

Documentación de los métodos para el tratamiento de puestas a tierra

Anggy Meneses Ravelo

Juan Pablo Sandoval Mejia

Trabajo presentado como requisito para optar el título de Ingeniero Eléctricista

Director:

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

PhD en tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

En primer lugar a Dios, que me ha brindado una vida llena de alegrías y aprendizaje, llenándome de beneficios y permitiéndome vivir una muy buena experiencia en mi etapa universitaria.

A mis padres Juan Bautista Meneses Niño y Amparo Ravelo Nieto que siempre me han apoyado y guiado incondicionalmente llenándome de oportunidades.

Mis hermanos, especialmente Liliana Patricia Meneses quien se comportó como una segunda madre ayudándome y apoyándome en todo momento. Gracias por tu dedicación, tiempo y consejos.

Mi novio Jose Luis Rodríguez que estuvo siempre a mi lado en esa etapa importante para mi vida ayudándome, aconsejándome, apoyándome y en muchas ocasiones guiándome.

A mis amigos que me ayudaron a cumplir de alguna forma esta meta y hacer este momento de mi vida llevadero.

Anggy Meneses Ravelo

Dedicatoria

Este proyecto de grado se lo dedico a Dios, el cual me lleno de Fe, esperanza y fuerza para seguir adelante en este proceso.

A mi familia que es mi gran motivación y pilar fundamental de mi vida y mis sueños, resaltando la labor de mis padres Arnulfo Sandoval Solano y Viviana Mejia Aldana que siempre me han guiado, apoyado y me brindan su amor para continuar mi camino. Gracias familia por su paciencia y nunca dejarme solo en este camino.

A mis compañeros y amigos que siempre me brindaron una voz de aliento, de fuerza y esperanza para seguir, se culmina una etapa más, pero la vida continúa y estaré siempre agradecido por la oportunidad de conocer a cada uno de ellos.

Gracias Totales.

Juan Pablo Sandoval Mejia

Agradecimientos

A nuestro director de tesis Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, por la orientación, ayuda que nos brindó durante la realización del trabajo de grado y por su apoyo en todo el proceso que nos permitieron aprender mucho más.

A todos los profesores de la carrera de ingeniería eléctrica que nos enseñaron tanto de la profesión como de la vida, formándonos para ser profesionales íntegros.

A los ingenieros Nestor Alfonso Rivera y Luis Toloza, quienes muy amablemente nos brindaron su apoyo y conocimiento laboral.

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Diseño del sistema de puesta a tierra	19
1.1 Generalidades de los sistemas de puesta a tierra en las instalaciones eléctricas	20
1.2 Detalle del procedimiento de diseño según estándar IEEE 80	22
1.2.1 Paso 1: datos de campo	24
1.2.2 Paso 2: tamaño del conductor	28
1.2.3 Paso 3: criterios de tensiones de paso y contacto	31
1.2.4 Paso 4: diseño inicial	33
1.2.5 Paso 5: resistencia a tierra.....	33
1.2.6 Paso 6 corriente máxima de malla	38
1.2.7 Paso 7 potencial máximo de la malla.....	39
1.2.8 Paso 8 tensiones máximas de malla y paso.....	39
1.2.9 Paso 9 y paso 10 controles de seguridad.....	44
1.2.10 Paso 11 acciones de mejora	44
1.2.11 Paso 12 poner a tierra todos los equipos.....	45
2. El terreno y la resistencia puesta a tierra	45
2.1 Composición del terreno	47
2.1.1 Sales solubles y su concentración.	49

2.1.2 Temperatura.	51
2.1.3 Granulometría.	51
2.1.4 Compacidad.	52
2.1.5 Estratigrafía.	52
2.2 Influencia de los electrodos de puesta a tierra en la resistencia.....	53
2.2.1 Electrodo puntual semiesférico de radio “r”.	53
2.2.2 Varilla enterrada verticalmente a ras de la superficie	53
2.2.2.1 Electrodos horizontales.	55
2.3 Técnicas de reducción de la resistencia puesta a tierra.....	56
2.3.1 Variando las dimensiones de los electrodos.	57
2.3.1.1 Varillas o conductores de mayor radio.	57
2.3.1.2 Varillas o conductores más largos.	58
2.3.2 Electrodos múltiples.....	59
2.3.3 Tratamiento químico del terreno.....	60
3. Compuestos que mejoran las puestas a tierra	61
3.1 Suelos Artificiales	66
3.1.1 Características de un suelo artificial	66
3.2 Bentonita	67
3.2.1 Baja resistividad de la bentonita.	68
3.2.2 Alta capacidad de hinchamiento.	69
3.2.3 Instrucciones de instalación	69
3.3 Hidrosolta.....	70
3.3.1 Instrucciones de instalación.	71

3.3.2 Pozo vertical capacitivo	71
3.3.3 Pozo plano capacitivo	72
3.4 Conducrete	75
3.4.1 Características y beneficios.....	75
3.4.2 Resistencia a la compresión y baja contracción.....	76
3.4.3 Resultados de pruebas de alta corriente/alto voltaje.	76
3.4.4 Instrucciones de instalación	77
3.4.4.1 Instalaciones horizontales.	77
3.4.4.2 Instalaciones verticales.	78
3.5 Celec	79
3.5.1 Características	79
3.5.2 Pruebas	80
3.5.3 Instrucciones de instalación	81
3.5.3.1 Instalaciones verticales.	81
3.5.3.2 Instalaciones horizontales.	82
3.6 Aglomerante conductivo GL.....	83
3.6.1 Ventajas aducidas por el proveedor	84
3.6.2 Instrucciones de instalación.	84
3.6.2.1 Sistemas horizontales.....	84
3.6.2.2 Sistemas verticales	85
3.6.2.3 Recomendaciones para obtener mejores resultados.....	85
3.7 FAVIGEL	86
3.7.1 Ventajas aducidas por el proveedor	86

3.7.2 Como se realiza su hidratación.	87
3.7.3 Lugar de uso.....	87
3.8 THOR GEL.....	89
3.8.1 Composición.	90
3.8.2 Rendimiento.....	90
3.9 PROTEGEL	91
3.9.1 Características	92
3.9.2 Rendimiento (dosis de 6 kg).	92
3.9.3 Presentación.	93
3.9.4 Instrucciones de instalación	93
3.9.5 Mantenimiento.	95
3.10 Análisis comparativo del desempeño de los productos	97
3.11 Recomendaciones cuando no se puede mejorar una puesta a tierra	100
3.12 Exigencias de inspección y mantenimiento del sistema de puesta a tierra	100
3.12.1 Pruebas.....	101
3.12.2 Registros.	102
4. Conclusiones	102
Referencias Bibliográficas	105

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros para calcular el calibre del conductor	30
Tabla 2. Fórmulas desarrolladas por Dwight.....	37
Tabla 3. Valores del factor de disminución para toda la duración t_f de la falla.....	39
Tabla 4. Máxima tensión de contacto admisible para el ser humano	44
Tabla 5. Valores típicos medios de la resistividad.....	48
Tabla 6. Valores orientativos de la resistividad	48
Tabla 7. Propiedades mas importantes de los productos	63
Tabla 8. Comparación, presentación y costo	65
Tabla 9. Dimensiones del SPT sugerido por HIDROSOLTA	74
Tabla 10. Características producto HIDROSOLTA	74
Tabla 11. Características AGLOMERANTE CONDUCTIVO GL.....	83
Tabla 12. Plan de mantenimiento.....	88
Tabla 13. Características FAVIGEL.....	89
Tabla 14. Composición THOR GEL	90
Tabla 15. Rendimiento THOR GEL	91
Tabla 16. Características THOR GEL	91
Tabla 17. Dosificación PROTEGEL.....	96
Tabla 18. Observaciones en campo	98

Lista de Tablas

	Pág.
Figura 1. Componentes de un sistema de puesta a tierra	19
Figura 2. Secuencias de pasos recomendados por la IEEE 80.....	23
Figura 3. Método Wenner.	24
Figura 4. Método de Schlumberger-Palmer.....	26
Figura 5. Composición de la tierra.....	46
Figura 6. Variaciones de la resistividad del terreno en función del porcentaje de sal	50
Figura 7. Variación de la resistividad del suelo con respecto a la humedad a diferentes frecuencias.	50
Figura 8 Variaciones de resistividad por diversos factores.	51
Figura 9 Electrodo puntual semiesférico radio ' r '	53
Figura 10 Electrodo vertical.....	54
Figura 11 Electrodo vertical enterrado a una profundidad h	55
Figura 12 Electrodo horizontal.	56
Figura 13 Técnicas de reducción de la resistencia de puesta a tierra.....	57
Figura 14 Variación de la resistencia al modificar el diámetro	58
Figura 15 Variación de la resistencia con la longitud de la varilla.	59
Figura 16 Electrodos múltiples	60
Figura 17 Bentonita sódica	68

Figura 18 Instalación en pozo vertical – HIDROSOLTA.	72
Figura 19 Instalación en pozo horizontal – HIDROSOLTA.	73
Figura 20 Comparación de muestra de cobre sin protección vs protegida con CONDUCRETE.	76
Figura 21 Instalación horizontal- CONDUCRETE.	78
Figura 22 Instalación vertical-CONDUCRETE.	79
Figura 23 Electrodo vertical – CELEC.	81
Figura 24 Malla horizontal- CELEC.	82
Figura 25 Reducción de la resistencia de puesta a tierra con FAVIGEL.	87
Figura 26 Instalación electrodo vertical – PROTEGEL.	93
Figura 27 Instrucciones de instalación – PROTEGEL.	95

Resumen

TÍTULO: Documentación de los métodos para el tratamiento de puestas a tierra*.

AUTORES: Anggy Meneses Ravelo, Juan Pablo Sandoval Mejia**

PALABRAS CLAVE: Sistema de puesta a tierra, RETIE, tensión de paso, tensión de contacto, tratamientos químicos.

DESCRIPCION:

En el presente documento se presentan los métodos desarrollados para el tratamiento de puestas a tierra ante condiciones de terreno desfavorables, buscando comprender el comportamiento y el papel de los suelos en el funcionamiento del sistema de puesta a tierra, haciendo énfasis en las acciones que se deben tomar cuando las condiciones del terreno no son favorables. Se detalla el proceso de diseño basado en el RETIE y el estándar IEEE 80, buscando cumplir los criterios de las tensiones de paso y contacto. También contiene información brindada por productores y comercializadores de los compuestos químicos mejoradores de puestas a tierra más comerciales en Colombia. Esta información junto con la experiencia de campo aportada por ingenieros que han podido poner en práctica la utilización de estos compuestos, permite hacer una comparación de los diferentes compuestos utilizados como tratamientos para mejorar los sistemas de puesta a tierra, identificando ventajas, limitaciones, formas de aplicación, tipo y frecuencia de mantenimiento y costos. Desde nuestra experiencia durante la realización de este trabajo de grado y con la información utilizada para la realización del mismo nos permitimos hacer algunas conclusiones que brindan un aporte para facilitar la toma de decisiones a la hora de elegir un producto necesario para mejorar la resistencia de un sistema de puesta a tierra.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Abstract

TITLE: Documentation of ground-handling methods*.

