	608	1200

Tabla 2.2. Tamaño mínimo de los conductores de puesta a tierra para canalizaciones y equipos. Tabla 250-122. NOM-001-SEDE-2012.

Material del conductor de la malla. La selección adecuada del material del conductor mantendrá en buenas condiciones la integridad del sistema de puesta a tierra durante años, si los conductores son de tamaño adecuado y las condiciones del suelo no son corrosivas para el material utilizado. Cada elemento del sistema de puesta a tierra, incluyendo conductores de la cuadrícula, conexiones, cables de conexión, y todos los electrodos primarios se les debe evaluar, sobre cuál material y qué calibre se debe usar.

Para la elección final se debe reflejar las consideraciones señaladas a continuación.

- Tener una conductividad suficiente, por lo que no contribuirá sustancialmente a las diferencias de voltaje locales.
- Resistir la fusión y el deterioro mecánico bajo la combinación más desfavorable de magnitud y duración de falla.
- Ser mecánicamente confiable y robusta en un alto grado.
- Ser capaz de mantener su función, incluso cuando se expone a la corrosión o abuso físico.

Para el caso del conductor de la malla de tierra los materiales que generalmente son más usados, es el cobre y el cobre estañado o copperweld. Podría usarse cualquier metal pero la mayoría de los metales comunes se corroen fácilmente a diferencia del cobre que ha

destacado en ese aspecto, además de ser un buen conductor. Otro material muy usado para los sistemas de puesta a tierra es el acero revestido de cobre y acero chapado en cobre, especialmente donde el robo es un problema.

Otros materiales que pueden ser usados como conductores de malla son el aluminio, o el acero pero por cuestiones de corrosión bajo tierra son muy poco usados. A continuación se muestra la tabla con los materiales más comúnmente usados como conductores de malla de tierra.

Tabla 1 – Constante de los materiales

Descripción	Conductividad del Material ^a (% IACS)	Factor ^a α_r a 20°C (1/°C)	K_0 a 0°C	Temperatura de Fusión ^a T_m (°C)	Resistividad ^a a 20°C ρ_r ($\mu\Omega$ -m)	Capacidad ^a Térmica TCAP [J/(cm ³ *°C)]
Cobre, recocido suave	100	0.003 93	234	1083	1.72	3.4
Cobre, comercial duro	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.4
Alambre de acero revestido de cobre	40.0	0.003 78	245	1084 ^e	4.40	3.8
Alambre de acero revestido de cobre	30.0	0.003 78	245	1084 ^e	5.86	3.8
Varilla de acero revestido de cobre	17.0	0.003 78	245	1084 ^e	10.1	3.8
Alambre de acero revestido de aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Acero, 1020	10.8 ^b	0.003 77	245	1510	15.9	3.8
Varilla de acero inoxidable ^c	9.8	0.003 77	245	1400 ^e	17.5	4.4
Varilla de acero galvanizada	8.6	0.003 20	293	419 ^e	20.1	3.9
Acero inoxidable, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.0	4.0

Tabla 2.3. Constante de materiales. Tabla 1. IEEE-STD-80-2013.

Calibre del conductor de la malla. Para la selección de un correcto calibre para el conductor de la malla de tierra se debe tomar en cuenta que además de la corrosión el conductor de la malla también sufrirá un esfuerzo mecánico y térmico. A continuación se muestran las fórmulas para obtener el calibre del conductor.

$$A_{mm^2} = I * \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP * 10^4}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2.4)$$

Donde:

A_{mm^2} es el área del conductor en mm²

I es la corriente de falla en kA

TCAP es la capacidad térmica por unidad de volumen

T_m es la temperatura máxima permitida en °C

T_r es la temperatura de referencia para las constantes de material en °C

- T_a es la temperatura ambiente en °C
 t_c es el tiempo de la falla en segundos.
 ρ_r es la resistividad del conductor a la temperatura de referencia T_r
 K_0 es $1/\alpha_0$ o $(1/\alpha_r) - T_r$ en °C
 α_r es el coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de referencia T_r .

De donde la tabla 1 de la IEEE- STD-80-2013 (antes mencionada) nos proporciona varios de estos valores. Si el tamaño del conductor se da en Kcmil ($A_{mm^2} \times 1.974 = A_{kcmil}$). La ecuación anterior se convierte en:

$$A_{kcmil} = I * \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (2.5)$$

También podemos usar las formulas simplificadas para calcular el calibre del conductor utilizando la tabla 2 de constantes de materiales. A continuación se muestra la formula simplificada para obtener el área en mm².

$$A_{mm^2} = \frac{I * K_f * \sqrt{t_c}}{1.97352} \quad (2.6)$$

Para obtener el área del conductor en Kcmil se puede utilizar la siguiente fórmula simplificada.

$$A_{Kcmil} = I * K_f * \sqrt{t_c} \quad (2.7)$$

Donde

- I es la corriente de falla a tierra
 t_c es el tiempo de duración de la falla.
 K_f es una constante para diversos materiales dada en la Tabla 2 de la IEEE-STD-80-2013 en los diferentes valores de T_m .

Tabla 2 – Constante de Materiales

Material	Conductividad (%)	T_m^a (°C)	K_f
Cobre, recocido suave	100.0	1083	7.00
Cobre, comercial duro	97.0	1084	7.06
Cobre, comercial duro	97.0	250	11.78
Alambre de acero revestido de cobre	40.0	1084	10.45
Alambre de acero revestido de cobre	30.0	1084	12.06
Varilla de acero revestido de cobre	17.0	1084	14.64
Alambre de acero revestido de aluminio	20.3	657	17.26
Acero, 1020	10.8	1510	18.39
Varilla de acero inoxidable	9.8	1400	14.72
Varilla de acero galvanizada	8.6	419	28.96
Acero inoxidable, 304	2.4	1400	30.05

Tabla 2.4. Constante de materiales. Tabla 2. IEEE-STD-80-2013.

Aspectos adicionales en el dimensionamiento del conductor. Aun cuando el tamaño del conductor seleccionado es correcto y cumpla con los requisitos de prueba, es prudente elegir un tamaño mayor del conductor para compensar la reducción gradual de la sección del conductor durante la vida de diseño de la instalación donde el ambiente del suelo tiende a fomentar la corrosión.

Las conexiones bajantes del equipo a la cuadrícula pueden estar sometidas a la corriente total de falla en la red, mientras que la cuadrícula divide esta corriente de manera que cada segmento de conductor en la red solamente se somete a una fracción de la corriente total de falla. Por lo tanto, los conductores bajantes pueden tener que ser más grande que los conductores de la cuadrícula o pueden ser múltiples desde los equipos a la cuadrícula para tener una corriente admisible suficiente a la corriente de falla total.

Los conductores de toma de tierra que conducen la corriente del rayo rara vez requieren consideración adicional. El tamaño del conductor, que se selecciona de acuerdo a los requisitos de corriente de falla, por lo general también resulta adecuado para llevar los impulsos de corto tiempo causados por un rayo.

En la práctica los requerimientos de confiabilidad mecánica determinarán el calibre mínimo del conductor. Las primeras guías de la AIEE e IEEE recomiendan un calibre mínimo de 1/0 y 2/0 AWG para conductor de cobre con juntas soldadas y atornilladas respectivamente.

Un reciente estudio realizado a nivel internacional ha mostrado que cerca del 66% de las utilidades cuestionadas usan conductor de calibre 4/0 AWG para la construcción de la red y aproximadamente el 16% restante prefiere usar conductores tan grandes como 500 Kcmil.

Aunque en muchos casos el calibre del conductor esté sobrado, se ha justificado su instalación para darle mayor resistencia mecánica y evitar su afectación por efectos electromecánicos o de corrosión. Por otro lado cerca del 25% de las utilidades reportan el uso de conductores de cobre tan pequeños como 1/0 AWG sin presentar problemas mecánicos. [7]

2.2.3 Conectores

Los conectores son los elementos que se utilizan para unir los conductores de puesta a tierra, a los electrodos con los conductores de la malla y para la conexión de la puesta a tierra de equipos al sistema de puesta a tierra. La NOM-001-SEDE-2012 en su artículo 250-8. Establece los métodos permitidos para conectar los conductores de puesta a tierra, los conductores del electrodo de puesta a tierra y los puentes de unión, que son los siguientes.

- (1) Conectores a presión.
- (2) Barras terminales.
- (3) Conectores a presión aprobados para puesta a tierra de equipos y para unión.
- (4) Procesos de soldadura exotérmica.
- (5) Abrazaderas tipo tornillo que enrosquen por lo menos dos hilos o que se aseguren con una tuerca.

- (6) Pijas que entren cuando menos dos hilos en la envolvente.
- (7) Conexiones que son parte de un ensamble.
- (8) Otros medios aprobados.

Dejando en claro que se pueden usar dispositivos de conexión o accesorios que dependan únicamente de soldadura de bajo punto de fusión.

Características de los conectores. El conector será de cobre o aleación de cobre y debe ser apto para usar a la intemperie y además debe tener un buen agarre sobre los conductores después de ser instalado, de acuerdo a las instrucciones del fabricante, de tal forma que no presente incrementos de resistencia y temperaturas por encima de los límites establecidos para cada tipo de conector, además debe presentar un acabado uniforme, las superficies deben estar exentas de grietas, de aristas agudas o de rebabas que puedan dañar los conductores al ser instalados.

El cuerpo del conector debe tener una forma geométrica tal que garantice la fuerza de compresión aplicada en la superficie de contacto. El conector debe ser dúctil de tal forma que sea fácil de realizar los esfuerzos de compresión. El conector debe sujetar permanentemente los cables o conductores sin deformarlos de tal manera que estén dentro de los límites de elasticidad del material.

El diseño del conector debe garantizar su correcto funcionamiento, para el rango de calibres de conductores y para todas las herramientas mecánicas de compresión manual y automática, además deberá tener identificado las zonas o puntos donde se le realiza la compresión, también deberá indicar el tipo de dados y el número de compresiones. Y así eliminar la necesidad de realizar reaprietes u otro tipo de mantenimiento preventivo o periódico.

Generalmente los tipos de conexión más usados son los conectores a presión y los métodos soldables. A continuación se describirán los conectores más comerciales.

Conector tipo cuña. El conector de cuña tipo “C” está compuesto por un cuerpo en forma “C”, un alma para contacto y ajuste en forma de cuña que le aplica a los conductores la fuerza de apriete calibrada para no ocasionar deformaciones permanentes en los mismos. El elemento en C es fabricado en acero inoxidable y la cuña en aleación de cobre.

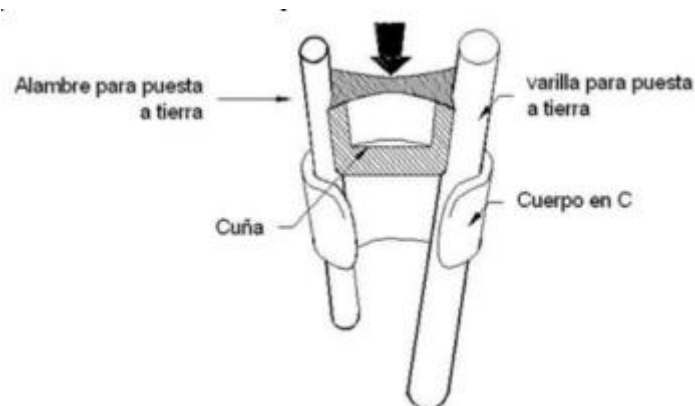


Fig. 2.10 Conector tipo cuña, modo de ensamble.

Las dimensiones del conductor para un conector tipo cuña para varilla 14mm (5/8”), van desde 8.37 mm² (8 AWG) hasta 33,6 mm² (2 AWG). Estos conectores mediante presión mantienen en contacto a los conductores

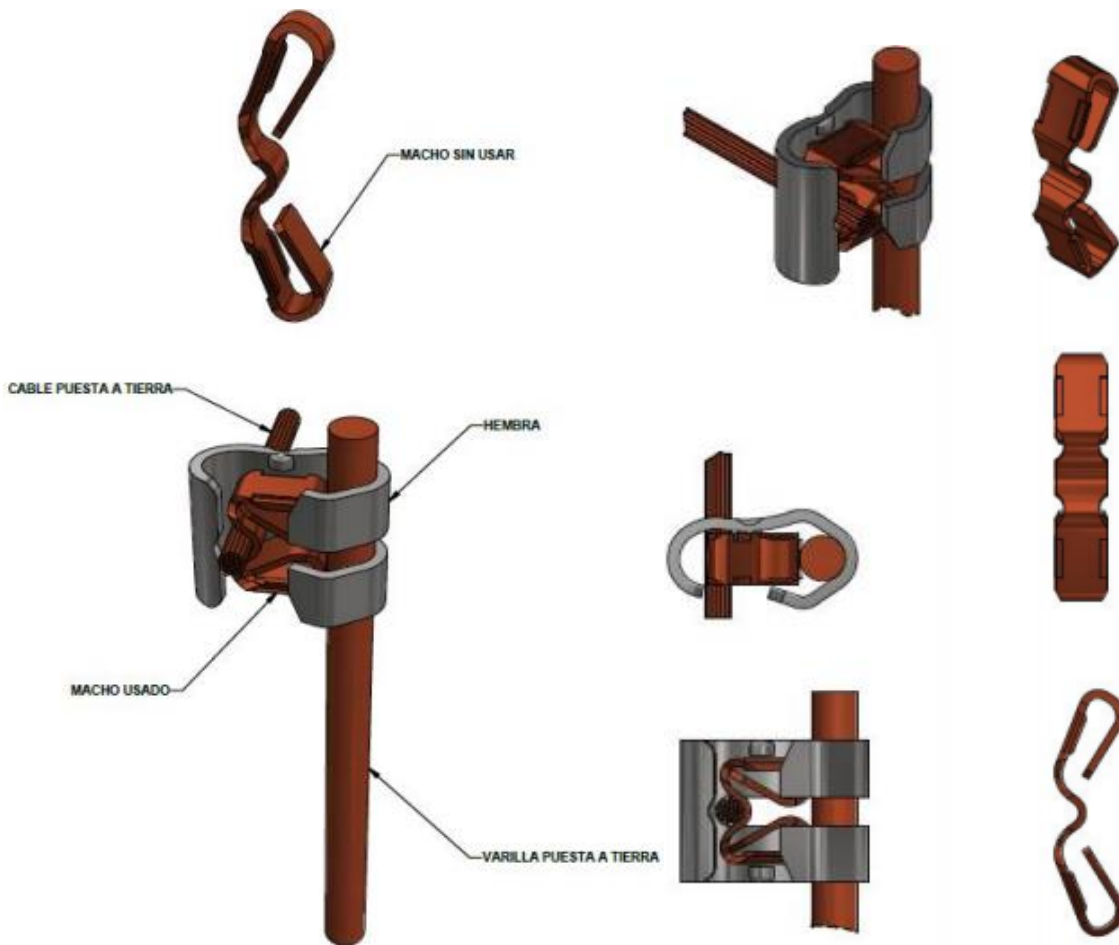


Fig. 2.11 Conector transversal elástico Tipo Cuña.

Conector tipo tornillo con arandela de presión. Son fabricados de cobre o alguna aleación con un mínimo de 80% de cobre, con una alta resistencia mecánica y a la corrosión. El perno tendrá una cabeza hexagonal que permita aplicar la torsión de apriete con una llave tipo copa o de estría. Deberá tener un par de apriete máximo de 16.9 N-m (150 lbf-in) al tornillo de sujeción, de tal manera que no se afloje cuando esté sometido a los efectos de una descarga atmosférica o del enterramiento.



Fig. 2.12 Conector tipo tornillo con arandela.

Conector tipo compresión. Este tipo de conectores está destinado a la derivación de conductores de cobre o acero cobreado, tiene la característica de poseer alta conductividad eléctrica y que la conexión es por compresión. Su aplicación es para las derivaciones en las redes de puesta tierra en general. Son fabricados en cobre electrolítico puro, con conductividad de 100% IACS lo que le garantiza a este tipo de conexión un efecto Joule mucho menor durante el paso de una determinada corriente eléctrica.

Los conectores de compresión se fabrican en una sola pieza y mediante herramientas especiales se colocan para la unión de conductores. Los conectores a presión deberán diseñarse para una temperatura máxima de 250 a 350° C.

Los conectores de compresión dan mayor garantía de buen contacto y son ampliamente utilizados para interconectar la red de puesta a tierra, así como para la puesta a tierra de las estructuras metálicas y en general de las partes metálicas expuestas de los equipos eléctricos de la subestación. Los conectores a presión son más económicos, seguros y fáciles de instalar por lo que se usan con mucha frecuencia.



Fig. 2.13 Conectores de compresión tipo C, G y E.

Conector con tornillo en “U”. Son fabricados de cobre o aleación de cobre, con un mínimo de 80% de cobre, con una alta resistencia mecánica a la corrosión. Se componen de pernos de bronce al silicio o acero inoxidable, arandelas de bloqueo y tuercas. Las dimensiones de estos conectores serán acordes para sujetar varilla de puesta a tierra de 5/8” y conductores entre calibre 4 y 2/0 AWG, según se requiera. Su par de apriete máximo es de 16.9 N-m (150 lbf-in) para cada tuerca de sujeción.

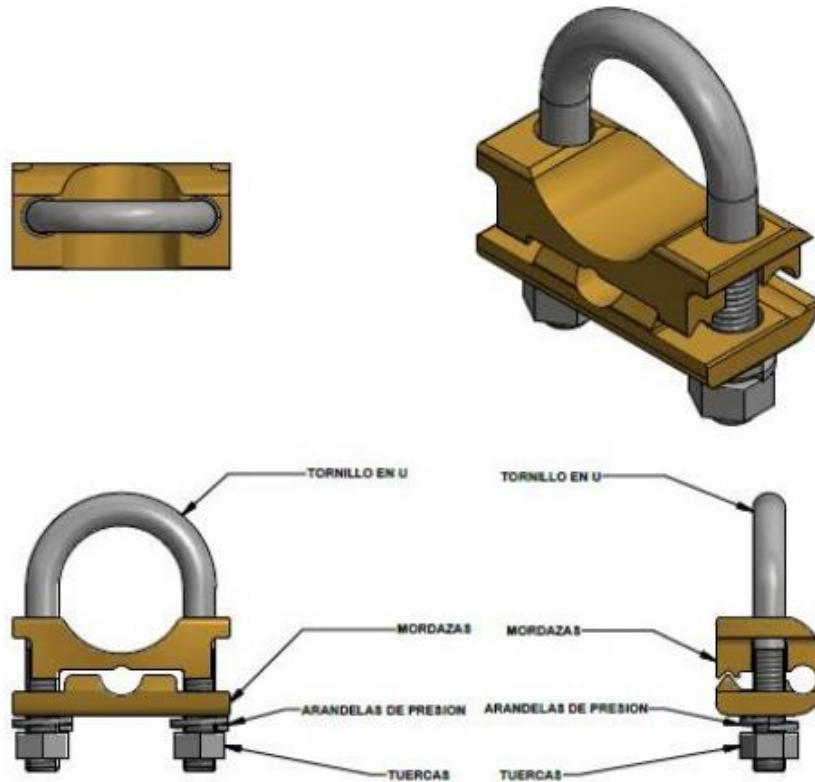


Fig. 2.14 Conector con tornillo en “U”

Conector soldable. Los conectores soldables o exotérmicos son aquellos que mediante una reacción química exotérmica se soldan los conductores y el conector en una conexión molecular. Estos conectores deben seleccionarse con el mismo criterio que con el que se seleccionan los conductores y deben de cumplir con las siguientes propiedades.

- Capacidad de conducción de corriente suficiente para soportar las severas condiciones de magnitud y duración de la corriente de falla.
- Resistencia a la corrosión que retarde su deterioro en el ambiente que se instale.
- Conductividad eléctrica que reduzca efectivamente las diferencias de tensiones locales de la red de puesta a tierra.
- Rigidez mecánica robusta para resistir los esfuerzos electromecánicos que pueden provocar los daños físicos de la red.
- Capacidad térmica que permita mantener una temperatura por debajo del conductor y así reducir el efecto de calentamiento.

