
SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF

JOSÉ SAMUEL RAMÍREZ CASTAÑO
Ingeniero Electricista
EDUARDO ANTONIO CANO PLATA
Ingeniero Electricista



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
2010

I.S.B.N. 978-958-8280-38-7

©2010 UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA SEDE MANIZALES

AUTORES:

José Samuel Ramírez Castaño
Ingeniero Electricista, Especialista en Sistemas de Distribución
Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Eduardo Antonio Cano Plata
Ingeniero Electricista, Doctor en Ingeniería
Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Corrección de Estilo
Marta Isabel Serna

IMPRESO: Editorial Blanecolor Ltda

Marzo 2010
Primera edición

ABSTRACT

How to precisely the model and measure the grounding resistance of substations is the fundamental factor to guarantee the safe operation of power systems. The placement rules of IEEE STD 80 and test electrodes for the grounding resistance measurement of grounding system in vertical-layered soil were analyzed by the numerical method in this book. The actual demanded location of the test potential electrode respective to the true grounding resistance of grounding system in the different measuring directions changed (in a wide range) when the grounding system was arranged in different soil models this is the principal idea for the introduction of the FEM –finite elements method in the IEEE std 80. The scientific and suitable measuring method of grounding resistance is based on analyzing the actual soil model and the grounding system structure to obtain the suitable test route and choose the correct compensated point location of the potential electrode.

RESUMEN

Precisar el modelo y la medición del sistema de puesta a tierra en una subestación es de vital importancia para garantizar la operación del sistema. Las reglas enumeradas en la forma IEEE 80 y la introducción al, método de los elementos finitos para el cálculo de la distribución son el centro del análisis de este libro. Actualmente es de suma importancia entregar las curvas de distribución de potencial en los electrodos del sistema para la correcta evaluación del valor de la resistencia del sistema. Los científicos basan el actual modelo de la estructura de los puntos medidos sobre el sólido, tratamiento que se ha intentado narrar en el texto.

DEDICATORIA

Esta primera edición está dedicada a nuestras familias:

José Samuel: Luz Mary, Valentina, Geraldine.

Eduardo Antonio: Alicia Fabiana, José Alberto, Ana Carla, Juan Marcos.

PRÓLOGO

Este trabajo intenta presentar de manera simple y sistematizada, el método introducido por la norma IEEE 80 en el diseño de sistemas de puesta a tierra para subestaciones. El estudio se limita al análisis del sistema a través de métodos numéricos.

Este tipo de sistemas forman parte de un capítulo del material que se dicta en el curso de postgrado calidad del servicio de energía eléctrica. Por considerar los autores la importancia del tema han decidido ampliarlo en la presente obra. Las exposiciones previas al texto se han valorado en los últimos diez años de clase sirviendo a los alumnos y enriqueciéndose a través de sus valiosas críticas. Los autores aprovechan la oportunidad para agradecer a quienes han propiciado la discusión de las presentaciones del tema de puesta a tierra en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Resaltan particularmente la influencia del Ing. Julián Felipe Zapata.

Se asume que el lector tiene conocimientos básicos de ingeniería eléctrica. Se pretendió una obra auto contenida donde el capítulo uno introduce el planteamiento del problema a través de métodos de ecuaciones diferenciales. Los capítulos dos a siete centran la atención en el método de diseño del IEEE std 80, su respectiva técnica de medida, el IEEE std 81. El capítulo ocho trata una serie de ejercicios adicionales. Culminando la obra con una ruta bibliográfica.

Los Autores.
Manizales, Febrero de 2010.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1. MÉTODOS DE LA MECÁNICA DEL CONTINUO	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Representación de la ecuación de continuidad	10
1.3 Representaciones en la configuración de referencia de tensores definidos en la configuración espacial.....	11
1.4 Representaciones de ecuaciones del continuo.....	13
1.5 Relaciones Constitutivas de las ecuaciones de Maxwell.....	14
La conductividad	14
1.6 Comentario final.....	16
CAPÍTULO 2. CRITERIOS DE DISEÑO UTILIZANDO IEEE-80	17
2.1 Parámetros críticos [1]	17
2.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla (I_G):	17
2.1.2 Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)	17
2.1.3 Factor de decremento (D_f)	18
2.1.4 Factor de crecimiento (C_p)	18
2.2 Cálculo del factor de división de corriente (S_f)	18
2.3 Duración de la falla (t_f) y duración del choque (t_s).....	21
2.4 Geometría de la malla.....	21
2.5 Resistividad de la capa superficial (ρ_s)	21
2.6 Resistividad del terreno (ρ).....	22
2.7 Investigación de la estructura del suelo	22
2.8 Medidas de resistividad.....	23
2.9 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo.....	24
2.10 Modelo de suelo multicapas.....	26

2.11	Selección del tamaño del conductor	27
2.12	Criterio de tensiones de paso y de toque tolerables [1].....	29
CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (Rg).....		31
3.1	Requerimientos usuales	31
3.2	Cálculos simplificados.....	31
3.3	Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo [1]	32
3.4	Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas.....	33
3.5	Tratamiento del suelo para obtener resistividad más baja.....	34
3.6	Cálculo de la tensión máxima de la malla [1]	34
3.7	Cálculo de la tensión real de paso Ep [1]	36
3.8	Refinamiento del diseño preliminar [1], [2]	36
3.9	Conexiones a la malla [1]	38
3.10	Procedimiento de diseño [1].....	38
3.11	Ejemplo de cálculo de las corrientes de falla en una subestación [3], [5]	40
CAPÍTULO 4. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO PARA LA SUBESTACIÓN (EJEMPLO).43		43
4.1	Datos recolectados en el terreno [5]	43
4.2	Modelamiento asumiendo suelo uniforme.....	44
4.3	Modelamiento asumiendo el modelo de suelo de 2 capas [1]	44
4.4	Método estadístico para encontrar la resistividad a emplear en el diseño de la puesta a tierra de suelos modelados como uniformes [5]	45
CAPÍTULO 5. DISEÑANDO CON IEEE-80		51
5.1	Caso 1: Malla cuadrada sin varillas de tierra	51
5.2	Caso 2: malla rectangular sin electrodos [1]	56
5.3	Caso 3: malla cuadrada con electrodos [1]	57
5.4	Caso 4: malla rectangular con electrodos [1]	59
5.5	Caso 5: malla en L con electrodos [1]	62
5.6	Aplicación de las ecuaciones de schwarz (más exacta) de la resistencia de puesta a tierra del caso 4 (terreno homogéneo)	64
5.7	Aplicación de las ecuaciones modificadas de schwarz para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra del caso4 (Terreno de dos capas) [2]	65
CAPÍTULO 6. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA YA INSTALADO.....		67
6.1	Método de la Regla del 61.8%: [4]	67
6.2	Método de intersección de curvas: [4], [6].....	68
6.2.1	Procedimiento de medida:.....	69
6.2.2	Condiciones para la instalación del sistema de medida:.....	69
6.3	Conductores, empalmes y barrajes de tierra [7]	72

CAPÍTULO 7. PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS DISTINTOS CASOS DE DISEÑO DE MALLAS DE PUESTAS A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN CON LA HERRAMIENTA MATLAB 6.1	85
CAPÍTULO 8. EJERCICIOS ADICIONALES	93
8.1 Mallas de puesta a tierra de un tren de laminación	93
8.1.1 Cálculo de la resistividad del suelo.....	93
8.2 Cálculo de malla de puesta a tierra para subestación transformadora	96
8.3 Diseños utilizando una malla de estructura como referencia de señal (SRS)	105
8.4 Diseños utilizando como herramienta el Estándar IEEE 80.....	110
BIBLIOGRAFÍA	113

INTRODUCCIÓN

El diseño de sistemas de puesta a tierra hace parte del conjunto de actividades relacionadas con el dimensionamiento de una subestación eléctrica, lo que es una actividad esencial. El presente trabajo se basa principalmente en la Norma ANSI / IEEE standard 80-2000 “IEEE Guide for Safety in AC Substation grounding” y la aplica a casos prácticos, buscando que el estudiante de Ingeniería Eléctrica conozca la norma de una manera didáctica y pueda enfrentar problemas prácticos que encontrará durante el desempeño y desarrollo de su vida profesional. Mediante los conceptos desarrollados en este texto, aprenderá entonces a calcular un sistema de puesta a tierra, comenzando con la obtención de los datos de campo, continuando con el diseño propiamente dicho y finalizando con la medición de la resistencia de un sistema de puesta a tierra ya construido.

Posteriormente, este trabajo se evalúa través del método de los elementos finitos MEF, que se utiliza para resolver la ecuación de Poisson. El resultado es la distribución de potencial eléctrico en el terreno, y se muestra de forma gráfica la efectividad de la solución propuesta.

En primer lugar, se presentan las relaciones constitutivas y el método de solución a través del toolbox de Matlab [34] partial differential equations; luego se muestran los criterios de diseño, los parámetros críticos, la selección del tamaño de los conductores, los criterios de tensiones de toque y de paso tolerables por el cuerpo humano, la evaluación de la resistencia de puesta a tierra, el cálculo de las tensiones máximas reales de malla y de paso, el refinamiento del diseño preliminar de la malla, las conexiones a la malla y el procedimiento de diseño.

La sección de cálculos comienza con las corrientes de cortocircuito de una subestación, sigue con las medidas de la resistividad del terreno y el modelamiento del tipo de suelo. Se incluye después un método estadístico para encontrar la resistividad a usar en el diseño del sistema de puesta a tierra cuando el suelo se modela como uniforme.

Se aplica el procedimiento planteado por la Norma IEEE 80-2000 a cinco casos típicos; los primeros tres casos con resultados no satisfactorios y otros dos con resultados satisfactorios. Se aplican también las fórmulas de Schwarz para calcular la resistencia de puesta a tierra de uno de los casos satisfactorios, asumiendo el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas.

El trabajo termina con la aplicación de esta metodología en el diseño de un tren de laminación, para luego medir la resistencia de una puesta a tierra ya construida; se ilustra también el método de intersección de curvas.

Finalmente se ilustran las conexiones eléctricas, las condiciones de utilización y los puntos donde se aplican.

Se anexa un programa de cálculo en la herramienta MATLAB 6.5 realizado por el estudiante Julián Felipe Zapata G. y unas hojas de cálculo con el método sistematizado.

CAPÍTULO 1

MÉTODOS DE LA MECÁNICA DEL CONTINUO

1.1 Introducción

Existen dos objetivos principales que debe cumplir el sistema de puesta a tierra de cualquier subestación, bajo condiciones normales y de falla:

- Proporcionar los medios para disipar corrientes eléctricas a tierra sin exceder los límites de operación de la red y de los equipos.
- Asegurar que las personas dentro de la subestación y en sus vecindades, no estén expuestas al peligro de las corrientes eléctricas de choque.

El procedimiento de diseño que se describe corresponde a la Standard 80-2000 de la IEEE y permite obtener niveles seguros de tensiones de paso y de toque dentro de la subestación (área cercada) y en sus proximidades. Puesto que la tensión de malla representa la peor tensión de toque posible dentro de la subestación (excluyendo los potenciales transferidos), esta clase de tensión se usará como base para el diseño.

Las tensiones de paso son menos peligrosas que las tensiones de malla debido a que se debe instalar una capa superficial de alta resistividad, pero esta capa no se extiende por fuera de la subestación, donde las tensiones de paso pueden ser peligrosas. En cualquier caso, las tensiones de paso y de toque calculadas deben ser menores que las tensiones de paso y de toque tolerables por el cuerpo humano.

Para mallas de puesta a tierra igualmente espaciadas, la tensión de malla se incrementará a lo largo de las cuadrículas desde el centro hasta las esquinas de la malla, lo cual dependerá de su tamaño, del número y localización de las varillas de tierra, del espaciamiento de los conductores paralelos, del diámetro y profundidad de los conductores y de la resistividad del suelo.

La tensión de malla (E_m) es la tensión de toque en el centro de una cuadrícula esquinera, pero ésta se disminuye instalando varillas en el perímetro de la malla o cuando el espaciamiento de la malla en el perímetro es pequeño.

Para limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente, y evitar que pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla, debe instalarse un sistema de puesta a tierra. En la discusión que sigue se asume que el sistema de puesta a tierra se compone de una malla horizontal de conductores enterrados, suplementada por varillas de tierra conectadas a la malla con el fin de penetrar suelos de capas profundas que tienen menor resistividad. Dichas varillas se instalan siempre a lo largo del perímetro y en las esquinas de la malla.

1.2 Representación de la ecuación de continuidad

Cuando se describe la conductividad de un medio continuo utilizando una metodología lagrangeana, existen dos posibilidades: (i) se conoce una configuración de referencia que puede ser la inicial o de flujo, este es en el caso de las llamadas formulaciones lagrangeanas totales y (ii) se conoce una configuración de equilibrio cualquiera, que es el caso de las llamadas formulaciones lagrangeanas actualizadas, y se busca la configuración espacial correspondiente a un instante t . Suele llamarse instante a un valor determinado de la coordenada temporal y se hace notar que se utiliza la noción de tiempo en un sentido muy general, como el de una coordenada que sirve para numerar eventos.

La configuración espacial correspondiente al instante t está definida por densidades de corriente tJ que satisfacen la ecuación de Maxwell de continuidad del tipo:

$$\nabla \bullet J = 0, \quad E = {}^t\sigma({}^tJ) \quad \forall \Omega \quad (1)$$

Donde, en general, los tensores de segundo orden ${}^t\sigma$ son complicadas funciones no-lineales de tJ y de la historia del proceso de cambio de la conductividad. Una dificultad fundamental para resolver la ecuación (1) es que el dominio ${}^t\Omega$ sobre el que debe ser resuelta, es parte de la solución del problema.

El problema matemático se completa con condiciones de borde en ${}^t\sigma$ y tJ , y se resuelve, como es bien sabido, utilizando magnitudes definidas sobre una configuración de referencia (representaciones en cierto sentido de las magnitudes definidas en la configuración espacial) y resolviendo un problema equivalente al descrito por la ecuación (1) sobre ${}^0\Omega$ (donde el supraíndice "0" indica la configuración de referencia adoptada).

El tensor de conductividad de Green y el segundo tensor de campo eléctrico de Kirchhoff son ejemplos de magnitudes definidas sobre la configuración de referencia para resolver sobre ${}^0\Omega$ los problemas no-lineales presentes en el medio, esta metodología ha migrado de las técnicas en mecánica del medio continuo (mecánica computacional) [21].

Marsden y Hughes [10] describen metodologías utilizadas en el cálculo de variedades diferenciables [14], que permiten sistematizar la tarea de encontrar representaciones sobre ${}^0\Omega$ de tensores definidos en ${}^1\Omega$ y sistematizar la formulación de problemas matemáticos definidos sobre ${}^0\Omega$ equivalentes a la ecuación (1). Aunque Maxwell desarrolló las ecuaciones en forma compacta se deben emplear métodos numéricos para su solución.

Los desarrollos modernos del método de elementos finitos aplicados a problemas no-lineales de Mecánica del Sólido hacen un uso riguroso de estas técnicas [11-17]. Para el caso particular del electromagnetismo, la resistividad del terreno se aborda en este capítulo utilizando esta técnica.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar una visión geométrica de algunas técnicas de cálculo de variedades diferenciables como los pull-back y los push-forward [11, 13], que permita su incorporación simple e intuitiva al bagaje de herramientas que manejan los ingenieros que trabajan en la resolución -mediante elementos finitos- de problemas no-lineales en Mecánica del Continuo, pensando siempre en los cambios que sufre el terreno ante la presencia de una descarga atmosférica.

El capítulo finaliza con el análisis de la representación sobre la configuración de referencia de algunas ecuaciones típicas que se encuentran en la teoría electromagnética [32-34].

1.3 Representaciones en la configuración de referencia de tensores definidos en la configuración espacial

Supóngase conocidas para un continuo la configuración de referencia (${}^0\Omega$) y la configuración espacial (${}^1\Omega$), tal como se indica en la Figura 1. Se define:

- Un sistema de coordenadas arbitrario en la configuración espacial $\{{}^1x^a\}$ con vectores base covariantes 1g_a y vectores base contravariantes ${}^1g^a$.
- Un sistema de coordenadas arbitrario en la configuración de referencia $\{{}^0X^A\}$ con vectores base covariantes 0G_A y vectores base contravariantes ${}^0G^A$.
- Un sistema de coordenadas convectivo $\{\theta^i\}$ que en la configuración espacial tiene vectores base covariantes 1g_i y vectores base contravariantes ${}^1g^i$ y en la configuración de referencia tiene vectores base covariantes 0G_i y vectores base contravariantes ${}^0G^i$.

Supóngase la existencia de un mapeo biunívoco:

$${}^1x^a = {}^1\varphi^a({}^0X^A) \quad (2.a)$$

y un mapeo inverso:

$${}^0X^A = [{}^1\varphi^{-1}({}^1x^a)]^A \quad (2.b)$$

es decir, asúmase que el movimiento indicado en la Figura 1 es un movimiento regular, que corresponde al supuesto cambio de conductividad ante la presencia de una descarga atmosférica en el modelo. Este caso proviene de la noción formal de movimiento regular y corresponde con la noción intuitiva de movimientos en los que no ocurre interpenetración.

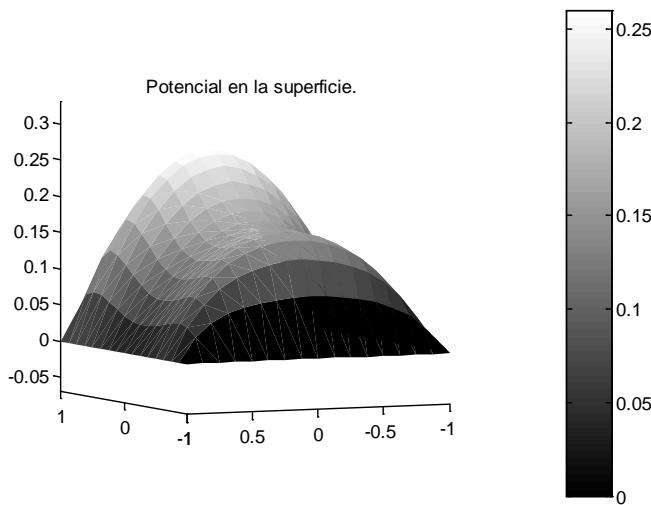
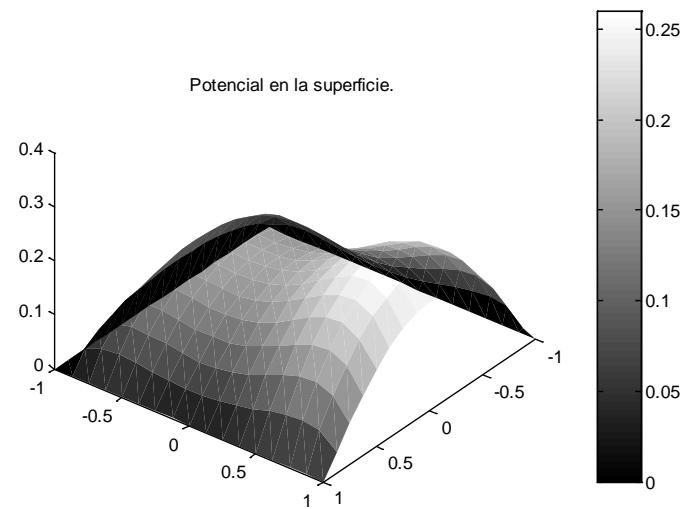


Figura 1. Movimiento del continuo

Restringiendo el problema al espacio euclídeo se puede considerar a φ un vector. Se define un tensor de dos puntos [11] denominado tensor gradiente de potencial:

$${}^t_0 F = \frac{\partial {}^t \varphi^a}{\partial X^A} {}^t g_a G^A \quad (3a)$$

donde, con la notación ${}^t g \otimes G^A$ se indica el producto tensorial de dos vectores (Matlab [34] se utiliza la notación ${}^t \underline{g}_a \otimes \underline{G}^A$). Es inmediato que,

$${}^t d\underline{x} = {}^t F \cdot d\underline{X} \quad (3b)$$

siendo,

$${}^t d\underline{x} = {}^t dx^a {}^t \underline{g}_a \quad (3c)$$

$${}^t d\underline{X} = {}^t dX^a {}^t \underline{G}_a \quad (3d)$$

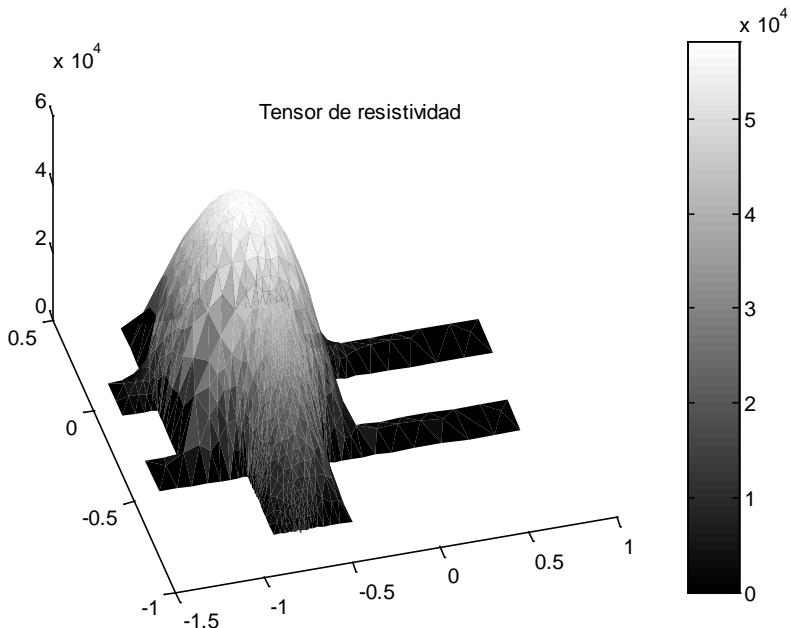


Figura 2. Distribución de la resistividad en un SPT.

1.4 Representaciones de ecuaciones del continuo

En la sección anterior, se ha comentado la forma de encontrar representaciones de tensores eulerianos en la configuración de referencia y en configuraciones desrotadas de la configuración espacial. En esta sección, aplicaremos lo expuesto para obtener representaciones de algunas ecuaciones del continuo.

Ecuaciones de Equilibrio

La ecuación (1) es la ecuación de equilibrio en la configuración espacial, donde \mathbf{J} es el vector de corriente por unidad de volumen de la configuración espacial.

En el sistema de coordenadas $\{x^a\}$, la divergencia de J está dada por (1) como la relación de Maxwell de continuidad, en ésta aparecen las relaciones constitutivas, entre otras la ley de ohm [32].

$$\underline{\nabla} \cdot {}^t J = \left[\frac{\partial' J^{ab}}{\partial' x^a} + {}^t J^{ja} \frac{1}{2} {}^t g^{bp} \left(\frac{\partial' g_{ap}}{\partial' x^j} + \frac{\partial' g_{pj}}{\partial' x^a} - \frac{\partial' g_{aj}}{\partial' x^p} \right) \right] {}^t g_b \quad (4a)$$

Dado que $\nabla \cdot$ es un vector podemos encontrar su representación en la configuración de referencia,

$$[{}^t \varphi^* (\underline{\nabla} \cdot {}^t J)]^B = ({}^t \underline{\Sigma}^#)_b^B (\underline{\nabla} \cdot {}^t J)^b \quad (4b)$$

Así mismo,

$$\frac{\partial' J^{ab}}{\partial' x^a} = \frac{\partial' J^{ab}}{\partial' X^A} ({}^t \underline{\Sigma}^#)_a^A \quad (4c)$$

y teniendo en cuenta las ecuaciones (2) obtenemos:

$$[{}^t \varphi^* (\underline{\nabla} \cdot {}^t J)]^B = \frac{\partial [{}^t \underline{\Sigma}^#]^{AB}}{\partial X^A} + ({}^t \underline{\Sigma}^#)^{JA} \frac{1}{2} {}^t C^{BP} \left[\frac{\partial {}^t C_{AP}}{\partial X^J} + \frac{\partial {}^t C_{JP}}{\partial X^A} - \frac{\partial {}^t C_{AJ}}{\partial X^P} \right] \quad (4d)$$

Esto se escribe como [11]:

$$[{}^t \varphi^* (\underline{\nabla} \cdot {}^t J)]^B = DIV_{{}^t \underline{\Sigma}^#} ({}^t \underline{\Sigma}^#) \quad (4e)$$

Lo anterior indica que se trata de un cálculo de divergencia de la representación ${}^t \underline{\Sigma}^# = [{}^t \varphi^* (\underline{\nabla} \cdot {}^t J)^{ab}]^{AB} G_A G_B$ utilizando como métrica el tensor de conductividad de Green (concepto tomado de la mecánica del continuo [22] y aplicado por analogía a la ley de continuidad de Maxwell)

Por lo tanto, la representación de la ecuación (1) en la configuración de referencia (${}^0 \Omega$) es

$$0 = DIV_{{}^0 \underline{\Sigma}^#} ({}^0 \underline{\Sigma}^#) \quad (4f)$$

1.5 Relaciones Constitutivas de las ecuaciones de Maxwell

La conductividad

En un material se define para un instante t la energía disipada por unidad de masa utilizando la conductividad, este es un problema asociado a la disipación de corriente eléctrica en el suelo, el

presente estudio se limita a las ecuaciones de un medio continuo (1). Observando estas ecuaciones en un sistema de puesta a tierra, se podrán representar así:

$$\begin{aligned} \nabla \bullet J &= 0, \quad E = {}^t\sigma({}^tJ) \quad \forall {}^t\Omega \\ E &= E_\Gamma \text{ en } \Gamma, \quad g_a \cdot J = 0 \text{ en } \Gamma_\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

En (5) Ω es el terreno, σ es su tensor de conductividad y Γ_Ω es la superficie del terreno, g_a es el vector covariante en coordenadas generalizadas y Γ es la superficie de los electrodos. La solución que se debe entregar es la distribución de potencial; o el potencial en un punto arbitrario. Se debe evaluar la dinámica cuando el sistema de puesta a tierra adquiere un potencial φ_Γ (sobretensión del sistema) y la ecuación (6) se trabaja en p.u.

$$J = \sigma\varphi, \quad I_\Gamma = \iint J d\Gamma, \quad R_{eq} = \frac{\varphi_\Gamma}{I_\Gamma} \quad (6)$$

En la práctica, se considera isotrópico el suelo, con ello σ se sustituye por un escalar (St. IEEE 80). Más adelante se describe otra aproximación con el modelo multicapas.

Asumiendo la superficie del terreno horizontal, esto muestra la condición de frontera de Dirichlet, $\Delta\varphi = 0$ en Ω , en búsqueda de regularización se tienen las condiciones expresadas en (5).