AUTHORS: Anggy Meneses Ravelo, Juan Pablo Sandoval Mejia. **

KEY WORDS: Grounding system, RETIE, Step voltage, contact voltage, chemical treatments.

DESCRIPTION:

This document presents the developed methods for the treatment of grounding in the face of unfavorable ground conditions, seeking to understand the behavior and role of soils in the functioning of the grounding system, emphasizing the actions they must take when the ground conditions are not favorable. The design process based on the RETIE and the standard IEEE 80 is detailed, seeking to meet the criteria of the step and contact voltages. It also contains information provided by producers and marketers of the improved chemical compounds from landings to more commercial lands in Colombia. This information together with the field experience contributed by engineers who have been able to put into practice the use of these compounds, allows to make a comparison of the different compounds used as treatments to improve grounding systems, identifying advantages, limitations, forms of application, type and frequency of maintenance and costs. From our experience during the accomplishment of this work of degree and with the information used for the realization of the same one we allow us to make some conclusions that provide a contribution to facilitate the decision making at the time of choosing a necessary product to improve the resistance of a grounding system.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Director Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Introducción

En Colombia el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE exige que el sistema eléctrico de potencia en los procesos de generación, transformación, transmisión, distribución y uso final de la energía, sean puestos a tierra en un punto.

El RETIE considera al sistema de puesta a tierra como requisito esencial de toda instalación. Su función principal es la protección de las personas en contacto con elementos de la instalación, tanto en el interior como en el exterior, asegurando que no queden sometidas a tensiones de paso, de contacto o transferidas, que superen los umbrales de tolerabilidad del ser humano cuando se presente una falla. Además, el sistema de puesta a tierra busca la protección de las instalaciones y la compatibilidad electromagnética.

Un factor importante en el diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de puesta a tierra es la resistividad del terreno ya que esta afecta directamente la impedancia de tierra impidiendo alcanzar el valor requerido para un correcto funcionamiento del sistema de tierra. La resistividad del terreno depende y varía según la composición físico-química del suelo. Los factores que afectan principalmente este valor son la porosidad del material, la temperatura y la humedad.

Por la importancia del tópico en el ámbito de las instalaciones eléctricas se desarrolla el presente trabajo de grado buscando comprender el comportamiento y el papel de los suelos en el funcionamiento del sistema de puesta a tierra, hacer énfasis en los métodos o las acciones que se deben tomar cuando las condiciones del terreno no son favorables, identificando los principios

físicos que intervienen en el drenaje de las corrientes a tierra, detallando el proceso de diseño y los componentes de las puestas a tierra, además de hacer una comparación de los diferentes métodos identificando desventajas y oportunidades dependiendo del terreno.

Este proyecto de grado se realizó con el objetivo de documentar los métodos desarrollados para el tratamiento de puestas a tierra ante condiciones de terreno desfavorables, teniendo en cuenta la importancia de los sistemas de puesta a tierra y la necesidad del correcto funcionamiento, por esto describe a modo de introducción las características principales del sistema de puesta a tierra y sus funciones, basados en el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). Se enfoca en describir los pasos según el estándar IEEE 80 para un correcto diseño de los sistemas de puesta a tierra que garantice los valores admisibles de seguridad de las tensiones de paso y de esta forma dar inicio al tema principal del documento.

Sustenta la influencia del terreno y su resistividad en los sistemas de puesta a tierra describiendo brevemente los componentes que afectan la resistividad del terreno y puntualiza en los efectos de los electrodos de puesta a tierra en la resistencia. Teniendo en cuenta los límites de diseño que deben satisfacerse, los requisitos que deben cumplir y las medidas necesarias que se deben tomar en los sistemas de puesta a tierra que garanticen el correcto funcionamiento de un SPT, se citan las técnicas de reducción de la resistencia, dando paso a la temática principal de este documento.

Incluye los principales métodos propuestos para el tratamiento de puestas a tierra que buscan garantizar el cumplimiento de las tensiones de paso y contacto reglamentarias ante condiciones de terreno desfavorables, hace referencia a algunos productos del mercado utilizados como compuestos mejoradores de puestas a tierra presentando detalladamente las características relevantes de los productos basados en la información proporcionada por los proveedores y

experiencias de campo. Se contrastan diversas características entre los compuestos tratados, teniendo en cuenta precios y presentación en la que se pueden encontrar en el mercado, además de una síntesis de ventajas y desventajas de los grandes grupos en los que son clasificados.

1. Diseño del sistema de puesta a tierra

Un sistema de puesta a tierra es un conjunto de elementos conductores continuos de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Comprende la puesta a tierra y la red equipotencial de cables que normalmente no conducen corriente (Ministerio de Minas y Energia, 2013).

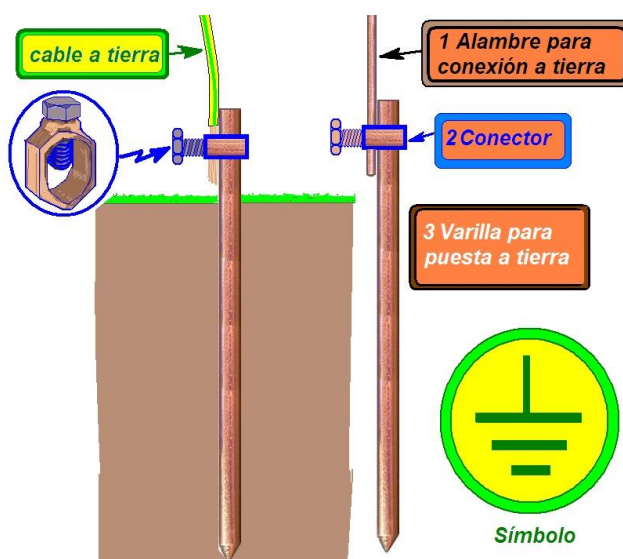


Figura 1. Componentes de un sistema de puesta a tierra Adaptado de: «coparoman,» 29 diciembre 2015. Recuperado de: <https://coparoman.blogspot.com/2015/12/conexion-tierra.html>. [Último acceso: mayo 2019].

La puesta a tierra es un componente de la instalación eléctrica que cumple un rango amplio de funciones que abarcan la seguridad de las personas, la calidad del servicio, y la operación apropiada del sistema eléctrico y de los equipos.

Dada la importancia de la puesta a tierra para el servicio y la protección de una instalación, diversas normas se han propuesto para orientar el diseño y construcción de la puesta a tierra.

Se debe tener en cuenta que las condiciones climáticas influyen en el diseño del sistema de puesta a tierra, así como la composición del suelo. Adicionalmente las condiciones propias de la instalación por su ubicación y entorno pueden dificultar la medición y la obtención de una buena puesta a tierra.

Debido a lo antes mencionado es que surge la necesidad de crear mejores puestas a tierra y mejores instrumentos para su medición (Rojas) .

1.1 Generalidades de los sistemas de puesta a tierra en las instalaciones eléctricas

Un sistema de puesta a tierra (SPT) está conformado principalmente por un conductor vertical que “deriva” corriente hacia un electrodo el cual está introducido y en contacto permanente con la tierra. El terreno cumple las funciones de camino de retorno de las corrientes de falla, así como medio de disipación de energía gracias a la capacidad de transferencia y “absorción” de choques térmicos con altos niveles de energía.

El sistema de puesta a tierra para instalaciones eléctricas comprende el sistema eléctrico y estructuras que puedan drenar una falla ante altas tensiones que puedan presentarse entre la estructura puesta a tierra y la red.

Las funciones de un sistema de puesta a tierra son:

- Garantizar condiciones de seguridad a los seres vivos.
- Permitir a los equipos de protección despejar rápidamente las fallas.
- Servir de referencia común al sistema eléctrico.
- Conducir y disipar con suficiente capacidad de las corrientes de falla, electrostática y de rayo.
- Realizar una conexión de baja resistencia con la tierra y con puntos de referencia de los equipos.

Para lograr lo anterior debe existir un punto de referencia común que conduzca físicamente a la tierra aquellas corrientes provenientes de descargas naturales imprevistas como los rayos o interferencias por inducción electromagnética, fallas propias de los sistemas como cortocircuitos o incluso errores humanos en la operación y mantenimiento de los sistemas como cortocircuitos, en la operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

El RETIE sugiere un procedimiento básico basado en el estándar IEEE 80 que consiste en:

- a. Investigar las características del suelo (especialmente la resistividad)
- b. Determinar la corriente máxima de falla a tierra.
- c. Determinar el tiempo máximo de despeje de la falla para efectos de simulación.
- d. Investigar el tipo de carga.
- e. Calcular de forma preliminar la resistencia de puesta a tierra.
- f. Calcular de forma preliminar las tensiones de paso y contacto
- g. evaluar las tensiones de paso y contacto

h. Investigar las posibles tensiones transferidas al exterior, debidas a tuberías, mallas, conductores de neutro, blindaje de cables, circuitos de señalización, además del estudio de las formas de mitigación.

- i. Ajustar y corregir el diseño inicial hasta que se cumpla los requerimientos de seguridad.

1.2 Detalle del procedimiento de diseño según estándar IEEE 80

En el diagrama de bloques mostrado en la imagen 2 se ilustra las secuencias de pasos recomendados por este estándar para el diseño de una malla de tierra, los cuales son descritos a continuación (IEEE Power and Energy Society , 2013) (Sinchi Sinchi , 2017).