Estos conectores se emplean mucho por cuestiones de ahorro de tiempo y costo obtenido al realizar este proceso de conexión. Además proporcionar una conexión permanente y

eliminan la resistencia de contacto, están libres de corrosión y permiten el uso de conductores de menor calibre, debido a su máxima limitación de temperatura (450°C).

Algunas de las propiedades que se obtienen en el uso de este tipo de conexión son las siguientes. La conductividad es al menos igual que la de los propios conductores. Como la sección de la soldadura es siempre mayor que la sección de los conductores, las sobrecargas y fuertes intensidades no tienen efecto sobre la conexión. Y por otra parte se ha demostrado que los conductores se funden antes que la soldadura. El tiempo de la utilidad es mayor ya que no se produce una fractura de la conexión por que no existen esfuerzos mecánicos.



Fig. 2.15 Paquete de conexión exotérmica.

Para el proceso de conexión por soldadura exotérmica no es necesaria una fuente de energía externa. Al encender una chispa sobre el polvo ignito, se inicia una reacción química, donde el óxido de cobre es reducido por el metal aluminio (reacción exotérmica) produciendo cobre fundido a unos 1400° C y escoria de aluminio. Este cobre fluye sobre los conductores soldándolos en la forma del molde de grafito, obteniendo una unión metálica sólida en unos cuantos segundos.

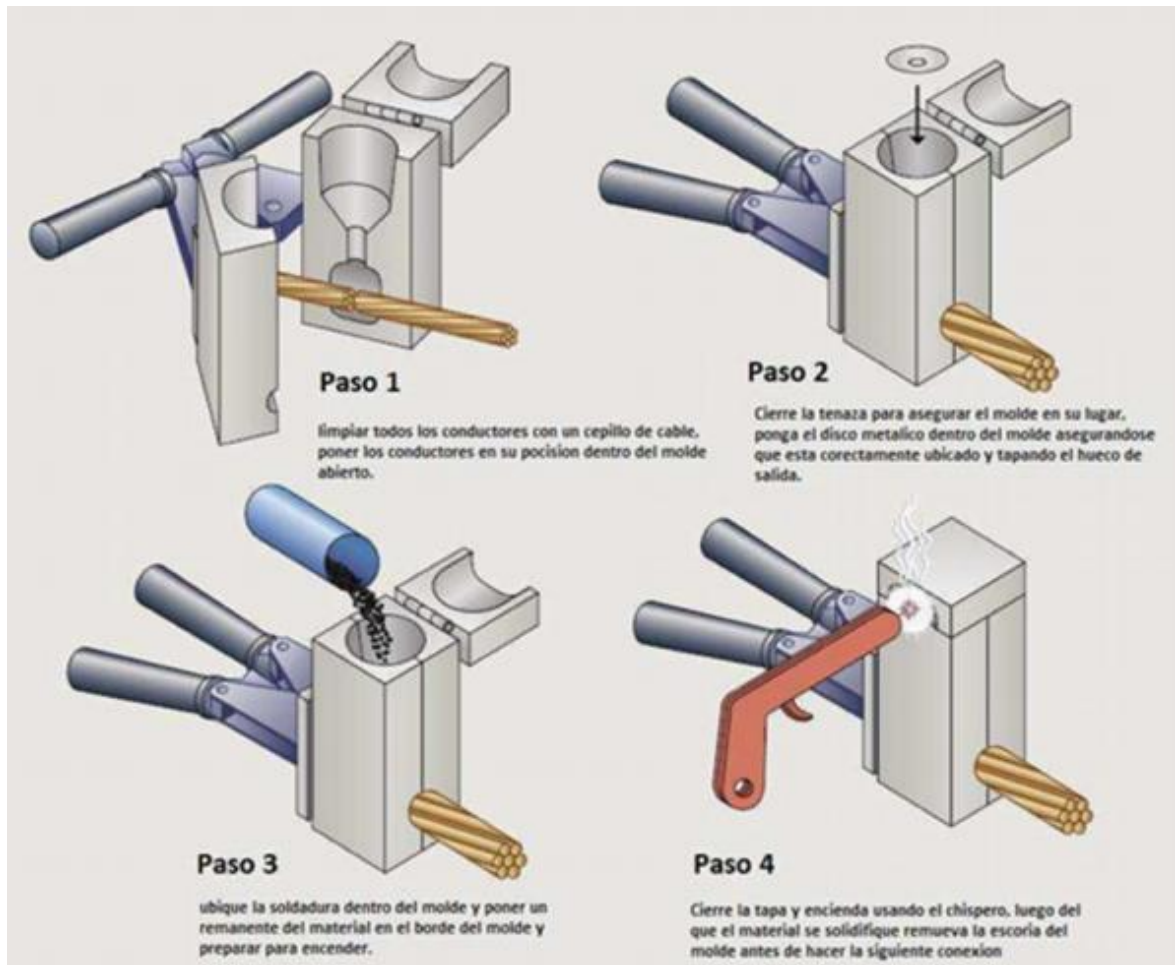


Fig. 2.16 Proceso de conexión por soldadura exotérmica.

Es importante decir que para el proceso el molde, la tenaza y los conductores deben de estar limpios y que una buena unión depende del ajuste del molde a los conductores, además de una correcta instalación de las herramientas para su uso. Además, aun cuando el proceso es simple es importante que los operadores dispongan de equipo de seguridad como lentes y guantes adecuados.

2.3 Resistividad del terreno.

El tipo de terreno, y las características eléctricas donde se va a montar la malla constituye una parte importante a estudiar antes de diseñar, como sabemos la tierra es el elemento encargado de disipar las corrientes de falla que lleguen a través de los electrodos, pero también hay que saber que la tierra tiene una resistencia eléctrica, y es necesaria estudiarla y conocerla.

Existe una gran diversidad de suelos con características tan diferentes que algunos no conducen electricidad, por lo tanto la resistencia del terreno puede ser muy diferente de un punto a otro, aun estando en la misma ubicación. Cuando se tiene un valor de resistencia alto se considera que es un mal conductor o aislante. Sin embargo la mayoría de estos son buenos conductores, especialmente en épocas de lluvia.

La resistividad del terreno depende de la naturaleza química, de la humedad presente, de la temperatura y de otras condiciones. Uno de los métodos para conocer la resistividad del terreno es de forma empírica mediante tablas conociendo el tipo de terreno. Aunque no se recomienda utilizarlas, puesto que no se puede pensar en un tratamiento analítico del problema sin antes considerar un gran número de variables y posibilidades, las cuales dadas las diversas cualidades del terreno sean desfavorables.

Siempre se aconseja efectuar las mediciones en campo para corroborar estos valores de resistencia propuestos por tablas, según sea el tipo de terreno y las condiciones donde se planea diseñar y montar una subestación. La resistividad del terreno se denota ρ y se mide en Ω -m. A continuación se muestra una tabla con valores típicos de resistividad de diferentes tipos de suelos. Estos valores estimativos pueden usarse con buen criterio, sólo en caso de la imposibilidad de conocer la resistividad real mediante mediciones en el terreno.

NATURALEZA DEL TERRENO	RESISTIVIDAD EN (Ω - m)
Terrenos pantanosos.	De algunas unidades a 30
Limo	20 – 100
Humus	10 – 150
Turba húmeda.	5 – 100
Arcilla plástica.	50
Margas y arcillas compactas.	100 – 200
Margas del jurásico.	30 – 40
Arena arcillosa.	50 – 500
Arena silícea.	200 – 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped.	300 – 500
Suelo pedregoso desnudo.	1500 – 3000
Calizas blandas.	100 – 300
Calizas compactas.	1000 – 5000
Calizas agrietadas.	500 – 1000
Pizarras.	50 – 300
Rocas de mica y cuarzo.	800
Granitos y gres procedentes de alteración.	1500 – 10000
Granitos y gres muy alterados.	100 – 600

Tabla 2.5. Resistividades equivalentes para diferentes tipos de terrenos.

Como se explicó previamente el término “resistividad del terreno” expresado en ohmetro (Ω -m) es una variable básica que afecta la resistencia a tierra de un sistema de electrodos. Pero se encontró que el valor real de la resistividad de la tierra no necesita medirse para verificar la resistencia de tierra del electrodo. Las mediciones de resistividad de tierra pueden emplearse convenientemente para prospecto geofísico. Las mediciones también pueden emplearse para determinar la profundidad de la roca.

Las mediciones de la resistividad de la tierra también son útiles para encontrar la mejor ubicación y profundidad para electrodos de baja resistencia. Tales estudios se realizan, cuando se van a construir unidades eléctricas nuevas tales como: estación generadora, subestación, torre de transmisión y central telefónica. Finalmente, se puede utilizar la resistividad de la tierra para indicar el grado de corrosión que se espera en tuberías subterráneas de agua, petróleo, gas, etc.

2.3.1 Variables que afectan la resistividad del terreno.

Para cualquier tipo de terreno, existen condiciones o factores que pueden variar su resistividad significativamente, y es importante tomarlos en cuenta a la hora de diseñar, algunos de ellos son la humedad, la temperatura, la compactación del suelo, la concentración de sales disueltas y los cambios climáticos en el terreno.

Estratigrafía del terreno. La resistividad del terreno varía tanto en sentido horizontal como en vertical. En general la variación de resistividad en la dirección horizontal es reducida comparada con las dimensiones normales de una puesta a tierra y puede por lo tanto ser despreciada. Los terrenos están formados por diferentes capas de agregados y por lo tanto de distintas resistividades.

Por consiguiente, en los casos prácticos, un terreno puede ser razonablemente representado por un modelo de estratos paralelos a la superficie del suelo, caracterizado cada uno de ellos por su espesor y un valor constante de resistividad. El estrato homogéneo más profundo se considera de espesor infinito. Entonces la resistividad media o aparente será la combinación de las resistividades de todas las capas que componen el terreno.

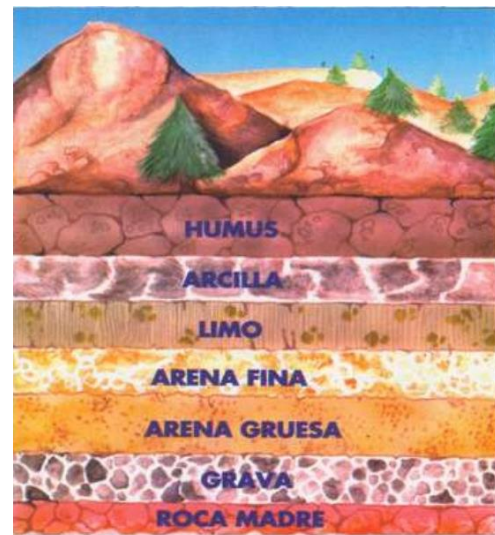
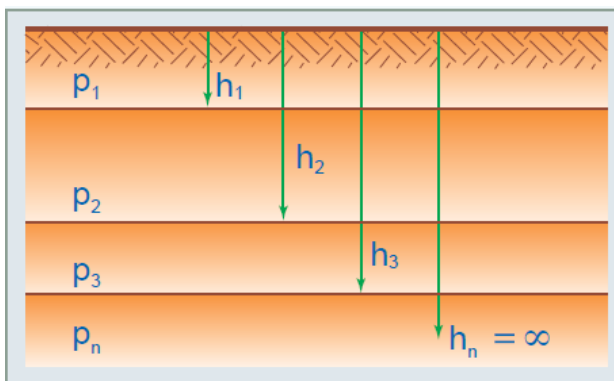


Fig. 2.17 Estratigrafía del terreno.

Humedad. La humedad que posee un terreno determina fuertemente su resistividad. Debido a su estado higrométrico, el agua que contiene o absorbe el terreno es el que influye. Por esto, siempre que se añada agua al terreno disminuirá su resistividad respecto a la que tendría si estuviera seco. Además, el contenido de humedad también depende de los cambios climáticos en las diferentes épocas del año.

En épocas de lluvias, el nivel freático se aproxima a la superficie del terreno, presentando éste una resistividad menor que en el periodo de sequía, en el que dicho nivel se aleja en profundidad de la superficie. Por lo tanto el valor del grado de humedad no es constante, pero tampoco se puede decir que es nulo, ni siquiera en las zonas desérticas donde rara vez hay humedad.

Temperatura. La temperatura del terreno es otro factor importante a considerar, como se explicó arriba un terreno seco es un buen aislador; el aire, el sol y las capas de arena seca de la superficie favorecen mucho esta condición. En general, el grosor de tales capas secas no es muy grande alcanzan entre 10 y 20 centímetros.

Sin embargo para zonas frías donde en invierno el suelo se congela hasta una cierta profundidad, la temperatura toma más importancia. La resistividad crece lentamente a medida que la temperatura disminuye hasta llegar al punto de congelación del agua. Por debajo del punto de congelación la resistividad crece rápidamente al disminuir la temperatura.

La escarcha generalmente tiene una penetración más profunda de entre 50 a 100 centímetros o más dependiendo el estrato. En estos casos el sistema de puesta a tierra debe instalarse por debajo del nivel de congelación si se pretende obtener un valor aceptable de resistividad a lo largo del año. En lugares donde la temperatura disminuye de 20 °C a -10 °C la resistividad puede variar alrededor de 200 veces.

Debido a que la temperatura y la humedad son más estables a mayor distancia de la superficie se concluye que para ser más efectivo al sistema de puesta a tierra en cualquier época del año se deben enterrar profundamente los electrodos. Este es uno de los motivos del porque se entierran a 3m las varillas (electrodos), puesto que cuando se llega a la capa freática la resistencia no solo es baja, sino que también es estable.

Concentración de sales disueltas. La concentración de sales disueltas en el terreno es un factor determinante en la resistividad del mismo. Al existir una mayor concentración de sal en el suelo, éste mejora su conductividad. En forma general, entonces, se puede decir que para mejorar la conductividad de un terreno, incluso si era malo y hacerlo bueno se logra simplemente añadiendo sales

Para comprender este fenómeno, sólo se debe recordar el comportamiento eléctrico del agua. El agua disocia las sales en iones y cationes que se encargan de transportar los electrones por el terreno. En los lugares de lluvias estacionales, hay que tener muy presente estos fenómenos, debido a que en la época de lluvias el terreno presenta un resistividad muy baja (la lluvia disuelve las sales del terreno), mientras que en la época seca la resistividad es muy alta.

Compactación del terreno. La compactación del suelo también influye en la resistividad del terreno, cuanto más compacto se encuentre mejor será la conductividad del terreno. Esto tiene porque cuando se colocan los electrodos de varilla y el conductor de la malla, la vibración al ir enterrando va creando pequeños espacios en entre la varilla y el terreno por lo que después habrá que compactar de nuevo para tener un mejor contacto electrodo-terreno.

Entonces se entiende que cuando la compactación del terreno es grande, la resistividad disminuye. Ya que una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas como las sales contenidas y se logra una mejor conducción a través de la humedad, por ello siempre se procura colocar los electrodos en terrenos muy compactos.

2.4 Medición de la resistividad del terreno.

La medición de la resistividad del terreno se efectúa fundamentalmente para encontrar la profundidad de la roca, o encontrar los puntos óptimos para montar la red de tierras de una subestación eléctrica, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia. Además que esta medición puede indicar el grado de corrosión de tuberías subterráneas. En general, los lugares con baja resistividad tienden a incrementar la corrosión.

Aunque el uso de tablas de estimaciones basadas en la clasificación de suelo puede usarse, cada vez es más necesario realizar esta medición ya que de estas tablas se obtiene únicamente una aproximación de la que puede ser la resistividad real del terreno donde se trabajara. Para obtener valores correctos de esta medición, deberán realizarse varias pruebas de lectura en cierto número de lugares dentro del terreno.

Ya que al ir midiendo en los diferentes puntos se puede encontrar que el terreno no tenga una resistividad uniforme, esto es porque generalmente el suelo tiene varias capas, cada una de ellas con diferentes resistividades. Como regla, el número de lecturas realizadas deben ser tan grandes como las variaciones sean tan grandes, especialmente si algunas de las lecturas tomadas son tan altas que pueden ocasionar posiblemente problemas de seguridad.

Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable el incremento en el intervalo de los espaciamientos de prueba. La idea es que una estimación bastante exacta para grandes espaciamientos fijos pueda ser determinada por extrapolación. Esto es posible porque así como el espaciamiento de la prueba es incrementado, la fuente de corriente de la prueba penetra más y más a áreas distantes, en las direcciones horizontal y vertical, a pesar de la cantidad de trayectorias de corriente que se distorsionan debido a las variaciones de las condiciones del suelo. ([8] ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA; [5] Swett Stein Francisco Javier, 2015).

Ya que existen variaciones tanto en sentido horizontal como vertical en la composición de la tierra, la mayor cantidad de datos posibles que se puedan recopilar en la prueba de medición nos permitirá seleccionar con mayor precisión el modelo de suelo a utilizar en el diseño de nuestro sistema de puesta a tierra.

Para realizar la medición de resistividad del terreno solo se necesita contar con un teluro metro o un megger de tierras debidamente certificado y calibrado, las picas o puntas de prueba que generalmente vienen incluidas con el instrumento de medición, protección adecuada y tener el conocimiento necesario de cualquiera de los siguientes métodos de prueba que se describen a continuación.

2.4.1 Método de Wenner

Este método de medición también llamado método de las cuatro puntas es la técnica más comúnmente utilizada para medir resistividades de terrenos, fue desarrollada por el Doctor Frank Wenner de la U.S. Bureau of Standard en 1915. El método consiste en enterrar cuatro sondas iguales en la tierra a lo largo de una línea recta, a una misma distancia de separación (A), incrustados a una misma profundidad (B).

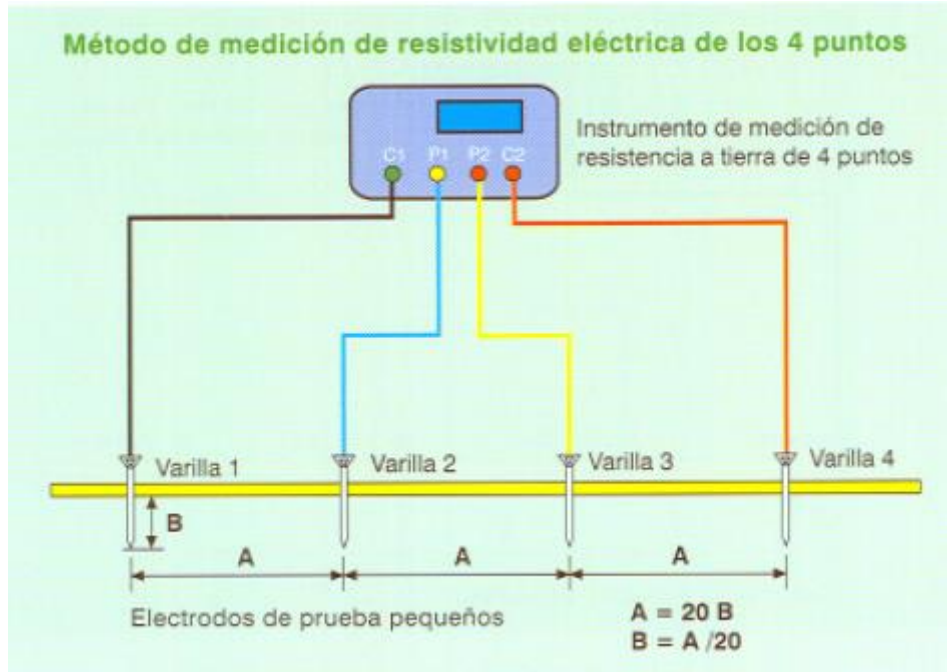


Fig. 2.18 Método de medición de Frank Wenner.