Aplicando a (5) la identidad de Green [11]:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\sigma} \iint_{\varepsilon \in \Gamma} k(x, \varepsilon) J(\varepsilon) d\Gamma, \quad x \in \Omega \quad (7)$$

Con núcleo débil:

$$k(x, \varepsilon) = \left(\frac{1}{r(x, \varepsilon)} + \frac{1}{r(x, \varepsilon')} \right), \quad r(x, \varepsilon) = |x - \varepsilon|; \quad (8)$$

En (7) se expresa el funcional del problema. Discretizando se tiene:

$$J(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N J_i N_i(\varepsilon) \quad \Gamma = \bigcup_{\alpha=1}^M \Gamma^\alpha \quad (9)$$

Utilizando *toolbox de Matlab Partial differential equations* (PDE) se aprovecha la utilización en dos dimensiones del mallado por elementos triangulares [34].

En resumen, la solución de la ecuación (1) pasará por:

1. Obtener la configuración de referencia de la ecuación (1).
2. Resolver dicha representación sobre ${}^0\Omega$ obteniéndose así medidas de densidad de corriente y conductividad.
3. Obtener los tensores de conductividad y densidad de corriente, a partir de su configuración de referencia.
4. Plantear el funcional de la ecuación constitutiva, que puede formularse a través de la técnica de Galerkin, por el método del residuo mínimo.
5. Resolver usando una semilla de mallado triangular.

1.6 Comentario final

En este capítulo se ha tratado de migrar desarrollos provenientes de la mecánica del medio continuo a través de la metodología de los profesores Eduardo Dvorkin y Marcela Gloschmit [21-22] y del cálculo de variedades diferenciables [32], para hacer el planteamiento de la ecuación de continuidad de Maxwell empleando el lenguaje usual de los ingenieros que trabajan en la resolución de problemas no-lineales de la Mecánica del Continuo utilizando elementos finitos.

El mérito de los desarrollos expuestos pertenece a los citados profesores y cualquier mala interpretación de estos conceptos será culpa responsabilidad de quienes firmamos este texto.

CAPÍTULO 2

CRITERIOS DE DISEÑO UTILIZANDO IEEE-80

A continuación se presenta una descripción de los criterios de diseño de sistemas de puesta a tierra (SPT) con el algoritmo propuesto en IEEE- 80 [1]. Como se ha indicado en el capítulo anterior, un sistema de puesta a tierra debe instalarse para limitar los gradientes de potencial de tierra a niveles de tensión y corriente que no pongan en peligro la seguridad de las personas y de los equipos bajo condiciones normales y de falla.

2.1 Parámetros críticos [1]

Los siguientes parámetros, que dependen del sitio de la subestación, tienen un sustancial impacto en el diseño de la malla de puesta a tierra:

2.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla (I_g):

El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la malla de la subestación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_g = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (10)$$

Donde:

$I_F = 3I_O$ → Corriente simétrica de falla a tierra en A.

D_f → Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

S_f → Factor de división de corriente.

C_p → Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de falla.

2.1.2 Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)

Por razones prácticas, se recomienda hallar los siguientes tipos de falla:

- a) Falla línea – línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3.I_O = \frac{3.E.Z_2}{Z_1.(Z_O + Z_2) + Z_2.Z_O} \quad (11)$$

b) Falla línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_F)_{L-T} = 3.I_O = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (12)$$

Donde:

I_O → Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A.

E → Tensión fase – neutro RMS en V.

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

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

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

En una ubicación dada, una falla simple línea – tierra será la peor si $Z_1.Z_0 > (Z_2)^2$ en el punto de la falla y una falla línea – línea – tierra será la peor si $Z_1.Z_0 < (Z_2)^2$, es común que en un sistema dado $Z_1 = Z_2$.

2.1.3 Factor de decremento (D_f)

En el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}})} \quad (13)$$

Donde:

t_f → Duración de la falla en s.

T_a → Constante de tiempo de la componente DC.

$$T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (14)$$

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

2.1.4 Factor de crecimiento (C_p)

Si la malla de puesta a tierra se construye teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación, y no se consideran aumentos futuros de carga ni de alimentadores, $C_p = 1$.

2.2 Cálculo del factor de división de corriente (S_f)

El proceso del cálculo consiste en derivar una representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. Esto es, conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros, hacia las tierras de los pie de torres que entran y sacan líneas de la subestación. S_f depende de:

- a) Localización de la falla.
- b) Magnitud de la resistencia de la malla de puesta a tierra de la subestación.
- c) Cables y tubos enterrados en las vecindades de la subestación o directamente conectados al sistema de puesta a tierra.
- d) Cables de guarda, neutros u otras trayectorias de retorno por tierra.
- e) Líneas de transmisión que entran y alimentadores que salen de la subestación; cantidad, número de cables de guarda y la impedancia de cada uno; cantidad y resistencia de puestas a tierra de pies de torre; longitud de líneas de transmisión y alimentadores; material y calibre de cables de guarda y neutros.

Existe una serie de desarrollos matemáticos, curvas y tablas que permiten encontrar el valor de S_f pero resulta mucho más práctico utilizar la Tabla 1.

La Tabla 1 muestra las impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de transmisión y de neutros de alimentadores de distribución, para una contribución remota del 100% con X líneas de transmisión y Y alimentadores de distribución. La primera columna muestra las impedancias equivalentes para resistencias de electrodos de puesta a tierra de líneas de transmisión R_{tg} de 15Ω y resistencias de electrodos de puesta a tierra de alimentadores de distribución R_{dg} de 25Ω . La segunda columna de impedancias equivalentes corresponde a $R_{tg} = 100\Omega$ y $R_{dg} = 200\Omega$.

El factor de división de corriente será entonces:

$$(S_f)_{X/Y} = \left| \frac{(Zeq)_{X/Y}}{Rg + (Zeq)_{X/Y}} \right| \quad (15)$$

Donde:

$(Zeq)_{X/Y}$ → impedancia equivalente de X cables de guarda de líneas de transmisión e Y neutros de alimentadores de distribución.

Rg → resistencia del sistema de puesta a tierra de la subestación.

Tabla 1. Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (alimentadores)

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Zeq (ohms) Rtg =15, Rdg =25	Zeq (ohms) Rtg =100, Rdg =200
1	1	0,91 + J0,485	3,27 + J0,652
1	2	0,54 + J0,33	2,18 + J0,412
1	4	0,295 + J 0,20	1,32 + J0,244
1	8	0,15 + J 0,11	0,732 + J0,133
1	12	0,10 + J 0,076	0,507 + J0,091
1	16	0,079 + J 0,057	0,387 + J0,069
2	1	0,685 + J 0,302	2,18 + J0,442
2	2	0,455 + J 0,241	1,63 + J0,324
2	4	0,27 + J 0,165	1,09 + J0,208
2	8	0,15 + J 0,10	0,685 + J0,122
2	12	0,10 + J 0,07	0,47 + J0,087
2	16	0,08 + J 0,055	0,366 + J0,067
4	1	0,45 + J 0,16	1,30 + J0,273
4	2	0,34 + J 0,15	1,09 + J0,22
4	4	0,23 + J 0,12	0,817 + J0,16
4	8	0,134 + J 0,083	0,546 + J0,103
4	12	0,095 + J 0,061	0,41 + J0,077
4	16	0,073 + J 0,05	0,329 + J0,06
8	1	0,27 + J 0,08	0,72 + J0,152
8	2	0,23+ J 0,08	0,65 + J0,134
8	4	0,17 + J 0,076	0,543 + J0,11
8	8	0,114 + J 0,061	0,408 + J0,079
8	12	0,085 + J 0,049	0,327 + J0,064
8	16	0,067 + J0,041	0,273 + J0,052

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

La duración de la falla y la duración del choque normalmente se asumen iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choques sucesivos, como los producidos por los recierres automáticos de los *reclosers*. La selección de t_f puede reflejar tiempos de despeje rápidos de la subestación de transmisión y tiempos de despeje lentos para subestaciones de distribución e industriales. La selección de t_f y t_s puede resultar en la combinación más pesimista de factores de decremento de corrientes de falla y corrientes permitidas por el cuerpo humano. Valores típicos para t_f y t_s están en el rango de 0.25 s a 1 s.

2.4 Geometría de la malla

Las limitaciones de los parámetros físicos de una malla de puesta a tierra están basadas en las restricciones físicas y económicas de la misma. Es poco práctico instalar una placa de cobre como sistema de puesta a tierra.

- Los espaciamientos típicos entre conductores (D) están en el rango:

$$15m > D > 3m$$
- Las profundidades típicas (h) están en el rango:

$$1.5m > h \geq 0.5 \text{ m}$$
- Los calibres típicos de conductores (ACM) están en el rango:

$$500 \text{ MCM} > A_{CM} \geq 2/0 \text{ AWG}$$
- El diámetro del conductor de la malla tiene un efecto despreciable sobre la tensión de malla.
- El área del sistema de puesta a tierra (A) es el factor más importante en la determinación de la resistencia de malla (R_g). Entre mayor sea A, menor será R_g y por lo tanto, es menor la elevación del potencial de tierra (GPR).

2.5 Resistividad de la capa superficial (ρ_s)

Una capa de alta resistividad sobre la superficie ayuda a limitar la corriente que pasaría por el cuerpo humano, ya que esta capa agrega una resistencia a la resistencia promedio del cuerpo. Una capa superficial con un espesor (h_s) entre $0.15m \geq h_s \geq 0.1m$ de un material de alta resistividad como la grava o la roca volcánica triturada, colocada sobre la superficie más arriba de la malla, incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas en la subestación y la corriente por el cuerpo bajará considerablemente. La reducción depende de los valores relativos de las resistividades del suelo en contacto con la malla, y del espesor y material de la capa superficial.

La capa superficial también es útil para retardar la evaporación de la humedad, y así limitar el secado de las capas superiores durante los períodos de verano. Esta capa tiene una resistividad del orden de $5000 \Omega\text{-m} > \rho_s > 2000 \Omega\text{-m}$. Una capa con un espesor entre 0.1m y 0.15m, disminuye el factor de riesgo (relación entre la corriente del cuerpo y la corriente de cortocircuito) a una relación 10:1 comparado con la humedad natural de la tierra.

Se introduce aquí el factor de disminución de la capa superficial (C_s), que puede ser considerado como un factor de corrección para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona en presencia de un material superficial de espesor finito. La norma expone un procedimiento matemático y presenta unas gráficas para encontrar el valor de C_s ; sin embargo, también presenta una expresión empírica para el valor de C_s . Este valor está dentro del 5% de los valores obtenidos con un método más analítico.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (16)$$

Donde:

C_s → Factor de disminución de la capa superficial.

ρ → Resistividad del terreno ($\Omega\text{-m}$).

ρ_s → Resistividad de la capa superficial ($\Omega\text{-m}$).

h_s → Espesor de la capa superficial.

La norma también define el factor de reflexión entre las resistividades de materiales diferentes como:

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (17)$$

2.6 Resistividad del terreno (ρ)

La resistencia de la malla y los gradientes de tensión dentro de una subestación están directamente relacionados con la resistividad del terreno, lo cual variará horizontal y verticalmente. Se deben reunir suficientes datos relacionados con el patio de la subestación, con base en mediciones directas de resistividad empleando un telurómetro. La resistividad del terreno es directamente afectada por la humedad, la temperatura ambiente y el contenido de químicos.

2.7 Investigación de la estructura del suelo

Las investigaciones sobre resistividad del terreno de una subestación son esenciales para determinar la composición general del suelo y el grado de homogeneidad. Las pruebas de las muestras de excavaciones, perforaciones y otras investigaciones geológicas, proporcionan información útil sobre la presencia de varias capas y la naturaleza del suelo, y dan una idea sobre el rango de resistividad del terreno del sitio. La Tabla 2 muestra el rango de resistividades de suelos típicos.

Tabla 2. Rango de resistividad del suelo

TIPO DE SUELO	RANGO DE RESISTIVIDAD ($\Omega\text{-m}$)
Lama	5 – 100
Humus	10 – 150
Limo	20 – 100

Arcillas	80 – 330
Tierra de jardín	140 – 480
Caliza fizurada	500 – 1000
Caliza compacta	1000 – 5000
Granito	1500 – 10000
Arena común	3000 – 9000
Basalto	10000 – 20000

2.8 Medidas de resistividad

Los estimativos basados en la clasificación del suelo ofrecen sólo una aproximación de la resistividad; por tanto, las pruebas reales son imperativas. Éstas deben hacerse en muchos lugares dentro del área de la subestación. Rara vez se encuentran sitios de la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda el área completa y a profundidades considerables. Típicamente existen varias capas y cada una tiene una resistividad diferente. Con frecuencia ocurren cambios laterales, y en comparación con los verticales esos cambios son más grandes. Las pruebas de resistividad del suelo deben hacerse para determinar si existen variaciones importantes de la resistividad con la profundidad.

El número de medidas tomadas debe ser más grande donde las variaciones son mayores, especialmente si algunas lecturas son tan altas como para sugerir un posible problema de seguridad. Si la resistividad varía apreciablemente con la profundidad, es deseable usar un rango incrementado de espaciamientos de prueba para obtener un estimativo de la resistividad de capas más profundas.

El método de Wenner o de los cuatro electrodos, mostrado en la Figura 3, es la técnica más comúnmente usada.

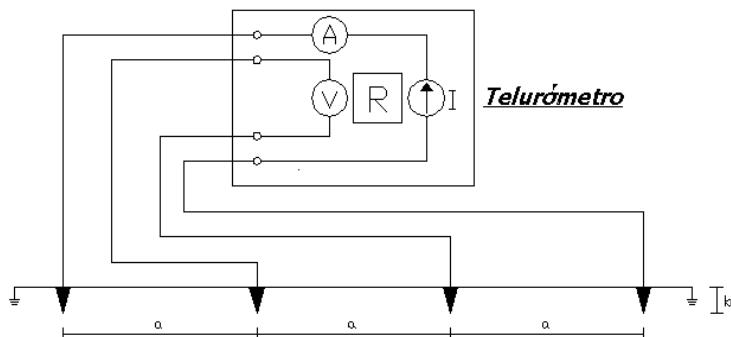


Figura 3. Método de los cuatro electrodos o de Wenner.

Los cuatro electrodos son clavados en la tierra en línea recta a una profundidad “b”, separados a una distancia “a”. La tensión entre los dos terminales interiores (o de potencial) es luego medido y dividido por la corriente entre los dos terminales exteriores (o de corriente) para dar el valor de la resistencia R, que aparece indicada en el telurómetro. Luego se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho_a = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (18)$$

Donde:

ρ_a → Resistividad aparente del suelo ($\Omega\text{-m}$).

R → Resistencia medida en Ω .

a → Distancia entre electrodos adyacentes en m.

b → Profundidad de los electrodos en m.

si $b \ll a$, como es el caso más común:

$$\rho_a = 2\pi aR \quad (19)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden usar para determinar la resistividad aparente ρ_a a una profundidad a.

2.9 Interpretación de las medidas de resistividad del suelo

El objetivo fundamental de las mediciones es encontrar un modelo de suelo que ofrezca una buena aproximación del suelo real. La resistividad varía lateralmente y con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del terreno. Las condiciones climáticas influyen en la resistividad medida, razón por la cual, dichas mediciones deben realizarse, en lo posible, en época de verano prolongado para obtener la resistividad más alta y desfavorable.

Los modelos más comúnmente usados para la resistividad del suelo son:

a) Modelo de suelo uniforme:

Usado sólo cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que raramente ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto.

b) Modelo de suelo de dos capas:

Es una representación muy exacta de las condiciones reales del suelo, y consiste en una capa superior de profundidad finita y con resistividad diferente a la de la capa más baja de espesor infinito.

c) Modelo de suelo multicapa:

Usado cuando las condiciones del suelo son más complejas.

Modelo de suelo uniforme:

Cuando el contraste entre las diferentes resistividades de las capas es moderado, se puede usar un valor promedio para la resistividad del suelo, como una primera aproximación o para establecer el orden de magnitudes. La resistividad aproximada para un suelo uniforme se puede obtener tomando un promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en varios sitios y direcciones dentro del patio, así:

$$\rho_{aprom} = \frac{\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}}{n} \quad (20)$$

Donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an}$ → Resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamientos siguiendo el método de *Wenner*.

n → Número total de medidas tomadas.

Pero la mayoría de los suelos no reúnen este criterio, ya que en la práctica la resistividad de los suelos varía significativamente.

En lugar del promedio aritmético, también puede emplearse la distribución normal para obtener la resistividad aparente del suelo. Como guía general, un suelo puede ser considerado como uniforme si la diferencia entre los dos valores extremos de las resistividades medidas es menor del 30%.

Modelo de suelo de dos capas:

Un modelo de suelo de dos capas puede representarse por una capa superior de profundidad finita, por encima de una capa inferior de profundidad infinita. El cambio abrupto de la resistividad en las proximidades de cada capa de suelo puede describirse por medio del factor de reflexión K, definido como:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (21)$$

Donde:

ρ_1 → Resistividad de la capa superior en $\Omega\text{-m}$.

ρ_2 → Resistividad de la capa inferior en $\Omega\text{-m}$.

En muchos casos, la representación de un electrodo de tierra basado en un modelo equivalente de dos capas es suficiente para diseñar un sistema seguro de puesta a tierra. Un modelo de suelo de dos capas puede aproximarse empleando el método gráfico de *Sunde*. La gráfica de la Figura 2 está basada en los datos de prueba de *Wenner*.

Los parámetros ρ_1 y ρ_2 se obtienen por inspección de las medidas de resistividad. Solamente H es obtenido por el método de *Sunde*, como sigue:

- Dibujar el gráfico ρ_a vs. a.

- b) De la gráfica anterior se estiman ρ_1 y ρ_2 , extendiendo el gráfico en ambos extremos para obtener los valores de resistividad, si los datos de campo son insuficientes.
- c) Determinar ρ_2/ρ_1 y seleccionar una curva del gráfico de la Figura 4, o interpolar y dibujar una nueva curva en el gráfico.
- d) Seleccionar el valor de ρ_a/ρ_1 sobre el eje Y dentro de la región pendiente de la curva ρ_2/ρ_1 apropiada.
- e) Leer el valor correspondiente a/h sobre el eje X.
- f) Calcular ρ_a multiplicando el valor seleccionado ρ_a/ρ_1 por ρ_1 .
- g) Leer el espaciamiento de prueba correspondiente de la gráfica de ρ_a vs. a.
- h) Calcular la profundidad del nivel superior H usando la separación de prueba apropiada a.

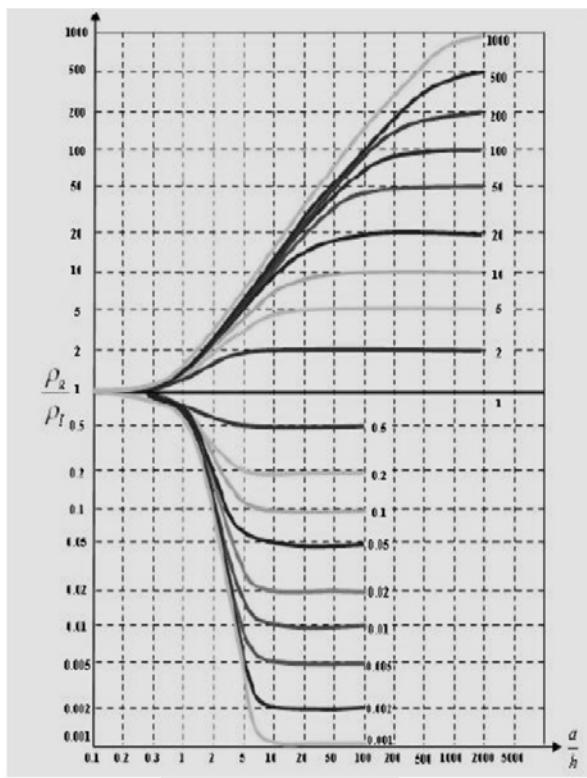


Figura 4. Curvas de Sunde

2.10 Modelo de suelo multicapas

Se pueden encontrar condiciones de suelo altamente no uniforme, que requieren el uso de técnicas de modelamiento multicapas, cuando un modelo de suelo de dos capas no es factible. Un modelo multicapa puede incluir varias capas horizontales o varias capas verticales. Las técnicas para interpretar resistividades de suelo altamente no uniforme requieren el uso del método de los elementos finitos, considerando las características anisotrópicas del tensor de conductividad, para la solución de la ecuación (1).

2.11 Selección del tamaño del conductor

La elevación de temperatura de corto tiempo en un conductor de tierra, o el tamaño requerido del conductor como una función de la corriente de falla que pasa por el conductor, se encuentra mediante la ecuación:

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_C \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) * \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (22)$$

Donde:

- I_F → Corriente asimétrica de falla RMS en KA, se usa la más elevada encontrada.
- A_{MCM} → Área del conductor en MCM .
- T_m → Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión en °C.
- T_a → Temperatura ambiente en °C.
- t_r → Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.
- α_0 → Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C.
- α_r → Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r 1/°C.
- ρ_r → Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T_r $\mu\Omega\text{-cm}$.
- K_0 → $1/\alpha_0$ o $[(1/\alpha_0) - T_r]$ en °C.
- T_c → Duración de la corriente en seg.
- TCAP → Capacidad térmica por unidad de volumen en J / ($\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$).

La Tabla 3 proporciona los datos para las constantes α_r , K_0 , T_m , ρ_r , y TCAP.

La fórmula simplificada da una aproximación muy buena:

$$A_{MCM} = I_F * K_f * \sqrt{t_c} \quad (23)$$

Donde:

- K_f → Constante para el material dado en la Tabla 3, usando una $T_a = 40$ °C.

El tamaño del conductor realmente seleccionado es usualmente más grande que el que se basa en la fusión, debido a factores como:

- a) El conductor debe resistir los esfuerzos mecánicos esperados y la corrosión durante la vida útil de la instalación.
- b) El conductor debe tener alta conductancia para prevenir caídas de tensión peligrosas durante una falla.
- c) La necesidad de limitar la temperatura del conductor.
- d) Debe aplicarse un factor de seguridad a la instalación de puesta a tierra y a los demás componentes eléctricos.

Se acostumbra entonces emplear como calibre mínimo el N° 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, con el fin de mejorar la rigidez mecánica de la malla y soportar la corrosión. La Tabla 4 muestra las dimensiones típicas de los conductores empleados para el sistema de puesta a tierra.

Tabla 3. Constantes de los materiales conductores [1]

DESCRIPTION	Material conductivity (%)	α_r factor at 20°C (1/°C)	K_0 at 0°C (0°C)	Fusing temperature Tm	ρ_r 20°C ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCAP thermal capacity [$\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$]	Kf
Copper, annealed soft-drawn	100	0,00393	234	1083	1,72	3,42	7
Copper, commercial hard-drawn	97	0,00381	242	1084	1,78	3,42	7,06
Cooper-clad steel wire	40	0,00378	245	1084	4,4	3,85	10,45
Cooper-clad steel wire	30	0,00378	245	1084	5,86	3,85	12,06
Cooper-clad steel rod	20	0,00378	245	1084	8,62	3,85	14,64
Aluminum, EC grade	61	0,00403	228	657	2,86	2,56	12,12
Aluminum, 5005 alloy	53,5	0,00353	263	652	3,22	2,6	12,41
Aluminum, 6201 alloy	52,5	0,00347	268	654	3,28	2,6	12,47
Aluminum-clad steel wire	20,3	0,0036	258	657	8,48	3,58	17,2
Steel, 1020	10,8	0,00316	605	1510	15,9	3,28	15,95
Stainless-clad steel rod	9,8	0,0016	605	1400	17,5	4,44	14,72
Zinc-coated steel rod	8,6	0,0032	293	419	20,1	3,93	28,96
Stainless steel, 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4,03	30,05

Tabla 4. Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra [2]

CALIBRE DEL CONDUCTOR	AREA NOMINAL		DIAMETRO m
	MCM	AWG	
350			0,015
300			0,0139
250			0,0127
211,6	4/0		0,0117
167,8	3/0		0,0104
133,1	2/0		0,0093

2.12 Criterio de tensiones de paso y de toque tolerables [1]

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbidas por el cuerpo humano, antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. Los voltajes máximos tolerables por un cuerpo humano de 50 kg. de peso corporal, durante un circuito accidental no debe exceder los siguientes límites:

-Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de 50 kg. de peso corporal:

$$Ep_{50} = (1000 + 6C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (24)$$

-Tensión de toque límite tolerable por un cuerpo de 50 kg. de peso corporal:

$$Et_{50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (25)$$

Donde:

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

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

T_s → Duración del choque (s).

$6C_s \rho_s = 2R_f$ → Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1m en serie sobre la capa superficial.

$1.5C_s \rho_s = R_f / 2$ → Resistencia a tierra de los 2 pies juntos en serie sobre la capa superficial.

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

C_s → Factor de disminución de la capa superficial calculada con la ecuación (16).

ρ_s → Resistividad del material de la capa superficial en $\Omega\text{-m}$.

Las tensiones de paso y de toque reales deben ser menores que los respectivos límites máximos permisibles (o tolerables) para obtener seguridad.

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA PUESTA A TIERRA (R_g)

Un buen sistema de puesta a tierra proporciona una resistencia baja a una tierra remota, con el fin de minimizar la elevación del potencial de tierra GPR, dada por:

$$GPR = I_g * R_g \quad (26)$$

3.1 Requerimientos usuales

La principal función de las puestas a tierra es garantizar la seguridad de las personas. Esta es una consideración muy importante durante el diseño y obliga a que se fije una resistencia objetivo. Por lo tanto, los valores recomendados en la Tabla 5 surgen de la experiencia, sin que necesariamente obedezcan a una norma específica.

Tabla 5. Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

UTILIZADA PARA	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra Ω
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión $V \geq 115\text{KV}$	1
Subestaciones de media tensión de uso exterior en poste	10
Subestaciones de media tensión de uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

3.2 Cálculos simplificados

La resistencia de una malla de puesta a tierra fue formulada por Sverak como:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (27)$$

Donde:

$L_t \rightarrow$ Longitud total de conductores enterrados en m.

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega\text{-m}$.

$A \rightarrow$ Área ocupada por la malla de tierra m^2 .

$H \rightarrow$ Profundidad de la malla en m.

Para mallas sin varillas de tierra, esta fórmula ha sido probada y da resultados que son prácticamente idénticos a los obtenidos con la fórmula de *Schwarz*.

3.3 Ecuaciones de Schwarz para suelo homogéneo [1]

Schwarz desarrolló el siguiente conjunto de ecuaciones para determinar la resistencia de un sistema de puesta a tierra en un suelo homogéneo que consta de una malla horizontal con electrodos verticales (varillas). Schwarz empleó la siguiente ecuación para cambiar la resistencia de la malla, varillas y la resistencia mutua, para calcular la resistencia de puesta a tierra R_g :

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (28)$$

Donde:

$R_1 \rightarrow$ Resistencia de tierra de los conductores de la malla en Ω .

$R_2 \rightarrow$ Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en Ω .

$R_m \rightarrow$ Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_1 y el grupo de varillas de tierra R_2 , en Ω .

La resistencia de tierra de la malla está dada por:

Donde:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi d_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{d_c h}} \right) - \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (29)$$

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 \quad (29 \text{ a})$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 \quad (29 \text{ b})$$

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega\text{-m}$.

$L_c \rightarrow$ Longitud total de todos los conductores de la malla en m.

$h \rightarrow$ Profundidad de los conductores de la malla en m.

$d_c \rightarrow$ Diámetro del conductor de la malla en m.

$A \rightarrow$ Área cubierta por los conductores de la malla de tierra m^2 .