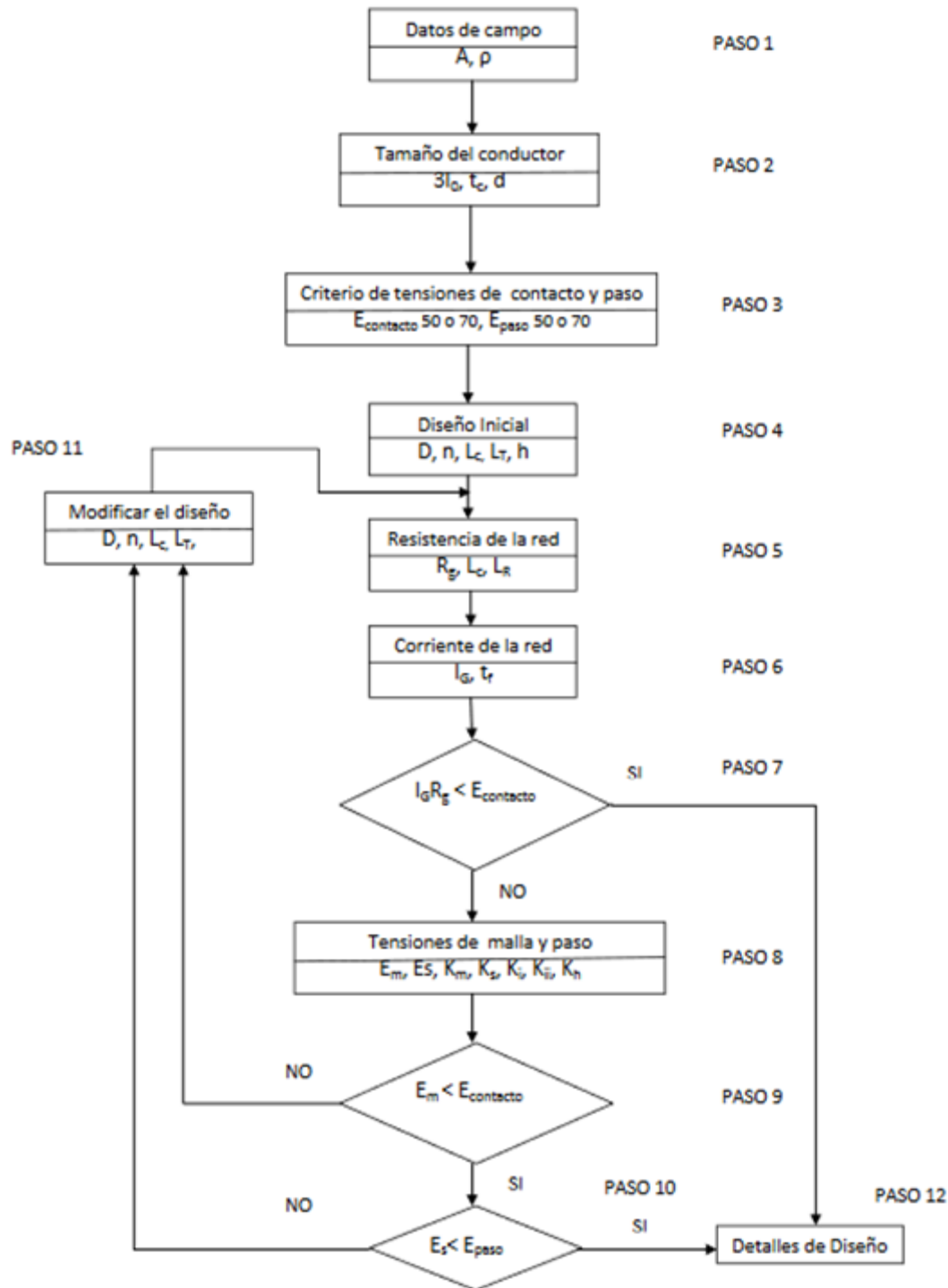


Figura 2. Secuencias de pasos recomendados por la IEEE 80. Adaptado de: IEEE Power and Energy Society, «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,» de *IEEE Std 80™-2013*, New York, 2013.

Fuente [3]

1.2.1 Paso 1: datos de campo La realización de una instalación de una puesta a tierra requiere conocer previamente el perfil de la resistividad del terreno según la profundidad para, de esta forma, facilitar la elección de la disposición de los electrodos de tierra. Los métodos (basados en (IEEE Power and Energy Society , 2013) (EPM, Area Ingenieria Distribucion , 2008)) más usados se describen a continuación:

- Método de Wenner.

El método de los cuatro puntos de Frank Wenner es el método más preciso y popular. Son razones para esto que: el método obtiene la resistividad del suelo para capas profundas sin enterrar los electrodos a dichas profundidades y los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno.

El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo, a una profundidad “p” y espaciados (en línea recta) una distancia “d”.

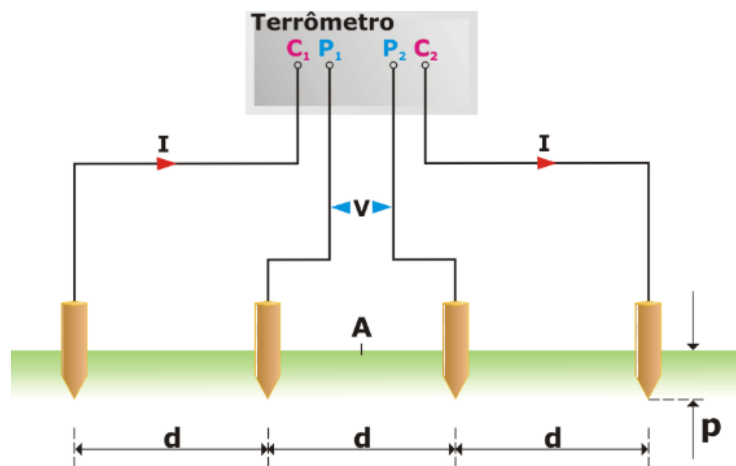


Figura 3. Método Wenner. Adaptado de: Molina Rodriguez J., «blogspot,» 24 noviembre 2010. Recuperado de: <http://jeferson-molina.blogspot.com/2010/11/sistemas-de-puestas-tierra.html>.

Una corriente “I” se inyecta entre los dos electrodos externos y la ΔP “V” entre los dos electrodos internos, es medida por el instrumento. El instrumento mide la resistencia R ($=V/I$) del volumen de suelo cilíndrico de radio “a” encerrado entre los electrodos internos. La resistividad aparente del suelo ρ_a a la profundidad “a” es aproximada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{4\pi R d}{\left(1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4p^2}} - \frac{2d}{\sqrt{4d^2 + 4p^2}}\right)} \quad (1)$$

Dado que en la práctica la distancia “d” es mucho mayor que la profundidad de enterramiento “p”, la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$\rho = 2\pi R d \quad (2)$$

Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos se varía desde unos pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra. El espaciamiento “d” del electrodo se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del suelo.

- Método de Schlumberger Palmer

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están situados en línea recta, la variante de éste arreglo radica en que la separación entre los electrodos es, aunque simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre éstos y los de corriente.

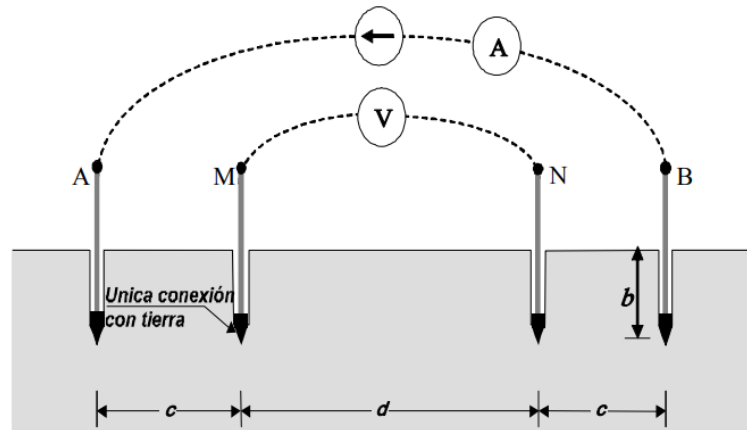


Figura 4. Método de Schlumberger-Palmer. Adaptado de: EPM, Area Ingenieria Distribucion , (2008) «Medida de resistividad electrica del suelo,».

El procedimiento para obtener el modelo del terreno, consiste en separar progresivamente los electrodos, alrededor de un punto central permanente, denominado punto de máxima exploración.

La fórmula con la cual se calcula la resistividad aparente del terreno es:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d) R}{d} \quad (3)$$

Donde:

c: es la separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión.

d: es la separación entre los electrodos de tensión

- Método de variación con la profundidad

Descrito en la norma ANSI/IEEE Std 81-1983, el método (variation of depth method) consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y, basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y los datos geométricos de la varilla, derivar la resistividad del suelo. Se asume como en los métodos anteriores, que el terreno es homogéneo (IEEE Power and Energy Society , 2013) (EPM, Area Ingenieria Distribucion , 2008).

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{a}\right)-1} \quad (4)$$

Donde:

ρ : resistividad del terreno

L: Longitud del electrodo

a: radio del electrodo

R: valor de resistencia leído por el equipo

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de las variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra (lo que originó el nombre de método de la variación de profundidad), es decir, por cada marca se lee un valor de resistencia y con la fórmula anterior se calcula la resistividad

Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o Schlumberger-palmer, pues la prospección es mucho menor, o en el caso de sólo poder disponer de un telurómetro de tres electrodos.

- Método de medición de resistencia de electrodos ya enterrados

Si se está en un lugar donde ya se encuentra instalado un sistema de puesta a tierra y se desea modificar el existente o construir uno adicional, es posible, a partir de la configuración del electrodo enterrado, hallar el valor de la resistencia del sistema y calcular el respectivo valor de resistividad con la fórmula de resistencia que le corresponda (apartado 1.2.5 Ecuación de Dwight). Sólo es aplicable en configuraciones sencillas para las cuales exista una fórmula al menos aproximada de la resistencia de puesta a tierra. El resultado que se obtiene por este método no es suficientemente confiable y solo debe usarse como recurso “de emergencia”.

1.2.2 Paso 2: tamaño del conductor La selección apropiada del material conductor mantendrá la integridad de un sistema de puesta a tierra durante años si los conductores son de tamaño adecuado y las condiciones del terreno no son corrosivas para el material utilizado. Los materiales comúnmente usados para el conductor de un sistema de puesta tierra se describen a continuación:

- Cobre

El cobre es el material más utilizado en los sistemas de puesta a tierra. Los conductores de cobre tienen una alta conductividad, además tienen la ventaja de ser resistentes a la corrosión subterránea ya que el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que pueden estar enterrados en los alrededores.

- Acero con revestimiento de cobre

El acero revestido de cobre es un material utilizado para sistemas de puesta a tierra, especialmente donde el robo del conductor puede ser un problema.

- Acero

Pueden usarse conductores de acero o acero inoxidable y varillas de tierra en aplicaciones donde las condiciones del terreno pueden ser perjudiciales para el cobre. El uso de acero revestido de zinc o acero inoxidable, en combinación con protección catódica, es típico para sistemas de puesta a tierra de acero.

- *Cálculo del calibre del conductor*

La sección transversal del conductor se determina mediante la ecuación 5, en donde la corriente de falla debe ser la máxima corriente futura de falla esperada que puede ser conducida por cualquier conductor del sistema de tierra, y el tiempo t_c , debe reflejar el tiempo de despeje máximo posible.

$$A_{mm^2} = \frac{I_F}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (5)$$

Donde

I_F = máxima corriente de falla asimétrica [kA]

A_{mm^2} = sección transversal del conductor [mm²]

T_m = máxima temperatura permisible de fusión [°C]

T_a = temperatura ambiente [°C]

T_r = temperatura de referencia de constantes de materiales [°C]

α_0 = coeficiente térmico de resistividad a 0°C [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 [μΩ-cm]

$K_0 = 1/\alpha_0$ [°C]

t_c = duración de la corriente de falla [s]

TCAP = capacidad térmica por unidad de volumen [J/ (cm³*°C)] obtenido de la tabla 1

Debe observarse que α_r y ρ_r se encuentran en la misma temperatura de referencia T_r . la tabla 1 proporciona los datos de α_r y ρ_r a una temperatura de referencia de 20 °C.

Tabla 1.