Para que los resultados obtenidos en la medición no sean erróneos se deben respetar estas reglas al momento de hacer la instalación de los electrodos de prueba. La profundidad de enterramiento se obtiene al dividir la distancia de separación entre varillas (A) sobre 20. El voltaje entre los dos electrodos interiores P1 y P2 (potenciales) se mide y se divide por la corriente entre los dos electrodos exteriores C1 y C2 (corrientes) para dar un valor de resistencia (R).

Los datos obtenidos de las lecturas de la medición resultan en un valor de resistencia de tierra (R), este valor nos será útil para conocer el valor de la resistividad del terreno, que se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad (2.8)$$

Donde:

- ρ es la resistividad aparente del terreno en ohm-metro (Ω -m).
- A es la distancia de separación entre los electrodos de prueba.
- R es la resistencia medida por el instrumento de medición.

En casos donde b es pequeña en comparación con a , como es el caso donde las puntas penetran el suelo solo en una corta distancia, la ecuación anterior se puede reducir a

$$\rho = 2\pi AR \quad (2.9)$$

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamiento, para determinar, en su caso, la existencia de diversas capas de terreno. En caso de obtener lecturas muy homogéneas estas deberán promediarse para conocer la resistividad del terreno. En caso de conocer el área para una subestación las mediciones deben hacerse en dirección diagonal iniciando del centro hacia las cuatro esquinas.

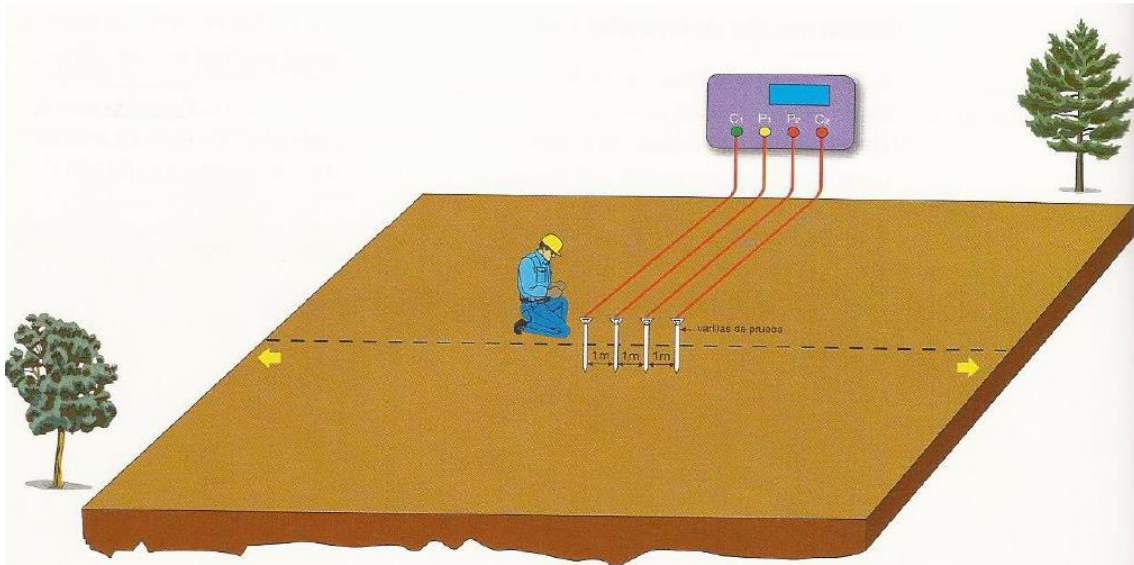


Fig. 2.19 Medición de la resistividad de terreno con varillas de prueba separadas a 1m

2.4.2 Método de Schulmbeger-Palmer.

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud de la tensión entre los 2 electrodos interiores cuando su espaciamiento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamientos muy grandes entre los electrodos de corriente, puede utilizarse el arreglo mostrado:

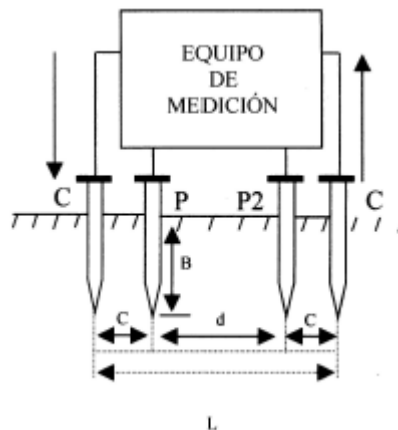


Fig. 2.20 Arreglo de Schulmbeger-Palmer, electrodos no igualmente espaciados.

Este método es una modificación del método de Wenner, también emplea 4 electrodos de prueba para la medición, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial (P1 Y P2) se mantienen constante y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores C1 y C2 (electrodos de corriente). Con el valor obtenido de la resistencia de tierra medida, utilizamos la siguiente expresión para calcular la resistividad del terreno.

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (2.10)$$

Donde:

- ρ es la resistividad aparente del terreno en Ohm-metro
- c es el distanciamiento entre electrodos interiores de prueba
- d es el distanciamiento entre los electrodos interiores y exteriores
- R es la resistencia a tierra medida.

2.4.3 Método de la caída porcentual.

Este método es el más utilizado a la hora de realizar la medición de la resistividad de sistemas de tierras y también es conocido como el método de los 3 puntos o el método del 62%. El método consiste en inducir una corriente conocida que circule por la tierra entrando por un electrodo C2 y saliendo por el electrodo bajo prueba.

La metodología a seguir para realizar la medición de la resistencia de un electrodo de puesta a tierra es la siguiente, primero que nada hay que desenergizar la instalación eléctrica en el punto donde se realizara la medición. Después se desconecta el conductor del electrodo de puesta a tierra que se pondrá bajo prueba y se procede a realizar la medición.

Se deberá colocar el electrodo C2 a la distancia máxima disponible que se tenga para realizar la medición, en línea recta desde el electrodo bajo prueba. La razón por la cual esté método es conocido como del 62% es porque el electrodo C1 se entierra a una distancia del 62% de la distancia total del electrodo C2. La medida de potencial entre los electrodos C2 y C1 se toma como el voltaje V para hallar la resistencia desconocida por medio de la relación V/I. con esta resistencia se procede a calcular la resistividad.

$$\rho = \frac{2\pi LrR}{\ln\left(\frac{8Lr}{d}\right)-1} \quad (2.11)$$

Donde:

- ρ es la resistividad aparente.
- Lr es la longitud del electrodo bajo prueba
- R es la resistencia medida
- d es el diámetro de la varilla.

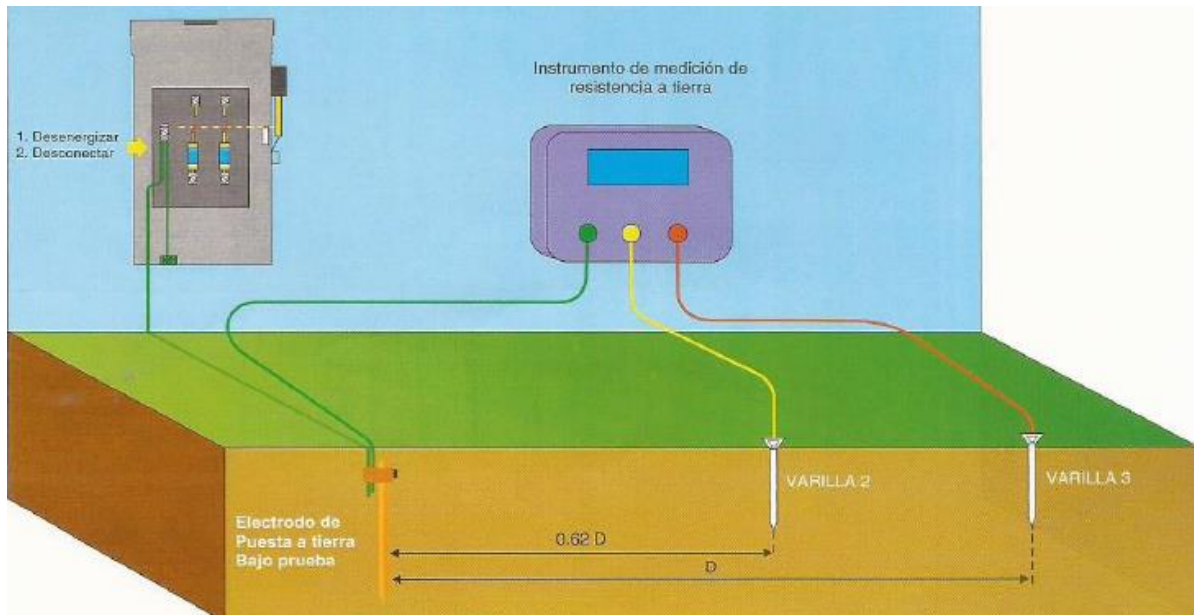


Fig. 2.20 Medición de la resistividad de un sistema de tierra, método de los 3 puntos.

En México la NOM-022-STPS Vigente exige que se realicen mediciones una vez al año de resistencia a tierra de los electrodos de equipos que producen electricidad estática y del sistema de protección contra descargas atmosféricas (Pararrayos). Exigiendo que los electrodos de puesta a tierra de equipos cumplan con máximo 10Ω y para el sistema de pararrayos no mayor a 25Ω

Para el caso de las subestaciones eléctricas, la NOM-001-SEDE 2012 en el art. 921(D) dice que deben efectuarse pruebas periódicamente durante la operación, anotando los registros para comprobar que los valores del sistema de tierra se ajustan a los valores de diseño; asimismo, para comprobar que se conservan las condiciones originales, a través del tiempo y de preferencia en época de estiaje.

La resistencia a tierra total del sistema debe cumplir con los valores indicados en la siguiente tabla.

Resistencia (ohms)	Tensión máxima (kV)	Capacidad máxima del transformador (kVA)
5	mayor que 35	mayor que 250
10	35	mayor que 250
25	35	250

Tabla 2.5. Resistencia a tierra del sistema. Tabla 921-25(B). NOM-001-SEDE-2012.

Una desventaja de este método es que cuando la varilla de prueba es clavada profundamente en el suelo, por lo general pierde el contacto con el suelo debido a la vibración y el acoplamiento de mayor diámetro resulta en valores de más altos resistencia medidos. La regla del 62% es válida sólo para grandes separaciones de los electrodos y el suelo uniforme. En suelos no uniformes, esta suposición puede afectar el resultado de las lecturas.

Los registros de medición de la resistividad deben incluir los datos de temperatura y la información sobre el contenido de humedad del suelo en el momento de la medición. Todos los datos disponibles sobre los objetos conductores enterrados conocidos de la zona estudiada también deben ser registrados.

Interpretación de mediciones de resistividad. Una parte importante y quizás muy difícil es la interpretación de la resistividad aparente obtenida en el campo. El objetivo básico es derivar un modelo de suelo que sea una buena aproximación del suelo real. Como ya se había mencionado la resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad, en función de la estratificación del suelo, además de las variaciones estacionales y las condiciones climáticas.

Hay que reconocer que el modelo de suelo es sólo una aproximación de las condiciones reales y que una coincidencia perfecta es poco probable. Los modelos de resistividad del suelo más comúnmente utilizados son el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas. Los modelos del suelo de dos capas son a menudo una buena aproximación de muchas estructuras del suelo mientras que los modelos del suelo de varias capas pueden ser utilizados para las condiciones del suelo más complejas.

El modelo de suelo uniforme se utiliza solo cuando hay variación moderada en la resistividad aparente. Este modelo de suelo homogéneo en la práctica es muy raro de encontrar ya que por lo general en las mediciones se obtienen resultados con grandes variaciones en la resistividad aparente medida.

Una representación más precisa de las condiciones reales del suelo se puede obtener mediante el uso de un modelo de dos capas. El modelo de dos capas consta de una capa superior de profundidad finita y de una capa inferior de espesor infinita con diferente resistividad. Existen varias técnicas para determinar un modelo de dos capas equivalente de la resistividad aparente obtenida en las pruebas de campo.

En algunos casos la variación de la resistividad del suelo puede presentar mínimos y máximos de tal manera que un modelo de dos capas equivalente puede no producir un modelo preciso. En tales casos, un modelo de suelo diferente, tal como un modelo de múltiples capas puede ser más preciso. Para más información sobre el tema consultar el anexo B.

2.5 Elevaciones de potencial de tierra (GPR).

Una elevación del potencial de tierra (GPR), es el potencial eléctrico máximo que un electrodo de tierra puede alcanzar respecto a un punto de conexión a tierra distante que se supone se encuentra el potencial de tierra remoto. Este voltaje, es igual a la corriente máxima de tierra, multiplicado por la resistencia de la red de tierra, $GPR = I_G * R_g$

Las elevaciones de potencial de tierra comúnmente son causadas por descargas atmosféricas, pero también se presentan durante las condiciones típicas de falla a tierra. En el tiempo que suceden estas fallas el flujo de corriente a tierra producirá gradientes de potencial dentro y alrededor de una subestación.

Si no se toman las precauciones apropiadas en el diseño, los gradientes de potencial máximo a lo largo de la superficie del suelo pueden ser de magnitud suficiente durante las condiciones de falla a tierra para poner en peligro a una persona que se encuentre en esa zona. Es por eso que una baja resistencia a la tierra de la subestación no es, en sí misma, una garantía de seguridad.

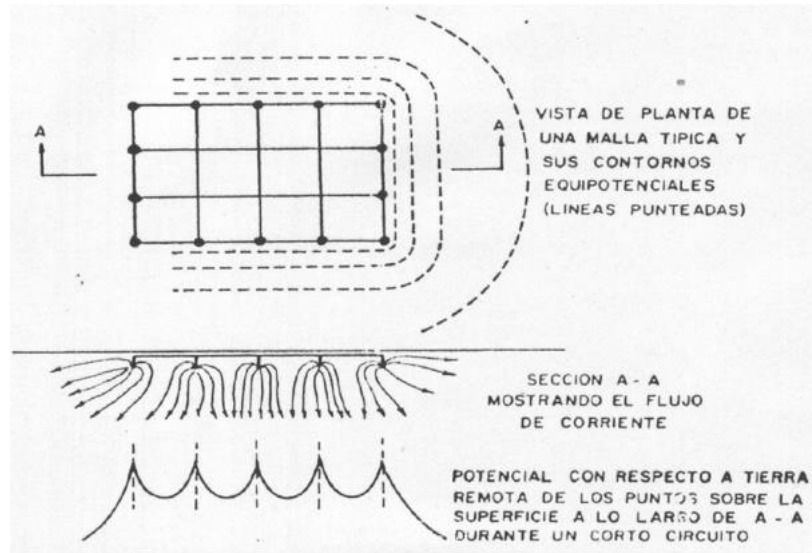


Fig. 2.21 Gradientes de potencial en una malla de tierra.

Entonces es por esto que un sistema de puesta a tierra para subestaciones eléctricas tiene como finalidad proporcionar medios adecuados para llevar las corrientes eléctricas hacia la tierra, en condiciones normales y de fallo sin exceder los límites de operación y del equipo o que afecten negativamente a la continuidad del servicio, logrando así reducir el riesgo de una persona en la proximidad de las instalaciones conectadas a tierra que están expuestas al peligro de choque eléctrico crítico.

La práctica de la puesta a tierra segura se esfuerza para controlar la interacción de dos sistemas de puesta a tierra:

- La tierra intencional, que consiste en electrodos de tierra enterrados a cierta profundidad por debajo de la superficie del suelo.
- La tierra accidental, temporal establecida por una persona expuesta a un gradiente de potencial en las proximidades de una instalación de puesta a tierra.

A menudo se asume que cualquier objeto conectado a tierra puede ser tocado con seguridad. No existe una relación simple entre la resistencia del sistema de tierra en su conjunto y la corriente de choque máxima a la que una persona puede estar expuesta. Por lo tanto, una subestación de relativamente baja resistencia a tierra puede ser peligrosa, mientras que otra subestación con muy alta resistencia puede ser menos peligrosa o puede hacerse menos peligrosa con un diseño cuidadoso.

Si la geometría, la ubicación de los electrodos de tierra, las características locales del suelo y otros factores contribuyen a un gradiente de potencial excesivo en la superficie de la tierra, el sistema de puesta a tierra puede ser insuficiente a pesar de su capacidad

para llevar la corriente de falla en magnitudes y duraciones permitidas por los relés de protección.

Efecto de una capa superficial (ρ_s). Una capa de material de alta resistividad, como puede ser grava o roca, a menudo se distribuye en la superficie de la tierra arriba de la red de mallas del sistema de puesta a tierra con un espesor (h_s) de 0.08 m a 0.15 m para incrementar la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación.

La profundidad superficial relativa del material superficial, comparada con el radio equivalente de los pies, excluye la suposición de una resistividad uniforme en la dirección vertical cuando se calcula la resistencia de las personas. Para una persona en el área de la subestación, se puede asumir el material superficial de extensión ilimitada en dirección lateral.

La corriente a través del cuerpo se disminuirá considerablemente con la adición del material aislante por la gran resistencia de contacto entre la tierra y los pies, esta reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo y del material superficial, así como del grosor de dicho material superficial.

La siguiente ecuación se utiliza para calcular el factor de disminución de la capa superficial C_S , el cual es un factor correctivo para calcular la resistencia efectiva de los pies en la presencia de una capa superficial h_s con grosor infinito.

$$C_S = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (2.12)$$

Donde

C_S es el factor de disminución de la capa superficial

P es la resistividad aparente del terreno

ρ_s es la resistividad del material de la capa superficial.

2.6 Tensiones eléctricas en el sistema de puesta a tierra.

Cuando una intensidad de corriente de falla corre por el terreno se origina una serie de caídas de tensión a lo largo de la malla de puesta a tierra, esto al suponer una resistividad homogénea del terreno lo cual origina una superficie equipotencial. Debido a esta superficie equipotencial creada, el o los electrodos conectados a la malla tomarán el valor de la superficie equipotencial a la que están conectados.

Al ir vareando la superficie correspondiente a cada electrodo en la malla el área que afecta la corriente de falla se vuelve cada vez mayor, por lo tanto el valor de la resistividad crecerá proporcionalmente como crece el área de la superficie equipotencial que se considera para cada electrodo, con lo que se llega a la conclusión de que a cierta distancia del electrodo las caídas de tensión generadas por la corriente de falla y la resistividad del terreno no serán apreciables.

Esto desde un punto de vista práctico ya que físicamente las caídas de tensión se darán a través de toda la superficie por la cual fluya la corriente de falla; pero pueden ser despreciables después de cierta distancia.

El potencial más elevado será el del electrodo ya que al aumentar el área de la superficie las caídas de tensión van disminuyendo, en el electrodo se encontrara el valor de potencial de tierra o potencial absoluto, mismo potencial que tomaran las masas metálicas conectadas a estos.

Tensión de paso. En una subestación eléctrica puede haber personas alrededor, ya sean personas transitando, personas laborando, realizando algún tipo de mantenimiento, etc., en el momento de que ocurre una falla y se originen diferencias de potencial en toda la superficie de la red de puesta a tierra.

Una persona que pise dos puntos diferentes se verá expuesta a una tensión de paso por la diferencia de potencial que hay entre sus dos pies en una distancia de 1 metro, ya que estos representarían el cierre de un circuito eléctrico como se muestra a continuación.