$L_x, L_y \rightarrow$ Largo, ancho de la malla en m.

La resistencia de las varillas de tierra está dada por:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln\left(\frac{8L_r}{d_r}\right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (30)$$

Donde:

n_r → Número de varillas de tierra.

L_r → Longitud de cada varilla en m.

d_c → Diámetro de la varilla en m.

La resistencia de tierra mutua entre la malla y las varillas está dada por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln\left(\frac{2L_C}{L_r}\right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (31)$$

La resistencia combinada de R_1 y R_2 será menor que la resistencia a tierra, analizando ambos componentes por sí solos; pero será más alta que la de la combinación en paralelo ($R_m < R_1, R_m < R_2, R_g > R_m$).

3.4 Ecuaciones de Schwarz para terreno de dos capas

En la práctica, es deseable enterrar varillas de tierra profundas para alcanzar suelos de menor resistividad. En las ecuaciones que siguen, las expresiones para R_1 , R_2 y R_m se han modificado, para tener en cuenta esta situación.

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_C} \left[\ln\left(\frac{2L_C}{\sqrt{d_C h}}\right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (32)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_r L_r} \left[\ln\left(\frac{8L_r}{d_2}\right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (33)$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_C} \left[\ln\left(\frac{2L_C}{L_r}\right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (34)$$

$$\rho_a = \frac{L_r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2(H-h) + \rho_1(L_r+h-H)} \quad (35)$$

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega\text{-m}$.

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa profunda en $\Omega\text{-m}$.

$H \rightarrow$ Espesor de la capa superior (valor encontrado por método de Sunde).

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla en m.

$L_r \rightarrow$ Longitud de las varillas (c/u).

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente en $\Omega\text{-m}$.

Si $\rho_2 \leq 0.2 \rho_1$ y $H \geq 0.1 L_r$, las anteriores ecuaciones son razonablemente exactas para la mayor parte de los cálculos prácticos.

3.5 Tratamiento del suelo para obtener resistividad más baja

Con frecuencia, es imposible obtener la reducción deseada de resistencia de tierra agregando más conductores o más varillas de tierra a la malla. Una solución alternativa es incrementar de manera efectiva el diámetro de los electrodos, modificando el suelo alrededor del electrodo. Los métodos más conocidos son los siguientes:

- El uso de bentonita, una arcilla natural que contiene montmorillonita, que se formó por acción volcánica hace mucho tiempo, y es un elemento no corrosivo, estable y tiene una resistividad de 2.5 $\Omega\text{-m}$ al 300% de humedad. Es de naturaleza higroscópica.
- El uso de sales como cloruro de sodio, magnesio y sulfatos de cobre, o cloruro de calcio, para incrementar la conductividad del suelo alrededor del electrodo. Pero estas sales emigran a otras áreas.
- El uso de electrodos de tipo químico que constan de un tubo de cobre relleno de una sal. Los agujeros en el tubo permiten la entrada de humedad, disolver las sales y permitir que la solución de sal se filtre en la tierra.
- Materiales artificiales de tierra, de baja resistividad colocados alrededor de las varillas y de los conductores en la zanja. En Colombia se conocen como Hidrosalta y Fabigel.
- Electrodos revestidos de concreto, donde el concreto por ser un material higroscópico y que atrae la humedad, al ser enterrado en el suelo se comporta como un semiconductor mediano con resistividades de 30 a 90 $\Omega\text{-m}$, pero facilita la corrosión.

3.6 Cálculo de la tensión máxima de la malla [1]

El valor de la tensión real de la malla se obtiene mediante la expresión:

$$E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M} \quad (36)$$

Donde:

$K_m \rightarrow$ Valor geométrico de espaciamiento de la malla, calculado así:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_C} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_C} - \frac{h}{4d_C} \right) + \frac{K_{ii}}{k_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (37)$$

Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro, o para mallas con varias varillas de tierra en las esquinas, así como para ambas, $K_{ii} = 1$; donde K_{ii} es un factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores sobre la esquina de la malla.

Para mallas sin varillas de tierra, o sólo unas pocas, ninguna localizada en las esquinas o sobre el período:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (38)$$

K_h es un factor de corrección que tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla, dado por:

$$K_h = \sqrt{1 + h/h_0} \quad \text{con } h_0 = 1\text{m} \quad (39)$$

n representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente, y está dado por:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (40)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}; \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}; \quad n_c = \left[\frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x \cdot L_y}}; \quad n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (41)$$

Para mallas cuadradas: $n = n_a$ ya que $n_b = n_c = n_d = 1$

Para mallas rectangulares: $n = n_a \cdot n_b$ ya que $n_c = n_d = 1$

Para mallas en forma de L: $n = n_a \cdot n_b \cdot n_c$ ya que $n_d = 1$

Donde:

L_c → Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m.

L_p → Longitud del perímetro de la malla en m.

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.

D_m → Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla, en m.

K_i es el factor de irregularidad y se define como:

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (42)$$

Para mallas sin varillas de tierra o para mallas con sólo unas pocas varillas espaciadas a través de la malla pero ninguna localizada en las esquinas o a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (43)$$

Donde:

$$L_R = n_r L_r \rightarrow \text{Longitud total de todas las varillas.} \quad (44)$$

$n_r \rightarrow$ Número de varillas.

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla.

Para mallas con muchas varillas de tierra en las esquinas, así como a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R \quad (45)$$

3.7 Cálculo de la tensión real de paso E_p [1]

El valor de tensión real de paso se calcula mediante:

$$E_p = \frac{\rho J_G K_s K_i}{L_S} \quad (46)$$

para mallas con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado L_S es:

$$L_S = 0.75 L_C + 0.85 L_R \quad (47)$$

Se asume que el E_p máximo ocurre sobre una distancia de 1m hacia fuera del conductor perimetral en el ángulo que bisecta la esquina más extrema de la malla.

El valor de K_s se calcula si:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (48)$$

Esta ecuación es valida para profundidades de enterramiento de $0.25m < h < 2.5m$.

3.8 Refinamiento del diseño preliminar [1], [2]

Si los cálculos basados en el diseño preliminar (Figura 5) indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas dentro de la subestación, se deben estudiar diferentes alternativas de selección y aplicarlas donde sea adecuado.

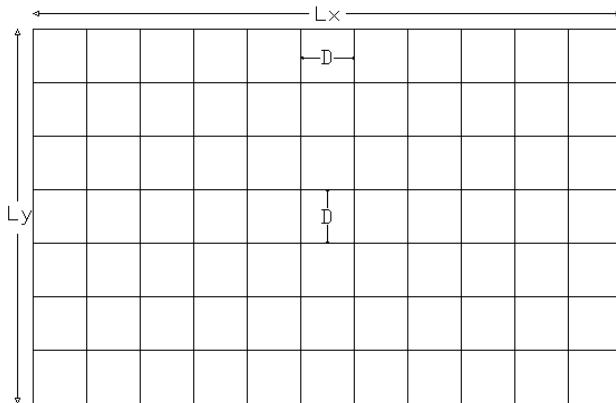


Figura 5. Diseño preliminar de la malla

$$L_C = NL_x + ML_y ; A = L_x \cdot L_y \quad (49)$$

Donde:

$N \rightarrow$ Número de conductores de longitud L_x .

$M \rightarrow$ Número de conductores de longitud L_y .

Possibles remedios o alternativas de solución:

- a) Disminuir la resistencia total de la malla:

Al disminuir R_g se disminuye el GPR y por lo tanto el voltaje máximo transferido. Esto se puede lograr aumentando el área total de la malla (A), enterrando varillas de puesta a tierra, que penetren en capas de más baja resistividad.

- b) Disminuir o ajustar los espaciamientos de los conductores de la malla (D):

Además de disminuir el espaciamiento D (lo cual aumenta la cantidad de conductor a enterrar) también se puede pensar en extender el conductor de la malla por fuera de la cerca, incrementar la cantidad de varillas perimetrales, enterrar dos o más conductores paralelos a lo largo del perímetro, aumentar la profundidad de la malla y disminuir el espaciamiento cerca al perímetro de la malla.

- c) Derivar una porción más grande de la corriente de falla hacia otras trayectorias:

Esto se puede lograr disminuyendo la resistencia de puesta a tierra de las torres vecinas a la subestación. Esto también significa trasladar el problema a las torres de transmisión y distribución, donde no hay control de acceso.

- d) Limitando la corriente total de falla

- e) Colocando barreras para limitar el acceso a algunas áreas

- f) Instalando mallas equipotenciales:

Hacerlo debajo de la capa de roca triturada y en los sitios donde las cuadrillas se ubican con más frecuencia. Las mallas equipotenciales se conectan a la malla principal y a la estructura metálica del

equipo que está justo encima de ella (seccionadores, interruptores, etc). Las mallas equipotenciales se pueden construir en cable de cobre N° 6 AWG con espaciamientos de 0.6m.

3.9 Conexiones a la malla [1]

Se deben emplear conductores con la capacidad adecuada de corriente y resistencia mecánica suficiente para la conexión entre:

- a) Todos los electrodos de tierra, como mallas de puesta a tierra, varillas, pozos de tierra o donde se apliquen partes metálicas, tubos de agua o de gas, cajas para pozos de agua, etc.
- b) Todas las partes conductivas que pueden accidentalmente llegar a energizarse, como estructuras metálicas, armazones de máquinas, alojamientos a cabinas metálicas de equipos de interrupción convencionales o aislados a gas, tanques de transformadores, cables de guarda, etc. Igualmente, partes metálicas que pueden llegar a tener diferencias relativas de potencial con otras partes metálicas y que deben tener enlaces con la malla de tierra.
- c) Todas las fuentes de corriente, como pararrayos, bancos de capacitores o capacidores de acople, transformadores y, donde sea adecuado, los neutros de las máquinas y circuitos de potencia.
- d) Debe conectarse a la malla el acero de refuerzo de las obras civiles, rieles para movilización de transformadores, tuberías de agua potable y bandejas portacables.
- e) Las ventanas, puertas, pasamanos, tableros, etc, del edificio de control también deben conectarse a tierra, lo mismo que las instalaciones de baja tensión. Cables o correas de cobre se emplean usualmente para las conexiones a tierra. Algunas veces los tanques de transformadores son usados como parte de la trayectoria de tierra de los pararrayos. Así mismo, la mayor parte de las estructuras de acero y de aluminio también se usa como parte de la trayectoria a tierra, si se establece que su conductancia -incluidas las de las conexiones- es la adecuada.

Se deben también aterrizar las manijas de los seccionadores mediante una malla de seguridad bajo la capa de roca triturada, justo debajo de la manija y enlazada con la estructura metálica. También se acostumbra colocar a tierra las mallas perimetrales y la puerta de acceso mediante enlaces flexibles conectados a la cerca.

Las pantallas y forros metálicos del cableado de control se deben aterrizar en un sólo punto al igual que las bandejas y escalerillas portacables.

3.10 Procedimiento de diseño [1]

Los pasos a ejecutar durante el diseño de mallas de puestas a tierra para una subestación son los siguientes:

Paso 1: El mapa adecuado y plano de la localización general de la subestación proporciona un buen estimativo del área para la malla. Las medidas de resistividad determinan la curva de resistividad y los datos para modelar el terreno (suelo uniforme o suelo de dos capas), A, ρ .

Paso 2: Determinar el tamaño del conductor de la malla. La corriente de falla $3I_0$ debe ser la máxima esperada en el futuro y que será conducida por cualquier conductor en el sistema de puesta a tierra, y el tiempo t_c debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible (incluyendo el respaldo). $A_{MCM}, t_c, d, 3I_0$.

Paso 3: Determinar las tensiones tolerables de toque y de paso para personas con peso corporal de 50 kg. La selección de tiempo t_s está basado en el juicio del ingeniero diseñador. E_{t50} y E_{p50} .

Paso 4: El diseño preliminar debe incluir un anillo conductor que abarque toda el área de la puesta a tierra, más los conductores adecuados de cruce, con el fin de proporcionar el acceso conveniente de las bajantes a tierra de los equipos, etc. Los estimativos iniciales del espaciamiento de conductores y la localización de las varillas de tierra deben estar basados en la corriente I_g y el área que esta siendo aterrizada. D, L_c, L_T, h, L_R, n .

Paso 5: Se calcula la resistencia de puesta a tierra preliminar del sistema en suelo uniforme. Para el diseño final deben hacerse cálculos más exactos, considerando las varillas de tierra si es el caso. R_g, L_c, L_R .

Paso 6: Se determina la corriente I_g a disparar por la malla para evitar un sobredimensionamiento de la malla de puesta a tierra, considerando sólo esa porción de la corriente total de falla $3I_0$ que fluye a través de la malla hacia una tierra remota. La corriente I_g debe reflejar el peor tipo de falla y localización, el factor de decremento y cualquier expansión futura de la subestación. I_g, t_f .

Paso 7: Si el GPR (elevación del potencial de tierra) del diseño preliminar es menor que la tensión tolerable de toque, no es necesario realizar más cálculos. Sólo se requerirá conductor adicional para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos. $I_g R_g < E_{t50}$.

Paso 8: Si no se cumple la condición anterior, se calcula la tensión de malla y la tensión de paso para la malla con suelo uniforme, $E_m, E_s, K_m, K_s, K_t, K_{ti}, K_h$.

Paso 9: Si el voltaje de malla calculado es menor que la tensión tolerable de toque, se requiere completar el diseño. Si la tensión de malla calculada es mayor que la tensión tolerable de toque, el diseño debe ser modificado. $E_m < E_{t50} ?$

Paso 10: Si ambas tensiones calculadas de toque y de paso son menores que las tensiones tolerables, el diseño sólo necesita los refinamientos requeridos para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos. Si no, el diseño preliminar debe ser modificado. $E_s < E_{p50} ?$

Paso 11: Si se exceden las tensiones tolerables de toque y de paso, es necesaria la revisión del diseño de la malla. Estas revisiones pueden incluir espaciamientos de conductores más pequeños, varillas adicionales de tierra, etc.

Paso 12: Después de satisfacer los requerimientos de tensiones de paso y de toque, se pueden requerir varillas de tierra y malla adicional. Los conductores adicionales de malla se requieren si su diseño no incluye conductores cerca de los equipos a ser puestos a tierra. Se pueden requerir varillas adicionales en la base de los pararrayos, neutros de transformadores, etc. El diseño final también será revisado para eliminar peligros debido a potenciales transferidos y peligros asociados con áreas de interés especial.

3.11 Ejemplo de cálculo de las corrientes de falla en una subestación [3], [5]

Considérese el sistema mostrado en la Figura 6. Con los datos indicados en esta figura, calcular la impedancias en secuencia, las corrientes simétricas de falla en las barras de 115KV y 13.2KV.

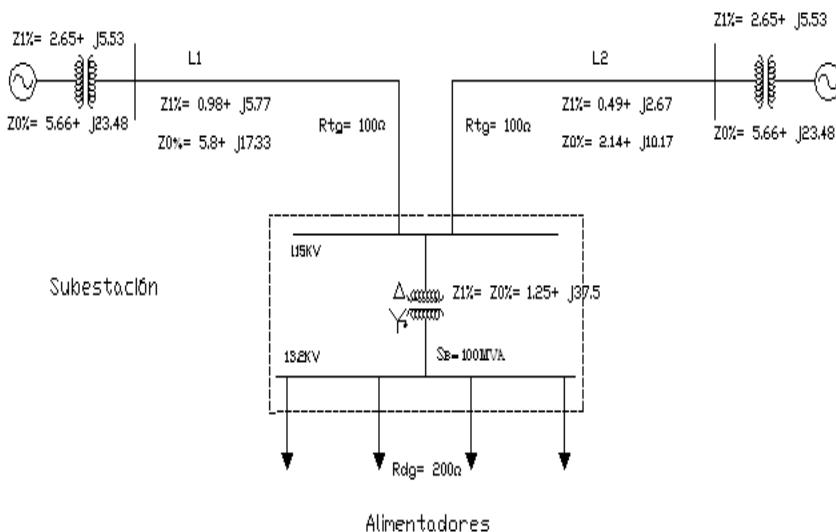


Figura 6. Diagrama unifilar del sistema en estudio

- a) Cálculo de la impedancia equivalente de secuencia positiva del sistema (Z_1) AT (barra de 115KV):

$$\text{Para } L_1: (Z_1)_{L1\%} = (2.65 + j5.53) + (0.98 + j5.77) = 3.63 + j11.3$$

$$\text{Para } L_2: (Z_1)_{L2\%} = (2.65 + j5.33) + (0.49 + j2.67) = 3.14 + j8.2$$

$$(Z_1\%)_{AT} = \frac{(Z_1)_{L1} * (Z_2)_{L2}}{(Z_1)_{L1} + (Z_2)_{L2}} = \frac{-81.2618 + j65.248}{6.77 + j19.5} = 1.695 + j4.756$$

$$Z_B = \frac{(V_B / \sqrt{3})^2}{S_B / 3} = \frac{(115 / \sqrt{3})^2}{100 * 10^6 / 3} = 132.25 \Omega$$

$$(Z_1)_{AT} = \frac{(Z_1\%)_{AT}}{100} * Z_B = \frac{1.696 + j4.756}{100} * 132.25 = 2.242 + j6.29 \Omega$$

b) Cálculo de la impedancia equivalente de secuencia cero del sistema (Z_0) AT (barra de 115KV):

$$\text{Para } L_1: (Z_1)_{L1\%} = (5.66 + j23.48) + (5.8 + j17.33) = (11.46 + j40.81)$$

$$\text{Para } L_2: (Z_1)_{L2\%} = (5.66 + j23.48) + (2.14 + j10.17) = (7.8 + j33.65)$$

$$(Z_0\%)_{AT} = \frac{(Z_0)_{L1} * (Z_0)_{L2}}{(Z_0)_{L1} + (Z_0)_{L2}} = \frac{-1283.8625 + j703.947}{19.26 + j74.46} = 4.681 + j18.453$$

$$(Z_0)_{AT} = \frac{(Z_0\%)_{AT}}{100} * Z_B = \frac{4.681 + j18.453}{100} * 132.25 = 6.191 + j24.404 \Omega$$

c) Cálculo de la impedancia equivalente de secuencia positiva del sistema (Z_1) BT (barra de 13.2KV):

$$(Z_1\%)_{BT} = (Z_1\%)_{AT} + (Z_1\%)_r = (1.695 + j4.756) + (1.25 + j37.5) = 2.945 + j42.256$$

$$Z_B = \frac{(V_B / \sqrt{3})^2}{S_B / 3} = \frac{(13.2 / \sqrt{3})^2}{100 * 10^6 / 3} = 1.742 \Omega$$

$$(Z_1)_{BT} = \frac{(Z_1\%)_{BT}}{100} * Z_B = \frac{2.945 + j42.256}{100} * 1.742 = 0.051 + j0.736 \Omega$$

d) Cálculo de la impedancia equivalente de secuencia cero del sistema (Z_0) BT (barra de 13.2KV):

$$(Z_0\%)_{BT} = (Z_0\%)_T = 1.25 + j37.5$$

$$(Z_0)_{BT} = \frac{(Z_0\%)_{BT}}{100} * Z_B = \frac{1.25 + j37.5}{100} * 1.742 = 0.022 + j0.653 \Omega$$

e) Cálculo de la corriente simétrica de falla en la barra de 115KV:

$$I_F = (3I_O) = \frac{3V_1}{2(Z_1)_{AT} + (Z_0)_{AT}} = \frac{3 * 115000 / \sqrt{3}}{2(2.242 + j6.29) + (6.191 + j24.404)}$$

$$I_F = \frac{(3 * 115000 / \sqrt{3})}{10.675 + j36.98} A = 1434.977 - j4971.541$$

$$\therefore |I_F| = 5174.5 A_{sim} \quad \text{y} \quad \frac{X}{R} = \frac{36.984}{10.675} = 3.465$$

f) Cálculo de la corriente simétrica de falla en la barra de 13.2KV:

Las impedancias equivalentes de falla en la barra de 115KV deben ser transferidas al lado de 13.2KV del transformador. Debe notarse que debido a la conexión *delta – ye*, puesto a tierra del transformador, sólo la impedancia de secuencia positiva del lado 115KV es transferida.

$$(Z_1)_r = \frac{(Z_1\%)_T}{100} * Z_B = \frac{1.25 + j37.5}{100} * 1.742 = 0.022 + j0.653\Omega$$

$$(Z_1)_{BT} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 * (Z_1)_{AT} + (Z_1)_T = \left(\frac{13.2}{115} \right)^2 (2.242 + j6.29) + (0.022 + j0.653) = 0.052 + j0.736\Omega$$

$$(Z_0)_T = \frac{(Z_0\%)_T}{100} * Z_B = \frac{1.25 + j37.5}{100} * 132.25 = 0.052 + j0.736\Omega$$

$$(Z_0)_{BT} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 * (Z_0)_{AT} + (Z_0)_T = \left(\frac{13.2}{115} \right)^2 (4.681 + j18.453) + (0.052 + j0.736) = 0.022 + j0.653\Omega$$

$$I_F = (3I_O) = \frac{3V_2}{2(Z_1)_{BT} + (Z_0)_{BT}} = \frac{3 * 13200 / \sqrt{3}}{2(0.052 + j0.736) + (0.022 + j0.653)}$$

$$I_F = \frac{(3 * 13200 / \sqrt{3})}{0.126 + j2.125} A = 635.716 - j10721.398 A$$

$$\therefore |I_F| = 10740.2 A_{sim} \quad \text{y} \quad \frac{X}{R} = \frac{2.125}{0.126} = 16.87$$

CAPÍTULO 4

MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO PARA LA SUBESTACIÓN (EJEMPLO)

4.1 Datos recolectados en el terreno [5]

Empleando el método de *Wenner*, las resistividades medidas en función de la profundidad (o espaciamiento a) para el terreno disponible de la subestación del ejemplo anterior (63m * 84m), son consignadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Medidas de resistividad del terreno

Medida numero	a (m)	R (Ω)	$\rho_a = 2\pi a R$ ($\Omega \cdot m$)
1	0,5	140	439,82
2	1	67,33	423,05
3	2	28,04	352,36
4	3	16,42	309,51
5	4	11,15	280,23
6	5	8,3	260,75
7	10	3,1	194,78
8	15	1,5	141,37
9	20	0,97	121,89
10	25	0,74	116,24
11	30	0,59	111,21
12	35	0,5	109,96
13	40	0,42	105,56
14	45	0,37	104,62
15	50	0,32	100,53

$$\sum_{i=1}^{15} \rho_{a_i} = 3171 . 88$$

4.2 Modelamiento asumiendo suelo uniforme:

Si se fuese a emplear un modelo de suelo uniforme, lo cual es bastante discutible en este caso, por la diferencia que existe entre el mayor valor de ρ_a y el menor valor de ρ_a , el resultado, aplicando la formula 20 sería:

$$\rho_{aprom} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \rho_{ai}}{n} = \frac{3171.88}{15} = 211.46 \Omega \cdot m$$

4.3 Modelamiento asumiendo el modelo de suelo de 2 capas [1]

Se emplean los datos de medida de la Tabla 6 para aplicar el método de *Sunde* como se muestra a continuación:

- a) Se grafican los datos de la Tabla 6 ρ_a vs. a ; la curva se muestra en la Figura 7

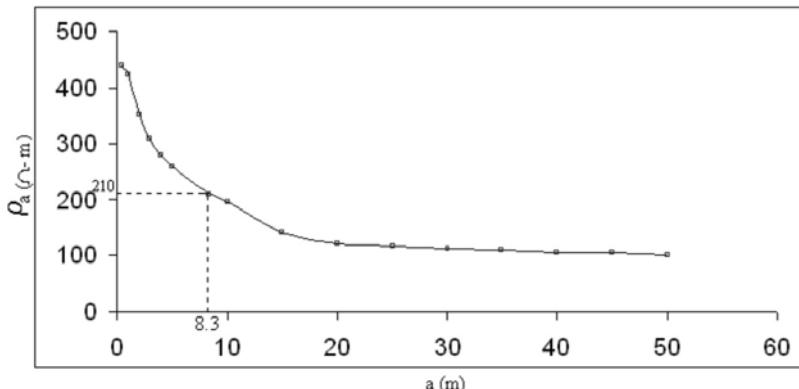


Figura 7. Gráfica ρ_a vs. a para aplicación del método de Sunde

- b) De la gráfica de la Figura 7 y por inspección visual se toma:
 $\rho_1 = 400 \Omega \cdot m$ y $\rho_2 = 100 \Omega \cdot m$.
- c) Se determina $\rho_2 / \rho_1 = 100/400 = 0.25$ y se dibuja esta curva por extrapolación en la Gráfica de Sunde de la Figura 4.
- d) Se selecciona el valor de $\rho_a / \rho_1 = 0.5$ dentro de la región pendiente de la curva apropiada $\rho_2 / \rho_1 = 0.25$ de la gráfica de Sunde de la Figura 4.
- e) Se lee el espaciamiento de prueba correspondiente $a/H = 1.8$ (Figura 4)
- f) Se calcula $\rho_a = (\rho_a / \rho_1) * \rho_1 = 0.5 * 400 = 200 \Omega \cdot m$.
- g) En la gráfica ρ_a vs. a de la Figura 5 se lee que para $\rho_a = 200 \Omega \cdot m$ el valor de a es 8.3.

- h) Se calcula la profundidad de la capa superior, usando la separación de prueba apropiada a.

$$h = \frac{a}{a/H} = \frac{8.3}{1.8} = 4.61\text{m}$$

Si el sistema de puesta a tierra de la subestación está compuesto por una malla con conductores horizontales enterrados a una profundidad $h = 0.5\text{m}$ y varillas perimetrales de 10m c/u , tal como se muestra en la Figura 8.

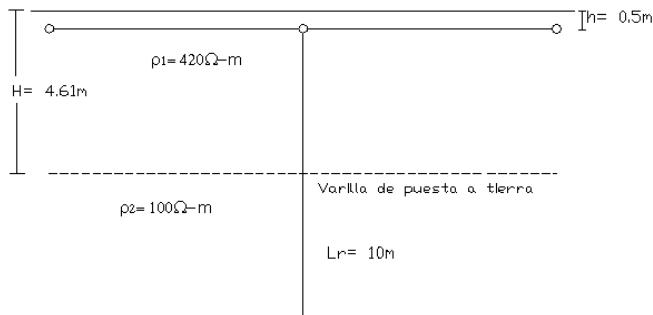


Figura 8. Disposición de la malla y de las varillas de tierra

La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{L_r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_2(H-h) + \rho_1(L_r + h - H)} \quad (50)$$

$$\rho_a = \frac{10 * 420 * 100}{100(4.16 - 0.5) + 420(10 + 0.5 - 4.61)} = 145.6\Omega\text{-m}$$

Esta resistividad es la vista por el sistema de puesta a tierra compuesto por una malla horizontal y varillas verticales de tierra.

4.4 Método estadístico para encontrar la resistividad a emplear en el diseño de la puesta a tierra de suelos modelados como uniformes [5]

Si se quiere utilizar un modelo de suelo uniforme debido a la simplicidad de la subestación, pero se tiene que los valores de ρ_a , medidos a una misma profundidad, difieren según el sitio donde se toma la lectura, se hace necesario utilizar un criterio probabilístico para definir la resistividad de diseño del sistema de puesta a tierra de la subestación.