Parámetros para calcular el calibre del conductor

Descripción	Conductividad del material (%)	Factor α_r a 20°C (1/°C)	K_0 a 0 °C (°C)	Temperatura de fusión T_m (°C)	ρ_r a 20 °C ($\mu\Omega \cdot cm$)	Capacidad térmica $TCAP$ [$J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$]
Cobre destemplado trenzado suave	100.0	0.00393	234	1083	1.72	3.4
Cobre comercial trenzado duro	97.0	0.00381	242	1084	1.78	3.4
Alambre de acero con revestimiento de cobre	40.0	0.00378	245	1084	4.40	3.8
Alambre de acero con revestimiento de cobre	30.0	0.00378	245	1084	5.86	3.8
Varilla de acero con revestimiento de cobre	17.0	0.00378	245	1084	10.1	3.8
Alambre de acero con revestimiento de aluminio	20.3	0.00360	258	657	8.48	3.561
Acero, 1020	10.8	0.00377	245	1510	15.90	3.8
Varilla de acero con revestimiento inoxidable	9.8	0.00377	245	1400	17.50	4.4
Varilla de acero con capa de zinc	8.6	0.00320	293	419	20.10	3.9
Acero inoxidable 304	2.4	0.00130	749	1400	72.00	4.0

Adaptado de: IEEE Power and Energy Society , «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,» de IEEE Std 80™-2013, New York, 2013 .

El tamaño del conductor realmente seleccionado es usualmente más grande que el que se calcula, debido a factores como:

- El conductor debe resistir los esfuerzos mecánicos esperados y la corrosión durante la vida útil de la instalación

- El conductor debe tener alta conductancia para prevenir caídas de tensión peligrosas durante una falla.
- La necesidad de limitar la temperatura del conductor
- Debe aplicarse un factor de seguridad a la instalación de puesta a tierra y a los demás componentes eléctricos.

1.2.3 Paso 3: criterios de tensiones de paso y contacto Los valores de las tensiones tolerables de paso y de contacto para un ser humano sometido a peligro, con pesos corporales de 50kg y 70 kg se determinan por las ecuaciones 7 y 8 y las ecuaciones 10 y 11, respectivamente.

- *Tensión de paso para una persona con peso corporal de 50kg y 70 kg*

$$Ep = (R_B + 6C_S\rho_S) * I_B \quad (6)$$

$$Ep_{50} = (1000 + 6C_S\rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad (7)$$

$$Ep_{70} = (1000 + 6C_S\rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \quad (8)$$

- *Tensión de contacto para una persona con peso corporal de 50kg y 70 kg*

$$Ec = (R_B + 1,5C_S\rho_S) * I_B \quad (9)$$

$$Ec_{50} = (1000 + 1,5C_S\rho_S) * \frac{0.116}{\sqrt{t_S}} \quad (10)$$

$$Ec_{70} = (1000 + 1,5C_S\rho_S) * \frac{0.157}{\sqrt{t_S}} \quad (11)$$

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 para 50kg.

$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_S}}$ = corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo para 70kg.

$6C_{SpS}$ = resistencia a tierra de los dos pies separados 1m en serie sobre la capa superficial.

$1.5C_{SpS}$ = resistencia a tierra de los dos pies juntos en serie sobre la capa superficial.

C_S = factor de disminución de la capa superficial, calculada por la ecuación 12.

ρ_S = resistividad del material de la capa superficial [Ω -m].

t_S = duración del choque [S].

La elección del tiempo t_S , se basa en el juicio del ingeniero de diseño. Normalmente se supone que la duración de la falla t_f y la duración del choque t_S son iguales, a no ser que la duración de la falla sea la suma de los choques sucesivos, como los de los cierres. Los valores típicos para t_f y t_S varían de 0.25s a 1s.

El factor C_S depende del espesor y la resistividad del material superficial, así como la resistividad del terreno.

$$C_S = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_a}\right)}{2h_S + 0.09} \quad (12)$$

C_S = factor de disminución de la capa superficial

h_S = espesor de la capa superficial [m]

ρ = resistividad del terreno [Ω -m]

Cuando no se tiene prevista una capa superficial, entonces $C_S = 1$ y $\rho_S = \rho$.

La capa de material superficial normalmente es de 0.10 metros a 0.15 metros de material de alta resistividad, como grava, usualmente se extiende sobre la superficie por encima de la malla de tierra para aumentar la resistencia de contacto entre el terreno y los pies de las personas. La corriente a través del cuerpo se reducirá considerablemente con la adición de material superficial debido a la mayor resistencia de contacto entre la tierra y los pies.

1.2.4 Paso 4: diseño inicial El diseño preliminar debe incluir un conductor perimetral que rodee el área de puesta a tierra, formado por conductores para proporcionar un acceso conveniente a los conductores de puesta a tierra de los equipos y estructuras.

Las estimaciones iniciales de la separación de los conductores, así como la ubicación de las varillas de tierra, se deben basar en la corriente I_G y el área del terreno que será puesta a tierra.

1.2.5 Paso 5: resistencia a tierra

- *Ecuación general*

El valor preliminar de la resistencia de puesta a tierra de una malla en un terreno uniforme es determinado mediante la ecuación 13.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (13)$$

Donde:

L_T = longitud total de conductores enterrados [m]

ρ = resistividad del terreno [Ω -m]

A = Área ocupada por la malla de tierra [m^2]

h = Profundidad de la malla [m].

Para las mallas sin varillas de tierra, esta fórmula ha sido probada para obtener resultados prácticamente idénticos a los obtenidos con la ecuación 14 de Schwarz, descrita a continuación.

- *Ecuaciones de Schwarz*

Schwarz desarrolló una serie de ecuaciones para determinar la resistencia total de un sistema de puesta a tierra en un terreno homogéneo formado por electrodos en disposición horizontal

(conductor) y verticales (varillas). Las ecuaciones ampliadas de Schwarz presentan a un conductor recto horizontal que representa la resistencia de tierra, R_1 , de una malla que consiste en conductores entrelazados, y una esfera incrustada en la tierra para representar la varillas R_2 . También presentó una ecuación para la resistencia de tierra mutua, R_m entre la malla y las varillas.

Schwarz utiliza la ecuación 14 para combinar la resistencia de la malla, las varillas y la resistencia a tierra mutua, para calcular la resistencia total sistema, R_g .

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (14)$$

Donde:

R_1 = resistencia a tierra de los conductores de la malla [Ω]

R_2 = resistencia a tierra de todas las varillas de tierra [Ω]

R_m = resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla, R_1 , y un grupo de varillas de tierra, R_2 , [Ω].

La resistencia a tierra de los conductores de la malla, R_1 , se calcula mediante la ecuación 15.

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (15)$$

Donde

L_c = longitud total de conductores de la malla [m]

ρ = resistividad del terreno [Ω -m]

$a' = \sqrt{2ah}$ para conductores enterrados a una profundidad h [m]

$a' = a$, para el conductor en la superficie de la tierra [m]

A = Área cubierta por los conductores de la malla de tierra [m^2]

$2a$ = diámetro del conductor [m]

k_1, k_2 = coeficientes calculadas con las ecuaciones 16 y 17

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 \quad (16)$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 \quad (17)$$

Donde

L_x, L_y = largo ancho de la malla de tierra [m^2]

La resistencia a tierra de las varillas R_2 se calcula mediante la ecuación 18

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (18)$$

Donde

$2b$ = diámetro de la varilla [m]

L_r = Longitud de cada varilla [m]

n_r = número de varillas de tierra

La resistencia a tierra mutua entre la malla y las varillas R_m , se calcula por medio de la ecuación 19.

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (19)$$

- *Ecuación de Dwight*

Un sistema de puesta a tierra de baja resistencia, es de gran importancia para satisfacer los requisitos de los alimentadores de sistemas de las empresas de servicios públicos, donde el camino de retorno de falla es a través del terreno. Cuanto menor sea la resistencia del sistema de puesta a tierra, más adecuadamente se cumplen estos requisitos. Sin embargo, las instalaciones con menores niveles disponibles de corriente de falla a tierra no requieren un valor tan bajo de resistencia como los sistemas más grandes con niveles más altos de corriente.

El cálculo ha sido simplificado en gran medida por las fórmulas desarrolladas en Dwight y presentadas en la tabla 2. Debe indicarse que estas fórmulas son solo aproximaciones.

Múltiples varillas en paralelo producen una menor resistencia a tierra que una sola varilla. Las varillas múltiples se utilizan comúnmente para proporcionar la baja resistencia a tierra requerida por las instalaciones de alta capacidad. La adición de una segunda varilla no proporciona, sin embargo, una resistencia total de la mitad de una sola varilla, a menos que las dos varillas tengan distintas longitudes.

La resistencia de contacto de una varilla visto en la tabla 2 está dada por la fórmula de Dwight:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (20)$$

Donde

ρ = resistividad del terreno [Ω -m]

L = longitud de la varilla [m]

a = radio de la varilla [m]

Tabla 2.

Fórmulas desarrolladas por Dwight

Símbolo	Descripción	Fórmula
	Hemisferio, radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
•	Varilla Longitud L, radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
• •	Dos varillas S > L separación s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^3} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
• •	Dos varillas S < L separación s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
—	Alambre horizontal enterrado Longitud 2L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
L	Alambre en ángulo recto Longitud de un lado L Profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
Y	Estrella de tres puntas Longitud de un lado L Profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.054 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
+	Estrella de cuatro puntas Longitud de lado L Profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
✳	Estrella de seis puntas Longitud de lado L Profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.409 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
✳	Estrella de ocho puntas Longitud de lado L Profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 10.96 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
○	Anillo de alambre Diámetro del anillo D Diámetro del alambre d Profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	Placa enterrada horizontalmente Longitud 2L, sección a por b, profundidad s/2 b < a/8	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{s^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
●	Placa redonda enterrada horizontalmente radio a profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \dots \right)$
	Placa redonda enterrada verticalmente radio a profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99}{320} + \frac{a^4}{s^4} \dots \right)$

Adaptado de: IEEE Power and Energy Society , «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,» de IEEE Std 80™-2013, New York, 2013 .

1.2.6 Paso 6 corriente máxima de malla La corriente máxima de malla I_G , que puede propagarse en una malla de tierra en casos de falla, está determinada mediante la ecuación 21. Para evitar sobredimensionar el sistema de puesta a tierra, solamente se debe usar la parte de la corriente de falla que fluye a través de la malla de tierra y hacia el terreno contiguo.

$$I_G = I_g * D_f = D_f * S_f * I_f \quad (21)$$

Donde

I_G = corriente máxima de malla [A]

I_g = valor eficaz de la corriente simétrica en la malla [A]

D_f = factor de disminución para toda la duración t_f de la falla

S_f = factor de división de corriente de falla

I_f = valor eficaz de la corriente de falla simétrica a tierra [A]

El factor de decremento D_f es usado para incluir el efecto de la componente DC. Éste factor determina el equivalente rms (valor eficaz) de la onda de corriente asimétrica para una duración de falla determinada t_f , teniendo en cuenta el efecto de la componente DC inicial y su atenuación durante la falla. En la tabla 3 se pueden observar los valores de D_f

Tabla 3.

Valores del factor de disminución para toda la duración t_f de la falla

Duración de falla, t_f		Factor de decremento, D_f			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	$X/R = 10$	$X/R = 20$	$X/R = 30$	$X/R = 40$
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

Adaptado de: IEEE Power and Energy Society , «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,» de *IEEE Std 80™-2013*, New York, 2013 .