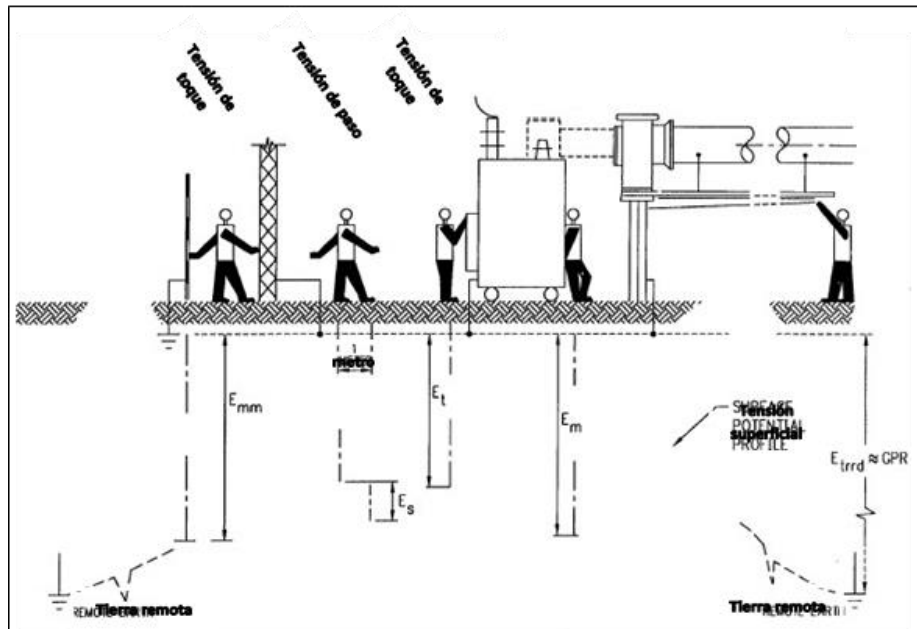


Fig. 2.22 Voltajes presentes en una subestación causados por una falla eléctrica

La seguridad de una persona depende de la prevención de la cantidad crítica de energía de choque sea absorbida antes de que la falla se despeje y el sistema se desenergice. El voltaje máximo de conducción de cualquier circuito accidental no debe exceder los límites definidos de la siguiente manera.

$$E_{PASO} = (R_B + 2R_F) * I_B \quad (2.13)$$

Para personas de 50 kg

$$E_{PASO50kg} = (1000 + 6C_S\rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{T_S}} \quad (2.14)$$

Para personas de 70 kg

$$E_{PASO70kg} = (1000 + 6C_S\rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{T_S}} \quad (2.15)$$

Donde

E_{PASO} es el voltaje de paso tolerable por una persona en V

C_S es el factor de disminución de la capa superficial indicada en la ecuación 2.12

ρ_S es la resistividad del material superficial en Ω -m

T_S es la duración de la corriente de choque en segundos

Al igual que sucede al dar un paso, en el momento que se produce una falla eléctrica, como toda la instalación eléctrica está conectada a la malla de la subestación eléctrica, estos potenciales estarán presentes en las estructuras ya que el metal es un material conductor de electricidad, entonces estas estructuras se comportaran como electrodos.

De modo que estas masas metálicas adquirirán el mismo valor que el de la corriente de falla; y debido a esta condición si una persona en un punto de la subestación llegará a tocar con la mano a alguna de estas masas metálicas y se genere una diferencia de potencial, entonces una tensión llamada voltaje de Toque recorrerá el cuerpo de la persona desde la mano hasta el pie.

Este voltaje de toque puede llegar a ser igual de peligroso que el voltaje de paso por lo cual se toma como un parámetro importante a considerar para el diseño de mallas de tierras. A continuación se define la ecuación para conocer el valor de voltaje de toque tolerable por una persona.

$$E_{TOQUE} = \left(R_B + \frac{R_F}{2} \right) * I_B \quad (2.16)$$

Para personas de 50 kg

$$E_{TOQUE50kg} = (1000 + 1.5C_S\rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{T_S}} \quad (2.17)$$

Para personas de 70 kg

$$E_{TOQUE70kg} = (1000 + 1.5C_S\rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{T_S}} \quad (2.18)$$

Donde

E_{TOQUE} es el voltaje de toque tolerable por una persona en V.

C_S es el factor de disminución de la capa superficial indicada en la ecuación 2.12

ρ_S es la resistividad del material superficial en Ω -m

T_S es la duración de la corriente de choque en segundos.

Las ecuaciones anteriores definen los valores máximos tolerables por el cuerpo humano tanto a las tensiones de toque como a las tensiones de paso, pero para que el diseño sea seguro y pueda llevarse a cabo su construcción los valores reales de la malla de puesta a tierra siempre deben ser menores a los valores máximos tolerables.

3. Desarrollo

3.1 Diseño de una red de mallas de tierra para una subestación comercial de 75 kva.

A continuación se presenta un diseño propuesto de una red de mallas de tierra para una subestación comercial de 75 kva. Este cálculo toma como base la norma IEEE STD-80-2013 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" y cumple con las especificaciones de la NOM-001-SEDE-2012.

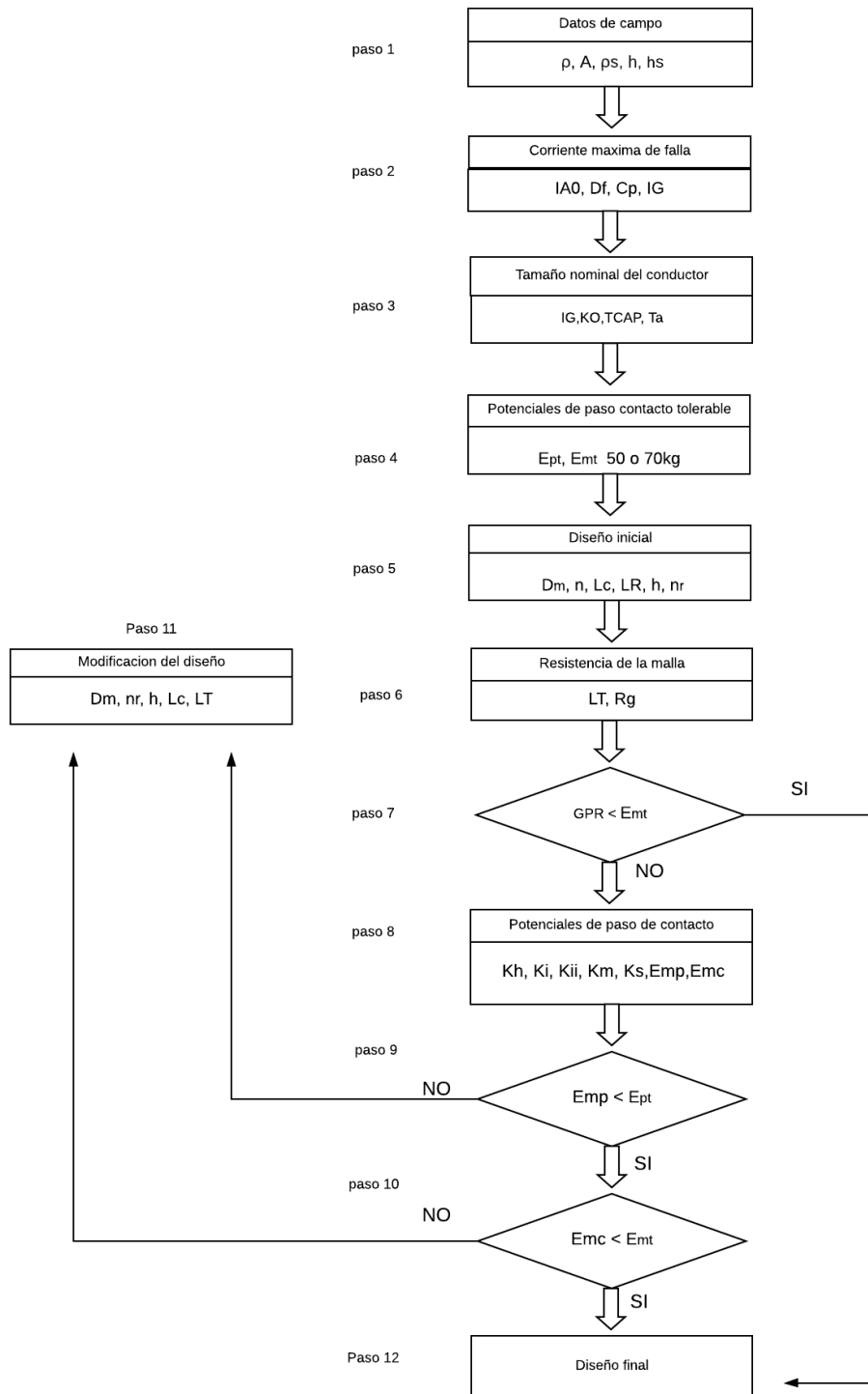


Fig. 3.1 Diagrama de bloques de procedimiento de diseño de mallas.

3.1.1 Cálculo de la corriente de falla monofásica a tierra.

Como primer paso antes de comenzar a diseñar es importante calcular la corriente de falla monofásica a tierra que circulara en la malla, para esto se solicitó el estudio de cortocircuito del punto de conexión de la ubicación donde se propone instalar este diseño. Ver anexo C.

Los datos proporcionados por CFE fueron en amperes (corriente), por lo que para poder realizar el cálculo de la corriente de falla monofásica a tierra se deben convertir estas corrientes de cortocircuito a potencia de cortocircuito.

Paso 1. Obtención de las potencias de cortocircuito.

Datos:

$$I_{cc1\phi} = 2,769.91 \text{ A}$$

$$I_{cc3\phi} = 3,949.95 \text{ A}$$

$$V_{L-L} = 13,200 \text{ V}$$

$$V_{L-N} = 7621 \text{ V}$$

$$F.P. = 0.9$$

$$PCC_{3\phi} = (I_{3\phi}) (V_{L-L}) (FP) (\sqrt{3})$$

$$PCC_{3\phi} = (3,949.95 \text{ A}) (13,200 \text{ V}) (0.9) (\sqrt{3})$$

$$PCC_{3\phi} = 81,277,187.357 \text{ W}$$

$$PCC_{3\phi} (MVA) = \frac{PCC_{3\phi}(w)}{\cos \alpha}$$

$$\cos^{-1}(0.9) = 25.8419$$

$$PCC_{3\phi} = \frac{81,277,187.357 \text{ W}}{\cos(25.8419)}$$

$$PCC_{3\phi} = 90,307,960.941 \text{ VA}$$

$$PCC_{3\phi} = \frac{90,307,960.941 \text{ VA}}{1,000,000}$$

$$PCC_{3\phi} = 90.307 \text{ MVA}$$

$$PCC_{1\phi} = (I_{1\phi}) (V_{L-N}) (FP)$$

$$PCC_{1\phi} = (2,769.91 \text{ A}) (7621 \text{ V}) (0.9)$$

$$PCC_{1\phi} = 18,998,535.699 \text{ W}$$

$$PCC_{1\phi} (MVA) = \frac{PCC_{1\phi}(w)}{\cos \alpha}$$

$$PCC_{1\phi} = \frac{18,998,535.699 \text{ W}}{\cos(25.8419)}$$

$$PCC_{1\phi} = 21,109,478.2637 \text{ VA}$$

$$PCC_{1\phi} = \frac{21,109,478.2637 \text{ VA}}{1,000,000}$$

$$PCC_{1\phi} = 21.109 \text{ MVA}$$

Paso 2. Estudio de cortocircuito trifásico método por unidad.

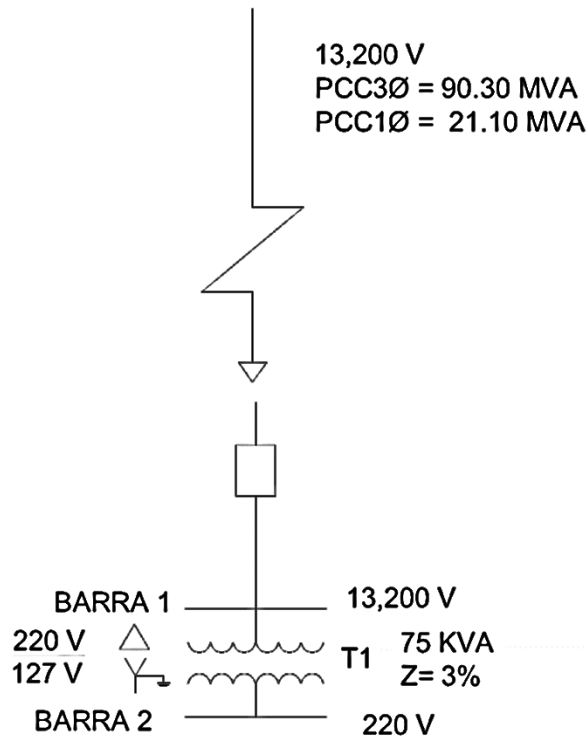


Fig. 3.2 Diagrama unifilar

Se realiza el diagrama unifilar y se obtienen los siguientes datos:

Datos:

$$PCC_{3\phi} = 90.307 \text{ MVA}$$

$$PCC_{1\phi} = 21.109 \text{ MVA}$$

$$\text{Barra 1} = 13,200 \text{ V}$$

$$\text{Trans} = 75 \text{ KVA} - Z= 3\% - 220/127 \text{ V}$$

$$\text{Barra 2} = 220 \text{ V}$$

1. Selección de la potencia base.

$$P_b = \frac{75,000}{1,000,000} = 0.075 \text{ MVA}$$

2. Conversión de las impedancias a base común.

$$X_{red} = \frac{P_b}{PCC_{3\phi}} = \frac{0.075}{90.307 \text{ MVA}}$$

$$X_{red} = 0.00083 \text{ pu}$$

$$X_{trans} = \frac{(Z)(10)(P_b)}{KVA \text{ Trans}}$$

$$X_{trans} = \frac{(3\%)(10)(0.075 \text{ MVA})}{75 \text{ KVA}}$$

$$X_{trans} = 0.03 \text{ Pu}$$

3. Se realiza el diagrama de impedancias.



Fig. 3.2 Diagrama de reactancias.

4. Se resuelve el diagrama y se obtienen la reactancia de secuencia negativa y positiva.

$$Z_{eq} = \frac{(X_{red} \gamma 90^\circ)(X_{trans} \gamma 90^\circ)}{X_{red} j + X_{trans} j}$$

$$Z_{eq} = \frac{(0.00083 \gamma 90^\circ)(0.03 \gamma 90^\circ)}{0.00083 j + 0.03 j}$$

$$Z_{eq} = 0.0008076 \gamma 90^\circ$$

Paso 3. Obtención de la corriente de falla monofásica a tierra.

1. Se calculan las reactancias de secuencia cero.

$$I_a = I_{cc} = \frac{PCC1\emptyset}{(\sqrt{3})(V_{L-L})} = \frac{21,109 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(13.2 \text{ KV})} = 923.2793 \text{ A}$$

$$I_{base} = \frac{Trans}{(\sqrt{3})(V_{L-L})} = \frac{75 \text{ KVA}}{(\sqrt{3})(13.2 \text{ KV})} = 3.2803 \text{ A}$$

$$I_{pu} = \frac{I_a}{I_{base}} = \frac{923.2793 \text{ A}}{3.2803 \text{ A}} = 281.4618 \text{ pu}$$

$$I_{a0} = \frac{281.4618 \text{ pu}}{3} = 93.8206 \text{ pu}$$

2. De la ecuación

$$I_{a0} = \frac{E}{x_1 + x_2 + x_0} \text{ (red)}$$

$$X_0 = \frac{E}{I_{a0}} - (x_1 + x_2)$$

$$X_0 = \frac{1}{93.8206 \text{ pu}} - 2 (0.00083 \text{ pu})$$

$$X_0 = 0.00899864 \text{ pu}$$

3. Calculo de la corriente de falla monofásica a tierra.

$$I_{a0} = \frac{E}{x_1 + x_2 + x_0}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{0.0089986 + 0.0008076 + 0.0008076}$$

$$I_{a0} = 94.2222 \text{ pu}$$

$$3I_{a0} = 3 (94.2222 \text{ pu}) = 282.6666 \text{ pu}$$

$$I_{A0} = (I_{base}) (3I_{a0})$$

$$I_{A0} = (3.2803 \text{ A}) (282.6666 \text{ pu})$$

$$I_{A0} = 927.2312 \text{ A}$$

3.1.2 Medición de la resistividad del terreno.

Se realizó la medición del terreno en las instalaciones del Instituto Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez, lugar donde se está proponiendo el diseño de este proyecto. El dato más importante obtenido en campo para el diseño de mallas de tierras es el valor de la resistividad del terreno, por tal motivo es muy importante realizar esta medición. El equipo y herramientas utilizados fueron:

- Telurometro megger DET4TD2
- 4 varillas de prueba y sus cables
- Marro
- Desarmador
- Flexómetro
- Guantes de protección
- Plumón
- Laptop

El procedimiento para realizar la medición fue el desarrollado por Frank Wenner, mismo que se explicó en el capítulo 2.4 de este reporte, tal como se describe ahí se deben de enterrar 4 varillas de prueba en línea recta a una misma profundidad y a una misma distancia de separación partiendo del centro, las mediciones deberán realizarse en varios puntos del terreno y a diferentes espaciamientos para que los resultados obtenidos sean los correctos.

De esta forma para la primera medición la distancia de separación de las varillas de prueba fue de 1 m, la segunda de 2 m, la tercera de 3 m y la ultima de 4 m de separación, ya que las distancias más comúnmente usadas son a 1 m de separación, y se extiende mucho más dependiendo el área del terreno donde se va a instalar la subestación.

En nuestro caso 4 m fue el límite de las distancias de separación por el tema de la profundidad de enterramiento de las varillas, ya que las varillas de prueba con las que contamos para realizar la medición fueron de 20 cm de largo. Partiendo de esto lo primero que se realizó fue marcar con plumón las medidas a las cuales se iban a enterrar las varillas para las diferentes distancias de cada medición. Esta profundidad de enterramiento se obtiene al dividir la distancia de separación de las varillas entre 20

Las profundidades para enterrar las varillas obtenidas fueron $1/20 = 0.05$ m (5 cm) para la primera medición, $2/20 = 0.1$ m (10 cm) para la segunda medición, $3/20 = 0.15$ m (15 cm) para la tercera medición y para la última medición, la profundidad de enterramiento fue de $4/20 = 0.2$ m (20 cm).

Es importante conocer la profundidad a la cual se van a enterrar las varillas de prueba para cada una de las distancias de separación de cada medición, ya que un error común al realizar las mediciones utilizando este método, es que algunos ingenieros al realizar la prueba entierran toda la varilla desde la primera medición, y por consecuencia así lo hacen sucesivamente para el resto de las mediciones que realizan, provocando que las lecturas tomadas sean erróneas desde la primera medición.

Una vez que se conoce el área que va a ocupar la malla, se procede a realizar la medición de la resistividad del terreno en donde se planea construirla; lo primero que se realizó fue ubicar el centro, y se delimitó enterrando un desarmador que nos sirvió de referencia para todo el proceso de medición.



Fig. 3.3 Determinación del centro del área de medición.

A partir de ese centro, se comienza a medir la primera distancia de separación de 1 m entre las varillas de prueba y se comienzan a enterrar las varillas de prueba una por una respetando la distancia de espaciamiento y la profundidad de enterramiento



Fig. 3.4 Medición y colocación del primer electrodo de prueba.

Este proceso se hace para las 4 varillas de prueba, de modo que todas quedan enterradas a la misma profundidad (5 cm) y a la misma distancia de separación (1 m), para realizar nuestra primera medición.



Fig. 3.5 Electrodo enterrados a 5 cm y espaciados a 1 m para realizar la primera medición

Lo siguiente es conectar los cables del teluometro a las 4 varillas de prueba ya enterradas, esto se hace respetando la continuidad de las varillas, es decir el primer cable del equipo de prueba se conecta con la primer varilla, el segundo cable con la segunda varilla y así sucesivamente, procurando dejar completamente extendidos los cables y verificando que no presenten nudos.



Fig. 3.5 Electrodo enterrados a 5 cm y espaciados a 1 m para realizar la primera medición

Una vez realizado lo anterior se procede a tomar la lectura de la primera medición. Para esto solo se debe encender el equipo de prueba, colocar la perilla en la posición que dice 4p que significa que tomara lectura de 4 puntas y presionar el botón “Test”.