El método que se describe a continuación se basa en que los logaritmos naturales de los valores de resistividad del suelo en un sitio particular, siguen una función de distribución normal en forma casi independiente de la magnitud de las variaciones de ρ ; los pasos a ejecutar son los siguientes:

a) Las medidas que se muestran en la Tabla 7 fueron tomadas para una determinada profundidad (p.e 8m), en un terreno disponible para una subestación de 63m * 84m. Los sitios programados para tomar las medidas se indican en la Figura 9.

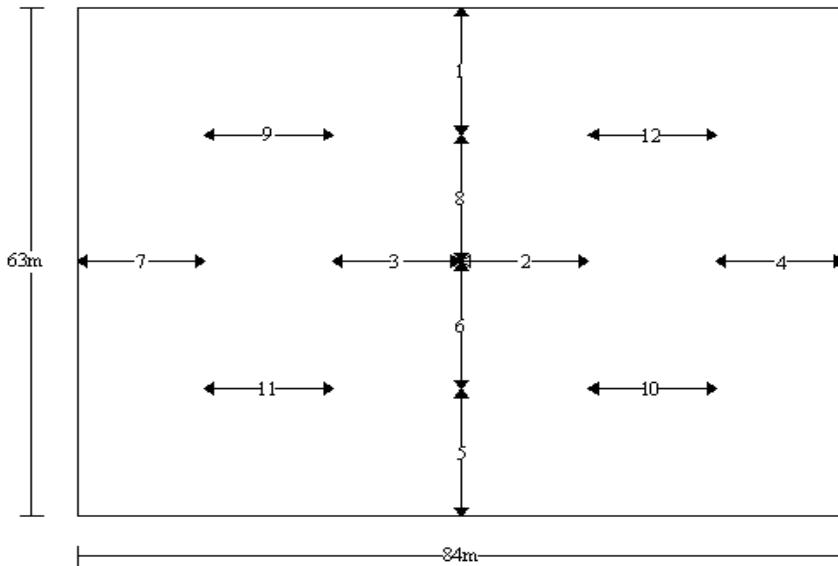


Figura 9. Programación de mediciones de ρ en 12 sitios diferentes y a una misma profundidad.

b) Las medidas tomadas de ρ se ordenan de forma descendente para una determinada profundidad y se obtienen los logaritmos naturales.

$$\chi_L = \ln \rho_i$$

c) Se saca el promedio χ_{prom} y la desviación estándar S :

$$X_{\text{prom}} = \frac{\sum \chi}{n} = \frac{68.9407}{12} = 5.7451$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\chi)^2 - (\sum \chi)^2 / n}{n-1}} = \sqrt{\frac{396.4373 - (68.9407)^2 / 12}{12-1}} = 0.1831$$

Tabla 7. Aplicación de la distribución normal para el cálculo de la resistividad a emplear en el diseño de la subestación.

Sitio de medida	P Ω-m	$\chi = \ln \rho$	χ^2	$\chi - \chi_{\text{prom}}$	$Z = \frac{\chi - \chi_{\text{prom}}}{S}$	$P=F(z) * 100\%$
1	392	5,9713	35,6564	0,2262	1,2354	89,25
2	375	5,9269	35,1281	0,1818	0,9929	83,89
3	368	5,9081	34,9056	0,163	0,8902	81,33
4	353	5,8665	34,4158	0,1214	0,663	74,54
5	341	5,8319	34,0111	0,0868	0,4741	68,08
6	328	5,793	33,5588	0,0479	0,2616	60,26
7	317	5,7589	33,1649	0,0138	0,0754	52,79
8	308	5,7301	32,834	-0,015	-0,0819	46,81
9	295	5,687	32,342	-0,0581	-0,3173	37,45
10	270	5,5984	31,3421	-0,1467	-0,8012	21,19
11	250	5,5215	30,487	-0,2236	-1,2212	11,12
12	210	5,3471	28,5915	-0,398	-2,1737	1,5

n = 12

$$\sum \chi = 68.9407 \quad \sum \chi^2 = 396.4373$$

El valor encontrado de S es una medida de la variación de la resistividad del suelo, un valor bajo de S constituye un índice de uniformidad.

d) La validez de la relación Log – normal para los valores de ρ permite predecir con cierto grado de confianza, la probabilidad de encontrar un suelo con ρ igual a un valor dado. Esta probabilidad se calcula mediante:

$$\rho = F\left[\frac{\ln \chi - \chi_{\text{prom}}}{S}\right] \quad \text{o} \quad \rho = F(z) \quad \text{y} \quad F(-z) = 1 - F(z)$$

Donde:

$$Z = \frac{\chi - \chi_{\text{prom}}}{S} \quad \text{y} \quad \text{así} \quad P = F(z) * 100\%$$

Los valores de Z se encuentran calculados en la tabla 7 y los valores de P se encuentran en la Tabla 8. Así, para cada valor de ρ o de $\ln \rho$, se puede sacar un porcentaje de probabilidad P; esto quiere decir que existe una probabilidad P de encontrar una resistividad ρ o menor.

e) Utilizando un valor de probabilidad de por lo menos el 70%, se define un valor muy representativo de la ρ del terreno. A partir de esta probabilidad se puede encontrar mediante interpolación el valor de $Z = 0.5245$ y con el promedio χ_{prom} y la respectiva S se encuentra el valor de ρ a partir de:

$$\ln \rho = SZ + \chi_{\text{prom}} \quad \text{y} \quad \rho = \ln^{-1}(SZ + \chi_{\text{prom}})$$

$$\ln \rho = 0.1831 * 0.5245 + 5.841136 \quad \rightarrow \quad \rho = \ln^{-1}(5.841136) = 344 \Omega - m$$

Téngase en cuenta que para $Z \geq 3.5$, $P \approx 1$ o $P = 100\%$

Tabla 8. Distribución normal acumulada

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz$$

Z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0,5	0,504	0,508	0,512	0,516	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5436	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5714	0,5714	5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,591	0,5948	0,5957	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,648	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,67	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,695	0,6985	0,7019	0,7054	0,7068	0,7123	0,7157	0,719	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,758	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7851	0,791	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,834	0,8365	0,8389
1	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8656	0,8706	0,8729	0,8749	0,877	0,879	0,881	0,883
1,2	0,8849	0,8869	0,8858	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,898	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9056	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,937	0,9382	0,9394	0,9405	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9465	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9435	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,975	0,9756	0,9761	0,9767
2	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,983	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,985	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,989
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,992	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,994	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,996	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,997	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,998	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9985	0,9986
3	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,999	0,999	0,999
3,1	0,999	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Ejemplos de la aplicación de la tabla

Z	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,09	3,291	3,891	4,417
F(z)	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	0,9995	0,99995	0,999995

f) El cálculo anterior se puede complementar determinando los límites para un nivel específico de confianza mediante:

$$F\left[Z - a\sqrt{\frac{2+z^2}{2n}}\right] \leq P \leq F\left[Z + a\sqrt{\frac{2+z^2}{2n}}\right]$$

Donde:

a es el coeficiente para un nivel específico de confianza

a = 1.65 para 90% de confianza.

a = 1.96 para 95% de confianza.

n → Número de lecturas.

Y los valores de la función se obtienen también de la Tabla 8.

Así, el rango de valores de probabilidad entre los cuales existe un 90% de confianza de hallar resistividades menores de 344 Ω-m o mayores de 344 Ω-m es:

$$F\left[0.5245 - 1.65\sqrt{\frac{2+(0.5245)^2}{2*12}}\right] \leq P \leq F\left[0.5245 + 1.65\sqrt{\frac{2+(0.5245)^2}{2*12}}\right]$$

$$F(0.0165) \leq P \leq F(1.0325)$$

$$50.8\% \leq P \leq 84.85\%$$

De esta manera se obtiene:

$$\begin{aligned}\rho_{min} &= \ln^{-1}(SZ_{min} + \chi_{prom}) = \ln^{-1}(0.01831 * 0.0165 + 5.7451) \\ \rho_{min} &= \ln^{-1}(5.7481) = 314 \Omega - m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{max} &= \ln^{-1}(SZ_{max} + \chi_{prom}) = \ln^{-1}(0.01831 * 1.0325 + 5.7451) \\ \rho_{max} &= \ln^{-1}(5.9342) = 377 \Omega - m\end{aligned}$$

Para el cálculo de la malla de tierra se deberá tomar $\rho = 377 \Omega - m$, siguiendo un modelo de tierra uniforme.

CAPÍTULO 5

DISEÑANDO CON IEEE-80

5.1 Caso 1: Malla cuadrada sin varillas de tierra

Utilizando el procedimiento descrito, calcular una malla de forma cuadrada con los siguientes datos relativos a la subestación:

Duración de la falla = Duración del choque eléctrico:	$t_f = t_c = 0.5 \text{ seg.}$
Resistividad de la roca triturada (mojada):	$\rho_s = 2000 \Omega\text{-m}$
Espesor de la capa de roca triturada:	$h_s = 0.102 \text{ m}$
Profundidad de enterramiento de la malla:	$h = 0.5 \text{ m}$
Área disponible para el sistema de puesta a tierra:	$A = 63\text{m} * 84\text{m}$
Material del conductor de la malla:	Cobre estirado en frío de 97.5% de conductividad
Temperatura ambiente:	$t_a = 40^\circ\text{C}$

Paso 1: Datos de campo (A, ρ):

Aunque la malla de puesta a tierra de la subestación está localizada dentro de un rectángulo de $63\text{m} * 84\text{m}$ (5292 m^2), para los cálculos del diseño inicial se asume una malla cuadrada de $70\text{m} * 70\text{m}$, sin varillas de puesta a tierra. Por tanto:

$$A = 70 * 70 = 4900 \text{ m}^2.$$

$\rho = 377 \Omega\text{-m}$. (calculada en el numeral 4.4).

Paso 2: Tamaño del conductor de la malla ($3l_0, t_c, d$):

Aunque la falla en la barra de 13.2 KV no contribuye a la elevación del potencial de tierra (GPR), los calibres de conexión flexibles y el conductor de la malla deben transportar esta corriente sin fundirlos.

El tiempo máximo de despeje de la falla se determinó en $t_f = t_c = 0.5$ seg, con base en el tiempo del relé de respaldo. El material usado es cobre. Ignorando la resistencia de la falla ($R_f = 0$) en las barras de la subestación, las corrientes de falla a tierra simétricas calculadas en el numeral 11, fueron:

Para una falla en la barra de 115KV: $3I_0 = 5174.5$ A ; $X/R = 3.465$

Para una falla en la barra de 13.2KV: $3I_0 = 10740.2$ A ; $X/R = 16.87$

La corriente asimétrica de falla en la barra de 13.2KV es:

$I_f = D_f (3I_0)$ donde el factor de decremento D_f está dado por la ecuación (13):

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{0.04475}{0.5} (1 - e^{-\frac{2 \times 0.5}{0.04475}})} = 1.0438$$

$$\text{Con } T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} = 16.87 * \frac{1}{120\pi} = 0.04475$$

$$I_f = 1.0438 (10740.2) = 11210.5 \text{ A asim} = 11.2105 \text{ kA asim.}$$

Esta última corriente será la usada para determinar el diámetro mínimo de los conductores de la malla.

El tamaño exacto del conductor se calcula empleando la ecuación (22):

$$A_{MCM} = 11.2105 \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{3.42}{0.5 \times 0.00381 \times 1.78} \right) * \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 40} \right)}} = 56 \text{ MCM}$$

Se emplearon los siguientes datos, extractados de la Tabla 3, para Cu a 97.5% de conductividad:

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

$$\alpha_r = 0.00381 / ^\circ\text{C a 20}^\circ\text{C.}$$

$$\rho_r = 1.78 \mu\Omega\text{-cm a 20}^\circ\text{C.}$$

$$K_o = 242^\circ\text{C a 20}^\circ\text{C.}$$

$$T_m = 1084^\circ\text{C.}$$

$$K_f = 7.06.$$

El cálculo aproximado se realiza utilizando la ecuación (23):

$$A_{MCM} = 11210.5 * 7.06 * \sqrt{0.5} = 55.96 \text{ MCM}$$

El conductor más cercano por encima es el N° 2 AWG de cobre 97.5% de conductividad, el cual tiene un área de 66.36 MCM, pero debido a requerimientos de esfuerzo mecánico, el calibre mínimo a emplear es el N° 2 / 0 AWG el cual que tiene un diámetro $d = 0.01\text{m}$ y un área de 133.1 MCM.

Paso 3: Criterio de tensiones de toque y de paso ($E_{t_{50}}$, $E_{p_{50}}$):

Para una capa superficial de roca triturada con espesor $h_s = 0.102\text{m}$, con una resistividad $\rho_s = 2000 \Omega\text{-m}$ (mojada) y una tierra con resistividad $\rho = 377 \Omega\text{-m}$, el factor de reducción de la resistividad de la capa superficial empleando la ecuación (16) es:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{377}{2000} \right)}{2 * 0.102 + 0.09} = 0.75$$

Asumiendo que la malla está dentro de la cerca perimetral para evitar el acceso al público y que el peso mínimo esperado de las personas que ingresan a la subestación es de 50kg, la tensión tolerable de paso $E_{p_{50}}$ está dada por la ecuación (24):

$$E_{p_{50}} = (1000 + 6 * 0.75 * 2000) * \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 1640.5V$$

Y la tensión tolerable de toque $E_{t_{50}}$ está dada por la ecuación (25):

$$E_{t_{50}} = (1000 + 1.5 * 0.75 * 2000) * \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 533.2V$$

Paso 4: Diseño inicial de la malla (D , n , L_c , L_t , h)

Asumir la malla de $70\text{m} * 70\text{m}$ que se muestra en la Figura 10 con conductores igualmente espaciados.

$D = 7\text{m}$, $L_x = 70\text{m}$, $L_y = 70\text{m}$, $A = 70\text{m} * 70\text{m} = 4900 \text{m}^2$, $h = 0.5\text{m}$.

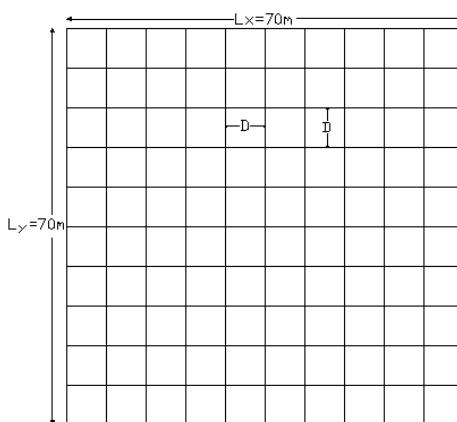


Figura 10. Diseño inicial de la malla (de forma cuadrada) Caso 1

Numero de conductores en el eje X: N=11 $L_R = 0 \rightarrow$ no hay varillas de tierra

Numero de conductores en el eje Y: M=11 $L_M = L_c + L_R = L_c = L_T$

Longitud total de conductores: $L_T = L_c = N L_x + M L_y = 11 * 70 + 11 * 70 = 1540\text{m}$

Longitud total del perímetro: $L_p = 4L_x = 4 * 70 = 280\text{m}$

Paso 5: Determinación de la resistencia de la malla (R_g)

Se emplea la ecuación de Sverak (27):

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{1540} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right] = 2.616 \Omega$$

Paso 6: corriente máxima a disipar por la malla (I_G, t_f)

$$\text{Con } T_a = \frac{X}{wR} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} = 3.465 * \frac{1}{120\pi} = 9.19 E - 3$$

El factor de decremento empleando la ecuación (13) es:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{9.19 E - 3}{0.5} (1 - e^{-\frac{2 \times 0.5}{9.19 E - 3}})} = 1.0046$$

De la Tabla 1 para dos líneas de transmisión y cuatro alimentadores de distribución y con $R_{tg} = 100 \Omega$ y $R_{dg} = 200 \Omega$ (2^{da} columna).

$$Z_{eq \ 2/4} = 1.09 + j0.208$$

Y empleando la ecuación (15), el factor de división de la corriente da:

$$(S_f)_{2/4} = \left| \frac{1.09 + j0.208}{1.09 + j0.208 + 2.616} \right| = |0.2785 + j0.0531| = 0.284$$

Y mediante la ecuación (10) se calcula la corriente a disipar por la malla así:

$$I_G = 1.0046 * 0.284 * 5174.5 = 1476.3 \text{ A}$$

Paso 7: Cálculo de la elevación de potencial de tierra (GPR)

$$GPR = I_G * R_g = 1476.3 * 2.616 = 3862 \text{ V}$$

Este valor excede la E_{t_0} que es de 533.2V por lo tanto, es necesario realizar evaluaciones adicionales.

Paso 8: Cálculo de la tensión de malla y la tensión real de paso (E_m , E_{preal})

La ecuación (40) permite calcular el valor de n así:

$$n = n_a = \frac{2L_c}{L_p} = \frac{2 * 1540}{280} = 11 \quad \text{Para mallas cuadradas}$$

La ecuación (29) da el valor de K_{ii} :

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * 11)^{2/11}} = 0.57$$

La ecuación (41) da el valor de K_h :

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.225$$

La ecuación (37) permite calcular el factor geométrico K_m así:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7+2*0.5)^2}{8*7*0.01} - \frac{0.5}{4*0.01} \right) + \frac{0.57}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2*11-1)} \right) \right] = 0.89$$

El factor de irregularidad K_i es calculado mediante la ecuación (42):

$$K_i = 0.644 + 0.148 * 11 = 2.272$$

Finalmente E_m se encuentra empleando la ecuación (36), así:

$$E_m = \frac{377 * 1476.3 * 0.89 * 2.272}{1540} = 730.8V$$

Con $L_M = L_C + L_R = 1540 + 0 = 1540m$

Paso 9: Comparación E_m vs. Et_{50} :

El voltaje de malla es mayor que el voltaje tolerable de toque ($E_m > Et_{50}$) esto es $730.8V > 533.2V$.

El diseño debe ser modificado; por tanto, se puede intentar con el Caso 2.

5.2 Caso 2: malla rectangular sin electrodos [1]

Paso 4: Nuevo diseño: cambiar los valores de D , n , L_c , L_t

La Figura 11 muestra una malla rectangular sin varillas de tierra con un área $63\text{m} * 84\text{m}$ ($A = 5292 \text{ m}^2$), $D = 7\text{m}$, $L_x = 84\text{m}$, $L_y = 63\text{m}$, $h = 0.5\text{m}$.

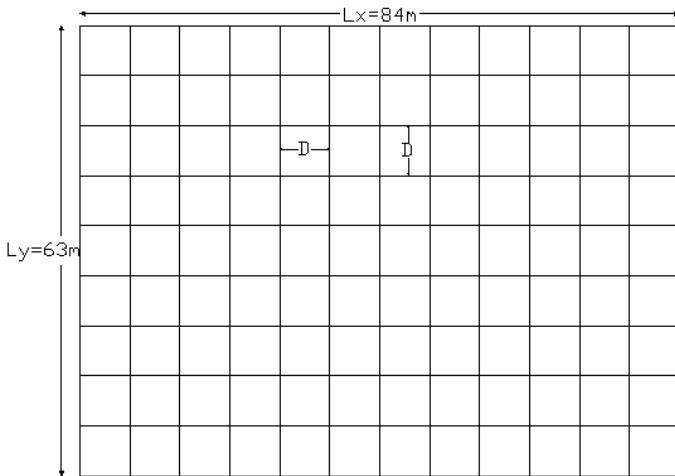


Figura 11. Malla rectangular sin electrodos. Caso 2

Número de conductores en el eje X: $N=10$ $L_R = 0 \rightarrow$ no hay varillas de tierra
 Número de conductores en el eje Y: $M=13$

$$L_t = L_c + L_R = N L_x + M L_y = 10 * 84 + 13 * 63 = 1659\text{m}$$

$$L_p = 2 * 63 + 2 * 84 = 294\text{m}$$

Los pasos 1, 2, 3 y 4 son los mismos del Caso 1.

Paso 5: Se calcula R_g mediante la ecuación (27):

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{1659} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5292}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{5292}}} \right) \right] = 2.5103 \Omega$$

Paso 6: cálculo de I_g :

Empleando la Tabla 1: $Z_{eq} 2/4 = 1.09 + j0.208$

La ecuación (6) da el factor de división de corrientes:

$$(S_f)_{2/4} = \left| \frac{1.09 + j0.208}{1.09 + j0.208 + 2.5103} \right| = |0.3051 + j0.0401| = 0.3077$$

Y la ecuación (10) da $I_g = 1.0046 * 0.3077 * 5174.5 = 1599.5177\text{A}$

Paso 7: cálculo del GPR:

$$GPR = I_g * R_g = 1599.5177 * 2.547 = 4073.9717V$$

Este valor excede la $E_{t_{50}}$ que es de 533.2V ($GPR > E_{t_{50}}$) lo que hace necesario realizar otros cálculos.

Paso 8: Tensión de malla E_m y tensión real de paso E_{preal} :

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} = \frac{2 * 1659}{294} = 11.286 \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{294}{4\sqrt{5292}}} = 1.005$$

$$n = 11.286 * 1.005 = 11.342$$

Valores encontrados empleando las ecuaciones (41) y (40):

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right) + \frac{0.5767}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 * 11.342 - 1)} \right) \right] = 0.8854$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 * 11.342)^{2/11.342}} = 0.5767 \quad y \quad K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.225$$

Aquí se emplearon las ecuaciones (37), (38) y (39)

según la ecuación (34) $K_{ii} = 0.644 + 0.148 * 11.342 = 2.3238$

y mediante la ecuación (36):

$$E_m = \frac{377 * 1599.5177 * 0.8854 * 2.3238}{1659} = 718.4V$$

Paso 9: E_m vs. $E_{t_{50}}$:

El voltaje de malla es mayor que el voltaje tolerable de toque $E_m > E_{t_{50}}$ (esto es $718.4 > 533.2V$) y la malla debe ser modificada. Esta modificación puede verse en los Casos 3 y 4.

5.3 Caso 3: malla cuadrada con electrodos [1]

En los casos anteriores, el Paso 10 no ha sido alcanzado ya que no se ha cumplido el criterio del Paso 9. Generalmente existen dos modelos para modificar el diseño de la malla, para cumplir con los requerimientos del voltaje tolerable de toque $E_{t_{50}}$:

a) Reducir el GPR a un valor menor del $E_{t_{50}}$, o a un valor lo suficientemente bajo como para que resulte $E_m < E_{t_{50}}$.

b) Reducir la corriente de falla a tierra, lo que resulta impráctico y difícil de obtener y la malla se puede modificar cambiando cualquiera de los valores D , L_c , h adicionando varillas etc.

En este ejemplo, el diseño preliminar del Caso 1 será modificado incluyendo 20 varillas de tierra de 7.5m cada una alrededor del perímetro de la malla, como se muestra en la Figura 12.

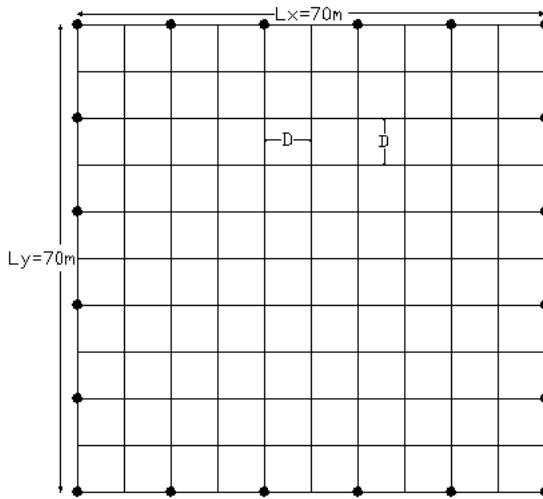


Figura 12. Malla cuadrada con electrodos del Caso 3

En este diseño: $D = 7m$, $A = 70m * 70m = 4900m^2$, $h = 0.5m$, $d = 0.01m$
 $N = 11$, $M = 11$.

$$L_t = L_c + L_R = N L_x + M L_y + L_R = 11 * 70 + 11 * 70 + 7.5 * 20 = 1690m$$

Con $L_r = 7.5$ $L_R = n_r * L_r = 7.5 * 20 = 150m$

$$L_c = 1540m, L_p = 4 * 70 = 280m$$

Paso 5: La resistencia de la malla se calcula con la ecuación (27):

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{1690} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{4900}}} \right) \right] = 2.594 \Omega$$

Paso 6: Cálculo de I_g :

Empleando la Tabla 1 $Z_{eq,2/4} = 1.09 + j0.208$

Y la ecuación (6) para el factor de división de corrientes

$$(S_f)_{2/4} = \left| \frac{1.09 + j0.208}{1.09 + j0.208 + 2.594} \right| = |0.2981 + j0.0396| = 0.307$$

Y la ecuación (10) da: $I_g = 1.0046 * 0.307 * 5174.5 = 1595.88V$

Paso 7: Elevación del potencial de tierra, calculada con la ecuación:

$$GPR = I_G * Rg = 1595.88 * 2.594 = 4139.7127V$$

Este valor excede la $E_{t_{50}}$ (esto es $4139.7127V > 533.2V$)

Paso 8: Para el cálculo de E_m , las ecuaciones (41) dan:

$$n_b = n_c = n_d = 1$$

Y la ecuación (40) da: $n = 11 * 1 * 1 * 1 = 11$

La ecuación (37) da:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7 + 2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right) + \frac{1}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 * 11 - 1)} \right) \right] = 0.772$$

Con $K_{ii} \rightarrow 1$ para mallas con varillas perimetrales.

$K_h \rightarrow 1.225$ (la misma de los casos 1 y 2), calculada mediante la ecuación (39)

La ecuación (42) da $K_i = 0.644 + 0.148 * 11 = 2.272$

Y mediante la ecuación (36): $E_m = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_m \cdot K_i}{L_M}$

La ecuación (45) da el valor de L_M así:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R = 1540 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] 150 = 1786.36$$

$$E_m = \frac{377 * 1595.88 * 0.772 * 2.272}{1786.36} = 590.7425 V$$

Paso 9: E_m aun es mayor que $E_{t_{50}}$ ($590.74V > 533.2V$):

Por lo tanto, la malla debe ser modificada de nuevo.

5.4 Caso 4: malla rectangular con electrodos [1]

En este caso, el diseño preliminar del Caso 2 será modificado agregando 38 varillas de tierra de 10m cada una y empleando toda el área disponible de la subestación, como se muestra en la Figura 13.