1.2.7 Paso 7 potencial máximo de la malla La elevación de potencial de tierra, GPR, se determina mediante la ecuación 22.

$$GPR = I_G * R_g \quad (22)$$

Donde

I_G = corriente máxima de malla [A]

R_g = resistencia de la malla [Ω]

Si el valor de la máxima elevación del potencial de tierra del diseño preliminar está por debajo de la tensión de toque tolerable por el cuerpo humano, ya no es necesario realizar análisis adicionales. Y se procede a poner a tierra los equipos.

1.2.8 Paso 8 tensiones máximas de malla y paso Para el cálculo de la tensión de paso real se utiliza

$$E_S = \frac{\rho * K_S * K_i * I_G}{L_S} \quad (23)$$

Donde

E_S = tensión de paso [V]

ρ = resistividad del terreno [Ω -m]

K_S = factor de espaciamiento para la tensión de paso

K_i = factor de corrección para la geometría de la malla

I_G = corriente máxima de la malla [A]

L_S = longitud efectiva del conductor para la tensión de paso [m]

Para mallas con o sin varillas de aterrizaje, la longitud enterrada efectiva, L_S , se calcula mediante la ecuación 24

$$L_S = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R \quad (24)$$

Donde

L_C longitud total del conductor de la malla [m]

L_R longitud total de todas las varillas de aterrizaje [m]

El factor de espaciamiento para la tensión de paso, K_S , se calcula por medio de la ecuación 25.

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (25)$$

Donde

h = profundidad a la que se encuentra enterrada la malla [m]

D = espaciamiento entre conductores paralelos [m]

n = número efectivo de conductores paralelos en una malla

El factor de corrección para la geometría de la malla, K_i , se calcula por medio de la ecuación 26.

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n \quad (26)$$

El cálculo de la tensión de contacto real se determina mediante la ecuación 27.

$$E_m = \frac{\rho * K_m * K_i * I_G}{L_M} \quad (27)$$

Donde

E_m = tensión de contacto [V]

K_m = factor de espaciamento para la tensión de contacto

L_M = longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto [m]

Factor de espaciamento para la tensión de contacto, K_m , se calcula de la siguiente forma:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 * h * d} + \frac{(D+2h)^2}{8 * D * d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} * \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (28)$$

Donde

d = diámetro del conductor de la malla [m]

K_{ii} = factor de ponderación correctivo que se ajusta para efectos de conductores internos

K_h = factor de ponderación correctivo que hace hincapié en los efectos de la profundidad de la malla.

El factor de ponderación correctivo, K_{ii} , para mallas con varillas de aterrizaje a lo largo de su perímetro, o para mallas con varillas de aterrizaje en sus esquinas o dentro de la misma es:

$$K_{ii} = 1 \quad (29)$$

Mientras que para mallas sin varillas de aterrizaje o mallas con pocas varillas de aterrizaje, ninguna de ellas colocadas en las esquinas o en el perímetro se tiene que:

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

El valor de K_h es:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (31)$$

Donde, $h_0 = 1\text{m}$ (profundidad de referencia de la malla)

El número efectivo de conductores paralelos en una malla n es:

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d \quad (32)$$

Donde

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} \quad (33)$$

$n_b = 1$ para mallas cuadradas

$n_c = 1$ para mallas cuadradas y mallas rectangulares

$n_d = 1$ para mallas cuadradas, mallas rectangulares y malla en forma de “L”

De otra manera:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 * \sqrt{A}}} \quad (34)$$

$$n_c = \left[\frac{L_X * L_Y}{A} \right]^{\frac{0.7 * A}{L_X * L_Y}} \quad (35)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \quad (36)$$

Donde

L_C = Longitud total del conductor de la malla [m]

L_P = longitud perimetral de la malla [m]

A = área de la malla [m²]

L_X = longitud máxima de los conductores de malla en dirección x [m]

L_Y = longitud máxima de los conductores de malla en dirección de y [m]

D_m = distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la malla [m]

Para mallas sin varillas de aterrizaje o mallas con tan solo algunas varillas dispersas a lo largo de la malla, pero colocada en las esquinas o sobre todo en el perímetro de la malla, la longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto, L_M , es:

$$L_M = L_C + L_R \quad (37)$$

Donde

L_C = longitud total del conductor de la malla [m]

L_R = longitud total de todas las varillas de aterrizaje [m]

Para mallas con varilla de aterrizaje en las esquinas, así como a lo largo de su perímetro y sobre toda la malla, la longitud efectiva del conductor de la malla para la tensión de contacto, L_M , es:

$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R \quad (38)$$

L_r es la longitud de cada varilla de aterrizaje [m]

Los valores calculados de E_m y E_s no deben superar los umbrales de soportabilidad del cuerpo humano. Los valores de las tensiones tolerables de paso y de contacto para un ser humano pueden ser hallados con las ecuaciones descritas en el paso 3: criterios de tensiones de paso y contacto.

La tabla 4 expone valores que corresponden a la máxima tensión de contacto aplicada el ser humano, la cual está dada en función del tiempo de despeje de la falla a tierra, de la resistividad del suelo y de la corriente de falla. Para el cálculo se tuvieron en cuenta los criterios establecidos en la IEEE 80.

Tabla 4.

Máxima tensión de contacto admisible para el ser humano

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEC para 95% de la población. (Público en general)	Máxima tensión de contacto admisible (rms c.a.) según IEEE para personas de 50 kg (Ocupacional)
Mayor a dos segundos	50 voltios	82 voltios
Un segundo	55 voltios	116 voltios
700 milisegundos	70 voltios	138 voltios
500 milisegundos	80 voltios	164 voltios
400 milisegundos	130 voltios	183 voltios
300 milisegundos	200 voltios	211 voltios
200 milisegundos	270 voltios	259 voltios
150 milisegundos	300 voltios	299 voltios
100 milisegundos	320 voltios	366 voltios
50 milisegundos	345 voltios	518 voltios

1.2.9 Paso 9 y paso 10 controles de seguridad Si las tensiones de paso y de contacto calculadas están por debajo de las tensiones de paso y de contacto tolerables por el cuerpo humano, se procede al paso 12. De lo contrario, el diseño preliminar debe ser revisado (paso 11).

1.2.10 Paso 11 acciones de mejora Si se superan los límites tolerables de las tensiones de paso o de contacto, se requiere una revisión del diseño de la malla. Esta revisión puede incluir la reducción del espaciamiento entre conductores, el incremento de electrodos de tierra, el aumento del área ocupada por la malla, etc.

Además, se puede considerar el uso de un material de superficie con una resistividad mayor o el aumento del espesor del material de la capa superficial, para incrementar las tensiones tolerables del cuerpo humano.

Cuando persisten diferencias de potencial peligrosas se deben estudiar diferentes alternativas para aplicarlas donde sea adecuado y cumplir con los criterios para la seguridad adecuada, es donde los tratamientos químicos para el terreno juegan un papel importante para reducir los valores de resistividad de terreno logrando cumplir con los criterios para la seguridad adecuada en los sistemas de puestas a tierra (Sinchi Sinchi , 2017).

1.2.11 Paso 12 poner a tierra todos los equipos Después de satisfacer los requisitos de tensiones de paso y contacto, se deben incluir los conductores requeridos para poner a tierra los equipos a la malla. Hay que tener en cuenta que pueden requerirse conductores y varillas de tierra adicionales cerca de los equipos como descargadores de sobretensión, neutro de transformadores, entre otros (Sinchi Sinchi , 2017).

2. El terreno y la resistencia puesta a tierra

La química del terreno, la cantidad y la calidad de las sales minerales en el contenido pueden influir de modo notable en su resistividad. Los terrenos lluviosos o arcillosos con acentuadas capas de humus, son aquellos que presentan las resistividades más bajas y adicionalmente las menores variaciones en el tiempo.

Los terrenos arenosos, pedregosos y rocosos presentan resistividad muy elevada y varían sus características en el tiempo, según la temperatura y la humedad, en límites muy amplios.

El suelo es de naturaleza heterogénea, varía por su composición y según las condiciones del medio, aunque se pueden clasificar de diversas formas los suelos no se puede atribuir una resistividad específica a un tipo de suelo y si se realizan mediciones se pueden encontrar diversos valores de resistividad.

Un terreno puede ser razonablemente representado por un modelo de estratos paralelos a la superficie del suelo, caracterizado cada uno de ellos por su espesor y un valor constante de resistividad, tal como lo muestra la Imagen 5. El estrato homogéneo más profundo se considera de espesor infinito (no se conoce el espesor de la última capa) (Garcia Marquez).

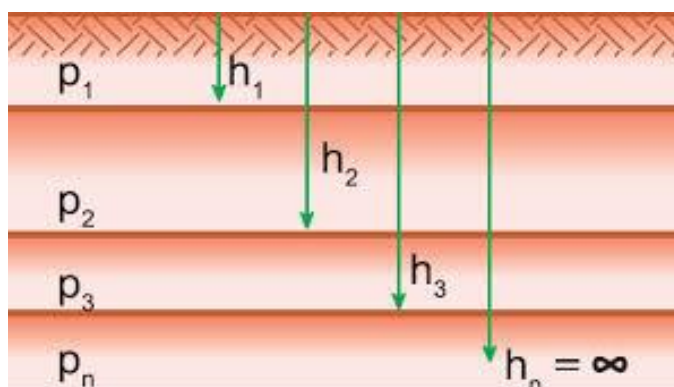


Figura 5. Composición de la tierra

Adaptado de: Rojas G., «manual de sistemas de puesta a tierra,» GEDISTRUT.

La composición del terreno es heterogénea, tanto de forma vertical como horizontalmente. La zonas en las que se instalan los sistemas de puesta a tierra son afectados por los cambios climáticos, esto sumado con la no homogeneidad del terreno hacen que los valores de resistividad del mismo

sean variables de un lugar a otro. En (Garcia Marquez) se describen los factores que influyen en la resistividad del terreno.

- La composición
- Humedad y salinidad
- La temperatura
- La granulometría
- La compacidad
- La estratigrafía

2.1 Composición del terreno

La variación de la resistividad según la composición del terreno es muy acusada, tropezándose con la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas como para saber de antemano el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Incluso para una misma clase de terreno, situada en distintos parajes, la resistividad puede ser sensiblemente diferente.

No hay una definición clara de los diferentes tipos de suelos; por ello no es posible dar valores específicos de resistividades por tipo de suelo. Se han caracterizado franjas de valores característicos para diferentes tipos de suelo en condiciones de humedad normal o natural a baja frecuencia.

La amplia variación de la resistividad ha hecho que se intenten clasificaciones que faciliten tener una primera idea de la “calidad” del terreno (Moreno Ospina, Valencia Velasquez, Cardenas Agudelo, & Villa Acevedo , 2009).

Clase A (arcilloso): suelo blando ácido; de baja resistividad (50 a 200 Ω -m), presenta una acción corrosiva alta.