Fig. 3.6 Lectura capturada de la primera prueba de medición realizada..

Este valor medido por el equipo de medición es un valor de resistencia del terreno, por lo que para conocer el valor de la resistividad aparente del terreno, cada valor de las lecturas realizadas de deberán usar en la siguiente fórmula $\rho = 2\pi AR$ donde A es la distancia de separación de las varillas de prueba y R es el valor de resistencia entregado por el equipo de medición.

Para realizar la segunda medición el procedimiento fue el mismo, primero se desconectó el equipo de medición de las varillas prueba y estas se desenterraron del suelo, y nuevamente partiendo del centro se procedió a medir la nueva distancia de separación entre las varillas (2 m), y se procedió a enterrar la primer varilla pero esta vez a una profundidad de 10 cm, tal como se había calculado.

Después se volvió a medir, se enterró la segunda varilla y se hizo lo mismo con las demás. Habiendo enterrado nuevamente todas las varillas, se conectaron los cables del equipo de medición a ellas de forma ordenada, a modo que la secuencia de los cables se conecten en la misma secuencia de las varillas, tratando de dejar los cables extendidos, cuidando que no se hicieran nudos y así realizar la segunda medición y tomar lectura.



Fig. 3.7 Procedimiento seguido para la realización de las siguientes pruebas de medición.

Para las siguientes dos mediciones el procedimiento fue el mismo, terminado las cuatro mediciones de la primer prueba, se procedió a realizar una segunda prueba partiendo del centro nuevamente pero ahora en dirección perpendicular a la anterior, de modo de que se dibujara una cruz imaginaria intersectándose en el centro, las dimensiones de separación entre conductores fueron las mismas y por lo tanto también las profundidades de enterramiento de las varillas.

En total se realizaron 2 pruebas con 4 mediciones cada una y las lecturas estas mediciones realizadas se capturaron en el software PowerDB 10, software sin costo que permite el uso de formularios de prueba estándar con instrumentos Megger. PowerDB fue diseñado por la marca Megger para la administración de datos de prueba de aceptación y mantenimiento.

Mediante este software se obtuvieron los valores de resistividad del terreno para cada medición, logrando así omitir el cálculo para la obtención de cada una de estas resistividades. Consultar anexo D para ver a detalle el formulario para el informe de medición de resistividad del terreno.

Las resistividades obtenidas fueron las siguientes:

Identificación de prueba	Distancia entre electrodos (metros)	Distancia entre electrodos (centímetros)	Profundidad de enterramiento (centímetros)	Resistencia del suelo (ohms)	Resistividad del terreno (ohms-centímetro)
A1	1	100	5	1.05	659.734
A2	2	200	10	0.37	464.956
A3	3	300	15	0.26	490.088
A4	4	400	20	0.23	578.053
B1	1	100	5	1.08	678.584
B2	2	200	10	0.35	439.823
B3	3	300	15	0.25	471.239
B4	4	400	20	0.22	552.92

Como se puede apreciar en la tabla anterior los valores fueron más o menos uniformes por lo cual para la interpretación de los resultados obtenidos se propuso un modelo de suelo una sola capa puesto que las lecturas tomadas fueron homogéneas por lo cual se aplica la siguiente fórmula para conocer el valor promedio de resistividad de terreno aparente.

$$\rho p = \frac{\rho a(1) + \rho a(2) + \rho a(3) + K + \rho a(n)}{n}$$

Donde

ρp es la resistividad aparente promedio (Ω -m)
 $\rho a(1), \rho a(2), \rho a(3) \dots \rho a(n)$ Son los datos de resistividad aparente obtenidos a diferentes espaciamientos por el método de cuatro varillas de pruebas.
 n es el número total de mediciones.

Como los valores de resistividad de terreno obtenidos están en unidades de Ω -cm (ohm-centímetro), se convierten a la unidad Ω -m (ohm-metro) antes de proceder a sustituirlos en la formula.

$$A \frac{659.734}{100} = 6.59 \quad \frac{464.956}{100} = 4.64 \quad \frac{490.088}{100} = 4.90 \quad \frac{578.053}{100} = 5.78$$

$$B \frac{678.584}{100} = 6.78 \quad \frac{439.823}{100} = 4.39 \quad \frac{471.239}{100} = 4.71 \quad \frac{552.92}{100} = 5.52$$

Con los valores de resistividad en Ω -m se calcula la resistividad aparente promedio del terreno.

$$\rho p = \frac{6.59 + 4.64 + 4.90 + 5.78 + 6.78 + 4.39 + 4.71 + 5.52}{8}$$

$$\rho p = 5.41 \Omega\text{-m}$$

Como el valor de resistividad del terreno medido es de 5.41 Ω -m, se utilizara un valor más grande para realizar el diseño propuesto, tomado de valores de tablas a partir del tipo de terreno del lugar donde se realizó la medición, ya que 5.41 Ω -m es un valor muy bajo de resistividad, por lo tanto es un muy buen valor y es probable que no se necesite construir una malla, y solo con instalar una delta pueda cumplir con los criterios de seguridad. El valor usado será de 50 Ω -m.

3.1.3 Datos de la malla.

Corriente de falla.	IAO	927.23	A	
Resistividad del terreno	ρ	50	Ω -m	
Resistividad superficial	ρ_s	5000	Ω -m	(Concreto).
Profundidad de la red	h	0.6	m	
Espesor de la capa superficial	h_s	0.15	m	
Tiempo de falla	T_c	0.5	s	
Longitud de la red	L_x	5	m	
Ancho de la red	L_y	5	m	
Relación X/R en la acometida	X/R	10		

Factor de crecimiento	Cp	1		No se prevé crecimiento
Longitud de la varilla de tierra	L_r	3.05	m	
Diámetro de la varilla	D_V	0.01587	m	5/8"
Material del conductor	Cobre comercial duro.			

3.1.4 Constante de tiempo:

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

$$T_a = 10 * \frac{1}{2 * 3.1416 * 60}$$

$$T_a = 0.0265$$

3.1.5 Factor de decremento:

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_a}{T_c} \left(1 - e^{-\frac{2T_c}{T_a}}\right)} \quad D_F = \sqrt{1 + \frac{0.027}{0.5} \left(e^{-\frac{2 * 0.5}{0.0265}}\right)}$$

$$D_f = 1.026$$

Adicionalmente, a continuación se muestra la tabla 10 del STD-80-2013, que contiene valores específicos de D_F , que se pueden usar para casos prácticos sin embargo tiene las limitaciones de un tiempo máximo de falla de un segundo y de una relación X/R de máximo 40. Este factor de corrección nos sirve para obtener la corriente máxima de falla que puede existir en la malla.

TABLA 10.- VALORES ESPECIFICOS DE DF (IEEE-STD-80-2013)					
SEGUNDOS	CICLOS DE 60 Hz	X/R			
		10	20	30	40
0,00833	0.5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,1	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,2	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,3	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,4	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,5	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1	60	1,013	1,026	1,039	1,052

3.1.6 Factor de crecimiento:

Como no se prevé crecimiento, entonces nuestro factor es

$$C_p = 1.00$$

3.1.7 Corriente máxima de falla en la malla:

$$I_G = D_f * C_p * I_g \quad I_G = 1.026 * 1.00 * 927.23$$

$$I_G = 951.3379A$$

3.1.8 Área del conductor:

$$A_{mm^2} = IG \frac{1}{\sqrt{\frac{TCAP * 10^{-4}}{T_c \alpha_r \rho_r} + \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}}$$

Donde:

A = Sección transversal del conductor en mm².

IG = Corriente máxima de falla en kA

T_m = Temperatura máxima permisible en °C.

T_a = Temperatura ambiente en °C.

T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.

α₀ = Coeficiente térmico de resistividad a 0 °C en 1/°C.

α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temp. de referencia 0 °C en 1/°C.

ρ_r = Resistividad del conductor de tierra a la temp. de referencia T_r en μΩ-cm.

T_c = Tiempo de la duración de la corriente en segundos.

TCAP = Factor de capacidad térmica por unidad de volumen en J/ (cm³ /°C)

TABLA 1. CONSTANTES DE MATERIALES (IEEE-STD-80-2013)

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α _r a 20 °C (1/°C)	K ₀ a 0°C (0°)	Temp. de Fusión T _m (°C)	Resistividad a 20 °C pr (μΩ*m)	Factor de Capacidad Térmica por Unidad de Vol. TCAP (J/(cm ³ *°C))
Cobre Recocido Suave Inmersión	100.00	0.00393	234.00	1083.00	1.72	3.42
Cobre Recocido Comercial Inmersión	97.00	0.00381	242.00	1084.00	1.78	3.42

Cobre Revestido Alambre de Acero	40.00	0.00378	245.00	1084.00	4.40	3.85
Cable Revestido Alambre de Acero	30.00	0.00378	245.00	1084.00	5.86	3.85
Cable Revestido Barra de Acero	20.00	0.00378	245.00	1084.00	8.62	3.85
Acero 1020	10.80	0.00160	605.00	1510.00	15.90	3.28
Acero Revestido Barra de Acero	9.80	0.00160	605.00	1400.00	17.50	4.44
Zinc Bañado Barra de Acero	8.60	0.00320	293.00	419.00	20.10	3.93
Acero Inoxidable 304	2.40	0.00130	749.00	1400.00	72.00	4.03

Como hemos seleccionado cobre comercial duro como material para nuestro conductor de la puesta a tierra, ya que además es el material más comúnmente usado y por lo tanto el más comercializado, entonces los datos que obtenemos de la tabla 1 son:

$$\alpha_r = 0.00381$$

$$T_a = 30 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_m = 1084.00 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\rho_r = 1.78 \quad (\mu\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\text{TCAP} = 3.42 \quad (\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}))$$

$$\text{TCAP} = 0.000342 \quad (\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}))$$

$$K_0 = 242 \quad ^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{mm}^2} = \frac{0.951}{\sqrt{\frac{0.000342}{0.50 \cdot 0.00381 \cdot 1.78} \cdot \ln\left(\frac{242+1084}{242+30}\right)}}$$

$$A = 2.38 \text{ mm}^2$$

De acuerdo al valor obtenido el conductor que satisface es el cal.: 12 AWG; pero de acuerdo a los diversos factores al momento de realizar la instalación, como puede ser la

resistencia mecánica se recomienda usar mínimo calibre 1/0 AWG, para este diseño se usara cable calibre 4/0 AWG.

$$A = 107.20 \text{ mm}^2$$

El diámetro del conductor es:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \qquad d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot 107.20}{\pi}}$$

$$d_c = 11.68 \text{ mm} = 0.01168 \text{ m}$$

3.1.9 Factor de reflexión:

$$k = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \qquad k = \frac{50 - 5000}{50 + 5000}$$

$$k = -0.98$$

3.1.10 Factor de reducción:

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

Donde:

C_s = Factor de disminución de la capa superficial.

P = Resistividad del terreno (Ω -m).

ρ_s = Resistividad de la capa superficial (Ω -m).

h_s = Espesor de la capa superficial.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{50}{5000}\right)}{2(0.15) + 0.09}$$

$$C_s = 0.7715$$

3.1.11 Tensión de paso tolerable:

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

$$E_{pt} = (1000 + 6 * .7715 * 5000) \frac{0.157}{\sqrt{0.50}}$$

$$E_{pt} = 5360.9512 \text{ V}$$

3.1.12 Tensión de toque tolerable:

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

$$E_{mt} = (1000 + 1.5 * 0.7715 * 5000) \frac{0.157}{\sqrt{0.50}}$$

$$E_{mp} = 1506.7614 \text{ V}$$

3.1.13 Diseño de malla:

Partiendo de las dimensiones del lugar donde se va a montar la subestación y conociendo la corriente máxima de falla, los voltajes de paso y contacto tolerables y el calibre del conductor se procede a proponer un diseño

$$A = 25.00 \text{ m}^2$$

$$d_c = 0.01168 \text{ m}$$

$$D_m = 1.00 \text{ m}$$

$$h = 0.60 \text{ m}$$

$$L_r = 3.05 \text{ m}$$

$$L_x = 5.00 \text{ m}$$

$$L_y = 5.00 \text{ m}$$

$$M = 6.00$$

$$N = 6.00$$

$$n_r = 4$$

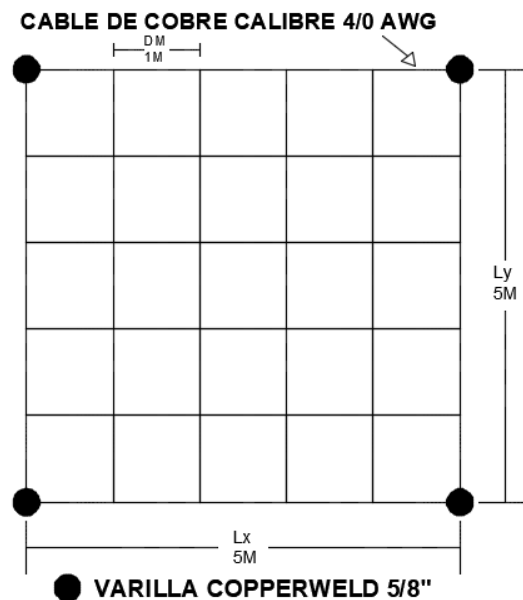


Fig. 3.8 Diseño de Malla Propuesto

Donde:

D_m = Espaciamiento entre conductores, en m.

h = Profundidad de la red

L_C = Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m.

L_P = Longitud del perímetro de la malla en m

L_r = Longitud de cada varilla.

L_R = Longitud total de todas las varillas.

L_X = Longitud máxima de la malla en la dirección X, en m.

L_Y = Longitud máxima de la malla en la dirección Y, en m.

M= Número de conductores de longitud L_Y .

N= Número de conductores de longitud L_X .

n_r = Numero de varillas.

3.1.14 Longitud total del conductor:

$$L_T = L_C + L_R$$

$$L_C = NL_x + ML_y = 6(5) + 6(5) \quad L_C = 60.00 \text{ m}$$

$$L_R = n_r L_r = 4(3.05) \quad L_R = 12.2 \text{ m}$$

$$L_P = 2L_x + 2L_y = 2(5) + 2(5) \quad L_P = 20.00 \text{ m}$$

$$L_T = 60.00 + 12.2 \quad \mathbf{LT = 72.2 \text{ m}}$$

3.1.15 Conductores paralelos de la malla:

$$n = n_a n_b n_c n_d$$

Dónde:

n = número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P} \quad n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}} \quad n_c = \frac{L_X L_Y^{\frac{0.7A}{L_X L_Y}}}{A} \quad n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}}$$

* $n_c = n_d = 1.00$ para mallas cuadradas y rectangulares*.

$$n_a = \frac{2 \cdot 60.00}{20.00} \quad n_a = 6$$

$$n_b = \sqrt{\frac{20.00}{4\sqrt{25.00}}} \quad n_b = 1.00$$

$$n = 6 * 1.00 * 1.00 * 1.00$$

$$\mathbf{n = 6}$$

3.1.16 Longitud efectiva de la malla:

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

$$L_m = 60.00 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{3.05}{\sqrt{5^2 + 5^2}} \right) \right] * 12.2$$

$$L_m = 85.32 \text{ m}$$

3.1.17 Longitud efectiva de conductor enterrado:

$$L_s = 0.75L_C + 0.85L_R$$

$$L_s = 0.75 * 60.00 + 0.85 * 12.2$$

$$L_s = 55.37 \text{ m}$$

3.1.18 Factor de corrección para profundidad:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Donde $h_0 = 1.0 \text{ m}$ (Profundidad de referencia)

$h =$ Profundidad de la malla

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.6}{1}}$$

$$k_h = 1.26$$

3.1.19 Factor de irregularidad:

$$K_i = 0.644 + 0.148n$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 * 6$$

$$k_i = 1.532$$

3.1.20 Factor de corrección en las esquinas:

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

En el caso de mallas con varillas en las esquinas:

$$k_{ii} = 1.00$$

3.1.21 Factor de espaciamento para tensión de toque:

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

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{(1)^2}{16 * 0.6 * 0.01168} + \frac{(1 + 2 * 0.6)^2}{8 * 1 * 0.01168} - \frac{0.6}{4 * 0.1168} \right) + \frac{1}{1.26} \ln \left(\frac{8}{\pi((2 * 6) - 1)} \right) \right]$$

$$\mathbf{k_m = 0.431}$$

3.1.22 Factor de espaciamiento para la tensión de paso:

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.6} + \frac{1}{1.00 + 0.6} + \frac{1}{1.00} (1 - 0.5^{6-2}) \right]$$

$$\mathbf{k_s = 0.76}$$

3.1.23 Potencial de toque en la malla:

$$E_{mC} = \frac{\rho l_G K_m K_i}{L_m}$$

$$E_{mC} = \frac{50.00 * 951.33 * 0.431 * 1.532}{85.32}$$

$$\mathbf{E_{mC} = 368.11 V}$$

Se cumple la regla $E_{mC} < E_{mt}70$ (es decir $368.11 < 1506.7614 V$)

3.1.24 Potencial de paso en la malla:

$$E_{mP} = \frac{\rho l_G K_s K_i}{L_s}$$

$$E_{mP} = \frac{50.00 * 951.33 * 0.762 * 1.532}{55.37}$$

$$\mathbf{E_{mP} = 1002.86 V}$$

Se cumple $E_{mP} < E_{pt}70$ (es decir $1002.86 < 5360.9512V$)

3.1.25 Resistencia de la red de tierra:

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

$$R_g = 50.00 \left[\frac{1}{72.2} + \frac{1}{\sqrt{20 * 25}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6 * \sqrt{\frac{20}{25}}} \right) \right]$$

$$R_g = 4.383 \Omega$$

Se cumple $R_g < 5 \Omega$ (ya que $4.383 < 5 \Omega$)

Por lo tanto esta propuesta de diseño es segura, por que cumple con los parámetros más críticos que son la resistencia de la malla ($R_g < 5 \Omega$) y que los voltajes de paso y de contacto en la malla sean menores que los voltajes de paso y contacto tolerables.

3.2 Desarrollo de software para diseñar mallas de tierras de subestaciones eléctricas.

Siguiendo el procedimiento antes descrito, el cual está basado en el IEE-STD-80-2013 a continuación se describe el proceso de desarrollo del software en la paquetería de Office Excel, que servirá como herramienta de trabajo para el diseño de mallas de tierras de subestaciones eléctricas.

1. Primeramente se capturaron las tablas a usar como son la tabla 1 Constante de materiales, la tabla 10 valores específicos de Df y la tabla de Área de conductores. Estas tablas se capturaron en hojas que estarán ocultas y protegidas para que no se muevan o modifiquen puesto que son valores constantes.

	A	B	C	D	E
1	TABLA DE DIAMETRO DE ÁREA DE CONDUCTORES				
2					
3	CALIBRE DE CABLE (AWG)	SECCIÓN NOMINAL (MM2)			
4	NO. 2	33.63			
5	NO. 1	42.41			
6	1/0	53.48			
7	2/0	67.42			
8	3/0	85.03			
9	4/0	107.2			
10					

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA COMSOL 5.2 O

F12 : f_x 1.052

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TABLA 10. VALORES ESPECIFICOS DE Df (STANDAR IEEE-STD-80)							
2			X/R					
3	SEGUNDOS	CICLOS DE 60 Hz	10	20	30	40		
4	0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688		
5	0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515		
6	0.1	6	1.125	1.232	1.316	1.378		
7	0.2	12	1.064	1.125	1.181	1.232		
8	0.3	18	1.043	1.085	1.125	1.163		
9	0.4	24	1.033	1.064	1.095	1.125		
10	0.5	30	1.026	1.052	1.077	1.101		
11	0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068		
12	1	60	1.013	1.026	1.039	1.052		

2. Lo siguiente fue crear las casillas para capturar los datos de campo con los que trabajara el software, estos datos son principalmente el estudio de cortocircuito del lugar donde se va a instalar la malla y la medición de la resistividad del terreno. Además del Área total a ocupar, y la capa superficial.