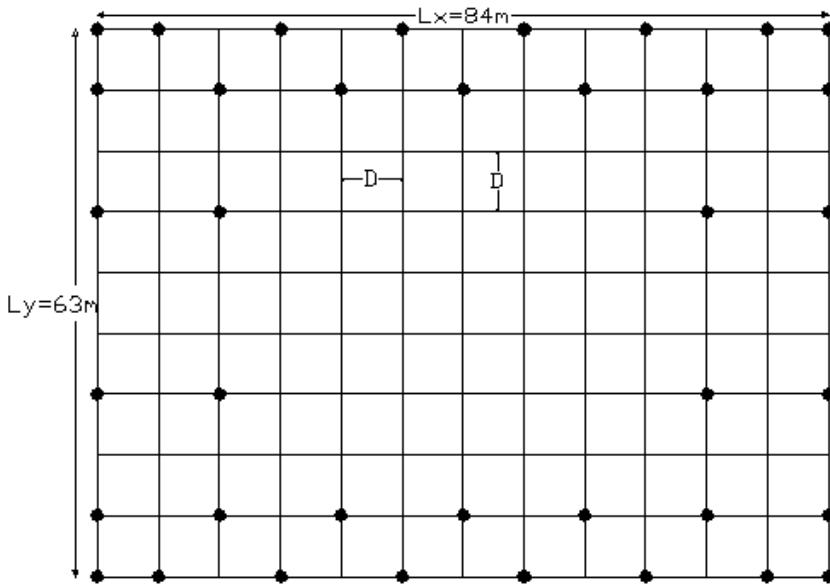


Figura 13. Malla rectangular con varillas de tierra del Caso 4

En esta malla se considera: $D = 7\text{m}$, $A = 63\text{m} * 84\text{m} = 5292\text{m}^2$, $h = 0.5\text{m}$, $d = 0.01\text{m}$
 $N = 10$, $M = 13$.

$$\begin{aligned}L_t &= L_c + L_r = N L_x + M L_y + L_r = 1659 + 380 = 2039\text{m} \\ \text{Con } L_r &= 7.5 \quad L_r = n_r * L_r = 38 * 10 = 380\text{m} \\ L_c &= N L_x + M L_y = 10 * 84 + 13 * 63 = 1659 \\ L_p &= 2 * 84 + 2 * 63 = 294\text{m}\end{aligned}$$

Paso 5: La resistencia de la malla según la ecuación (18) es:

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{2039} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5292}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{5292}}} \right) \right] = 2.468 \Omega$$

Paso 6: la corriente máxima a disipar por la malla I_g :

Empleando la Tabla 1: $Z_{eq \frac{2}{4}} = 1.09 + j0.208$

El factor de división de corrientes según la ecuación (15) es:

$$(S_f)_{\frac{2}{4}} = \left| \frac{1.09 + j0.208}{1.09 + j0.208 + 2.468} \right| = |0.3087 + j0.0404| = 0.311$$

Y la ecuación (10) da: $I_g = 1.0046 * 0.311 * 5174.5 = 1616.7\text{A}$

Paso 7: La elevación del potencial de tierra es:

$$GPR = I_g * Rg = 1616.7 * 2.468 = 3990V$$

Este valor excede la $E_{t_{50}}$ ($3990V > 533.2V$)

Paso 8: Cálculo de la tensión de malla E_m y la tensión de paso $E_{p_{50}}$:

Las ecuaciones (33) dan:

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p} = \frac{2 * 1659}{294} = 11.286 \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{294}{4\sqrt{5292}}} = 1.005$$

$$n_C = n_d = 1$$

$$\text{y la ecuación (41) da: } n = 11.286 * 1.005 * 1 * 1 = 11.342$$

$$K_i = 1 \quad \text{y} \quad K_h = 1.225 \quad \text{la ecuación (37) da:}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7+2*0.5)^2}{8*7*0.01} - \frac{0.5}{4*0.01} \right) + \frac{1}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2*11.342-1)} \right) \right] = 0.768$$

$$\text{La ecuación (42) da: } K_i = 0.644 + 0.148 * 11.342 = 2.323$$

Empleando ahora las ecuaciones (45) y (36) para calcular E_m :

$$E_m = \frac{377 * 1616.7 * 0.768 * 2.323}{1659 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{10}{\sqrt{63^2 + 84^2}} \right) \right] * 380} = 474.4V$$

Como $E_m < E_{t_{50}}$ ($474.4 < 533.2V$), entonces se puede ahora calcular la tensión de paso real utilizando las ecuaciones (46), (47) y (48):

$$K_i = 2.323$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2*0.5} + \frac{1}{7+0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{11.342-2}) \right] = 0.406$$

$$E_p = \frac{377 * 1616.7 * 0.406 * 2.323}{0.75 * 1659 * 0.85 * 380} = 366.8V$$

Paso 9: Se observa ahora que $E_m < E_{t_{50}}$ ($474.4V < 533.2V$):

Paso 10: Se tiene también que $E_p < E_{p_{50}}$ ($366.8V < 1640.5V$)

Paso 11: No son necesarias las modificaciones al diseño. Se encontró la solución.

Paso 12: Se ha obtenido un diseño satisfactorio. En este punto, todos los conectores flexibles, varillas adicionales de tierra para pararrayos, los enlaces de los postes de la cerca y de la puerta de acceso (incluyendo los refuerzos), etc. deben completarse para obtener todos los detalles del diseño.

5.5 Caso 5: malla en L con electrodos [1]

La solución al problema planteado se encontró en el Caso 4. El siguiente es otro ejemplo en el que la forma de la malla es muy diferente (en L). Se presenta con el objetivo de observar el procedimiento aplicado.

En este caso (Figura 14) se utilizarán los mismos datos de los casos anteriores.

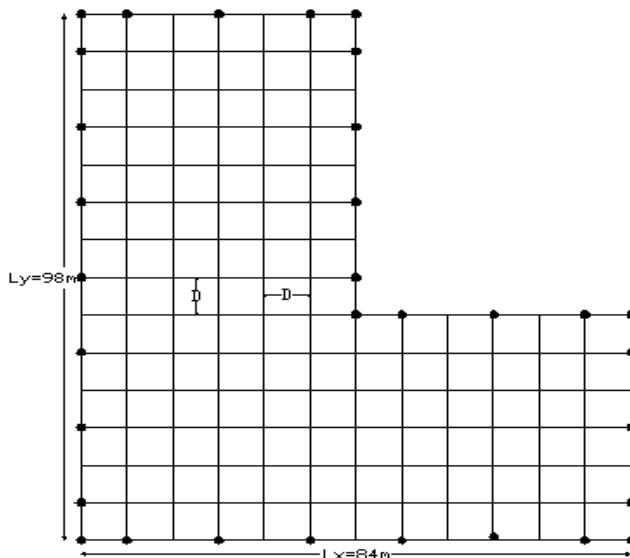


Figura 14. Malla en L con electrodos para el Caso 5.

Parámetros: $A = 5880 \text{ m}^2$, $d = 7 \text{ m}$, $d = 0.01 \text{ m}$, $h = 0.5 \text{ m}$, $h_s = 0.102 \text{ m}$, $L_p = 364 \text{ m}$

Se emplearán 32 varillas de 10m cada una

$$L_t = L_c + L_R = N L_x + M L_y + L_R = 1862 + 320 = 2182 \text{ m}$$

$$\text{Con } L_r = 7.5 \quad L_R = n_r * L_r = 32 * 10 = 320 \text{ m}$$

$$L_c = N L_x + M L_y = 1862 \text{ m}$$

Paso 5: La resistencia de la malla de acuerdo con la fórmula (27) es:

$$R_g = 377 \left[\frac{1}{2182} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5880}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5 \sqrt{\frac{20}{5880}}} \right) \right] = 2.34 \Omega$$

Paso 6: Corriente máxima a disparar por parte de la malla:

Empleando la Tabla 1: $Z_{eq} = 1.09 + j0.208$ y de acuerdo con la ecuación (15)

$$(S_f)_{2/4} = \left| \frac{1.09 + j0.208}{1.09 + j0.208 + 2.34} \right| = |0.3203 + j0.0412| = 0.323$$

Y la ecuación (1) da: $I_g = 1.0046 * 0.323 * 5174.6 = 1679.08A$

Paso 7: $GPR = I_g * R_g = 1679.08 * 2.34 = 3929.047V$

Este valor excede el $E_{t_{50}}$ ($3929.047V > 533.2V$), es necesario calcular E_m y E_p

Paso 8: Cálculo de E_m y E_p real: las ecuaciones (41) dan:

$$n_a = \frac{2 * 1862}{364} = 10.231; \quad n_b = \sqrt{\frac{364}{4 * \sqrt{5880}}} = 1.089; \quad n_c = \left[\frac{84 * 98}{5880} \right]^{\frac{0.7 * 5880}{84 * 98}} = 1.183 \quad n_d \\ = 1$$

la ecuación (40) da: $n = 10.231 * 1.089 * 1.183 * 1 = 13.18$

$K_i = 1$ y $K_h = 1.225$ y la ecuación (37) da:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.01} + \frac{(7+2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.01} - \frac{0.5}{4 * 0.01} \right) + \frac{1}{1.225} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 * 13.18 - 1)} \right) \right] = 0.747$$

La ecuación (42) da: $K_i = 0.644 + 0.148 * 13.18 = 2.595$

Se emplean ahora las ecuaciones (36) y (45) para calcular E_m

$$E_m = \frac{377 * 1679.08 * 0.747 * 2.595}{1862 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{10}{\sqrt{84^2 + 98^2}} \right) \right] * 320} = 513.8V$$

Se calcula ahora la tensión real de paso, usando las ecuaciones (46), (47) y (48):

$$K_i = 2.595$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} (1 - 0.5^{13.18-2}) \right] = 0.406$$

$$E_p = \frac{377 * 1679.08 * 0.406 * 2.595}{0.75 * 1862 * 0.85 + 320} = 399.7V$$

Paso 9: E_m es menor que $E_{t_{50}}$ ($513.8V < 533.2V$), resultado satisfactorio.

Paso 10: E_p es menor que $E_{p_{50}}$ ($399.7V < 1640.5$), resultado satisfactorio.

Paso 11: No se requiere nuevo diseño en este caso.

Paso 12: Un diseño seguro ha sido alcanzado y los detalles finales pueden ahora adicionarse al diseño.

5.6 - Aplicación de las ecuaciones de schwarz (más exacta) de la resistencia de puesta a tierra del caso 4 (terreno homogéneo)

Se utilizan ahora las ecuaciones de *schwarz* para encontrar un valor más preciso de la resistencia total de una puesta a tierra en suelos homogéneos, incluyendo la resistencia de los conductores horizontales (R_1), la resistencia de las varillas verticales (R_2) y la resistencia mutua (R_m) entre la malla horizontal y las varillas verticales.

Las ecuaciones (29a) y (29b) permiten encontrar:

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 = -0.05 \frac{84}{63} + 1.2 = 1.133$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 = 0.1 \frac{84}{63} + 4.68 = 4.813$$

Estos valores se pueden reemplazar en la expresión (29) para encontrar la resistencia de la malla horizontal (R_1):

$$R_1 = \frac{377}{\pi * 1659} \left[\ln \left(\frac{2 * 1659}{\sqrt{0.01 * 0.5}} \right) - \frac{1.133 * 1659}{\sqrt{63 * 84}} - 4.813 \right] = 2.3 \Omega$$

Y la ecuación (30) para hallar la resistencia de las varillas verticales (R_2):

$$R_2 = \frac{377}{2\pi * 38 * 10} \left[\ln \left(\frac{8 * 10}{0.016} \right) - 1 + \frac{2 * 1.133 * 10}{\sqrt{63 * 84}} - (\sqrt{38} - 1)^2 \right] = 2.5 \Omega$$

En la que se han empleado 38 varillas de 10m cada una y con un diámetro $d_r = 5/8 "$ = 0,016m.

La resistencia mutua (R_m) entre la dos se calcula mediante la ecuación (31):

$$R_m = \frac{377}{\pi * 1659} \left[\ln\left(\frac{2 * 1659}{10}\right) + \frac{1.133 * 1659}{\sqrt{63 * 84}} - 4.813 + 1 \right] = 2.013 \Omega$$

Finalmente se calcula mediante la expresión (28) la resistencia de la puesta a tierra (R_g), así:

$$R_g = \frac{2.3 * 2.5 - (2.013)^2}{2.3 + 2.5 - 2 * 2.013} = 2.19 \Omega$$

Empleando la formula de *Severak*, ecuación (27), el resultado fue $R_g = 2.468 \Omega$. Aun así, el diseño mostrado para el caso 4 no va a cambiar, ya que la diferencia fue apenas de 0.278Ω .

5.7 Aplicación de las ecuaciones modificadas de schwarz para el cálculo de la resistencia de puesta a tierra del caso 4 (Terreno de dos capas) [2]

Empleando los resultados obtenidos en el ejemplo del numeral 12.3, donde se aplicó el método gráfico de *Sunde* a un ejemplo práctico (serie de medidas de resistividad de terreno modelado como dos capas).

Los resultados fueron:

Capa superior con $\rho_1 = 420 \Omega\text{-m}$ y una profundidad $H = 4.61 \text{m}$

Capa inferior con $\rho_2 = 100 \Omega\text{-m}$ y profundidad infinita.

Profundidad de enterramiento de la malla $h = 0.5 \text{m}$

Varillas de tierra de $L_r = 10 \text{m}$ y diámetro $d_r = 5/8" = 0.016 \text{m}$.

El resultado para la resistividad aparente, usando la ecuación (50) fue:

$$\rho_a = 145.6 \Omega\text{-m}$$

La ecuación (32) da como resultado:

$$R_1 = \frac{420}{\pi * 1659} \left[\ln\left(\frac{2 * 1659}{\sqrt{0.01 * 0.5}}\right) + \frac{1.133 * 1659}{\sqrt{63 * 84}} - 4.813 \right] = 2.56 \Omega$$

La ecuación (33) da:

$$R_2 = \frac{145.6}{2\pi * 38 * 10} \left[\ln\left(\frac{8 * 10}{0.016}\right) - 1 + \frac{2 * 1.133 * 10}{\sqrt{63 * 84}} - (\sqrt{38} - 1)^2 \right] = 0.935 \Omega$$

La ecuación (34) da:

$$R_m = \frac{145.6}{\pi * 1659} \left[\ln\left(\frac{2 * 1659}{10}\right) + \frac{1.133 * 1659}{\sqrt{63 * 84}} - 4.813 + 1 \right] = 0.777 \Omega$$

La resistencia total de puesta a tierra según la ecuación (28) es:

$$R_g = \frac{2.56 * 0.935 - (0.777)^2}{2.56 + 0.935 - 2 * 0.777} = 0.922 \Omega$$

Al igual que en el caso anterior se debe verificar que $R_g < R_1$, $R_g < R_2$ pero $R_g > R_m$. Continuando ahora con el Caso 4 pero con $R_g = 0.922 \Omega$, $R_{tg} = 15 \Omega$ y $R_{dg} = 25 \Omega$.

Paso 6: Corriente a disparar por parte de la malla: según la Tabla 1 $Z_{eq,2/4} = 0.27 + j0.165$, valor extractado de la primera columna. De acuerdo con la ecuación (15):

$$(S_f)_{2/4} = \frac{0.27 + j0.165}{0.27 + j0.165 + 0.922} = |0.241 + j0.1051| = 0.27$$

Mediante la ecuación (10): $I_g = 1.0046 * 0.27 * 5174.6 = 1403.6 \text{ A}$

Paso 7: La elevación del potencial de tierra es: $GPR = I_g * R_g = 1403.6 * 0.922 = 1294.12 \text{ V}$
Este valor excede a $E_{t_{50}}$ (es decir $1294.12 \text{ V} > 533.2 \text{ V}$)

Paso 8: Cálculo de E_m y E_p real:

$$E_m = \frac{145.6 * 1403.6 * 0.768 * 2.323}{1659 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{10}{\sqrt{63^2 + 84^2}} \right) \right] * 380} = 219.55 \text{ V}$$

$$E_p = \frac{145.6 * 1403.6 * 0.406 * 2.323}{0.75 * 1659 * 0.85 * 380} = 123 \text{ V}$$

Paso 9: se cumple que $E_m < E_{t_{50}}$ (es decir $219.55 \text{ V} < 533.2 \text{ V}$)

Paso 10: se cumple que $E_p < E_{p_{50}}$ (es decir $123 \text{ V} < 1640.5 \text{ V}$)

Paso 11: no se requieren modificaciones al diseño, ya se encontró una solución aceptable

Paso 12: diseño detallado (Idem caso 4).

CAPÍTULO 6

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA YA INSTALADO

6.1 Método de la Regla del 61.8%: [4]

Este método fue desarrollado por G.F. Tagg y publicado en "Proceeding of the IEEE vol III N°12" en diciembre de 1964. El autor indica que las zonas de influencia de puestas a tierra pueden ser tan grandes que, para evitar su superposición, al hacer la medida se deben tomar distancias considerables entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra a evaluar. Para aplicar este método es necesario que las áreas de influencia no se sobrepongan entre sí. También es necesario desconectar la malla del resto del sistema mientras se realizan las medidas.

Para la medición con este método se requiere de un telurómetro, que se conecta como se muestra en la Figura 15.

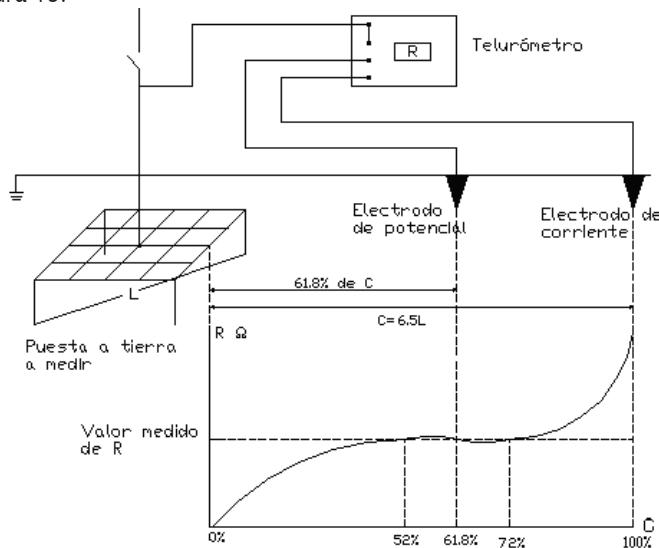


Figura 15. Ilustración del método del 61.8% para medir la resistancia de una puesta a tierra

La distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra a evaluar debe ser de 6.5 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra o el diámetro equivalente. El verdadero valor de la resistencia de puesta a tierra se obtiene con el electrodo de tensión ubicado a una distancia de $0.618C$ medido desde la malla.

Se recomienda realizar dos mediciones adicionales: una al 52% y otra al 72% y las diferencias con la resistencia medida al 61.8% deben ser muy pequeñas.

Al aplicar este método a la malla del Caso 4, el electrodo de corriente tendrá que estar ubicado a una distancia:

$$C = 6.5\sqrt{63^2 * 84^2} = 682.5;$$

En la práctica, este valor es exageradamente grande y difícil de obtener, bien sea porque la topografía del terreno no lo permite, o porque se acerca demasiado a otras tierras presentándose interferencias que hacen dudar de la medida tomada. Por esta razón, este método se recomienda para medir la resistencia de sistemas de puesta a tierra medianas y pequeñas.

6.2 Método de intersección de curvas: [4], [6]

Se basa en la regla del 61.8% y se emplea en la evaluación de la resistencia de grandes sistemas de puesta a tierra ($A > 20000m^2$) y resuelve varios problemas prácticos como:

- a) Al emplear el método de caída de potencial (regla del 61.8%), la ubicación del electrodo de corriente a 6.5 veces la máxima longitud de la malla de puesta a tierra a medir, considera distancias muy grandes ($> 500m$) en las cuales es muy difícil medir.
- b) Elimina dudas sobre las interferencias mutuas entre electrodos al usar grandes distancias para los electrodos auxiliares (de tensión y de corriente).
- c) No es muy exigente para determinar el centro eléctrico de sistemas de puesta a tierra complejas con múltiples conexiones, tubos, electrodos y conductores con geometría regular en su contorno, pero que no se comporta eléctricamente como una figura definida sobre el punto de vista de la conexión central.
- d) Elimina la necesidad de extensos cálculos y simplifica la medición al requerirse menores distancias al ubicar los electrodos auxiliares.

Este método consiste en obtener varias curvas de resistencia de puesta a tierra, colocando el electrodo de corriente B (ver Figura 16) a varias distancias y asumiendo varias posiciones para el centro eléctrico del sistema de puesta a tierra que se está midiendo. A partir de estas curvas se obtiene la resistencia de puesta a tierra y la posición exacta del centro de la malla.

Como se observa en la Figura 16, se supone el centro eléctrico del sistema de puesta a tierra en el punto D, a una distancia "X" de "O" que es el punto de conexión del telurómetro a la malla; luego, la distancia del centro al electrodo de corriente es $C+X$ y el valor de la resistencia se obtiene cuando el electrodo de potencial se coloca a $0.618(C+X)$ de D, o sea que el valor medido de D desde O es $0.618(C+X)-X$.

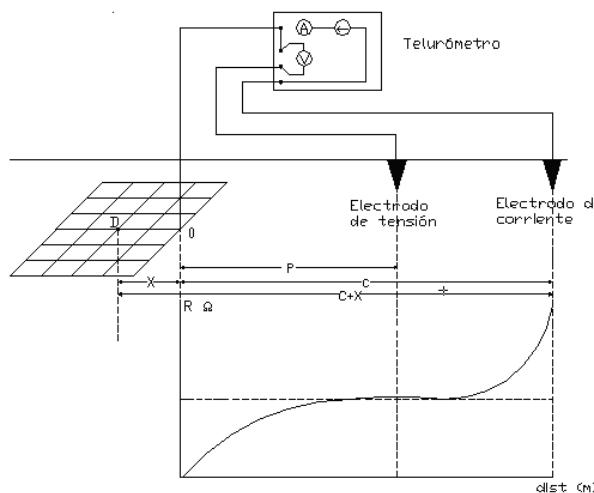


Figura 16. Ilustración del método de intersección de curvas.

6.2.1 - Procedimiento de medida:

1. Determinar el punto O.
2. De acuerdo con las dimensiones de la malla, determinar la distancia C para el electrodo de corriente, para cada una de las curvas que se quieren obtener. Se deben obtener como mínimo cuatro curvas.
3. Se determina la distancia X como un porcentaje de C (20%, 40%, 60%, 80%, y 100%).
4. Para cada una de las distancias X_i se ubica el electrodo de tensión a una distancia $P_i = 0.618(C+X_i)-X_i$.
5. Se dibujan las gráficas R_i vs. X_i .

6.2.2 Condiciones para la instalación del sistema de medida:

1. El punto O (unión entre el telurómetro y la malla) se ubica en el perímetro de la malla.
2. Los puntos D, O y B deben estar en línea recta y perpendicular a la malla.
3. La distancia mínima del electrodo de corriente debe ser mayor que el lado mayor de la malla y debe ser menor que el doble de este lado.
4. Realizar cuatro curvas con cinco mediciones para cada una y realizadas en una misma jornada de trabajo (no sirven medidas tomadas en días anteriores).
5. No debió haber llovido por lo menos en los dos días anteriores.

Ejemplo:

Calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra del Caso 4, el cual está compuesto de una malla horizontal y varillas verticales. Tiene las siguientes características.

$$\begin{aligned}L_x &= 84\text{m} & h &= 0.5\text{m} \\L_y &= 63\text{m} & \text{calibre conductor: } & 2/0 \text{ AWG de Cu} \\L_r &= 10\text{m} & d_r &= 5/8".\end{aligned}$$

Los valores elegidos para C fueron 100, 150, 200 y 250m y siguiendo el método de la intersección de curvas se tomaron las medidas consignadas en la Tabla 9, con X_i como 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de cada valor de C.

La Figura 17 se obtiene graficando los datos obtenidos en los 4 grupos de medida con relación a X_i .

En la gráfica de la Figura 17, se registran seis intersecciones y de acuerdo con el método teórico expuesto, se debería presentar una sola intersección para todas las curvas, que correspondería al valor de la resistencia de puesta a tierra que se está midiendo.

En este caso práctico, se debe tomar un promedio de los seis valores de resistencia correspondientes a cada intersección así:

- R1 = 1.31Ω que corresponde a la intersección de las curvas A y B.
- R2 = 1.12Ω que corresponde a la intersección de las curvas A y C.
- R3 = 0.93Ω que corresponde a la intersección de las curvas A y D.
- R4 = 0.92Ω que corresponde a la intersección de las curvas B y C.
- R1 = 0.83Ω que corresponde a la intersección de las curvas B y D.
- R1 = 0.80Ω que corresponde a la intersección de las curvas C y D.