Clase B (arenoso): suelo seco, fácil de trabajar, mediana resistividad, entre 500 y 1000 Ω .m

Clase C (rocoso): suelo de rocas duras, alta resistividad, normalmente entre 1000 y 10000 Ω .m.

Los valores extremos que se encuentran en la práctica pueden variar de algunas decenas de [Ω .m], para terrenos orgánicos y húmedos a una decena de miles de [Ω .m], para granitos secos.

La tabla 5 muestra valores típicos medios de la resistividad mientras que la tabla 6 proporciona valores orientativos de resistividad, dependiendo de la naturaleza del terreno.

Tabla 5.

Valores típicos medios de la resistividad

Naturaleza del terreno	valor medio de la resistividad en [Ω .m]
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terraplenes cultivables poco fértiles, terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

Adaptado de: R. Garcia Marquez, (s.f.)Puesta a tierra de instalaciones electricas, Barcelona : Marcombo, S.A.

Tabla 6.

Valores orientativos de la resistividad

Naturaleza del terreno	Resistividad en [Ω .m]
Terrenos pantanosos	De algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humos	10 a 150

Naturaleza del terreno	Resistividad en [Ω .m]
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas a grietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 000

2.1.1 Sales solubles y su concentración. La resistividad es inversamente proporcional a la humedad del terreno debido a que la conducción de la corriente en el suelo es esencialmente electrolítica (la conducción de la corriente tiene lugar, principalmente, a través de del electrolito formado por las sales y el agua habitualmente contenida en el terreno).

La resistividad del agua está gobernada por las sales disueltas en ella, por ende, la resistividad del suelo es influenciada por la cantidad y tipos de sales disueltos en el suelo, condición en la cual se presenta la conducción electrolítica. La cantidad de agua de agua varía de acuerdo con el clima y la época del año, la temperatura y la existencia de depósitos subterráneos.

En la Imagen 6 se refleja como la cantidad de sales disueltas afectan la resistividad.

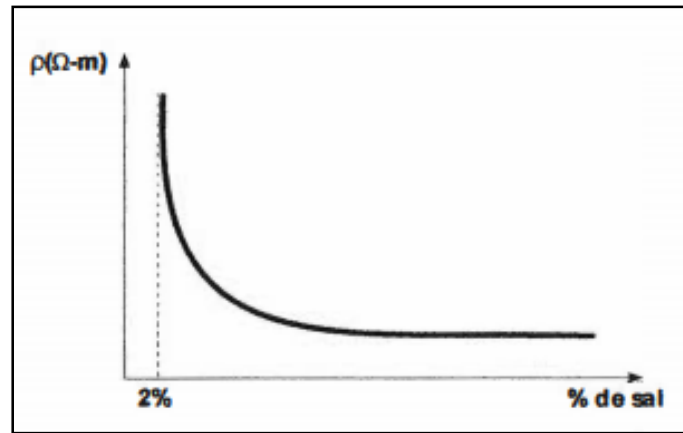


Figura 6. Variaciones de la resistividad del terreno en función del porcentaje de sal

Adaptado de: Tarazona Tinoco E. I., (2008) Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos, Lima: Universidad Nacional de Ingenieria,.

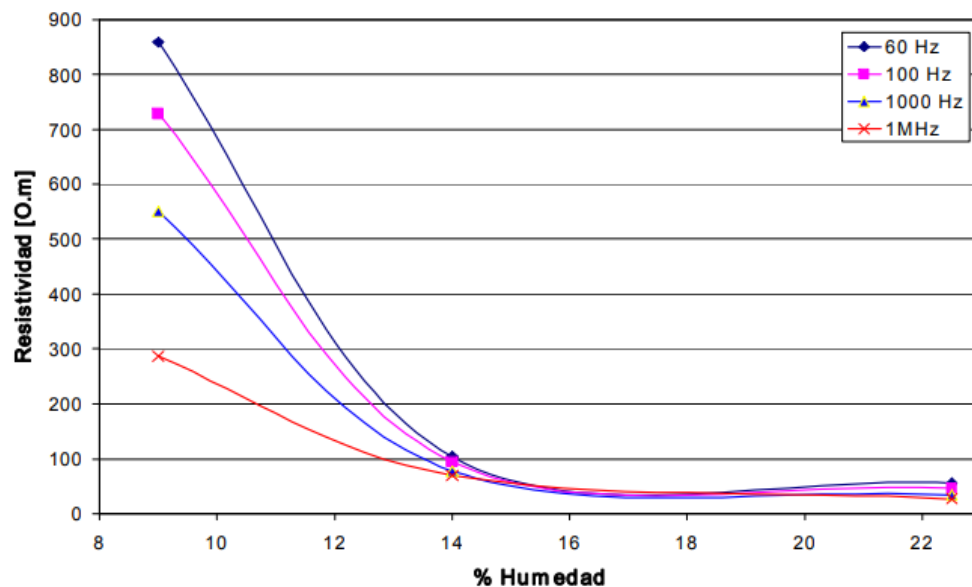


Figura 7. Variación de la resistividad del suelo con respecto a la humedad a diferentes frecuencias.

Adaptado de. EPM, Area Ingenieria Distribucion , (2008) «Medida de resistividad electrica del suelo,».

2.1.2 Temperatura. Un aumento de temperatura, dentro de los rangos normales de temperatura ambiente, influye sobre la velocidad de movimiento de los iones, al facilitar la conducción eléctrica y, por lo tanto, disminuye la resistividad. Sin embargo, una temperatura más elevada, cercana a los 100°C, provoca evaporación, disminuye la humedad del suelo y aumenta la resistividad.

La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se acusa mucho al alcanzarse los 0°C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrólitos.

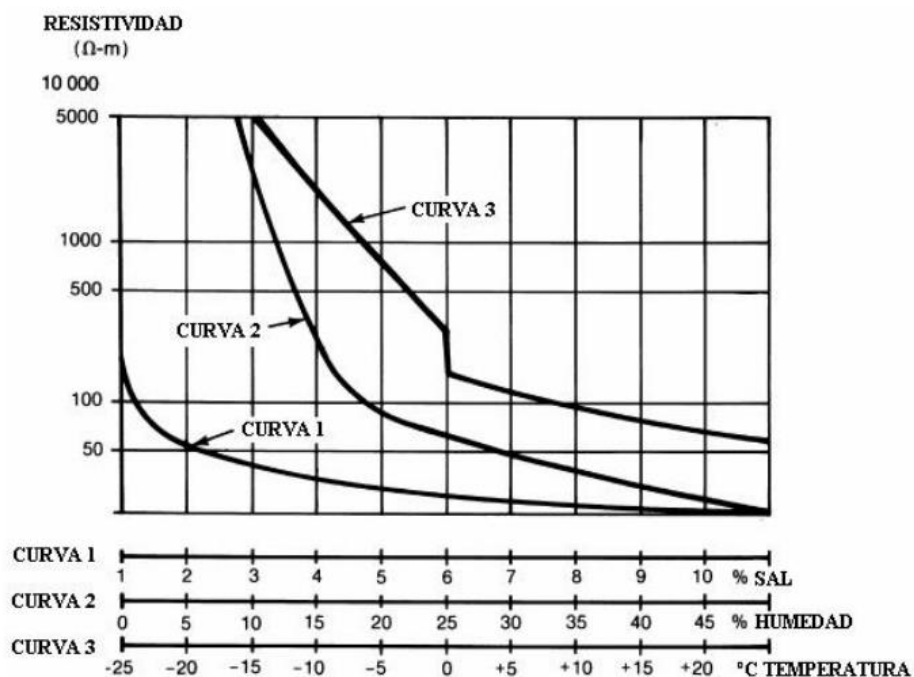


Figura 8 Variaciones de resistividad por diversos factores. Adaptado de. EPM, Area Ingenieria Distribucion , (2008) «Medida de resistividad electrica del suelo,».

2.1.3 Granulometría. Es un elemento importante que influye, a la vez, sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y también sobre la calidad del contacto con los electrodos,

incrementándose la resistividad con el mayor tamaño de los granos. Ésta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente a la arena y que el de esta supere al de la arcilla.

Los suelos de grano grueso (gravas) se presentan mal al establecimiento de buenas redes de tierra, circunstancia que se puede paliar rodeando la superficie de los electrodos de un cierto espesor de tierra fina o de otro material relativamente conductor.

2.1.4 Compacidad. La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste.

2.1.5 Estratigrafía. La resistividad total de un terreno es la resultante de las correspondientes a las diversas capas que lo constituyan. Puede suceder que una sola capa presente una resistividad tan baja que la influencia de las demás sea impredecible, tal como cuando se alcanzan zonas de agua o de nivel freático. Por lo anterior es entendible que la resistividad de las capas superficiales de un terreno presente variaciones estacionales, esta acción puede hacerse notar hasta una profundidad de varios metros, en condiciones climáticas extremas y prolongadas.

La resistividad del terreno es una magnitud variable y que el único camino aceptable para conocer su valor consistirá en medirla, lo que permitirá establecer su magnitud en las condiciones existentes en cada caso.

2.2 Influencia de los electrodos de puesta a tierra en la resistencia

En (Tarazona Tinoco , 2008) se hace una descripción de los modelos más usados para un electrodo de puesta a tierra y su relación con la resistencia de puesta a tierra. Estos modelos se describen brevemente a continuación:

2.2.1 Electrodo puntual semiesférico de radio “r”. El modelo de electrodo puntual, es un modelo básicamente teórico, su importancia radica en la posibilidad de deducir a partir de ella la resistencia aproximada de otros modelos.

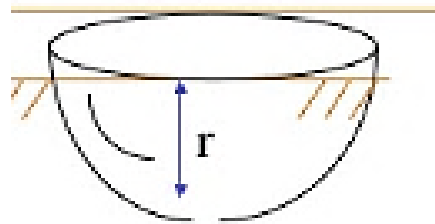


Figura 9 Electrodo puntual semiesférico radio ‘r’

Adaptado de: Falcon Chavez, J. L. (2016) *El electrodo de puesta a tierra*, Copper Alliance,.

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (39)$$

2.2.2 Varilla enterrada verticalmente a ras de la superficie

- Para suelos de un solo estrato

La resistencia de contacto de una varilla está dada por la fórmula de Dwight

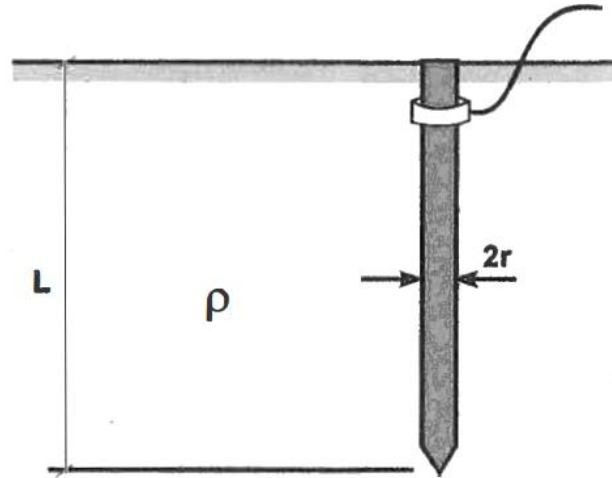


Figura 10 Electrodo vertical. Adaptado de. Tarazona Tinoco E. I., (2008) Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos, Lima: Universidad Nacional de Ingenieria,.