ARCHIVO INICIO INSERTAR DISEÑO DE PÁGINA FÓRMULAS DATOS REVISAR VISTA COMSOL 5.2 OFFICE REMOTE

F135 : f_x

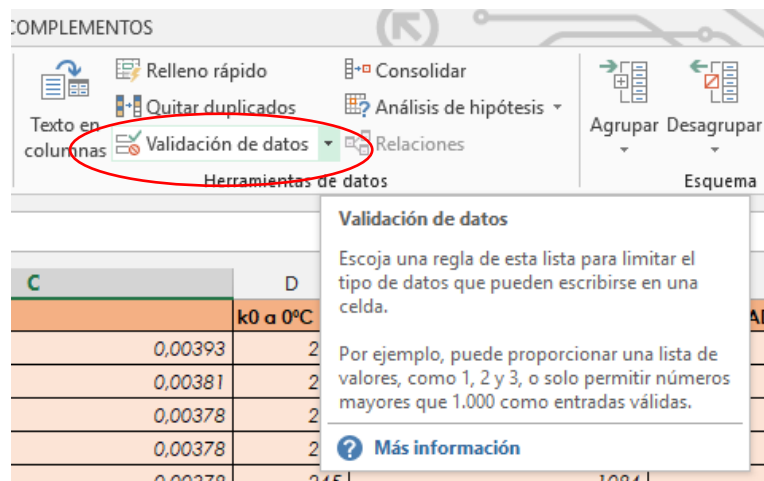
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PROGRAMA DE CALCULO DE MALLA DE TIERRA							
2	INGRESAR							
3	SELECCIONAR							
4								
5	Datos generales							
6	RESISTIVIDAD DEL TERRENO			50		ρ (Ω -m)		
7	CORRIENTE DE FALLA A TIERRA			927.23		IAD (A)		
8	RESISTENCIA/REACTANCIA			10		X/R		
9	TIEMPO DE FALLA			0.5		tc (segundos)		
10	MATERIAL DE LA VARILLA			COBRE COMERCIAL DURO				
11	LONGITUD DE LA VARILLA DE TIERRA			3.05		Lr (m)		
12	DIAMETRO DE LA VARILLA			0.625		pulgadas		
13				0.015875		Dv (m)		
14								
15	Área ocupada por la malla							
16	LARGO DE LA RED			5		Lx (m)		
17	ANCHO DE LA RED			5		Ly (m)		
18	PROFUNDIDAD DE LA RED			0.6		h (m)		
19	RESISTIVIDAD SUPERFICIAL			5000		ps (Ω -m)		
20	ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL			0.15		ts (m)		
21	FACTOR DE PROYECCION			1		CP		

3. Validación de datos

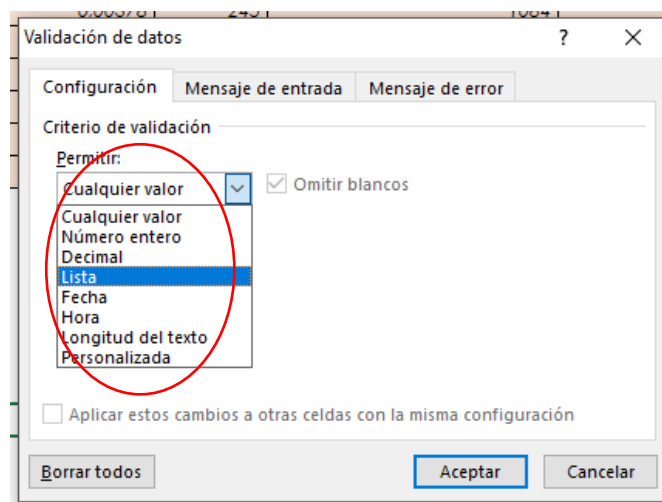
Mediante la función validación de datos se crearon las listas desplegables que restringen los valores a utilizar, únicamente podrán seleccionarse los que en ella se encuentran. Para esto se seleccionan los datos a validar.

1	DESCRIPCION	CONDUCTIVIDAD DEL MATERIAL	FACTOR α a 20°C
2	COBRE RECOCIDO SUAVE	100	0,00393
3	COBRE COMERCIAL DURO	97	0,00381
4	ALAMBRE DE ACERO REV DE COBRE	40	0,00378
5	ALAMBRE DE ACERO REV DE COBRE	30	0,00378
6	VARILLA REVESTIDO DE COBRE	17	0,00378
7	ALAMBRE DE ACERO REV DE AL	20,3	0,0036
8	ACERO 1020	10,8	0,00377
9	VARILLA DE ACERO INOX	9,8	0,00377
10	VARILLA DE ACERO GALVANIZADA	8,6	0,0032
11	ACERO INOX 304	2,4	0,0013

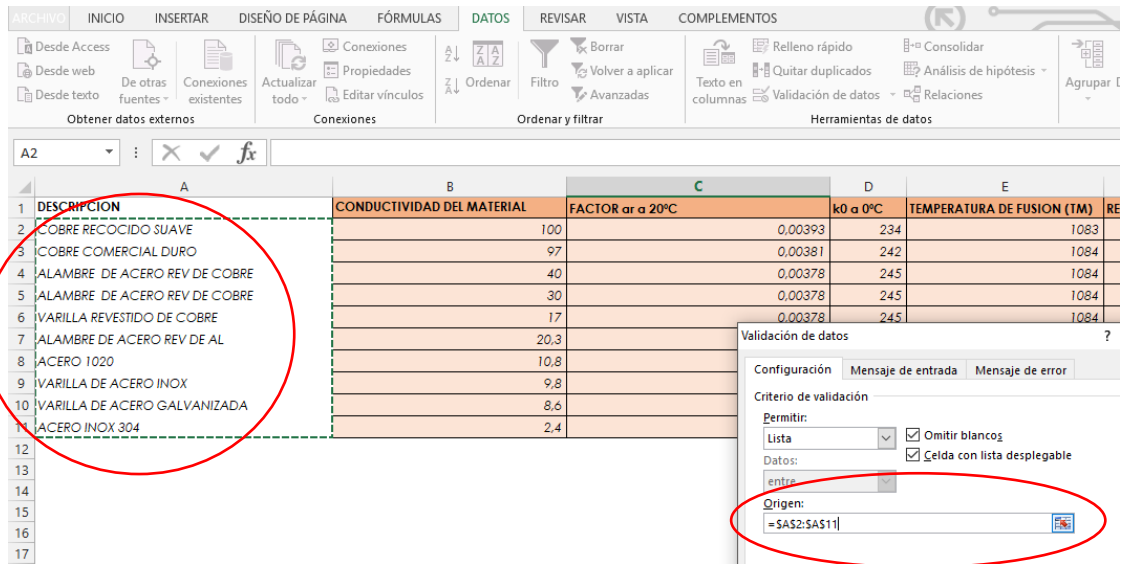
Después ir a la ventana de datos y seleccionar validación de datos.



Al ingresar a la ventana de validación de datos se deberá escoger el tipo de validación y escoger el tipo “lista” y aceptar.



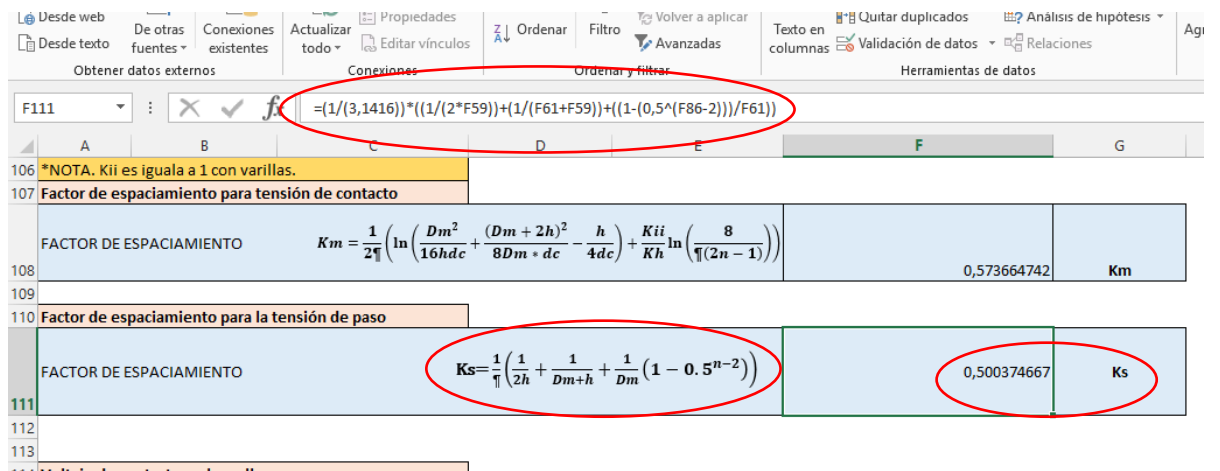
Una vez aceptado la función y tipo de validación se seleccionará la matriz a validar, esta estos valores serán visualizados en la lista desplegable.



Automáticamente se genera la lista de validación en la casilla seleccionada.

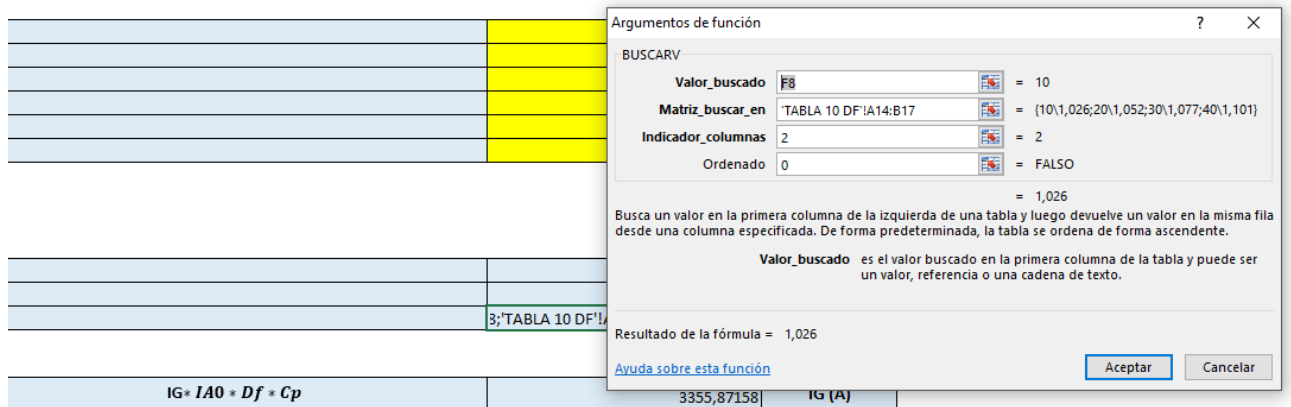
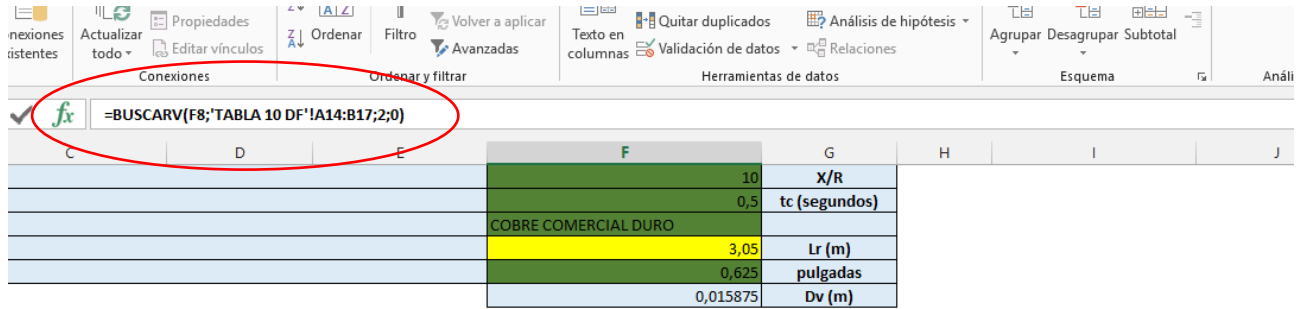
75	ρ (Ω -m)
3270,83	IA0 (A)
10	X/R
0,5	tc (segundos)
COBRE COMERCIAL DURO	Lr (m)
ALAMBRE DE ACERO REV DE COBRE	pulgadas
ALAMBRE DE ACERO REV DE COBRE	Dv (m)
VARILLA REVESTIDO DE COBRE	
ALAMBRE DE ACERO REV DE AL	
ACERO 1020	
VARILLA DE ACERO INOX	
VARILLA DE ACERO GALVANIZADA	
8	Lx (m)
4	Ly (m)
0,6	h (m)
5000	ρ_s (Ω -m)
0,15	hs (m)
1	CP

4. Programación de fórmulas necesarias para el diseño. Se capturaron todas las fórmulas necesarias para el cálculo de mallas de tierra para subestaciones eléctricas de acuerdo al procedimiento del IEE-STD-80-2013 en las celdas asignadas de forma gradual.

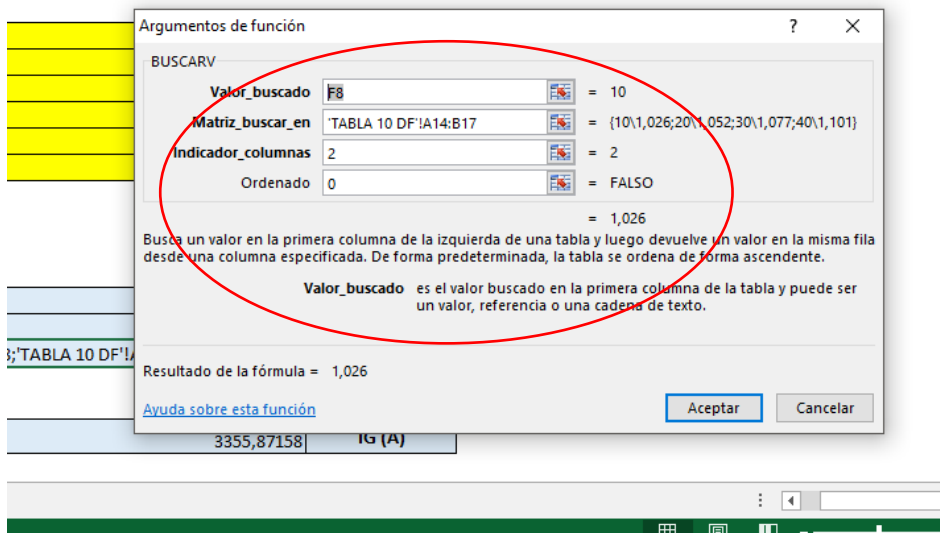


5. Buscar en V. Esta función permite buscar elementos de una tabla o un rango por fila asignada. Únicamente ingresando o seleccionando un valor te arroja su resultado, por lo regular su aplicación es la búsqueda de valores dentro de tablas. Primeramente asignar la

función en la casilla correspondiente, escribir la función “BUSCARV” y seleccionar el botón f_x .



Llenar la ventana de argumentos de función. Escoger el valor buscado, la matriz donde se buscará, la columna donde se buscará y colocar 0 ó falso para que se arroje el resultado correcto.



Una vez concluida la programación de la celda, únicamente se escogerá el valor buscado mediante la lista generada por la función “validación de datos” y se arrojará automáticamente el valor buscado.

	A	B	C	D	E	F	G
5	Datos generales						
6	RESISTIVIDAD DEL TERRENO					30	ρ (Ω -m)
7	CORRIENTE DE FALLA A TIERRA					927,23	IA0 (A)
8	RESISTENCIA/REACTANCIA					10	X/R
9	TIEMPO DE FALLA					10	tc (segundos)
10	MATERIAL DE LA VARILLA					30	
11	LONGITUD DE LA VARILLA DE TIERRA					40	Lr (m)
12	DIAMETRO DE LA VARILLA					0,625	pulgadas
13						0,015875	Dv (m)
14							
15	Área ocupada por la malla						
16	LARGO DE LA RED					5	Lx (m)
17	ANCHO DE LA RED					5	Ly (m)
18	PROFUNDIDAD DE LA RED					0,6	h (m)
19	RESISTIVIDAD SUPERFICIAL					5000	ps (Ω -m)
20	ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL					0,15	hs (m)
21	FACTOR DE PROYECCION					1	CP
22							
23							
24	Factores de correccion						
25	TIEMPO DE FALLA					0,5	tc (segundos)
26	X/R					10	X/R
27	FACTOR DE DECREMENTO					1,026	DF

4. Resultados

4.1 resultados

A continuación se muestra diseño final del programa desarrollado, ejemplificando su funcionamiento asignando los mismos datos utilizados en el desarrollo de la malla propuesta en el capítulo 3.

PROGRAMA DE CALCULO DE MALLA DE TIERRA			
INGRESAR			
SELECCIONAR			
Datos generales			
RESISTIVIDAD DEL TERRENO		50	ρ (Ω -m)
CORRIENTE DE FALLA A TIERRA		927,23	IA0 (A)
RESISTENCIA/REACTANCIA		10	X/R
TIEMPO DE FALLA		0,5	tc (segundos)
MATERIAL DE LA VARILLA		COBRE COMERCIAL DURO	
LONGITUD DE LA VARILLA DE TIERRA		3,05	Lr (m)
DIAMETRO DE LA VARILLA		0,625	pulgadas
		0,015875	Dv (m)
Área ocupada por la malla			
LARGO DE LA RED		5	Lx (m)
ANCHO DE LA RED		5	Ly (m)
PROFUNDIDAD DE LA RED		0,6	h (m)
RESISTIVIDAD SUPERFICIAL		5000	ps (Ω -m)
ESPESOR DE LA CAPA SUPERFICIAL		0,15	hs (m)
FACTOR DE PROYECCION		1	CP
Factores de correccion			
TIEMPO DE FALLA		0,5	tc (segundos)
X/R		10	X/R
FACTOR DE DECREMENTO		1,026	DF
Corriente Máxima de falla			
CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA	$IG * IA0 * Df * Cp$	951,33798	IG (A)
Selección del conductor			
TIPO DE CONDUCTOR		COBRE COMERCIAL DURO	
TEMPERATURA AMBIENTE		30	Ta ($^{\circ}$ C)
CAPACIDAD TERMICA POR UNIDAD DE VOLUMEN		3,4	TCAP
$1/ar - Tr$		242	K0
TIEMPO DE FALLA		0,5	tc
RESISTIVIDAD DEL CONDUCTOR DE TIERRA		1,78	pr
TEMPERATURA DE FUSION		1084	Tm
COEFICIENTE TERMICO DE LA RESISTIVIDAD		0,00381	cr
ÁREA DEL CONDUCTOR	$Amm^2 = (IG) \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{tc \cdot ar \cdot pr} \right) \left(\ln \frac{K0 + Tm}{K0 + Ta} \right)}} \right)$	2,387035155	Amm2
*NOTA. SE DEBERA USAR MÍNIMO CALIBRE 2 PARA LOS CONDUCTORES DE LA MALLA POR CUESTIONES DE RESISTENCIA MECÁNICA INDICADA EN LA NOM 001-SEDE-2012		4/0	AWG
		107,2	mm2
DIAMETRO DEL CONDUCTOR		11,68294822	Dc (mm2)
Factor de reduccion			
FACTOR DE REDUCCION	$cs = 1 - \frac{0.09 (1 - \frac{\rho}{ps})}{2hs + 0.09}$	0,771538462	cs
Cálculo de potenciales tolerables de paso y contacto			
VOLTAJE DE PASO	$E_{paso} = (1000 + 6 * cs * \rho s) * 0.157 / \sqrt{ts}$	5361,207465	E _{paso} (V)
VOLTAJE DE CONTACTO	$E_{contacto} = (1000 + 1.5 * cs * \rho s) * 0.157 / \sqrt{ts}$	1506,825513	E _{contacto} (V)