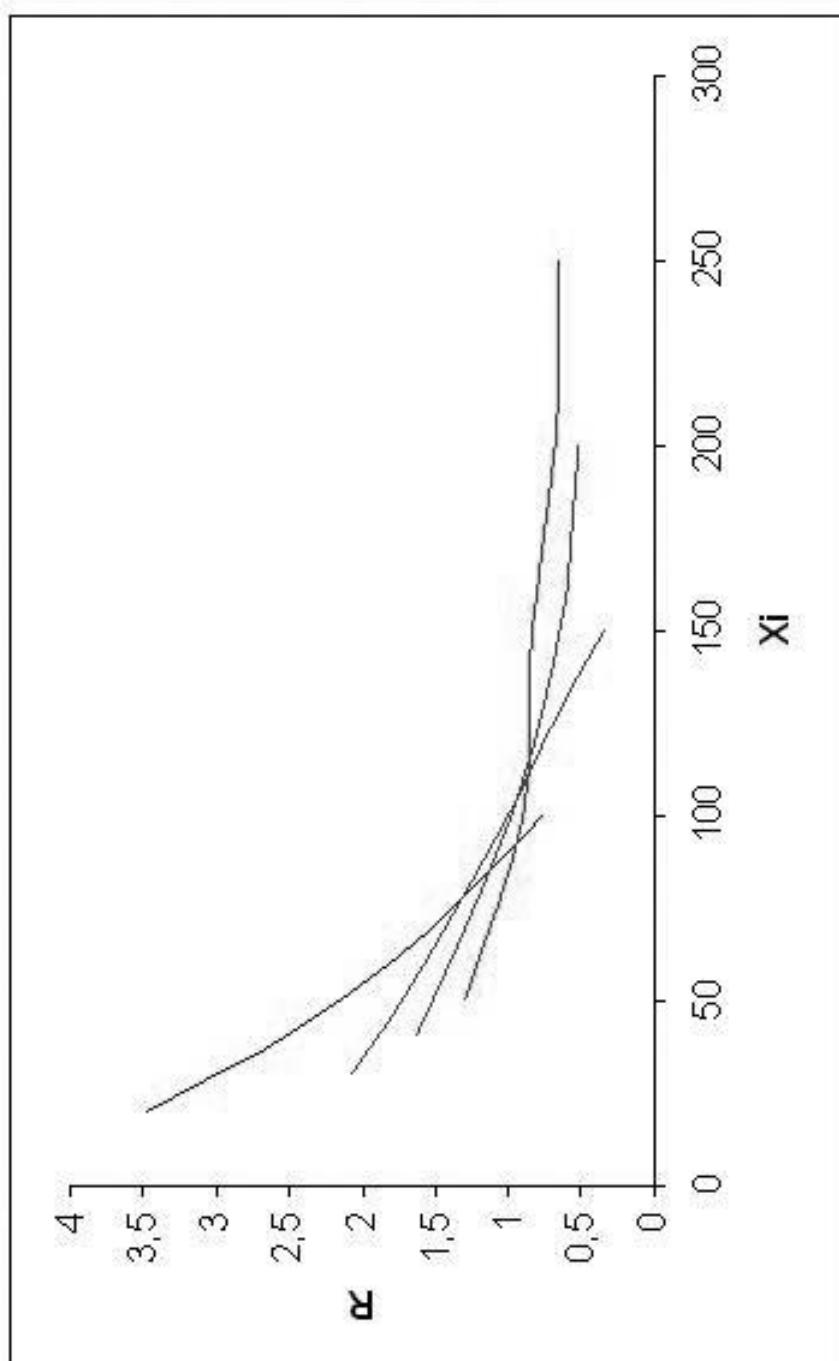
El valor promedio es:

$$R_{PUESTA-A-TIERRA} = \frac{1.12 + 1.31 + 0.93 + 0.92 + 0.83 + 0.80}{6} = 0.985\Omega$$

Tabla 9. Cálculo de las resistencias en función de las X_i como porcentajes de C

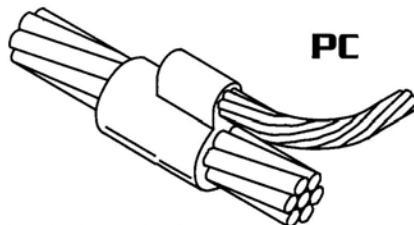
X_i	CURVA A C = 100m			CURVA B C = 150m			CURVA C C = 200m			CURVA D C = 250m			
	P _i	m	R _i	Ω	P _i	m	R _i	Ω	P _i	m	R _i	Ω	
20	54,16	3,49	30		81,24	2,07	40		108,32	1,63	50	135,4	1,29
40	46,52	2,52	60		69,7	1,58	80		93,04	1,17	100	116,3	0,9
60	38,88	1,81	90		59,32	1,14	120		77,76	0,82	150	97,2	0,83
80	31,24	1,25	120		46,86	0,75	160		62,4	0,6	200	70,1	0,68
100	23,6	0,75	150		35,4	0,34	200		47,2	0,51	250	59	0,65

Figura 17. Curvas resultantes R vs. X_i del ejemplo práctico

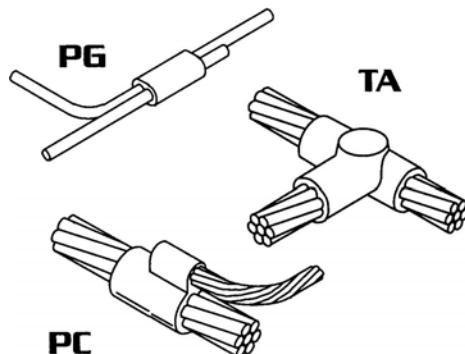


6.3 Conductores, empalmes y barrajes de tierra [7]

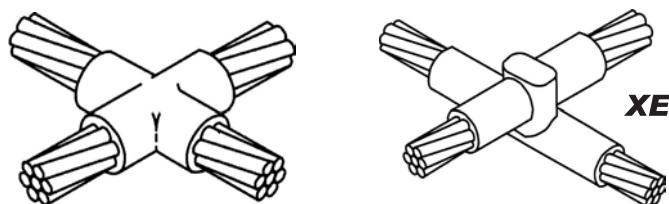
Ducto de empalme paralelo:



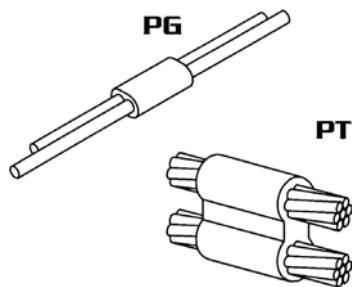
Empalmes horizontales en “T”:



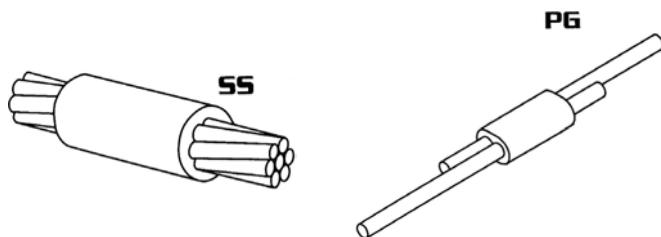
Empalmes horizontales en “X”:



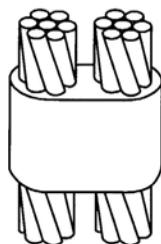
Conductores horizontales en paralelo:



Empalme horizontal:

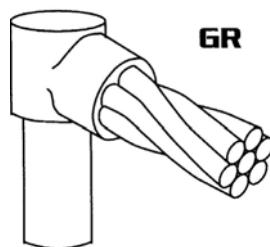


Conductores verticales en paralelo:

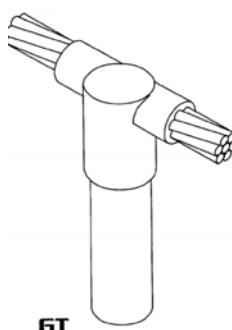


Cable a varilla de tierra:

Único cable al extremo superior de la varilla de tierra.

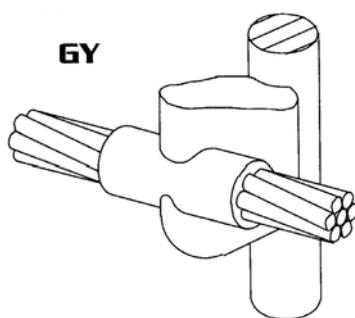


Cable pasante a varilla de tierra:

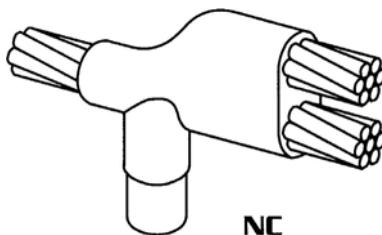


Cable a varilla de tierra:

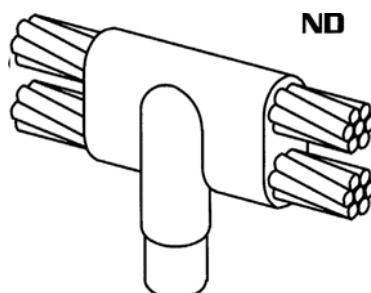
Cable a través de un lado de la varilla de tierra.



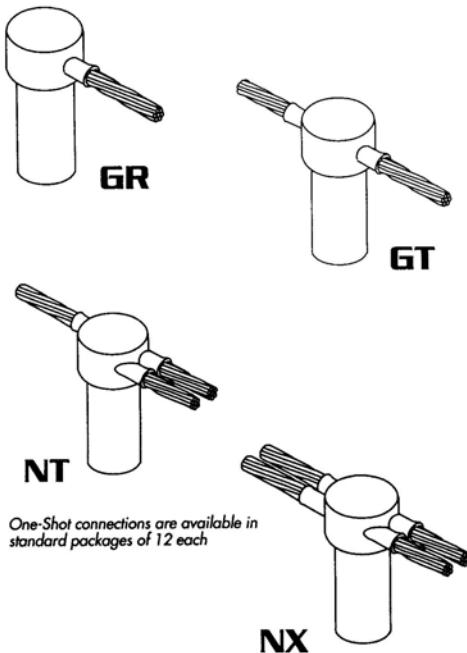
Dos cables a varillas de tierra:



Cables paralelos al extremo superior de la varilla de tierra:



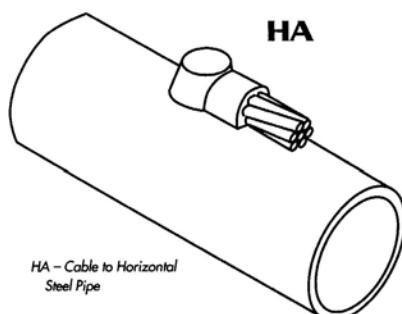
Cable a varilla de tierra usando empalmes Cadweld de un disparo:



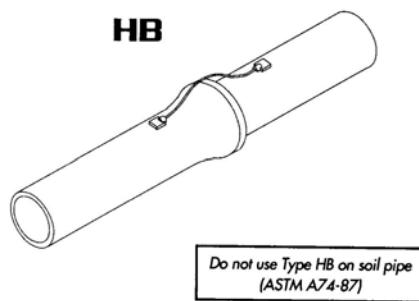
Empalme de varillas de tierra:



Rango de tubo horizontal de acero:



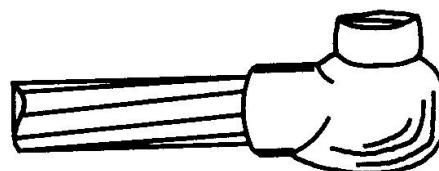
Superficie horizontal de hierro unido:



*Do not use Type HB on soil pipe
(ASTM A74-87)*

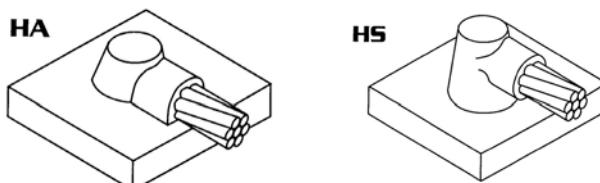
Superficie vertical de acero:

Cable al lado del tubo horizontal de acero.



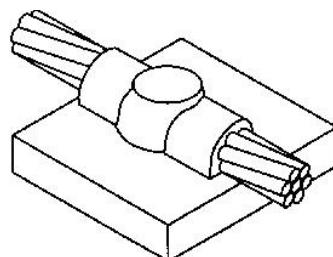
Superficie horizontal de acero:

Conductor horizontal concéntrico de cobre en la parte superior del tubo horizontal.



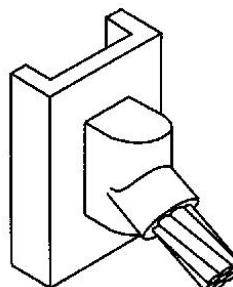
Superficie horizontal de acero:

Cable en la parte superior del tubo horizontal de acero.

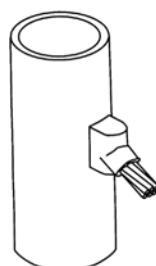


Superficie vertical de acero:

Cable descendiendo a 45° de la superficie plana vertical de acero incluyendo tubo.

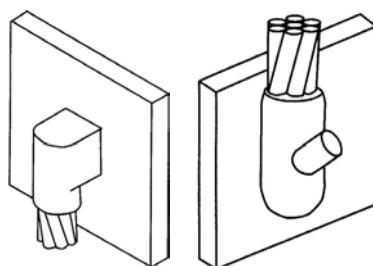


Rango de tubos verticales:



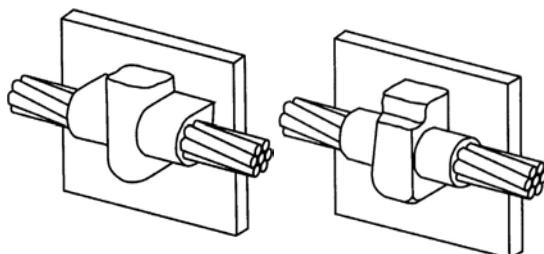
Superficie vertical de acero:

Empalme de un cable vertical con un lado del tubo horizontal de acero.



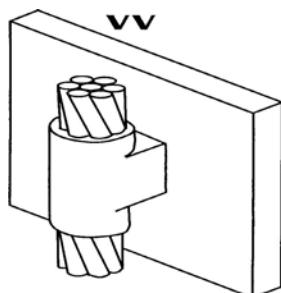
Superficie vertical de acero:

Cadweld a través de empalmes con la superficie plana vertical de acero, cable a un lado del tubo horizontal de acero, cable al tubo vertical de acero.



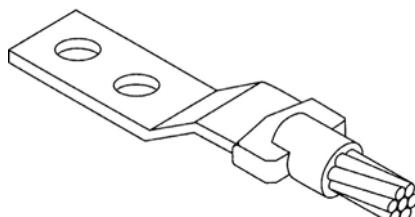
Superficie vertical de acero:

A través de empalmes a la superficie plana vertical o al lado del tubo vertical u horizontal de acero.



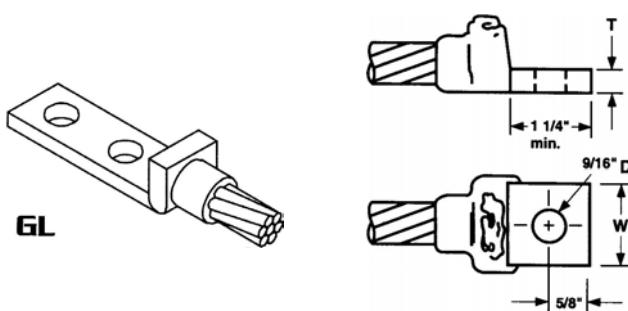
Platina de cobre:

Cable a platina o empalme a un barraje.



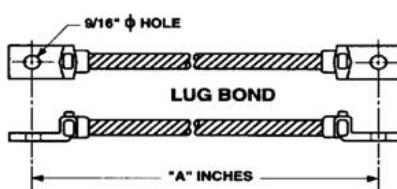
Platina de cobre:

Platina y empalme para equipos y estructuras. Ideal para aplicaciones de potencia.



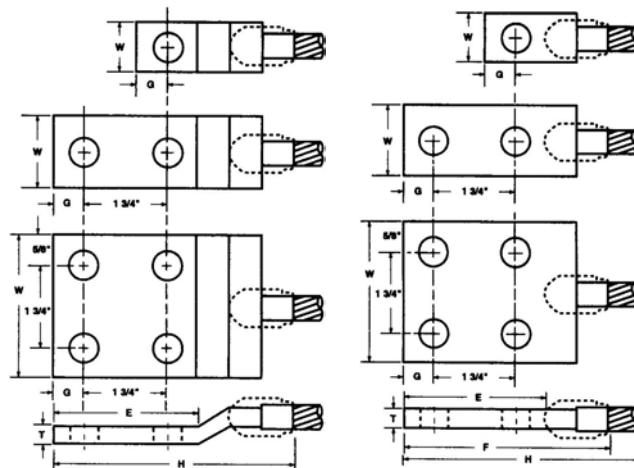
Platinas unidas prefabricadas:

Son hechas bajo especificaciones.



Platinas para platinas de empalme tipo LA:

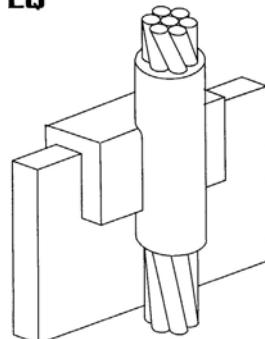
Las platinas NEMA para empalmes tipo LA son hechas por una barra de cobre electrolítico.



Cable a barraje:

A través de un conductor vertical en la parte superior del barraje horizontal con fase en el plano vertical.

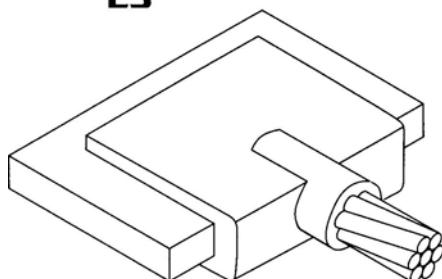
LQ



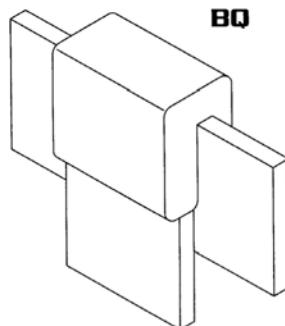
Cable a barraje:

Ducto de cable horizontal al barraje plano.

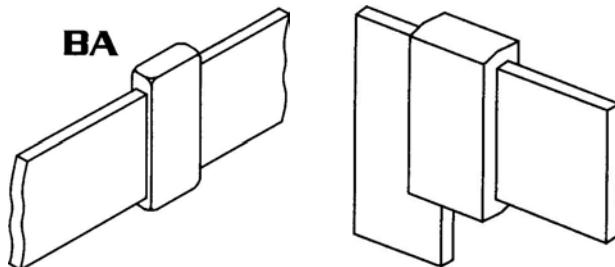
LJ



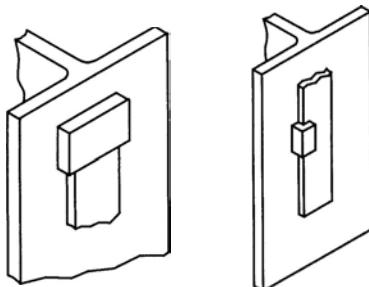
Barraje:



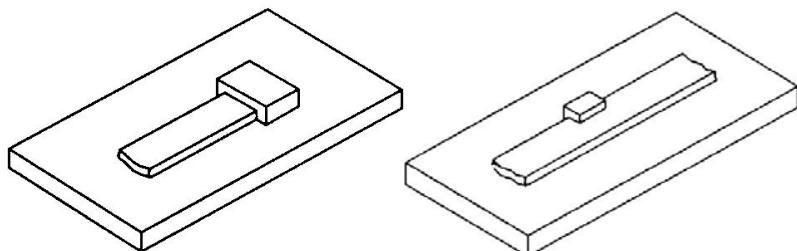
Empalme de barraje:



Barraje a superficie de acero:

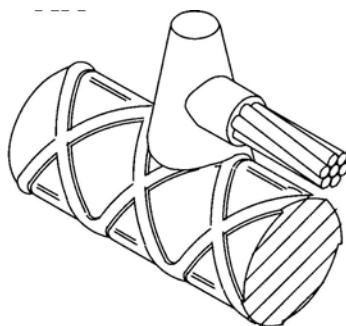


Barraje a superficie de acero:



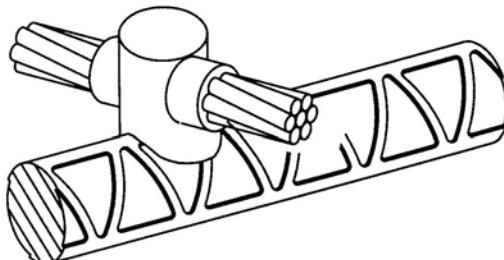
Cable a barra gruesa:

Ducto de cable horizontal a una barra gruesa horizontal.



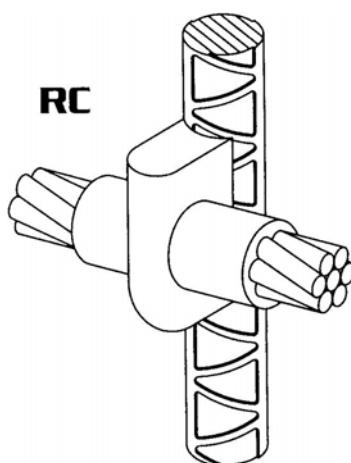
Cable a barra gruesa:

Empalme de cable horizontal en X a una barra gruesa horizontal.



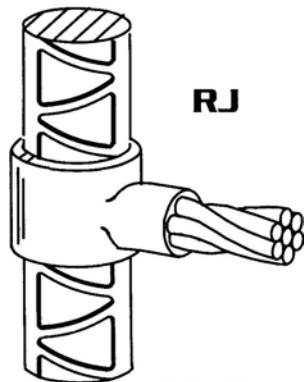
Cable a barra gruesa:

Cable a través de una conexión horizontal a una barra gruesa vertical.

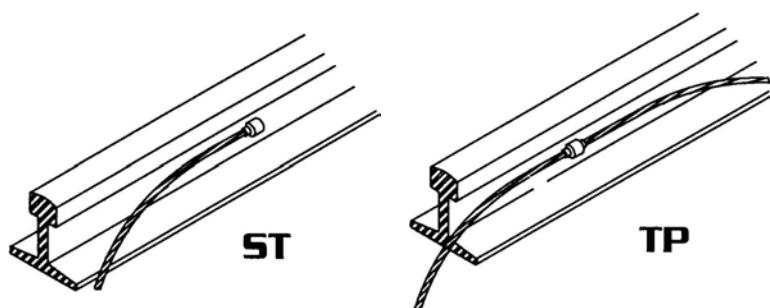


Cable a barra gruesa:

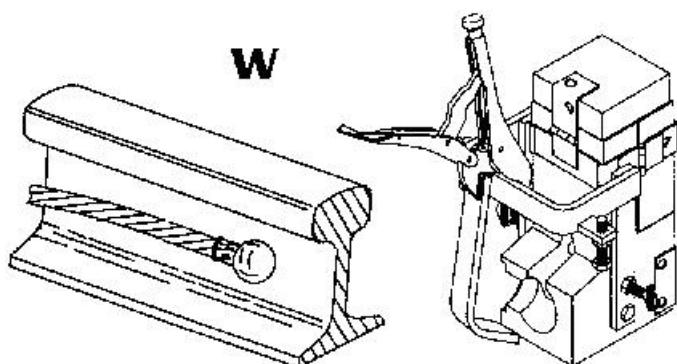
Empalme en T horizontal de un ducto de cable a una barra gruesa horizontal.



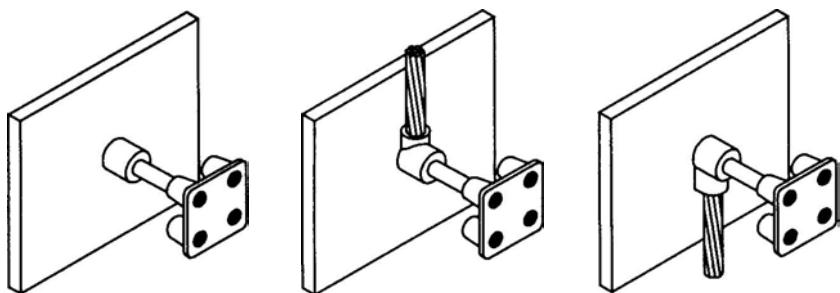
Cable a soporte:



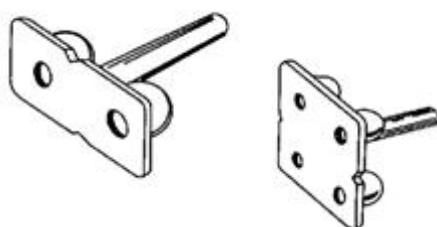
Cable a estructuras de soporte:



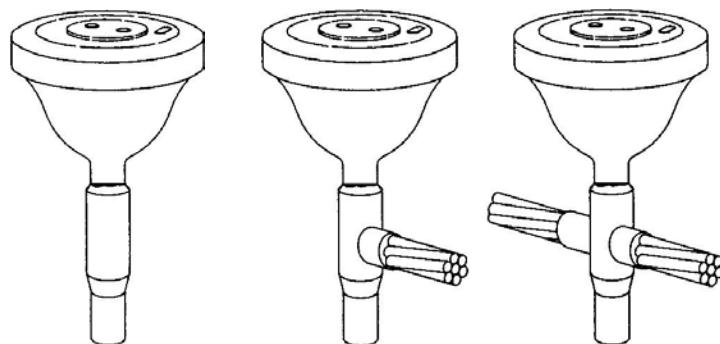
Empalme de platinas de tierra con estructuras:



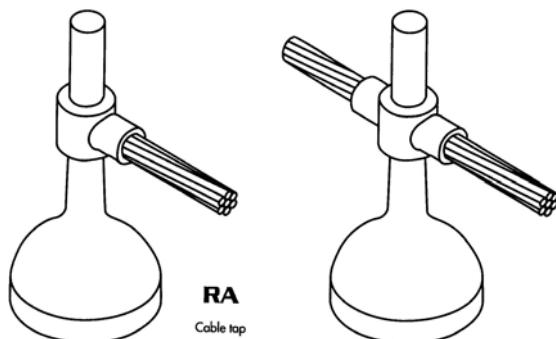
Platinas de tierra Cadweld:



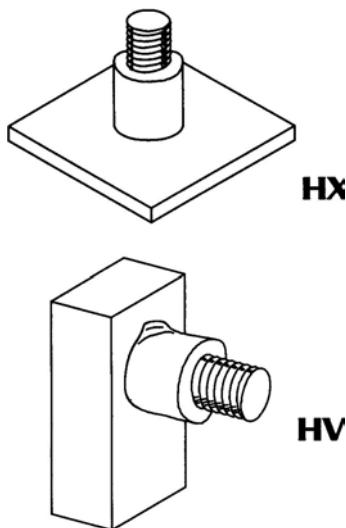
Receptores de tierra:



Tipos RA y RB para tierra aérea:



Arandelas de cobre y acero:



CAPÍTULO 7

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LOS DISTINTOS CASOS DE DISEÑO DE MALLAS DE PUESTAS A TIERRA PARA UNA SUBESTACIÓN CON LA HERRAMIENTA MATLAB 6.1

El siguiente es el código del programa elaborado por el estudiante Julián Felipe Zapata, hoy ingeniero electricista.

```

clc;

%CASO 1:malla cuadrada sin varillas%

prompt = {'Duracion de la falla y Duracion del choque Electrico tf=tc [Seg.]:','Resistividad de la
roca triturada [Ohm]:','Espesor de la Capa de Roca Triturada [m]:','Profundidad de Enterramiento
de la Malla [m]:','Temperatura Ambiente [•c]:','Impedancia Equivalente Aproximada de Cable de
Guarda (Zeq):'};

title = 'Datos de Campo';
lines= 1;
def = {'0.5','2000','0.102','0.5','40','1.09+i*0.208'};
%valores predeterminados
answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

tf=str2num(answer{1,1});
Rhos=str2num(answer{2,1});
hs=str2num(answer{3,1});
h=str2num(answer{4,1});
ta=str2num(answer{5,1});
Zeq=str2num(answer{6,1});

prompt = {'Longitud en X (Lx) [m]:' ,'Longitud en Y (Ly) [m]:' , 'Resistividad del Terreno
[Ohm.m]:' , '[D]:' };
title = 'Datos de Campo';
lines= 1;
def = {'70','70','377','7'}; %valores predeterminados

```

```

answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

Lx=str2num(answer{1,1});
Ly=str2num(answer{2,1});
Rho=str2num(answer{3,1});
D=str2num(answer{4,1});

A=Lx*Ly;

%%%%%%%%%%%%% paso 2 %%%%%%%%%%%%%%
prompt = {'Valor de Corriente Simetrica de Falla a Tierra en alta(3lo) [A]:' , 'Relacion de las Componentes de la Impedancia Subtransitoria de falla (X/R)en alta:' , 'Valor de Corriente Simetrica de Falla a Tierra en Baja(3lo) [A]:' , 'Relacion de las Componentes de la Impedancia Subtransitoria de falla (X/R)en Baja:'};
title = 'Tamaño del Conductor de la Malla';
lines= 1;
def = {'5174.5','3.465','10740.2','16.87'}; %valores predeterminados
answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

tresloalta=str2num(answer{1,1});

xralta=str2num(answer{2,1});

treslobaja=str2num(answer{3,1});

xbaja=str2num(answer{4,1});

prompt = {'Capacidad Termica por unidad de Volumen [J/(cm3.°C)]:' , 'Resistividad del Conductor a la Temperatura de Referencia:' , 'Ko:' , 'Maxima Temperatura Disponible o temperatura de Fusion del Conductor [°C]:' , 'Kf:' , 'Coeficiente Termico de Resistividad a la temperatura de Referencia [1/°C]:'};
title = 'Datos Extraidos de la Tabla 3';
lines= 1;
def = {'3.42' , '1.78' , '242' , '1084' , '7.06' , '0.00381'}; %valores predeterminados
answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);

TCAP=str2num(answer{1,1});
Rhor=str2num(answer{2,1});
Ko=str2num(answer{3,1});
Tm=str2num(answer{4,1});
Kf=str2num(answer{5,1});