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \left(\ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right) \quad (40)$$

Si el suelo es de un solo estrato, las ecuaciones siguientes pueden también usarse. Los márgenes de diferencia son pequeños

$$R = \frac{\rho}{2L} \operatorname{arc} \sinh \left(\frac{L}{r} \right) \quad (41)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{2L}{r} \right) \quad (42)$$

Si la varilla está en un suelo de dos estratos, en las ecuaciones anteriores; la resistividad a indicar será la aparente (***Pa***)

$$R = \frac{Pa}{2\pi L} \ln \left(\frac{2L}{r} \right) \quad (43)$$

- Varilla vertical enterrada a una profundidad “h”

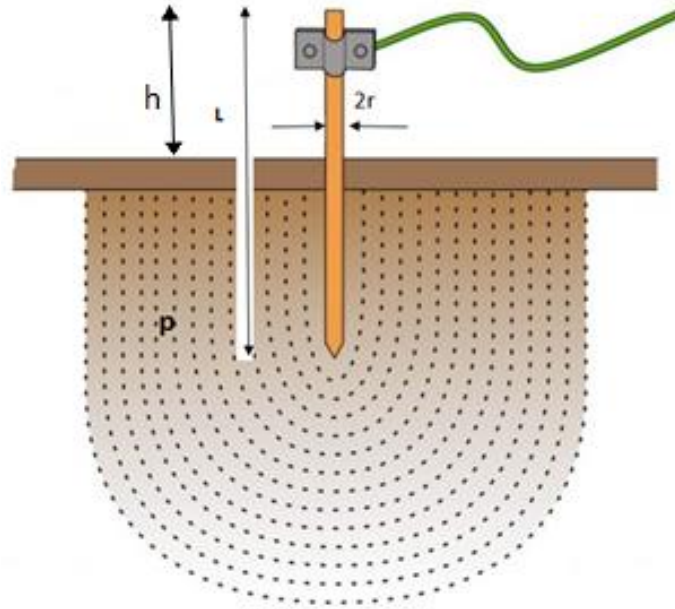


Figura 11 Electrodo vertical enterrado a una profundidad h

Adaptado de: Falcon Chavez, J. L. (2016) *El electrodo de puesta a tierra*, Copper Alliance,.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{L}{r} \sqrt{\frac{3L+4h}{L+4h}} \right) \quad (44)$$

El objetivo de enterrar una profundidad “h” al electrodo debajo de la superficie es para disminuir los posibles gradientes de potencial sobre la superficie del terreno en los contornos de la barra.

2.2.2.1 Electrodo horizontales. La resistencia de aterramiento de un conductor o electrodo enterrado horizontalmente en el suelo a una profundidad “h” metros se calcula:

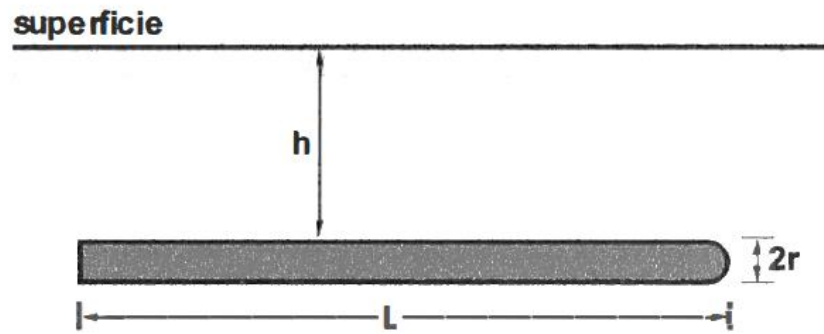


Figura 12 Electrodo horizontal. Adaptado de: Tarazona Tinoco E. I. (2008), Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos, Lima: Universidad Nacional de Ingenieria,.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left[\ln \left(\frac{2L^2}{rh} - 2 + \frac{2h}{L} - \left(\frac{h}{L} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{L} \right)^4 \right) \right] \quad (45)$$

También se puede utilizar, en forma aproximada:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L^2}{hr} \quad (46)$$

2.3 Técnicas de reducción de la resistencia puesta a tierra

Existen diferentes técnicas de reducción de la resistencia del terreno buscando cumplir las condiciones de seguridad de los sistemas de puesta a tierra, la variación del sistema de electrodos permite en algunos casos mejorar estas condiciones, dichas condiciones se describen a continuación.

Cuando la resistividad del terreno es muy elevado, y en donde los electrodos no pueden enterrarse profundamente debido a rocas se utilizan diversos métodos para mejorar las condiciones. Los tratamientos químicos surgen como una solución para disminuir la resistencia de

puesta a tierra evitando utilizar una gran cantidad de electrodos o en caso donde las modificaciones al sistema de electrodo no alcanzan los valores requeridos para un correcto funcionamiento.

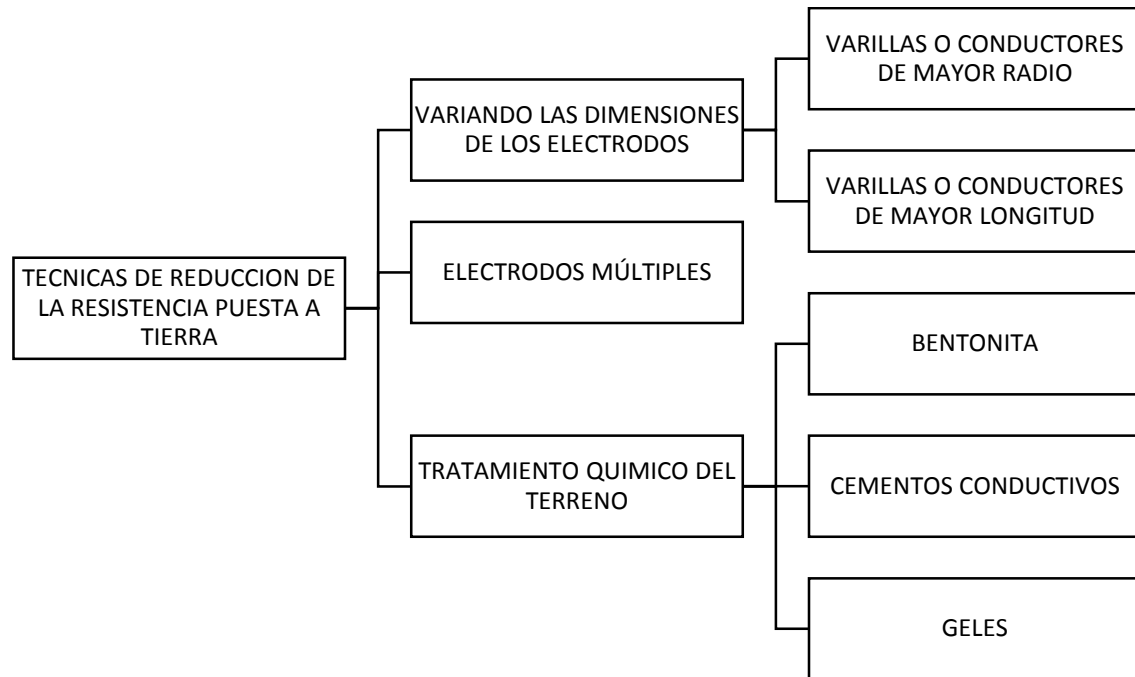


Figura 13 Técnicas de reducción de la resistencia de puesta a tierra

2.3.1 Variando las dimensiones de los electrodos. En la ecuación (43) es fácil advertir que como ésta depende de variables como: la longitud del electrodo (L); el radio de su sección recta “ r ” y de la resistividad del suelo (ρ); entonces puede conseguirse cierta reducción modificando “ L ” y “ r ”.

2.3.1.1 Varillas o conductores de mayor radio. El radio del electrodo está en función a la resistividad y profundidad de las capas del terreno, obviamente se prefiere colocar el electrodo dentro de la capa de menor resistividad.

De la ecuación (43) al aumentar el radio (R) del electrodo se puede notar una disminución en el valor de la resistencia. La gráfica siguiente muestra la variación de la resistencia al modificar el diámetro.

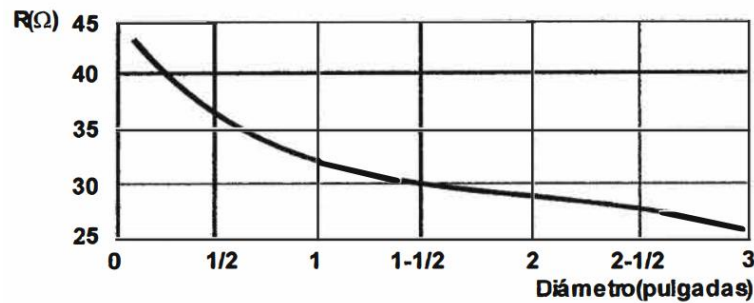


Figura 14 Variación de la resistencia al modificar el diámetro

Adaptado de: Tarazona Tinoco E. I., (2008) Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos, Lima: Universidad Nacional de Ingenieria,.

Experimentalmente se ha comprobado que usando varillas de 19mm en lugar de varillas de 13mm se logra una reducción en la resistencia a tierra de hasta un 10% máximo.

2.3.1.2 Varillas o conductores más largos. Partiendo del mismo principio estudiado del efecto del radio del electrodo, también podría pensarse que incrementando el largo del mismo disminuye la resistencia. De modo idéntico usando la ecuación (43) se nota que al aumentar la longitud la resistencia disminuye.

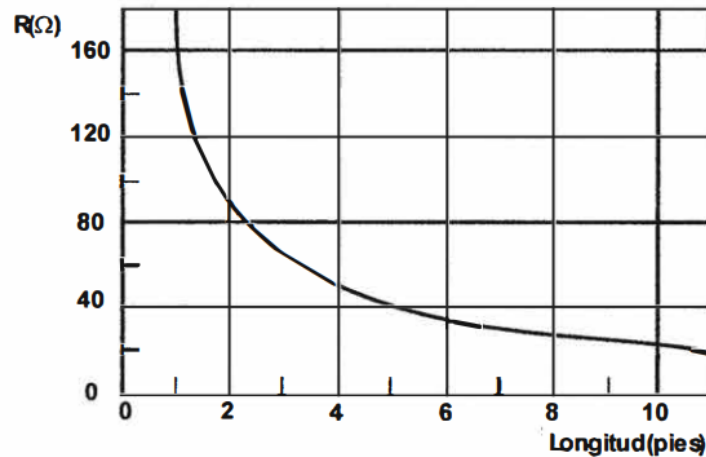


Figura 15 Variación de la resistencia con la longitud de la varilla. Adaptado de: Tarazona Tinoco E. I., (2008) Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos, Lima: Universidad Nacional de Ingenieria,.

Para los casos donde las capas superiores de la tierra son de arena y donde a gran profundidad se encuentra una capa de terreno húmedo, existen modelos de varillas que se acoplan unas a otras para lograr longitudes hasta de 15 m.