Diseño inicial de la malla			
*Tomar en cuenta el diseño unicamente para cuadrados y rectángulos.			
LARGO DE LA RED		5	Lx (m)
ANCHO DE LA RED		5	Ly (m)
ÁREA		25	A (m ²)
PROFUNDIDAD DE LA RED		0,6	h (m)
NÚMERO DE VARILLAS		4	nr
ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES		1	Dm (m)
DIAMETRO DEL CONDUCTOR		0,011682948	dc (m)
LONGITUD DE CADA VARILLA DE TIERRA		3,05	Lr (m)
NÚMERO TOTAL DE CONDUCTORES A LO LARGO		6	N
NÚMERO TOTAL DE CONDUCTORES A LO ANCHO		6	M
LONGITUD TOTAL DE LOS CONDUCTORES DE LA MALLA HORIZONTAL	$LC = N * Lx + M * Ly$	60	LC (m)
LONGITUD DEL PERÍMETRO DE LA MALLA	$LP = 2 * Lx + 2 * Ly$	20	LP (m)
LONGITUD TOTAL DE LAS VARILLAS	$LR = nr * Lr$	12,2	LR (m)
LONGITUD TOTAL EFECTIVA DEL CONDUCTOR	$LT = LC + LR$	72,2	LT (m)

Determinación de la resistencia de la malla			
RESISTENCIA DE LA MALLA	$Rg = \rho \left(\frac{1}{LT} + \frac{1}{\sqrt{20A} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right)} \right)$	4,383740407	Rg (Ω)

Evaluación de la elevación del potencial de tierra			
ELEVACION DEL POTENCIAL DE TIERRA	$GPR = IG * RG$	4170,418744	GPR (V)

Conductores paralelos de la malla			
FACTOR na	$na = \frac{2 * Lc}{Lp}$	6	na
FACTOR nb	$nb = \sqrt{\frac{Lp}{4 * \sqrt{A}}}$	1	nb
FACTOR nc	$nc = \frac{Lx * Ly^{0.7 * A}}{A^{Lx * Ly}}$	1	nc
FACTOR nd	$nd = \frac{Dm}{\sqrt{Lx^2 * Ly^2}}$	1	nd

***NOTA** nc=nd=1 Para mallas cuadradas y rectangulares

NÚMERO DE CONDUCTORES PARALELOS DE UNA MALLA	$n = na * nb * nc * nd$	6	n
--	-------------------------	---	---

Longitud efectiva de la malla			
LONGITUD EFECTIVA LC+LR PARA EL VOLTAJE DE CONTACTO	$LM = LC + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Lx^2 + Ly^2}} \right) \right] LR$	85,32999217	LM (m)

Longitud efectiva de conductor enterrado			
LONGITUD EFECTIVA LC+LR PARA EL VOLTAJE DE PASO	$LS = 0.75 * LC + 0.85 * LR$	55,37	LS (M)

Factor de corrección de la profundidad de la malla			
FACTOR DE CORRECCION DE LA PROFUNDIDAD DE LA MALLA	$Kh = \sqrt{1 + \frac{h}{h0}}$	1,264911064	Kh

*NOTA. Donde h0 = 1 m (profundidad de referencia)
h = profundidad de la malla

Factor de corrección para profundidad			
FACTOR DE IRREGULARIDAD	$Ki = 0.664 + 0.148 * n$	1,552	Ki

Factor de corrección en las esquinas			
FACTOR DE CORRECCION EN LAS ESQUINAS	$Kii = \frac{1}{2(n^{2/n})}$	1	Kii

*NOTA. Kii es iguala a 1 con varillas.

Factor de espaciamiento para tensión de contacto			
FACTOR DE ESPACIAMIENTO	$K_m = \frac{1}{2\eta} \left(\ln \left(\frac{Dm^2}{16hdc} + \frac{(Dm+2h)^2}{8Dm*dc} - \frac{h}{4dc} \right) + \frac{K_{ii}}{Kh} \ln \left(\frac{8}{\eta(2n-1)} \right) \right)$	0,431558307	Km
Factor de espaciamiento para la tensión de paso			
FACTOR DE ESPACIAMIENTO	$K_s = \frac{1}{\eta} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{Dm+h} + \frac{1}{Dm} (1 - 0.5^{n-2}) \right)$	0,762615652	Ks
Voltaje de contacto en la malla			
VOLTAJE DE CONTACTO	$E_{mc} = \frac{\rho * IG * K_m * K_i}{L_m}$	373,3656254	Emc (V)
Voltaje de paso en la malla			
VOLTJE DE PASO	$E_{mp} = \frac{\rho * IG * K_s * K_i}{L_s}$	1016,781762	Emp (V)

Resultados		
CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA	951,33798	IG
ÁREA DEL CONDUCTOR CALCULADO	2,387035155	Amm2
CALIBRE A USAR	107,2	mm2
	4/0	AWG
ELEVACION DEL POTENCIAL DE TIERRA	4170,418744	GPR (V)
RESISTENCIA DE LA MALLA	4,383740407	Rg (Ω)

ANÁLISIS DE POTENCIALES				
	VOLTAJE TOLERABLE		VOLTAJE EN MALLA	
CONTACTO	1506,825513	<	373,3656254	EL DISEÑO CUMPLE
PASO	5361,207465	<	1016,781762	EL DISEÑO CUMPLE

Como se puede apreciar, el software desarrollado es autónomo y fácil de usar solo se ingresan los datos generales y algunos más se seleccionan mediante listas desplegables y el cálculo se genera de forma automática. Al final de la hoja de cálculo se pueden apreciar los resultados. En caso de que el diseño de la malla no sea seguro, se podrá rediseñar fácilmente con solo reingresar valores en el apartado “diseño inicial de la malla”.

4.2 Conclusiones

Para la realización del proyecto se trazaron objetivos en específicos los cuales se han logrado cumplir en su totalidad, ya que se realizó una propuesta de diseño partiendo de datos reales obtenidos en campo, como es la medición de la resistividad del terreno del Instituto Tecnológico Nacional de México campus Tuxtla Gutiérrez y el estudio de cortocircuito del punto de conexión del campus.

Además, en este reporte se describen los parámetros más importantes a considerar al momento de diseñar una malla, teniendo en claro que la función más importante de una red de mallas de tierras es el salvaguardar la integridad de las personas en caso de ocurrir cualquier tipo de falla eléctrica.

Procurando que este reporte sirva como guía de diseño, se abarca todo el fundamento teórico de los parámetros que se toman en cuenta al momento de realizar el diseño de un sistema de puesta a tierra para una subestación eléctrica, explicando de forma clara el ¿Por qué? Se utilizan algunos de estos parámetros.

Se incluye también el procedimiento para el diseño de sistemas de tierra en forma práctica, paso a paso y la implementación de un software en la paquetería Excel de

Microsoft Office que permite realizar en menor tiempo y con menos esfuerzo, el diseño de los sistemas de puesta a tierra para subestaciones eléctricas.

Ya que si se llegara a suscitar alguno de los problemas típicos en los sistemas de puesta a tierra, como puede ser que los voltajes de paso y contacto permisibles sean mayores a los que circularan en la malla o que el valor la resistencia de la malla sea mayor al valor máximo permitido, el diseño propuesto no será seguro y se tendrá que rediseñar.

Para estos posibles casos el software desarrollado se convierte en una herramienta muy útil y práctica para el ingeniero eléctrico que lo manipule, pues con solo ampliar o disminuir la distancia entre conductores, incrementar el número de varillas a utilizar, aumentar la profundidad de la instalación de la malla desde el software, se pueden resolver los problemas ya antes mencionados.

Sin embargo y pese a lo útil que puede llegar a ser este proyecto se debe mencionar que tiene algunas limitantes importantes, y que se necesita contar con algunos requisitos obligatorios que no calcula el software desarrollado, para que pueda realizar y arrojar todos los datos necesarios para nuestro sistema.

Los requisitos más importantes son el valor de la corriente monofásica a tierra que se obtiene al realizar el estudio de cortocircuito de la ubicación donde se planea realizar la instalación de la subestación y el valor de la resistividad del terreno, preferentemente obtenido con una medición del terreno, ya que el usar tablas de resistividades aparentes y capturar valores propuestos podría afectar gravemente el resultado obtenido, por lo que se recomienda siempre utilizar datos reales.

Dentro de las limitaciones con las que cuenta el software es que solo puede hacer cálculos de un tiempo de despeje de fallas de máximo 1 segundo y con valores de X/R de 10 a 40, ya que los datos usados para los cálculos de DF se basan en las tablas del IEE STD-80-2013, aunque claro que para la mayoría de los casos el tiempo de falla de 1 segundo es muchísimo, no se descarta la posibilidad de que existan redes con un valor de X/R mayores de 40.

Para efectos demostrativos se desarrolló una propuesta de diseño de malla de tierra para una subestación comercial de 75kva a la cual se le hizo un pequeño presupuesto abarcando solamente los precios de los materiales a usar en la construcción de dicha malla, esto es a modo ilustrativo ya que en la práctica realizar un presupuesto bien elaborado para un proyecto eléctrico, cubre los costos de traslado, permisos (si así se requieren), mano de obra, costos de desgaste de material, retiro de material o excavación y las utilidades. Ver anexo E.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Oropeza Angeles Javier. (2015). *Libro de Oro de puesta a Tierra*. Ciudad de Mexico, Mexico.
- [10] Secreteria de Energia. (2012). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas* . México.
- [11] Oropeza Angeles Javier . (2007). *Instalaciones electricas comerciales e industriales*. Ciudad de Mexico.
- [2] Daza Guzmán Rafael, G. C. (2012). *DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA APLICANDO LAS REGLAMENTACIONES VIGENTES*. Barranquilla, Colombia.
- [3] Daviran Berrospi Pedro Eusebio. (2013). *ELABORACION DE UN PROGRAMA PARA COMPUTADOR DE DIMENSIONAMIENTO Y CALCULO DE MALLAS DE PUESTA A TIERRA BASADO EN LA NORMA IEEE-80-2000*. Huancayo, Perú.
- [4] Jiménez Z. Jonathan M., P. G. (2013). *DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARTIENDO DE UN MODELO BIESTRATIFICADO DE TERRENO, APLICANDO UN SOFTWARE*. Cuenca, Ecuador.
- [5] Swett Stein Francisco Javier. (2015). *SOFTWARE PARA LA DETERMINACIÓN DE CONFIGURACIÓN GEOELÉCTRICA Y ANÁLISIS DE MALLAS EN TERRENOS ESTRATIFICADOS*. Santiago de Chile.
- [6] Segura Terán Alfredo, V. A. (2010). *ANALISIS DE LA MALLA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACION DE POTENCIA (TEOTIHUACÁN) PARA SU MEJORAMIENTO*. MEXICO, DF.
- [7] Vazquez Muñoz Edgar. (2016). *Diseño de un sistema de tierras de una subestacion electrica mediante dos metodologias*. Ciudad de Mexico.
- [8] ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA. (s.f). *METODOLOGIA DE PRUEBA*. ZACATENANGO.
- [9] IEEE. (2013). *IEEE STD 80 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding"*. New York.

ANEXO A

DEFINICIONES (GLOSARIO)

Tierra: Es la conexión conductora, ya sea intencional o accidental, por el cual un circuito eléctrico o equipo se conecta al suelo o a algún cuerpo conductor de magnitud relativamente grande que sirve en lugar de la tierra.

Puesto a tierra: Un sistema, circuito o aparato dotado de una tierra (s) a los efectos de establecer un circuito de retorno por tierra y para mantener su potencial aproximadamente al potencial de la tierra.

Corriente de tierra: Una corriente que entra o sale de la tierra o su equivalente que sirve como tierra.

Electrodo de tierra: Conductor incrustado en la tierra y usado para recolectar la corriente de tierra, o la disipación de corriente de tierra hacia el suelo.

Red de tierra: Es un sistema de electrodos de tierra interconectado arreglado en un patrón sobre un área específica y enterrado por debajo de la superficie del suelo.

NOTA – Las redes enterradas horizontalmente cerca de la superficie de la tierra son también eficaces en el control de los gradientes de potencial superficiales. Una cuadrícula típica por lo general se complementa con una serie de varillas de tierra y puede ser conectada además a los electrodos de tierra auxiliares para reducir su resistencia con respecto a tierra remota.

Malla de tierra: Es una placa metálica sólida o un sistema de conductores desnudos espaciados estrechamente que están conectados y a menudo localizados a poca profundidad y arriba de la red de tierra o en otra parte de la superficie del terreno, para obtener un nivel extra de protección que minimiza el peligro de la exposición a altos voltajes de paso o de toque en un área de operación crítica o en lugares que son usados por la gente.

Elevación del potencial de tierra (GPR): El potencial eléctrico máximo que un electrodo de tierra puede alcanzar respecto a un punto de conexión a tierra distante que se supone se encuentra el potencial de tierra remoto. Este voltaje, GPR, es igual a la corriente máxima de tierra, multiplicado por la resistencia de la red de tierra. Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico puesto a tierra opera cerca del potencial de tierra cero.

Eso es, el potencial de un conductor neutro puesto a tierra es casi idéntico al potencial de la tierra remota. Durante una falla a tierra la porción de la corriente de falla que es conducida por la red de tierra de la subestación hacia el suelo causa un incremento del potencial de la red de tierra con respecto a la tierra remota.

Nota – Bajo condiciones normales, el equipo eléctrico puesto a tierra opera cerca del potencial de tierra cero. Eso es, el potencial de un conductor neutro puesto a tierra es casi idéntico al potencial de la tierra remota. Durante una falla a tierra la porción de la corriente

de falla que es conducida por la red de tierra de la subestación hacia el suelo causa un incremento del potencial de la red de tierra con respecto a la tierra remota.

Circuito de retorno a tierra: Un circuito en el que se utiliza la tierra o un cuerpo conductor equivalente para completar el circuito y permitir la circulación de corriente desde o hacia su fuente de corriente.

Sistema de puesta a tierra: Comprende todas las instalaciones de puesta a tierra interconectadas en un área específica.

Electrodo auxiliar de tierra: Un electrodo de tierra con cierto diseño o restricciones operativas. Su principal función puede ser la de conducir la corriente de falla a tierra hacia el suelo.

Electrodo de tierra primario: Un electrodo de tierra diseñado o adaptado para la descarga de la corriente de falla a tierra en el suelo, a menudo en un patrón de descarga específica, según sea necesario (o implícitamente pedido) por el diseño del sistema de puesta a tierra.

Encerramiento continuo: Un encerramiento de bus en el cual las secciones consecutivas del gabinete del mismo conductor de fase están interconectadas para proporcionar un camino de corriente continua a través de toda la longitud del encerramiento. La unión equipotencial cruzada, la conexión de los encerramientos de las otras fases, son hechas solamente en los extremos de la instalación y en unos puntos intermedios seleccionados.

Desplazamiento de DC: Es la diferencia entre la onda de corriente simétrica y la corriente real durante una condición de un transitorio del sistema. Matemáticamente, la corriente de falla real puede ser dividida en dos partes, una componente alterna simétrica y una componente uní-direccional (DC). La componente uní-direccional puede ser de cualquier polaridad, pero la polaridad no cambiará, y disminuirá en alguna tasa predeterminada.

Reactancia subtransitorio: Reactancia de un generador en el inicio de una falla. Esta reactancia se utiliza en el cálculo de la corriente de falla simétrica inicial. La corriente disminuye de forma continua, pero se supone que es constante en este valor como un primer paso, con una duración aproximada 0.05 s después de una falla aplicada.

Factor de decremento: Factor de ajuste que se utiliza junto con el parámetro de corriente de falla a tierra simétrica en los cálculos de tierra orientados a la seguridad. Determina el equivalente RMS de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla dada, t_f , lo que representa el efecto de desplazamiento inicial de DC y su atenuación durante la falla. Su valor se obtiene mediante la tabla 10 del estándar IEEE-STD-80

Corriente de falla asimétrica efectiva: El valor RMS de la onda de corriente asimétrica, integrada en el intervalo de duración de la falla.

$$I_F = D_f * I_f \text{ (A.1)}$$

Donde

I_f es la corriente de falla asimétrica efectiva en A
 I_f es la corriente de falla a tierra simétrica en A
 D_f es el factor de decremento.

Corrientes de encerramiento: Corrientes que resultan de las tensiones inducidas en el recinto metálico por las corrientes que fluyen en el conductor encerrado.

Factor de división de corriente: Un factor que representa la relación la inversa de la corriente de falla simétrica a la porción de la corriente que fluye entre la red de tierra y el suelo circundante.

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} \quad (\text{A.2})$$

Donde
 S_f es el factor de división de corriente
 I_g es la corriente de cuadrícula simétrica RMS en A
 I_0 es la corriente de falla de secuencia cero en A.

NOTA: En realidad, el factor de división de corriente cambia durante la duración de la falla, en base a las tasa de descomposición de las diferentes contribuciones de falla y la secuencia de interrupción de las operaciones del dispositivo. Sin embargo, a los efectos de calcular el valor de diseño de la corriente cuadrícula y la corriente de cuadrícula simétrica según las definiciones de la corriente de cuadrícula simétrica y la corriente máxima de la cuadrícula, la relación se supone constante durante toda la duración de una falla determinada.

Corriente de cuadrícula máxima: Un valor de diseño de la corriente de cuadrícula máxima definida como sigue:

$$I_G = D_f * I_g \quad (\text{A.3})$$

Donde
 I_G : Corriente de cuadrícula máxima en A
 D_f : Factor de decremento para la duración completa de la falla t_f , dado en s
 I_g : Corriente de cuadrícula simétrica en A

Corriente de cuadrícula simétrica: La parte de la corriente de falla a tierra simétrica que fluye entre la cuadrícula de tierra y el suelo circundante puede expresarse como:

$$I_g = S_f * I_f \quad (\text{A.4})$$

Donde
 I_g : Corriente de cuadrícula simétrica en A
 I_f : Corriente de falla a tierra simétrica RMS en A
 S_f : Factor de división de corriente de falla

Corriente simétrica de falla a tierra: El valor máximo RMS de la corriente de falla simétrica después del instante de inicio de la falla a tierra. Como tal, representa el valor

RMS de la componente simétrica en el primer medio ciclo de una onda de corriente que se desarrolla después del instante de la falla en el tiempo cero. Puede expresarse así

$$I_{f(0+)} = 3I_0 \quad (\text{A.5})$$

Donde

$I_f(0+)$: Corriente de falla a tierra simétrica RMS inicial

I_0 : Valor RMS de la corriente simétrica de secuencia cero que desarrolla inmediatamente después del instante de la iniciación de falla, reflejando la reactancia del subtransitorio de las máquinas rotativas contribuyendo a la falla.

Voltaje de malla: Es el voltaje de toque máximo dentro de una malla de una cuadrícula de tierra.

Voltaje de toque de metal a metal: Es la diferencia de potencial entre los objetos metálicos o estructuras dentro de una subestación que puede ser empuentada por un contacto directo de mano a mano o de mano a pie.

NOTA – El voltaje de toque de metal a metal entre objetos metálicos o estructuras unidas a la cuadrícula de tierra se supone que es insignificante en las subestaciones convencionales. Sin embargo, puede ser sustancial el voltaje de toque de metal a metal entre objetos o estructuras metálicas unidas a la red de tierra a objetos metálicos internos al sitio de la subestación, tal como una cerca aislada pero no unida a la cuadrícula de tierra.

Material superficial: Un material instalado sobre el suelo que consiste en, pero no limitado a, roca o piedra triturada, asfalto o materiales artificiales. El material superficial, dependiendo de la resistividad del material, puede afectar significativamente la corriente por el cuerpo para los voltajes de paso y de toque que involucran los pies de la persona.

Voltaje de paso: La diferencia en el potencial de la superficie que podría ser experimentada por una persona parada con los pies separados una distancia de 1 m sin contactar algún objeto conectado a tierra.