```

```

alfar=str2num(answer{6,1});
tc=tf;
ts=tc;

Ta=xrbaja*(1/(2*pi*60));
DF=sqrt(1+(Ta/tf(1-exp(-2*tf/Ta)))); 
lf=DF*treslobaja;

p=TCAP/(tc*alfar*Rhor);
y=log((Ko+Tm)/(Ko+ta));
Amcm=lf*(197.4/(sqrt(p*y)));
Amcmaprox=lf*Kf*sqrt(tc);

%%%%%%%%%%%%% paso 3 %%%%%%%%
Cs=1-((0.09*(1-(Rho/Rhos)))/((2*hs)+0.09));
Ep50=(1000+(6*Cs*Rhos))*(0.116/sqrt(ts));
Et=(1000+(1.5*Cs*Rhos))*(0.116/sqrt(ts));

%%%%%%%%%%%%% paso 4 %%%%%%%%
N=(Lx/D)+1;
Lr=0;
M=(Ly/D)+1;
LT=N*Lx+M*Ly;
Lc=LT;
Lm=Lc+Lr;
Lp=4*Lx;

%%%%%%%%%%%%% paso 5 %%%%%%%%
Rg=Rho*(1/LT+((1/sqrt(20*A))*((1+(1/(1+h*sqrt(20/A)))))));

%%%%%%%%%%%%% paso 6 %%%%%%%%
Taalta= xralta*(1/(2*pi*60));
DF6=sqrt(1+(Taalta/tf(1-exp((-2*tf)/Taalta)))); 
Sf=abs(Zeq/(Rg+Zeq));
IG=tresloalta*DF6*Sf;

```

```
%%%%%%%% paso 7 %%%%%%
```

```
GPR=IG*Rg;
```

```
%%%%%%%% paso 8 %%%%%%
```

```
na=(2*Lc)/Lp;
nb=sqrt(Lp/(4*sqrt(A)));
nc=((Lx*Ly)/A)^(0.7*A/Lx*Ly);
nd=1;
n=na*nb*nc*nd;
Kii=1/(2*n)^(2/n);
ho=1;
dc=0.01;
Kh=sqrt(1+(h/ho));
PP=(Kii/Kh)*(log(8/(pi*((2*n)-1))));
PO=log((D^2/(16*h*dc))+(((D+2*h)^2)/(8*D*dc))-(h/(4*dc)));
Km=(1/(2*pi))*(PO+PP);
Ki=0.644+(0.148*n);
Em=(Rho*IG*Km*Ki)/Lm
Ls=(0.75*Lc)+(0.85*Lr);
Ks=(1/pi)*((1/(2*h))+(1/(D+h))+((1/D)*(1-(0.5^(n-2)))));
Ep=(Rho*IG*Ks*Ki)/Ls;
```

```
%%%%%%%% Paso 10 %%%%%%
```

```
if Em>Et
```

```
prompt = {'Longitud en X (Lx) [m]:' , 'Longitud en Y (Ly) [m]:'};
title = 'Datos de Campo';
lines= 1;
def = {'84','63'}; %valores predeterminados
answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);
Lx2=str2num(answer{1,1});
Ly2=str2num(answer{2,1});
A2=Lx2*Ly2;
N2=(Lx2/D)+1;
Lr=0;
M2=(Ly2/D)+1;
LT2=N2*Lx2+M2*Ly2;
Lc2=LT2;
Lm2=Lc2+Lr;
Lp2=(2*Lx2)+(2*Ly2);
```

%%%%%%%%% Paso 5 %%%%%%%%

Rg2=Rho*(1/LT2+((1/sqrt(20*A2))*((1+(1/(1+(h*sqrt(20/A2)))))));

%%%%%%%%% Paso 6 %%%%%%%%

Sf2=abs(Zeq/(Rg2+Zeq));
IG2=tresloalta*DF6*Sf2;

%%%%%%%%% paso 7 %%%%%%%%

GPR2=IG2*Rg2;

%%%%%%%%% paso 8 %%%%%%%%

na2=(2*Lc2)/Lp2;
nb2=sqrt(Lp2/(4*sqrt(A2)));
nc2=((Lx2*Ly2)/A2)^((0.7*A2)/Lx2*Ly2);
nd=1;
n2=na2*nb2*nc2*nd;
Kii2=1/(2*n2)^(2/n2);
PP2=(Kii2/Kh)*(log(8/(pi*((2*n2)-1))));
Km2=(1/(2*pi))*(P0+PP2);
Ki2=0.644+(0.148*n2);
Em2=(Rho*IG2*Km2*Ki2)/Lm2
Ls2=(0.75*Lc2)+(0.85*Lr);
Ks2=(1/pi)*((1/(2*h))+(1/(D+h))+((1/D)*(1-(0.5^(n2-2)))));
Ep2=(Rho*IG2*Ks2*Ki2)/Ls2;

if Em2>Et

%%%%%%%%% Caso 3: Malla Cuadrada con Varilla de Tierra
%%%%%%%%

```

prompt = {'Longitud de las Varillas [m]:' , 'Numero de Varillas:'};
title = 'Datos de las Varillas de Tierra';
lines= 1;
def = {'7.5','20'}; %valores predeterminados
answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);
lr=str2num(answer{1,1});
nr=str2num(answer{2,1});
Lr3=nr*lr;
LT3=(N*Lx)+(M*Ly)+Lr3;
Lm3=Lc+((1.55+(1.22*(lr/(sqrt(Lx^2+Ly^2)))))*Lr3);

```

```
%%%%% Paso 5 %%%%%%
Rg3=Rho*(1/LT3+((1/sqrt(20*A))*(1+(1/(1+(h*sqrt(20/A)))))));
%%%%% Paso 6 %%%%%%
Sf3=abs(Zeq/(Rg3+Zeq));
IG3=tresloalta*DF6*Sf3;
%%%%% paso 7 %%%%%%
GPR3=IG3*Rg3;
%%%%% paso 8 %%%%%%
na3=(2*Lc)/Lp;
nb3=sqrt(Lp/(4*sqrt(A)));
nd=1;
n3=na3*nb3*nc*nd;
Kii3=1; %% Para Mallas Con Varillas Perimetrales %%
PP3=(Kii3/Kh)*(log(8/(pi*((2*n3)-1)))); 
Km3=(1/(2*pi))*(P0+PP3);
Ki3=0.644+(0.148*n3);
Em3=(Rho*IG3*Km3*Ki3)/Lm3
Ls3=(0.75*Lc)+(0.85*Lr3);
Ks3=(1/pi)*((1/(2*h))+(1/(D+h))+((1/D)*(1-(0.5^(n3-2)))));
Ep3=(Rho*IG3*Ks3*Ki3)/Ls3;
if Em3>Et
```

%%%%% CASO 4: MALLA RECTANGULAR CON VARILLAS DE TIERRA %%%%

```
%%%%% Paso 4 %%%%%%
prompt = {'Longitud de las Varillas [m]:' , 'Numero de Varillas:'};
title = 'Datos de las Varillas de Tierra';
lines= 1;
def = {'10','38'}; %valores predeterminados
answer = inputdlg(prompt,title,lines,def);
lr4=str2num(answer{1,1});
nr4=str2num(answer{2,1});
Lr4=nr4*lr4;
```

```

LT4=N2*Lx2+M2*Ly2+Lr4;
Lm4=Lc2+((1.55+(1.22*(lr4/(sqrt(Lx2^2+Ly2^2)))))*Lr4);

%%%%%%%%%%%%% Paso 5 %%%%%%%%%%%%%%
Rg4=Rho*(1/LT4+((1/sqrt(20*A2))*((1+(1/(1+(h*sqrt(20/A2))))))));

%%%%%%%%%%%%% Paso 6 %%%%%%%%%%%%%%
Sf4=abs(Zeq/(Rg4+Zeq));
IG4=tresloalta*DF6*Sf4;

%%%%%%%%%%%%% paso 7 %%%%%%%%%%%%%%
GPR4=IG4*Rg4;

%%%%%%%%%%%%% paso 8 %%%%%%%%%%%%%%
Kii4=1; %% Para Mallas Con Varillas Perimetrales %%%%%%
PP4=(Kii4/Kh)*(log(8/(pi*((2*n2)-1)))); 
Km4=(1/(2*pi))*(PO+PP4);
Em4=(Rho*IG4*Km4*Ki2)/Lm4
Ls4=(0.75*Lc2)+(0.85*Lr4);
Ks4=(1/pi)*((1/(2*h))+(1/(D+h))+((1/D)*(1-(0.5^(n2-2)))));
Ep4=(Rho*IG4*Ks4*Ki2)/Ls4;
end
end
end

```


CAPÍTULO 8

EJERCICIOS ADICIONALES

8.1 Mallas de puesta a tierra de un tren de laminación

8.1.1 - Cálculo de la resistividad del suelo

Para definir la resistividad del terreno se utilizó un criterio probabilístico, que se desarrolla en la Tabla de Cálculo 10, cuyo método se basa en que los logaritmos naturales de los valores de la resistividad del suelo en un sitio particular, siguen una función de distribución normal.

Tabla 10. Cálculo de resistividad

$R(\Omega)$	$\rho(\Omega.m)$	$X = \ln \rho$	X^2	$Z = \frac{(X - \bar{X})}{S}$	$F(Z)$	$P = F(Z)*100$
37	387.79	5.96	35.53	1.36	0.91	91.31
32.3	338.53	5.82	33.93	1.20	0.88	88.49
30.2	316.52	5.76	33.15	1.13	0.87	87.06
29.2	306.04	5.72	32.76	1.09	0.86	86.21
29.3	307.09	5.73	32.80	1.09	0.86	86.21
28.9	302.90	5.71	32.64	1.08	0.86	85.99
28	293.46	5.68	32.28	1.04	0.85	85.06
28.1	294.51	5.69	32.32	1.04	0.85	85.06
27.7	290.32	5.67	32.16	1.03	0.85	84.86
26.9	281.94	5.64	31.83	0.99	0.84	83.89
26.6	278.79	5.63	31.70	0.98	0.84	83.65
26.3	275.65	5.62	31.57	0.97	0.83	83.4
25.9	271.45	5.60	31.40	0.95	0.83	82.89
23.5	246.30	5.51	30.32	0.84	0.83	82.64

25.6	268.31	5.59	31.27	0.94	0.83	82.64
25.7	269.36	5.60	31.32	0.94	0.83	82.64
25.3	265.17	5.58	31.14	0.92	0.82	82.12
24.9	260.97	5.56	30.96	0.91	0.82	81.86
24.9	260.97	5.56	30.96	0.91	0.82	81.86
22.4	234.77	5.46	29.80	0.78	0.78	78.23
21.7	227.44	5.43	29.45	0.75	0.77	77.34
16.45	172.41	5.15	26.52	0.43	0.67	66.64
15.32	160.57	5.08	25.79	0.35	0.64	63.62
14.32	150.09	5.01	25.11	0.27	0.61	60.64
14	146.73	4.99	24.89	0.24	0.59	59.48
13.95	146.21	4.99	24.85	0.24	0.59	59.48
13.8	144.64	4.97	24.74	0.23	0.59	59.1
13.5	141.49	4.95	24.52	0.20	0.58	57.93
13	136.25	4.91	24.15	0.16	0.56	56.36
12.97	135.94	4.91	24.13	0.16	0.56	56.36
12.35	129.44	4.86	23.65	0.10	0.54	53.98
12.03	126.08	4.84	23.40	0.07	0.53	52.79
11.93	125.04	4.83	23.32	0.06	0.52	52.39
$R(\Omega)$	$\rho(\Omega.m)$	$X = \ln \rho$	X^2	$Z = \frac{(X - \bar{X})}{S}$	$F(Z)$	$P = F(Z) * 100$
9.83	103.03	4.63	21.48	-0.16	0.44	43.64
9.65	101.14	4.62	21.31	-0.18	0.43	42.86
9.61	100.72	4.61	21.27	-0.19	0.42	42.47
9.08	95.17	4.56	20.75	-0.25	0.40	40.13
9.1	95.38	4.56	20.77	-0.25	0.40	40.13
8.85	92.76	4.53	20.52	-0.28	0.39	38.97
8.5	89.09	4.49	20.16	-0.33	0.37	37.07
8.16	85.52	4.45	19.79	-0.38	0.35	35.2
4.4	46.12	3.83	14.68	-1.09	0.31	30.79
6.3	66.03	4.19	17.56	-0.67	0.25	25.14
5	52.40	3.96	15.67	-0.94	0.17	17.36
4.51	47.27	3.86	14.87	-1.06	0.14	14.46

3.53	37.00	3.61	13.04	-1.34	0.09	9.01
3.5	36.68	3.60	12.98	-1.35	0.09	8.85
3.36	35.22	3.56	12.68	-1.40	0.08	8.08
3.3	34.59	3.54	12.56	-1.42	0.08	7.78
2.82	29.56	3.39	11.47	-1.60	0.05	5.48
2.82	29.56	3.39	11.47	-1.60	0.05	5.48
2.62	27.46	3.31	10.97	-1.68	0.05	4.65
2.54	26.62	3.28	10.77	-1.72	0.04	4.27
2.41	25.26	3.23	10.43	-1.78	0.04	3.75
2.3	24.11	3.18	10.13	-1.83	0.03	3.36
2.01	21.07	3.05	9.29	-1.99	0.02	2.33

Las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de este criterio son:

$$Z = \frac{(X - \bar{X})}{S} \quad (52)$$

siendo \bar{X} el valor promedio de la resistividad y S el valor estándar.

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{n} = \frac{267.45}{56} = 4.78 \quad (53)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X^2) - \frac{(\sum X)^2}{n}}{n-1}} = \sqrt{\frac{1319 - \frac{267.45^2}{56}}{56-1}} = 0.87 \quad (54)$$

$F(Z)$ es hallado en la tabla de distribución normal acumulada.

La validez de la relación ρ permite predecir la probabilidad de encontrar suelo con una ρ igual que un valor dado, y se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = F\left[\frac{\ln Ro - \bar{X}}{S}\right] \quad o \quad \rho = F(Z); \quad (55)$$

Para cada valor de Ro se puede encontrar un porcentaje de probabilidad $P=F(Z)*100$, esto quiere decir que existe una probabilidad P de encontrar una resistividad de $Ro \Omega.m$ o menos.

Utilizando un valor de probabilidad, por lo menos del 70% se define un valor muy representativo de la resistividad del terreno, hallando en las tablas de distribución normal acumulada un valor de Z para el 70% y con el promedio \bar{X} y el valor estándar S se encuentra el valor de ρ , a partir de:

$$\rho = \ln^{-1}(S * Z + \bar{X}) \quad (56)$$

En nuestro estudio con una probabilidad del 70%, encontramos $Z=0.53$ y desarrollando la ecuación anterior hallamos $\rho=188.5 \Omega.m$.

El cálculo anterior se complementó determinando los límites para un nivel de confiabilidad del 90% mediante la función:

$$F\left[Z - a\sqrt{\frac{2+Za}{2n}}\right] \leq P \leq F\left[Z + a\sqrt{\frac{2+Za}{2n}}\right] \quad (57)$$

a = Coeficiente para un nivel específico de confianza

$a= 1.65$ para 90%

Los valores de la función se obtienen también de la tabla de distribución normal acumulada.

Para el estudio de resistividad que se realizó, se hallaron los siguientes valores:

$$F(0.3) \leq P \leq F(0.77) \quad (58)$$

$$61.8\% \leq P \leq 77.94\%$$

$$\rho_{\min} = \ln^{-1}(S * Z_{\min} + \bar{X}) = \ln^{-1}(0.87 * 0.3 + 4.78) = 155 \Omega.m$$

$$\rho_{\max} = \ln^{-1}(S * Z_{\max} + \bar{X}) = \ln^{-1}(0.87 * 0.77 + 4.78) = 233 \Omega.m$$

Para el cálculo de la malla a tierra se debe tomar la resistividad máxima =

8.2 Cálculo de malla de puesta a tierra para subestación transformadora

Se recomiendan dos diseños de mallas factibles para esta subestación.

Constantes:

Resistividad del terreno de diseño:	$\rho = 233 \Omega.m$
Resistividad del concreto:	$\rho_s = 3000 \Omega.m$
Corriente de falla monofásica a tierra en el secundario:	$I = 30.141 kA$
Corriente de falla monofásica a tierra en el primario:	$I_o = 3719 A$
Tiempo de despeje de la falla:	$t_c = 0.5 s$
Espesor de concreto:	$h_s = 0.15 m$
Profundidad de enterramiento de la malla:	$h = 0.5 m$
Material del conductor:	Cu 97.5% de conductividad
Temperatura máxima de uniones:	$T_m = 1083^{\circ}C$
Constante para temperatura de fusión	$K_f = 7.06$
Relación X/R	$\frac{X}{R} = 10$

Tamaño de los conductores de la malla:

La corriente asimétrica de falla en la barra de 13.2kV es:

$$I_f = D_f * I$$

D_f = Factor de decremento

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

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi f R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{120\pi} = 0.0265$$

$$D_f = 1.0262$$

$$I_f = 1.0262 * 30141kA = 30.930kA$$

$$A = I_f * K_f * \sqrt{t_c}$$

$$A = 30.93kA * 7.06 * \sqrt{0.5s} = 154.4MCM$$

El conductor más cercano a éste, es el N° 3/0 AWG que tiene un área de 167.8 MCM. Éste será el calibre que se debe utilizar, ya que cumple con la corriente asimétrica de falla y con los requerimientos de esfuerzo mecánico

Tensiones de paso y contacto máximos tolerables:

El factor de reducción de la resistividad de la capa superficial de concreto es:

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

$$C_s = 0.79$$

Asumiendo que el peso mínimo de las personas que ingresan es de 50 kg:

La tensión tolerable de paso V_p es:

$$V_{p_{tolerable}} = \frac{(1000 + 6 * C_s * \rho_s) * 0.116}{\sqrt{\pi c}}$$

La tensión tolerable de contacto V_c es:

$$V_{p_{tolerable}} = 2488 .42 V$$

$$V_{c_{tolerable}} = \frac{(1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * 0.116}{\sqrt{\pi c}}$$

$$V_{c_{tolerable}} = 745.14V$$

Diseño de mallas propuestos:

Se desarrollaron 3 diseños de mallas factibles para esta subestación.

Diseño 1

Las características que se proponen son las siguientes:

Área de la malla de puesta a tierra	$A = 8073m^2$
Largo de la malla	$L_1 = 117m$
Ancho de la malla	$L_2 = 69m$
Número de conductores a lo largo	$M_1 = 24$
Número de conductores a lo ancho	$M_2 = 40$
Espaciamiento entre los conductores	$D = 3m$
Número de electrodos tipo varilla	$N = 88$
Longitud de un electrodo tipo varilla	$L_v = 2.4m$

Evaluación según FEM comparada con el Estándar IEEE 80

- **Longitud de conductor horizontal**

$$\begin{aligned} L_c &= M_1 * L_1 + M_2 * L_2 \\ L_c &= 24 * 117m + 40 * 69m \\ L_c &= 5568m \end{aligned}$$

- **Longitud total del conductor**

$$\begin{aligned} L_T &= L_c + N * L_v \\ L_T &= 5568m + 88 * 2.4m \\ L_T &= 5779m \end{aligned}$$

- **Resistencia de puesta a tierra**

$$R_g = \rho * \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20 / A}} \right) \right] = 1.19\Omega$$

$$R_g = 1.19\Omega < R_g \text{ max} = 10\Omega$$

Esta resistencia de puesta a tierra es menor que el valor máximo permitido para subestaciones de media tensión según el RETIE.

- Máximo potencial de tierra (GPR)

$$GPR = I_G * Rg$$

$$I_G = 1.9 * Io$$

$$I_G = 1.9 * 3719A$$

$$I_G = 7066.1A$$

$$GPR = 7066.1A * 1.19V$$

$$GPR = 8408.66V$$

Ya que $GPR > Vc_{tolerable}$, se deben calcular las tensiones de malla y de paso en caso de falla.

- Tensión de malla en caso de falla

$$V_{malla} = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_c + \left[1,55 + 1,22 * \left(\frac{L_v}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}} \right) \right] * N * L_v} [V]$$

- K_m es el factor geométrico y se calcula así:

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

- $K_{ii} = 1$ para mallas con electrodos tipo varilla a lo largo del perímetro, en las esquinas o dentro de la malla.

- K_h es el factor de corrección por la profundidad de enterramiento de la malla.

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

$$K_i = 0,644 + 0,148 * n$$

- K_i es el factor de corrección por geometría de la malla.

- n es el factor de geometría de la malla.

$$n = n_a * n_b * n_c$$

$$n_a = \frac{2 * L_c}{L_p} \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}} \quad n_c = \left(\frac{L_1 * L_2}{A} \right)^{0,7 * A}$$

Para mallas rectangulares como esta,

$$L_p = (L_1 + L_2) * 2$$

El voltaje de malla para el diseño propuesto es de:

$$V_{malla} = 739.07V$$

$$V_{malla} < Vc_{tolerable}$$

- Tensión de paso en caso de falla

$$V_{paso} = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{0,75 * L_c + 0,85 * N * L_v} [V]$$

K_s es el factor de espaciamiento para tensión de paso.

$$K_s = \frac{1}{\pi} * \left[\frac{1}{2 * h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} * (1 - 0,5^{n-2}) \right]$$

$$V_{paso} = 1003,54V$$

$$V_{paso} < V_{p_{tolerable}}$$

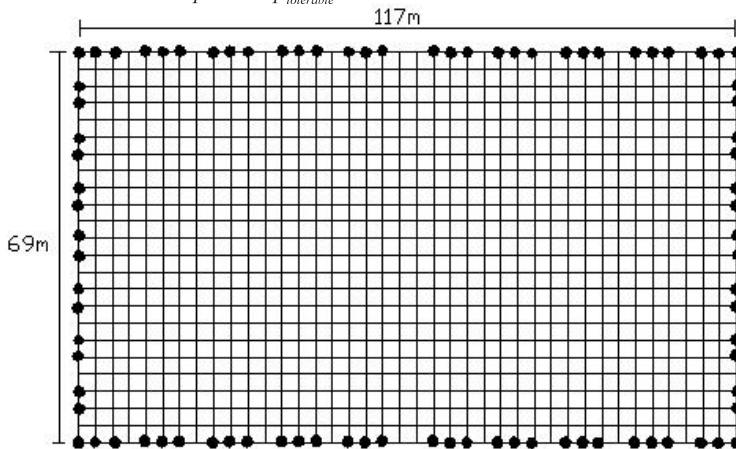


Figura 18. Malla de puesta a tierra de subestación de transformadores. Diseño 1

La característica del potencial eléctrico calculado por el método de los elementos finitos se muestra en la Figura 19

Característica del potencial de la malla

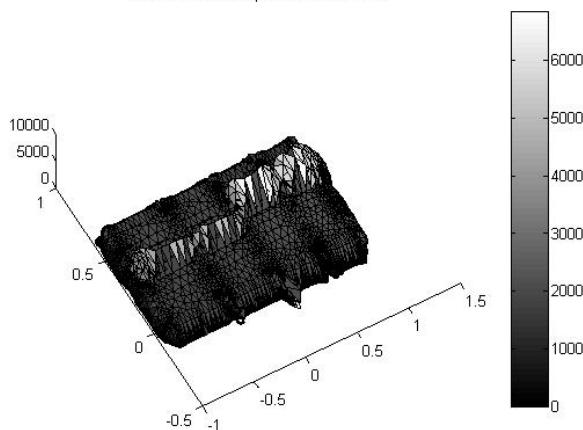


Figura 19. Diseño 1, característica del potencial

La distribución de los electrodos en el perímetro de la malla dibujan un potencial plano y uniforme en tal perímetro, el centro se ve disminuido.

Diseño 2

Si se considera un espesor del concreto diferente, el voltaje de paso y de contacto tolerable aumenta. Debido a esto, el área de la malla disminuye un poco y también el número de electrodos que deben ser utilizados.

Los cálculos realizados son iguales a los utilizados para desarrollar el diseño 1. Por esta razón, sólo se muestran los resultados obtenidos.

Espesor de concreto: $h_s = 0.25m$

$$V_{p_{tolerable}} = 2701.47V$$

$$V_{C_{tolerable}} = 798.40V$$

Características propuestas:

Área de la malla de puesta a tierra	$A = 7722m^2$
Largo de la malla	$L_1 = 117m$
Ancho de la malla	$L_2 = 66m$
Número de conductores a lo largo	$M_1 = 23$
Número de conductores a lo ancho	$M_2 = 40$
Espaciamiento entre los conductores	$D = 3m$
Número de electrodos tipo varilla	$N = 18$
Longitud de un electrodo tipo varilla	$L_v = 2.4m$

Evaluación según IEEE 80, y el MEF.

- **Longitud de conductor horizontal**

$$L_c = 5331m$$

- **Longitud total del conductor**

$$L_T = 5374.2m$$

- **Resistencia de puesta a tierra**

$$R_g = 1.21\Omega < R_g \text{ max} = 10\Omega$$

Esta resistencia de puesta a tierra es menor que el valor máximo permitido para subestaciones de media tensión según el RETIE.

- **Máximo potencia de tierra (GPR)**

$$GPR = 8408.66V$$

Ya que $GPR > V_{C_{tolerable}}$, se deben calcular las tensiones de malla y de paso en caso de falla.

- **Tensión de malla en caso de falla**

$$V_{malla} = 796.92V$$

$$V_{malla} < V_{C_{tolerable}}$$

- **Tensión de paso en caso de falla**

<

$$V_{paso} = 1060.55V$$

$$V_{paso} < V_{p_{tolerable}}$$

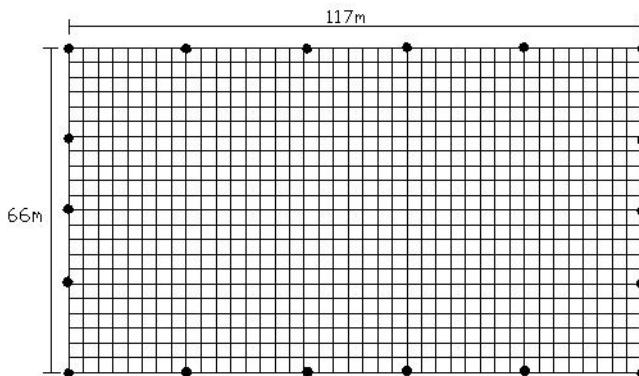


Figura 20. Malla de puesta a tierra de subestación de transformadores. Diseño 2

Diseño 2: característica de la distribución del potencial eléctrico

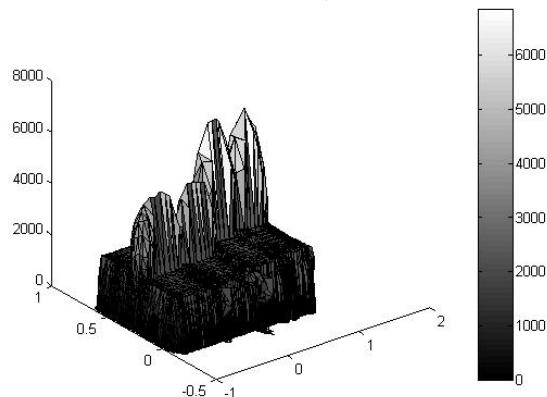


Figura 21: Distribución del potencial eléctrico en la malla del diseño 2.