Voltaje de toque (contacto): La diferencia de potencial entre el incremento de potencial de tierra (GPR) de una cuadrícula o sistema de tierra y el potencial de superficie en el punto en que una persona puede estar de pie, mientras que, al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura conectada a tierra. Las mediciones de voltaje de toque pueden ser en "circuito abierto" (sin la resistencia del cuerpo equivalente incluidas en el circuito de medición) o en "circuito cerrado" (con la resistencia del cuerpo equivalente incluidas en el circuito de medición).

Voltaje transferido: Un caso especial del voltaje de toque cuando un voltaje es transferido dentro o fuera de la subestación desde o hacia un punto remoto externo al sitio de la subestación.

Relación X/R: Es la relación de la reactancia a la resistencia del sistema. Es indicativa de la tasa de decaimiento de cualquier desplazamiento de DC. Una relación grande X/R corresponde a grandes constantes de tiempo y una tasa lenta de decaimiento.

ANEXO B

MODELOS DE SUELO

B1 Modelo de suelo uniforme

Un modelo de suelo uniforme se puede utilizar en lugar del modelo de suelo cuando las herramientas de cálculo de dos capas o de múltiples capas no están disponibles. La resistividad del suelo uniforme aproximada puede obtenerse tomando una media aritmética de los datos de resistividad aparente medidos como se muestra en la siguiente ecuación

$$\rho_p = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + K + \rho_a(n)}{n} \quad (\text{B-1})$$

Donde

ρ_p : Resistividad aparente promedio ($\Omega\text{-m}$)

$\rho_a(1), \rho_a(2), \rho_a(3) \dots \rho_a(n)$: Datos de resistividad aparente obtenidos a diferentes espaciamientos por el método de cuatro varillas de pruebas

n : Número total de mediciones

Es difícil desarrollar un modelo de suelo uniforme cuando la resistividad de un suelo varía significativamente, la mayoría de los suelos no cumplirá los criterios para el uso de la ecuación anterior. No se recomienda el uso de la Ecuación (B-1) para una cuadrícula de tierra sin varillas de tierra. Además, si la resistividad de suelo uniforme determinada utilizando la Ecuación (B-1) se emplea para diseñar una cuadrícula de tierra, las varillas de tierra deben al menos alcanzar la profundidad donde la resistividad medida se corresponde con el valor calculado de ρ_a (av2).

$$\rho_{a(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad (\text{B-2})$$

Hay varios métodos sugeridos por diferentes autores para aproximarse a un terreno no uniforme con un modelo de suelo uniforme. Uno de estos métodos incluye el uso del promedio de la capa superior de la resistividad aparente para los cálculos de voltaje de toque y de paso y el promedio de la resistividad aparente de la capa más baja para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra del sistema.

B2 Modelo de suelo de dos capas.

Un modelo de suelo de dos capas puede ser representado por un suelo de la capa superior de una profundidad finita por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en los límites de cada capa de suelo se puede describir por medio de un factor de reflexión K y se calcula con la siguiente ecuación.

$$K = \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \quad (\text{B-3})$$

Donde

P_1 : Resistividad de la capa superior, $\Omega\cdot m$.

P_2 : Resistividad de la capa inferior, $\Omega\cdot m$.

Mientras que la representación más exacta de un sistema de puesta a tierra, sin duda debe estar basada en las variaciones reales de la resistividad del suelo presente en el sitio de la subestación, rara vez será económicamente justificable o técnicamente factible modelar todas estas variaciones. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la representación de un electrodo de tierra sobre la base de un modelo de tierra de dos capas equivalente es suficiente para diseñar un sistema de puesta a tierra segura.

Hay otros métodos sugeridos por los autores que incluyen la determinación de un modelo de dos capas y utilizando la resistividad de la capa superior para los cálculos de voltaje de paso y contacto, y la resistividad de la capa inferior para el cálculo de la resistencia; las ecuaciones modificadas presentadas en la guía pueden ser usadas de esta manera en modelos de dos capas.

Un modelo de suelo de dos capas puede ser aproximado mediante el uso de métodos gráficos. El método de Sunde se utiliza para aproximar un modelo de suelo de dos capas. El gráfico de la figura (B-1), que se basa en los datos de prueba de cuatro puntas de Wenner. Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen mediante la inspección de las mediciones de resistividad representados gráficamente en la figura (B-2). Sólo h se obtiene por el método gráfico de Sunde, como sigue:

- a) Trazar la curva de resistividad aparente ρ_a en el eje Y versus el espaciado de las puntas de sondeo en el eje x.
- b) Estimar ρ_1 y ρ_2 partir de la gráfica ploteada en el literal (a) ρ_a correspondiente a una separación más pequeña es ρ_1 y para una separación más grande es ρ_2 . Ampliar el gráfico de resistividad aparente en ambos extremos para obtener estos valores extremos de resistividad si los datos de campo son insuficientes.
- c) Determinar ρ_2 / ρ_1 y seleccionar una curva en el gráfico de Sunde en la figura (B-2), que coincida estrechamente, o interpolar y trazar una nueva curva en el gráfico.
- d) Seleccionar el valor en el eje y de ρ_a / ρ_1 dentro de la región inclinada de la curva ρ_2 / ρ_1 apropiada de la figura (B-1).
- e) Leer el valor correspondiente de α / h en el eje x.
- f) Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado, ρ_a / ρ_1 , en el apartado d) por ρ_1 .
- g) Leer la correspondiente separación de las puntas de prueba en el gráfico de resistividad aparente ploteada en a).
- h) Calcular h , la profundidad de la capa superior, usando la separación de las puntas de prueba apropiada, α .

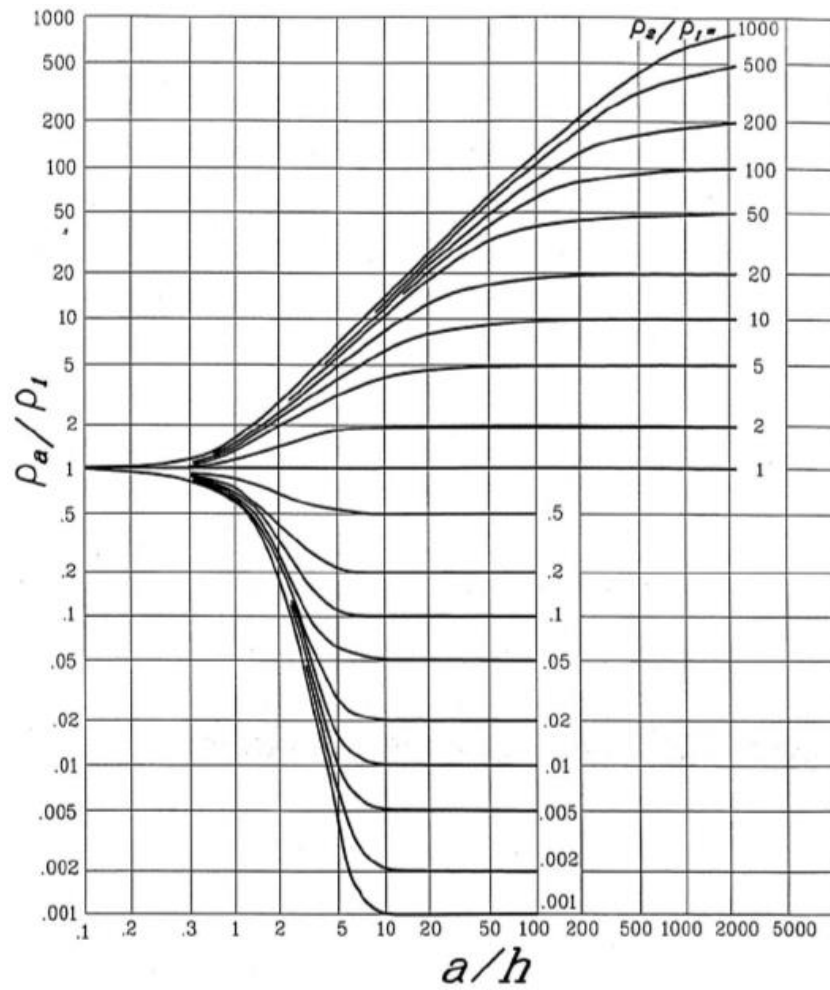


Figura B-1 Método Grafico De Sunde

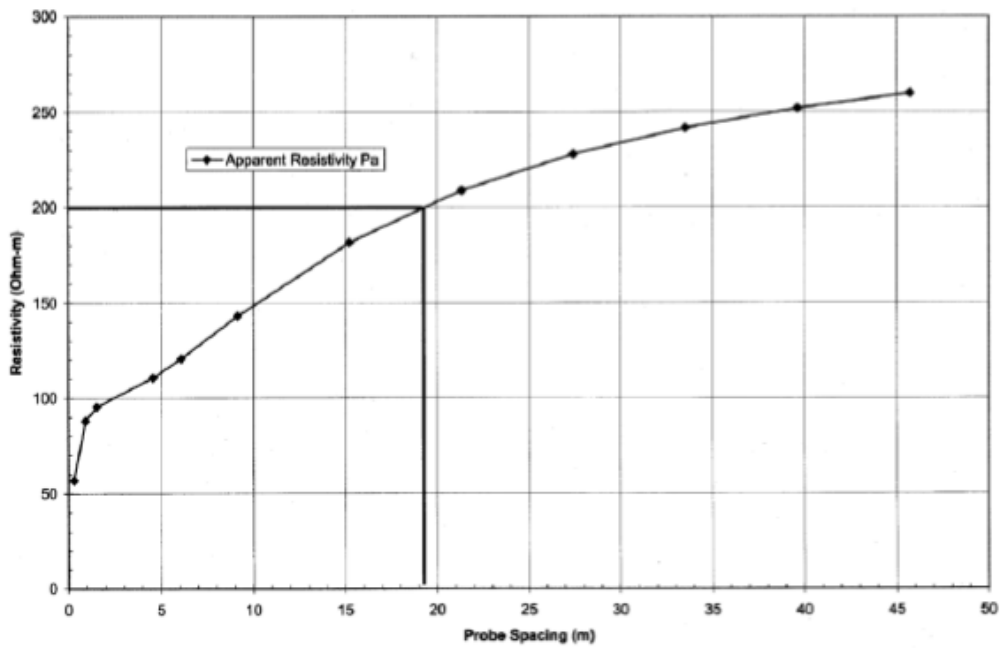


Figura B-2 Ejemplo Para Determinar "A" De La Curva De Resistividad Aparente

El enfoque del modelo de dos capas se ha encontrado que es mucho más preciso que el modelo de suelo uniforme. Un sistema de puesta a tierra en un ambiente de suelo de dos capas se comporta de manera diferente en comparación con el mismo sistema en el suelo uniforme.

B3 Modelo de suelo multicapas.

Es muy raro encontrar condiciones altamente no uniformes de suelo, sin embargo eso no significa que no se encontraran. Tales condiciones del suelo pueden requerir el uso de técnicas de modelado de múltiples capas si un modelo de suelo de dos capas equivalente no es factible. Un modelo de suelo de varias capas puede incluir varias capas horizontales o capas verticales.

Las técnicas para interpretar la resistividad altamente no uniforme del suelo requieren el uso de programas de computadora o métodos gráficos. Las ecuaciones que rigen el desempeño de un sistema de puesta a tierra enterrado en el suelo de varias capas se pueden obtener mediante la resolución de las ecuaciones de Laplace para una fuente de corriente en un punto, o por el método de las imágenes, lo que da resultados idénticos.

El uso de cualquiera de los métodos para determinar el potencial de tierra causado por un punto de fuente de corriente resulta en una serie infinita de términos que representan las contribuciones de cada imagen consecuyente de la fuente de corriente del punto ([9] IEEE, 2013).

ANEXO C

DATOS SOLICITADOS AL SUMINISTRADOR PARA EL ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO.

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 16 de octubre de 2018

CFE Distribución
Ing. Cesar Antonio Sánchez Velasco
Jefe de la oficina de protecciones, Zona Tuxtla
Presente

Por medio de la presente solicitud, yo, Fabián Alejandro Chacón Ovando, estudiante del noveno semestre de la licenciatura de ing. Eléctrica del plantel Instituto Tecnológico de México campus Tuxtla Gutiérrez, anteriormente Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez., el cual se encuentra ubicado en, Carretera Panamericana Km. 1080, CP. 29050, Tuxtla Gutiérrez. Extiendo la presente carta de petición para solicitar el estudio de corto circuito en MVA y/o en Amp del punto de conexión del campus.

Esto por motivo de fines didácticos, ya que este estudio me será útil para poder calcular la corriente de falla a tierra que necesito conocer para poder avanzar en el desarrollo de mi proyecto de residencia profesional, el cual es "programa para el diseño de mallas de una subestación eléctrica con base en la NOM-001-SEDE VIGENTE".

Agradezco de antemano el apoyo prestado a la presente petición y quedo al pendiente por cualquier duda o comentario generado de la misma solicitud. Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente,



Fabián Alejandro Chacón Ovando
Alumno de 9º semestre de ing. Eléctrica
Instituto Tecnológico Nacional, campus Tuxtla



Ing. Jesús R. Díaz

Código de Oficio: LST-065/2018

Oficio número: LST-065/2018

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; 06 de noviembre del 2018.

C. Fabian Alejandro Chacón Ovando,
Instituto Tecnológico Nacional de México,
Campus Tuxtla Gutiérrez,
No. De Control 14270466,
Presente

En atención a su solicitud de fecha 16 de octubre del presente año, en la cual solicita los valores de corto circuito, en el punto de transición del inmueble del Instituto Tecnológico campus Tuxtla Gutiérrez, ubicado en Carretera Panamericana Km. 1080, me permito indicarle lo siguiente

Subestación: Tuxtla Sur
Circuito alimentador TXS-4040
Tensión: 13.2KV
Corriente de corto circuito trifásica: 3949.95 A
Corriente de corto circuito monofásica: 2769.91 A

Sirva la presente para los fines académicos del proyecto que usted realiza denominado "Programa para el diseño de mallas de una subestación con base a la NOM-001-SEDE VIGENTE".

Sin más por el momento, me despido de usted

Atentamente

Ángel Gabriel Bustillos Nucamendi
Oficina de Líneas de Subtransmisión

Con copias para:

- Ing. Miguel Ángel García Mendoza. Superintendente de la Zona Tuxtla
- Ing. Luis Antonio Cervantes Meza.- Departamento de Mantenimiento Zona Tuxtla.-
- Expediente

ANEXO D

INFORME DE MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO.



RESISTIVIDAD DEL SUELO:



SUBESTACION ITNM CAMPUS TUXTLA GUTIERREZ. POSICIÓN _____ PÁGINA 1

UBICACIÓN RELE _____ FECHA 14/12/2018

ACTIVO ID _____ TEMPERATURA AMBIENTE 30 °C HUMEDAD 56 % CONTR # _____

EQUIP. PRUEBA MEGGER 4 PUNTAS PROBADO POR _____

TIPO DE VARILLA TIERRA _____ NUMERO VARILLAS DE TIERRA _____

DIAMETRO VARILLA DE TIERRA _____ cm LONGITUD VARILLA DE TIERRA _____ METROS

TIPO SUELO Arcilla Expansiva CONDICION DEL SUELO: SECO MOJADO HUMEDO

SIZE CONECTOR AL CONDUCTOR _____ AWG CONECTOR DE CONDUCTOR DESCUB AISLADO

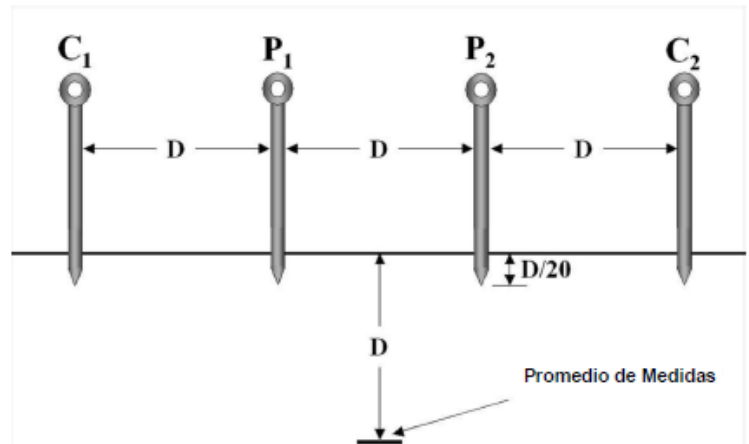
MEDIDA DIAGONAL DE MALLA DE TIERRA 4 METROS PROBADOR DE TIERRA MARCA: MEGGER DET4TD2

NUMERO DE SERIE _____ FECHA DE CALIBRACION _____

DIRECCION UBICACION SONDA _____

Resistividad del suelo (ohmio-cm) = 2 * PI * Distancia Entre Electrodo (cm) * Resistencia (ohmic)

UBICACION IDENTIFICADO	DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS (metros)	DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS (cm)	ELECTRODO PROFUNDIDAD (cm)	RESISTENCIA (ohms)	SUELO RESISTIVIDAD (ohm-cm)
A	1	100	5	1,05	659,734
B	2	200	10	0,37	464,956
C	3	300	15	0,26	490,088
D	4	400	20	0,23	578,053
A1	1	100	5	1,08	678,584
B1	2	200	10	0,35	439,823
C1	3	300	15	0,25	471,239
D4	4	400	20	0,22	552,92



COMENTARIOS: _____
DEFICIENCIAS: _____

ANEXO E

COTIZACIÓN DEL MATERIAL A USAR EN LA MALLA PROPUESTA.

Ventas

COEL S.A. DE C.V.



9ª AV. SUR Y 9ª CALLE PONIENTE #971
C.P. 29000 Col. BARRIO LAS CANOITAS
CHIAPAS CHIAPAS MEXICO
RFC COE9510055R6
Tel 01 961-611-45-15

Cotizacion CHI CH113896	por Confirmar ID=9147364	Pesos	20 diciembre 2018
--------------------------------	--------------------------	-------	-------------------

Cliente: **VENTAS MOSTRADOR CHIAPAS (25001)**

Referencia: **ELIGIO ARTURO MAZA LOPEZ**

Concepto: **Chiapas**

Observaciones:

Atentamente : **LUIS MIGUEL SOLIS**

Artículo	Descripción	Cant	Precio	Desc	Precio Neto	Importe
YA282NBURNDY	02004895 - ZAPATA TERM.CA?ON LARG.2PERF.CAL.4/0 TORN.1/2	2	\$105.37	10.89	%	\$93.90
						\$187.79
TIEMPO DE ENTREGA INMEDIATA						
VCW3	VARILLA COOPERWELD 3MTS X 5/8 PULG PULG	4	\$171.78	10.89	%	\$153.07
						\$612.29
TIEMPO DE ENTREGA INMEDIATA						
CTHW4/ONCORTE	CABLE THW 600V CAL 4/0 CONDULAC	64	\$206.91	10.89	%	\$184.38
						\$11,800.21
TIEMPO DE ENTREGA INMEDIATA						

Importe:	\$12,600.29
Sub Total:	\$12,600.29
Anticipos:	
Impuestos:	\$2,016.05
Importe Total:	\$14,616.34

cotizacion del proyecto							
red de mallas de tierra para subestacion comercial de 75 KVA							
Material	Cantidad		Precio neto		Importe		
soldadura cadwell 150	40	cargas	243,5	10 cargas	974	Sub total	
zapatas 2 ojillos 4/0	2	piezas	93,9	individual	187,8		15042,4
varillas copperweld 5/8"	4	piezas	153,07	individual	612,28	impuestos	
cable calibre 4/0	64	metros	184,38	individual	11800,32	iva 16%	2406,784
cinta senalizadora	1	rollo	100	individual	100		
molde para soldadura	1	pieza	1368	individual	1368	precio total	17449,184