Al disminuir la cantidad de electrodos en el perímetro aumentó la superficie del potencial eléctrico como bien se observa en la figura 21.

Diseño 3

Si se realiza tratamiento al terreno con suelo artificial, la resistividad del terreno disminuirá más de un 90%, tal como se puede observar en la Figura 19. Lo anterior significa que la resistividad del terreno donde se construirá el tren 2 de laminación será aproximadamente igual a $20\Omega \cdot m$, utilizando este valor se llega a la siguiente malla de puesta a tierra.

Tensiones de paso y contacto máximos tolerables:

$$V_{p_{tolerable}} = 2440.04V$$

$$V_{c_{tolerable}} = 733.05V$$

Características propuestas:

Área de la malla de puesta a tierra	$A = 162m^2$
Largo de la malla	$L_1 = 18m$
Ancho de la malla	$L_2 = 9m$
Número de conductores a lo largo	$M_1 = 4$
Número de conductores a lo ancho	$M_2 = 7$
Espaciamiento entre los conductores	$D = 3m$
Número de electrodos tipo varilla	$N = 18$
Longitud de un electrodo tipo varilla	$L_v = 2.4m$

Evaluación IEEE 80 y MEF.

- Longitud de conductor horizontal

$$L_c = 135m$$

- Longitud total del conductor

$$L_T = 178.20m$$

- Resistencia de puesta a tierra

$$R_g = 0.76\Omega < R_g \text{ max} = 10\Omega$$

Esta resistencia de puesta a tierra es menor que el valor máximo permitido para subestaciones de media tensión según el RETIE.

- Máximo potencia de tierra (GPR)

$$GPR = 35825.13V$$

Ya que $GPR > V_{C_{tolerable}}$, se deben calcular las tensiones de malla y de paso en caso de falla.

- Tensión de malla en caso de falla

$$V_{malla} = 728.77V$$

$$V_{malla} < V_{C_{tolerable}}$$

- Tensión de paso en caso de falla

$$V_{paso} = 725.04V$$

$$V_{paso} < V_{P_{tolerable}}$$

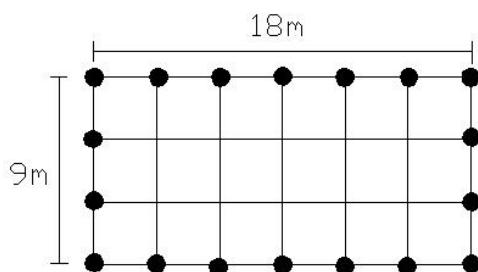


Figura 22. Diseño 3

Diseño 3: Distribución del potencial

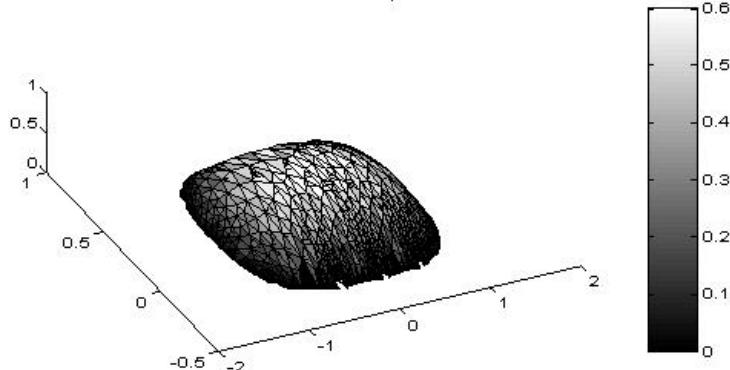


Figura 23. Característica del potencial eléctrico en el diseño 3, evaluación por MEF.

Las mallas de puesta a tierra que se proponen, cumplen con la metodología y requerimientos planteados por el Estándar IEEE 80 del año 2000, garantizando de esta manera la seguridad de las personas y la protección de las instalaciones.

Se debe tener en cuenta que un diseño con una longitud del electrodo de puesta a tierra de 1.8m no es permitido, debido a que la longitud mínima admitida, según la NTC 4552, NTC 2050 y el RETIE es de 2.4m.

Malla para variadores de velocidad

Constantes:

Resistividad del terreno de diseño:	$\rho = 233\Omega.m$
Corriente de falla monofásica a tierra en el secundario	$I = 30.141kA$
Corriente de falla monofásica a tierra en el primario	$I_o = 3719A$
Tiempo de despeje de la falla:	$t_c = 0.5s$
Profundidad de enterramiento de la malla:	$h = 0.5m$
Material para conductor:	Cu 97.5% de conductividad
Temperatura máxima de uniones:	$T_m = 1083^{\circ}C$
Constante para temperatura de fusión	$K_f = 7.06$

Tamaño de los conductores de la malla:

La máxima corriente asimétrica de falla en 460V es:

$$I_f = D_f * I$$

D_f = Factor de decremento

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

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{2\pi f R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{120\pi} = 0.0265$$

$$D_f = 1.0262$$

$$I_f = 1.0262 * 30.141kA = 30.930kA$$

$$A = I_f * K_f * \sqrt{t_c}$$

$$A = 30.93kA * 7.06 * \sqrt{0.5s} = 154.4MCM$$

El conductor más cercano a este es el N° 3/0 AWG el cual tiene un área de 167.8 MCM. Este será el calibre que se debe utilizar, ya que cumple con la corriente asimétrica de falla.

Para el tren de laminación se desarrollan varios diseños de malla de puesta a tierra para los VSD, utilizando dos herramientas diferentes. A continuación se presenta el desarrollo y análisis de cada uno de ellos de manera detallada.

8.3 Diseños utilizando una malla de estructura como referencia de señal (SRS)

Una estructura como referencia de señal, puede ser empleada como medio básico para alcanzar una referencia de alta frecuencia de la tierra, para todo el equipo dentro de un área contigua. Uno de los métodos para construir un SRS, es formando una malla de conductores de cobre, ubicada debajo

de los convertidores de velocidad, para los cuales se diseña la malla, si éstos no se encuentran situados en áreas fuera de cuartos de equipos.

En la construcción de un SRS, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Cada retícula de la malla debe ser soldada a intervalos no inferiores a 30cm, ni superiores a 60cm, para crear una malla de referencia continua.
- Los conductores pueden ser de cobre, aluminio o acero.
- Deberá existir un buen contacto eléctrico entre los conductores con el armario donde estarán los convertidores y con la malla. Se recomienda utilizar soldadura exotérmica.
- Cada armario deberá tener dos conexiones o empalmes, en esquinas opuestas del encerramiento.
- El menor calibre para conductores de puesta a tierra que se puede utilizar es el calibre No. 6 AWG
- Los calibres de conductores típicos que hacen parte de este tipo de mallas están entre No. 6 AWG y No. 2 AWG
- La resistencia más común, que se debe encontrar es de $500\text{m}\Omega$.

Las Figuras. 23 y 24 son tomadas del Estándar IEEE 1100 e ilustran uno de los métodos que se puede utilizar para crear una malla de referencia de señal.

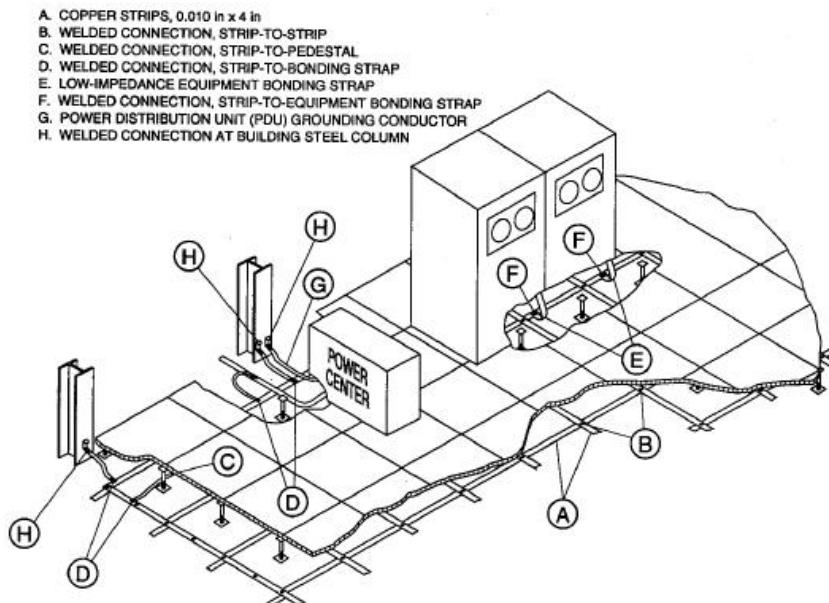


Figura 23. Conexión a la malla de señal de referencia [35]

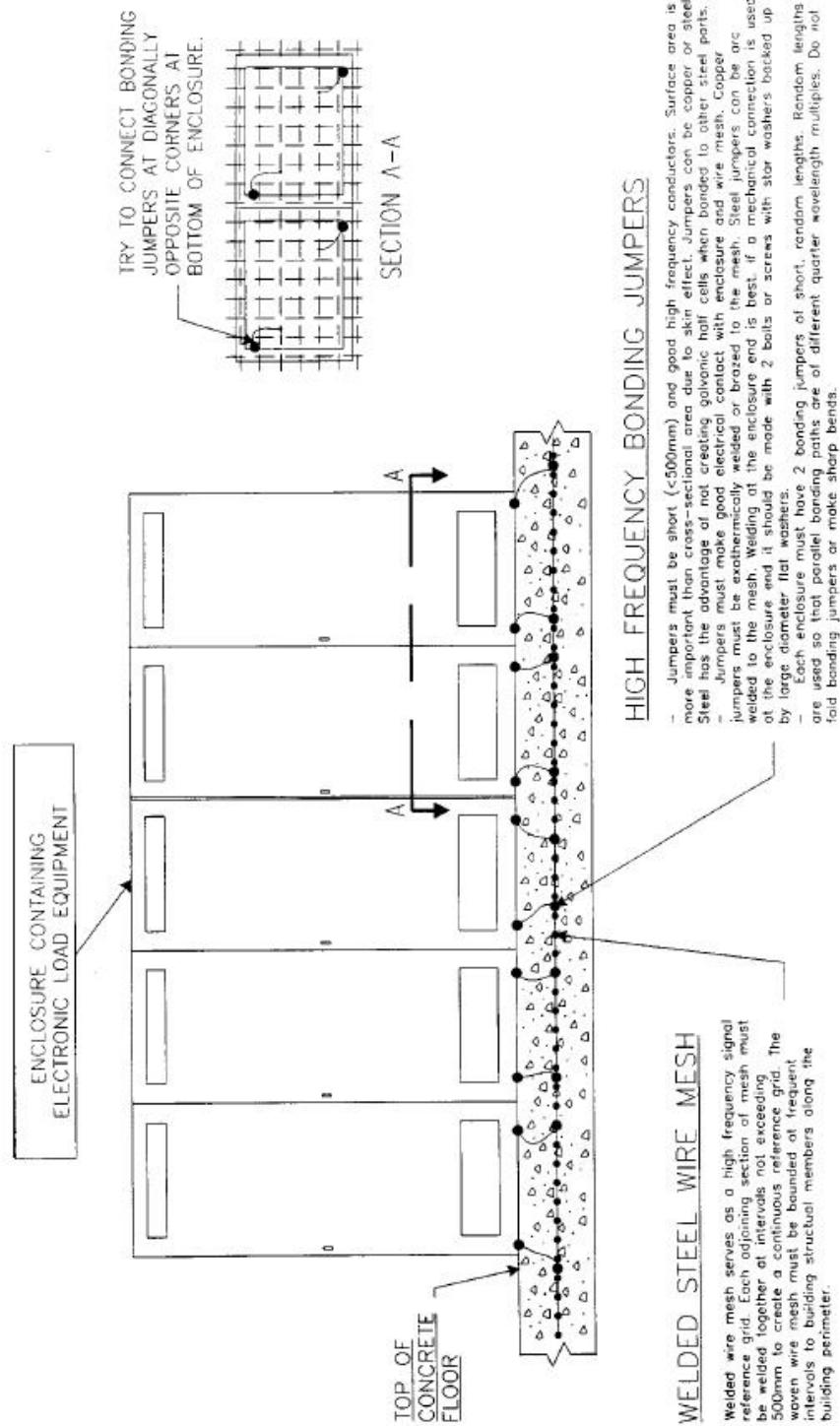


Figura 24. Malla de señal de referencia utilizando malla de alambre soldada [35]

Diseño de la malla

Las características que se proponen para estas mallas son las siguientes:

Área de la malla de puesta a tierra	$A = 400m^2$
Largo de la malla	$L_1 = 20m$
Ancho de la malla	$L_2 = 20m$
Número de conductores a lo largo	$M_1 = 41m$
Número de conductores a lo ancho	$M_2 = 41m$
Espaciamiento entre los conductores	$D = 0.5m$
Número de electrodos tipo varilla	$N = 24$
Longitud de un electrodo tipo varilla	$L_v = 2.40m$

Memoria de cálculos:

- **Longitud de conductor horizontal**

$$\begin{aligned} L_c &= M_1 * L_1 + M_2 * L_2 \\ L_c &= 41 * 20m + 41 * 20m \\ L_c &= 1640m = L_T \end{aligned}$$

- **Longitud total del conductor**

$$\begin{aligned} L_T &= L_c + N * L_v \\ L_T &= 1640m + 24 * 2.40m \\ L_T &= 1697.6m \end{aligned}$$

- **Resistencia de puesta a tierra**

$$R_g = \rho * \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20 / A}} \right) \right] = 5.09\Omega$$

$$R_g = 5.09\Omega > R_{gmax} = 0.5\Omega$$

Esta resistencia de puesta a tierra es mucho mayor que el valor común de resistencia encontrado en este tipo de mallas.

Para hallar un diseño de este tipo, con los parámetros ya planteados, con el cual se obtenga una resistencia que sea menor a 0.5Ω , se deberá contar con un área mayor que el área de toda la estructura de la planta del nuevo tren de laminado.

Debido a lo anterior se recomienda hacer un relleno con suelos artificiales, ya que son una buena solución a la necesidad de obtener bajas resistencia de puesta a tierra.

Resultado de la malla utilizando Suelo Artificial (FAVIGEL[4])

En la Figura 25 se encuentra un gráfico en el que se visualiza la disminución en porcentaje de la resistencia de puesta a tierra de acuerdo con el número de días después de su aplicación.

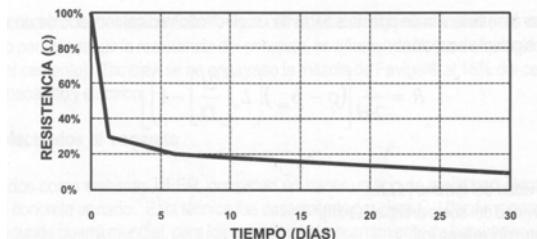


Figura 25. Reducción de la resistencia de puesta a tierra con FAVIGEL[4]

Con la visualización de este gráfico, podemos decir que en 30 días la resistencia de la malla de puesta a tierra disminuirá un 90%.

Para el caso de este primer diseño, la malla del nuevo tren de laminado tendría una resistencia de: $10\% * R_g = 0.509 \Omega$

Con este valor de resistencia, la malla propuesta cumple con la IEEE Std 1100 [35].

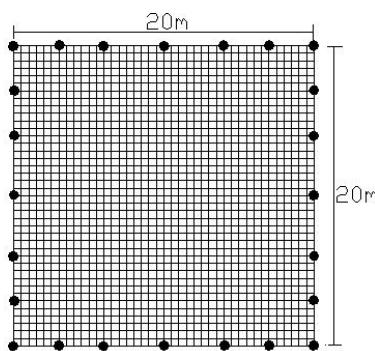


Figura 26. Malla de alta frecuencia

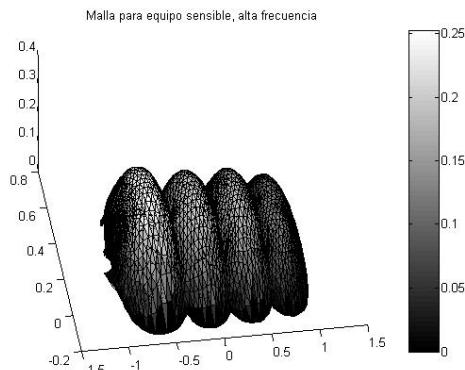


Figura 27. Determinación del potencial eléctrico para la malla del equipo sensible.

8. - Diseños utilizando como herramienta el Estándar IEEE 80

La malla puede ser calculada de acuerdo con el estándar IEEE 80, ya que los efectos de los armónicos no se controlan con la red de tierra.

De acuerdo con esto, se recomienda como opción, utilizar VSD que asegure un THD y THI menor al 5%.

La resistencia de puesta a tierra recomendada para equipos sensibles es de 5Ω .

Diseños propuestos

Se hace una comparación entre dos diseños.

Con el primero se llega a una resistencia de la malla de 4.67Ω , sin hacerle un tratamiento de tierra, en el que se presenta como dificultad el área que se necesita para el montaje de esta malla.

El segundo diseño tiene resistencia de puesta a tierra menor a 1Ω y además el área que se debe utilizar, es similar a la de la subestación donde estarán los variadores de velocidad; en este diseño se propone utilizar una técnica de mejoramiento de suelo, con suelo artificial FAVIGEL.

Diseño 1

Las características para este diseño son:

Área de la malla de puesta a tierra	$A = 576m^2$
Largo de la malla	$L_1 = 24m$
Ancho de la malla	$L_2 = 24m$
Número de conductores a lo largo	$M_1 = 9$
Número de conductores a lo ancho	$M_2 = 9$
Espaciamiento entre los conductores	$D = 3m$
Número de electrodos tipo varilla	$N = 28$
Longitud de un electrodo tipo varilla	$L_v = 3m$

➤ Cálculos

- Longitud de conductor horizontal

$$Lc = M_1 * L1 + M_2 * L2$$

$$Lc = 9 * 24m + 9 * 24m$$

$$Lc = 432m$$

- Longitud total del conductor

$$L_T = Lc + N * Lv$$

$$L_T = 432m + 8 * 2.4m$$

$$L_T = 451.2m$$

- Resistencia de puesta a tierra

$$Rg = \rho * \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20 / A}} \right) \right] = 4.67\Omega$$

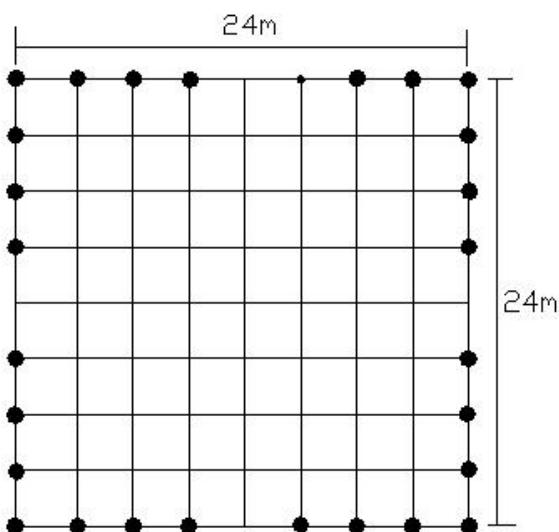


Figura 28. Malla con base en el estándar IEEE 80

Diseño 2

Las características propuestas serán:

Área de la malla de puesta a tierra	$A = 72m^2$
Largo de la malla	$L_1 = 12m$
Ancho de la malla	$L_2 = 6m$
Número de conductores a lo largo	$M_1 = 3$
Número de conductores a lo ancho	$M_2 = 5$
Espaciamiento entre los conductores	$D = 3m$
Número de electrodos tipo varilla	$N = 8$
Longitud de un electrodo tipo varilla	$L_v = 2.4m$

➤ Cálculos

- Longitud de conductor horizontal

$$L_c = M_1 * L_1 + M_2 * L_2$$

$$L_c = 3 * 12m + 5 * 6m$$

$$L_c = 66m$$

- Longitud total del conductor

$$L_T = L_c + N * L_v$$

$$L_T = 66m + 8 * 2.4m$$

$$L_T = 85.2m$$

- Resistencia de puesta a tierra

$$R_g = \rho * \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20 / A}} \right) \right] = 13.73\Omega$$

Teniendo en cuenta la reducción de resistividad que ocasionará el tratamiento de suelo que se propone, la resistencia de puesta a tierra disminuirá el 90% en 30 días.

$$10\% * R_g = 1.373\Omega$$

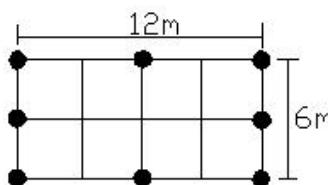


Figura 29 Malla con base en el Estándar IEEE 80, con tratamiento de suelo

BIBLIOGRAFÍA

1. ANSI / IEEE Standard 80-2000 Guide for Safety in AC Subestations Grounding. (revisión de la IEEE Std 80-1986).
2. ANSI / IEEE Standard 80-2000 Guide for Safety in AC Subestations Grounding.
3. IEEE tutorial course: "Practical applications of ANSI / IEEE Standard 80-1986 – IEEE Guide for Safety. D.L> Garret Organizador – 86 Eh0253 – S – PWR.
4. Tierras – Soporte de la Seguridad Eléctrica Ing. Favio Casas Ospina. Editorial Linotipia Bolívar y CIA S en C Junio de 2003 187p.
5. Apuntes personales de profesor Ing. José Samuel Ramírez y Notas de Clase del curso de Subestaciones de la línea de profundización en distribución.
6. Método para medir la resistencia de puesta a tierra de grandes sistemas. Jorge Humberto Sanz A. Revista Scientia et Technica N°21. Universidad Tecnológica de Pereira.
7. Cadweld, Welded Electrical Conneccctions. Erico. 1997.
8. J.C. Simo, "A framework for finite strain elasto-plasticity based on maximum plastic dissipation and the multiplicative decomposition, part I : Continuum formulation", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 66, pp. 199-219, (1988).
9. J.C. Simo, "A framework for finite strain elasto-plasticity based on maximum plastic dissipation and the multiplicative decomposition, part II: Computational Aspects", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 68, pp. 199-219, (1988).
10. J .C. Simo y J.E. Marsden, "On the rotated stress tensor and the material version of the Doyle-Ericksen formula", Arch. Rat. Mech. Anal, Vol. 86, pp. 213-231, (1984).

11. B. Moran, M. Ortiz y C.F. Shih, "Formulation of implicit finite element methods for multiplicative finite deformation plasticity", *Intemat. Journ. Numer. Meth. Engrg.*, Vol. 29, pp. 483-514, (1990).
12. R . Hill, Aspects on invariance in solid mechanics", *Adv. in Appl. Mech.*, Vol.18, pp. 1-75, (1978).
13. L . Anand, "On Hencky's approximate strain-energy function for moderate deformation", *J. Appl. Mech.*, Vol. 46, pp. 78-82,(1979).
14. W .D. Rolph III y K.J. Bathe, "On a large strain finite element formulation for elasto-plastic analysis", in: K.J. William, ed., *Constitutive equations: Macro and Computational Aspects*, Winter Annual Meeting, ASME, New York, pp. 131-147, (1984).
15. G . Weber y L. Anand, "Finite deformation constitutive equation and a time integration procedure for isotropic, hyperelastic viscoplastic solids", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 79, pp. 173-202, (1990).
16. A .L. Eterovic y K.J. Bathe, "A hyperelastic based large strain elasto-plastic constitutive formulation with combined isotropic kinematic hardening using the logarithmic stress and strain measures" , *Internat. Journ. Numer. Meth. Engrg.*, Vol. 30, pp. 1099-1114, (1990).
17. D . Péric, D.R.J. Owen y M.E. Honnor, "A model for finite strain elasto-plasticity based on logarithmic strains : Computational issues", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 94, pp. 35-61, (1992).
18. J .C. Simo, "Algorithms for static and dynamic multiplicative plasticity that preserve the classical return mapping schemes of the infinitesimal theory", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 99, pp.61-112, 1992.
19. E .N. Dvorkin, D. Pantuso y E.A. Repetto, "2D Finite Strain Elasto-Plastic Analysis Using a Quadrilateral Element Based on Mixed Interpolation of Tensorial Components", en: H. Alder et ai, *Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences, Proceedings of the International Congress on Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences*, Chile, pp. 144-157 (1992).
20. E .N. Dvorkin, D. Pantuso y E.A. Repetto, "Finite Strain Elasto-Plastic Analysis Interpolating Hencky Strains and Displacements", *Proceedings of the Third Pan American Congress of Applied Mechanics, PACAM III*, Brasil, pp. 271-274.
21. E. N. Dvorkin, M. B. Goldschmit, D. Pantuso y E.A. Repetto "Comentarios sobre algunas herramientas utilizadas en la resolución de problemas no-lineales de la mecánica del continuo" *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 10, 1, 47-65 (1994).

-
22. E. N. Dvorkin, M. B. Goldschmit, Notas de clase del curso mecánica computacional, FIUBA 2000.
 23. .E .N. Dvorkin, D. Pantuso y E.A. Repetto, "A Finite Element Formulation for Finite Strain Elasto-Plastic Analysis Based on Mixed Interpolation of Tensorial Components", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (en prensa).
 24. S. N. Atluri, "Alternate stress and conjugate strain measures, and mixed variational formulations involving rigid rotations for computational analysis of finitely deformed solids, with applications to plates and shells - Part I", Computers and Structures, Vol. 18, pp. 93-116, (1984).
 25. J. Lubliner, Thermomechanics of deformable bodies, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, (1985).
 26. J. K. Bienes, "On the analysis of rotation and stress rate in deforming bodies", Acta Mee/i., Vol. 32, pp. 217-232, (1979).
 27. Y.M. Cheng y Y. Tsui, "Limitations to the large strain theory", Internat. Journ. Numer. Meth. Engrg., Vol. 33, pp. 101-114, (1990).
 28. J. C. Simo y K.S. Pister, "Remarks on rate constitutive equations for finite deformation problems: Computational Aspects", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 46, pp. 201-215, (1984).
 29. .P. M. Pinsky, M. Ortiz y K.S. Pister, "Numerical integration of rate constitutive equations in finite deformation analysis", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 40, pp. 137-158,(1983).
 30. J. C. Slatery, "Momentum, Energy and Mass Transfer in Continua", McGraw Hill, (1972).
 31. E. H. Lee, "Elastic-plastic deformations at finite strains", J. Appl. Mech., Vol. 36, pp. 1-6, (1969).
 32. Jianming Jin "The Finite Element Method in Electromagnetics" Second Edition IEEE Press, Wiley- interscience 2002. 753 paginas.
 33. Peter Monk "Finite Element Methods for Maxwell equations" Numerical Mathematics and Scientific Computation. Oxford University press 2003.
 34. Mathwork corp. MATLAB 6.5
 35. IEEE, Sistemas de puesta a tierra en equipo sensible, Emerald Book. Sd. 1100.