Por lo general duplicando el largo, se obtiene una reducción del 40% de resistencia a tierra.

Otra ventaja es que con el uso de varillas largas, que se combinan con electrodos horizontales, se controla mejor el gradiente de potencial en la superficie. Aun así esta no es todavía una buena alternativa (Tarazona Tinoco , 2008).

2.3.2 Electrodo múltiples Colocar dos varillas en paralelo es una manera efectiva de bajar la resistencia. Pero, las varillas no deben estar colocadas muy cerca una de otra, debido a los efectos mutuos que afectan la impedancia del circuito.

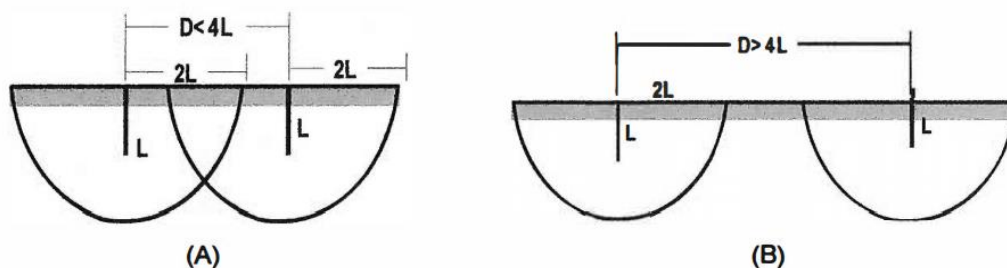


Figura 16 Electrodos múltiples Adaptado de: Tarazona Tinoco E. I., (2008) Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos, Lima: Universidad Nacional de Ingenieria,.

En la figura anterior en el caso (A) si los conductores están muy cerca uno del otro se produce un efecto mutuo entre ellas, mientras que en (B) hay una distancia suficiente entre ellas para que esto no ocurra

Colocar varias varillas en paralelo disminuye el valor de la resistencia total. Pero debe tenerse en cuenta que cuando se utilizan múltiples electrodos, cada electrodo adicional no contribuye con una reducción proporcional en la resistencia del circuito (Tarazona Tinoco , 2008).

2.3.3 Tratamiento químico del terreno Las tensiones de paso y contacto reales deben ser menores que los respectivos límites máximos permisibles para obtener seguridad. Si los cálculos basados en el diseño preliminar indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas dentro del sistema se pueden realizar técnicas de reducción de la resistencia de puesta a tierra las cuales se aplican a las varillas o conductores como se estudió anteriormente.

Si luego de aplicar dichas técnicas se siguen presentando diferencias de potencial peligrosas se deben estudiar diferentes alternativas para aplicarlas donde sea adecuado y cumplir con los criterios para la seguridad adecuada. La alternativa que se plantea a continuación es el tratamiento químico del suelo, uso de compuestos que mejoran las puestas a tierra.

El tratamiento químico del suelo surge como un medio de mejorar y disminuir la resistividad del terreno, sin necesidad de utilizar gran cantidad de electrodos o cuando los electrodos de tierra ya no se pueden enterrar más debido a la dureza del suelo. Los diferentes tratamientos químicos permiten disminuir la resistividad de cualquier tipo de suelo desde un 15% hasta un 90%, dependiendo del tipo y textura del terreno (Tarazona Tinoco , 2008).

3. Compuestos que mejoran las puestas a tierra

A menudo es imposible lograr la reducción deseada en la impedancia o resistencia de puesta a tierra por adición de más conductores o varillas. Parte de las soluciones utilizadas consisten en incrementar el diámetro equivalente de los conductores o electrodos, por modificaciones del suelo que rodea a los conductores (a través de tratamientos químicos o físicos), puesto que el volumen de suelo más cercano al electrodo comprende la mayor parte de la resistencia de puesta a tierra podrá ser reducida con tratamientos, según lo establecido en IEEE-142 (Society, 2007) desde 15% hasta el 90%, dependiendo del tipo y textura del suelo artificial utilizado.

El relleno ideal debe compactarse fácilmente, ser no corrosivo y a la vez buen conductor eléctrico. La bentonita entre otros compuestos como el sulfato de magnesio o de sulfato de cobre, o de compuestos químicos patentados.

La norma IEC 62561-7 (UNE- Normalizacion Española, 2018) expone los requisitos que deben cumplir los compuestos que mejoran las puestas a tierra creando una baja resistencia. “los

compuestos que mejoran las puestas a tierra deben diseñarse y fabricarse de manera que durante su uso normal su funcionamiento sea fiable y no peligroso para las personas y el medio ambiente.

La elección de un material depende de su capacidad de ajustarse a los requisitos de una aplicación particular.

Los materiales de los compuestos que mejoran la puesta a tierra deben ser químicamente inertes en el subsuelo. No deben contaminar el medioambiente. Deben proporcionar un entorno estable en términos de propiedades físicas y químicas y tener baja resistividad. Los compuestos que mejoran la puesta a tierra no deben ser corrosivos para los electrodos de tierra que se utilicen.

La conformidad se verifica por los ensayos de lixiviación, determinación de azufre, determinación de la resistividad y corrosión (UNE- Normalizacion Española, 2018).

En este capítulo hace referencia a algunos productos del mercado utilizados para mejorar las condiciones del terreno en las puestas a tierra, en las tablas 7 y 8 se presentan características importantes teniendo en cuenta la información suministrada por los proveedores de los productos tenidos en cuenta que permite hacer una comparación inicial antes de profundizar en cada uno de estos. La tabla 7 muestra las propiedades más importantes de los compuestos mientras que en la tabla 8 se evidencia una comparación de los precios y presentación en los que estos productos se pueden encontrar actualmente en el mercado.

Tabla 7.

Propiedades mas importantes de los productos

Tierras artificiales	Productos	Presentación	Resistividad $\Omega\text{-m}$	pH	Densidad gr/cm^3
Cementos conductivos	Bentonita		2.5 - 3.6	N/D	4.23
	Hidrosolta		0.3 – 0.4	7.5 – 13.5	1.2 – 1.6
	Conducrete		0.306-0.638	Neutro (7)	1.4-1.7

Tierras artificiales	Productos	Presentación	Resistividad $\Omega\text{-m}$	pH	Densidad gr/cm^3
	Celec		0.48-0.1	10.9 - 12.1	1.2
	Ground Lightning		0.25-0.38	11-12	1.4-1.8
	Favigel		0.5	7.6	0.91
Geles	Thorgel		0.2-0.5	9 – 10	1 – 1.40

Tierras artificiales	Productos	Presentación	Resistividad $\Omega\text{-m}$	pH	Densidad gr/cm^3
	Protegel		0.2-0.5	7.3	0.9-1.5

Tabla 8.

Comparación, presentación y costo

Marca	Producto	Presentación	Costo por unidad
Bentonita	Natural	Bulto de 30 kg	\$ 85000
Hidrosolta	Cemento conductivo	Bulto de 15 kg	\$ 167000
Conducrete	Cemento conductivo	Bulto de 25 kg	\$ 70000
Celec	Cemento conductivo	Bulto de 25 kg	\$ 112500
Ground Ligthning	Cemento conductivo	Bulto de 25 kg	\$ 140000
Favigel	Gel	Bulto de 25 kg	\$ 190000
Thorgel	Gel	Vienen 2 empaques de 5 kg cada uno	\$ 98900
Protegel	Gel	Vienen 3 empaques de 6 kg cada uno	\$ 121000
NOTA: El precio por kilogramo de estos productos oscila entre (\$3000-\$10000)			

3.1 Suelos Artificiales

Es la respuesta de la industria a la necesidad de obtener bajas resistencias de puesta a tierra (Casas Ospina, 2008).

3.3.1 Características de un suelo artificial

- Que no tenga factores de riesgo para quienes lo manipulen o para los animales
- Que sea fácil de aplicar
- Que retenga la mayor humedad posible, el mayor tiempo posible
- Que su humedad relativa no exceda el 10%
- Que no requiera hidratación previa con agitación
- Muy estable
- Fácil de almacenar, compactar y transportar
- Costo no muy elevado
- Que no dañe los suelos naturales donde se aplique
- Que se introduzca fácilmente entre las grifas o fisuras
- Procesos químicos originados en la mezcla sean reversibles
- Alta capacidad de intercambio catiónico
- Elevada superficie específica
- Insoluble en agua
- Tixotrópico
- PH alcalino (mayor de 7)

- Permitividad mayor de 10
- Baja resistividad
- Alta conductividad térmica

3.2 Bentonita

El empleo de la BENTONITA SÓDICA mejora el contacto entre los electrodos y el terreno y las propiedades eléctricas del terreno en las cercanías de los electrodos. La BENTONITA es un mineral arcilloso su estructura se basa en el apilamiento de iones de oxígeno e hidroxilos.

La presencia de la superficie interlaminar, así como de una débil carga en la misma, son características esenciales de este grupo de minerales. Como consecuencia de ello son capaces de incluir en ella, no solo cationes hidratados, sino también agua u otros líquidos polares, dando mayor separación de las capas. A esto se denomina hinchamiento. Esta es una de las propiedades más importantes para los distintos usos industriales de la bentonita. Aun cuando las distintas variedades de bentonitas difieren mucho entre sí, en lo que respecta a sus propiedades respectivas, es posible clasificarlas en dos grandes grupos la bentonita sódica y la bentonita cálcica.

Cuando el catión interlaminar es el Na, las bentonitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales que son la que le dan el aspecto de gel. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio, su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

La bentonita sódica formada tendrá mejores propiedades eléctricas, y mayor capacidad de absorción de agua y un valor de PH mayor que las bentonitas cálcicas. Esto último favorece la

formación de un ambiente suficientemente alcalino para evitar los riesgos por corrosión en el caso de electrodos de hierro (Tarazona Tinoco , 2008) (Cordova Maas, 2011).

El uso de la BENTONITA en tomas de tierra se basa en dos de sus propiedades fundamentales

- Su baja resistividad de 2.5 - 3.6 $\Omega.m$
- Su alta capacidad de hinchamiento que puede llegar en valor medio a 20 litros de mezcla por litro de bentonita sódica.



Figura 17 Bentonita sódica

Adaptado de. Cordova Maas B. W. R., (2011) Aplicacion de pozos de materiales de baja resistividad en subestaciones electricas para reducir la resistencia de la red de tierras, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala,.

3.2.1 Baja resistividad de la bentonita. La resistividad de la bentonita en estado de papilla con agua es baja moviéndose alrededor de 2.5 – 3.6 $\Omega.m$ con lo cual será un buen relleno mejorador del terreno, su acción se extiende únicamente a la mejora de la zona donde físicamente se deposita sin penetrar en el terreno circundante.

Desde el punto de vista pues del descenso de la resistencia de tierra es un magnifico relleno capaz de hacer descender moderadamente la resistencia de tierra.

3.2.2 Alta capacidad de hinchamiento. La bentonita llega a una capacidad de hinchamiento media de unos 20 litros por litro de bentonita solida a lo que es lo mínimo unos 25 litros por kilogramo de bentonita. En situación de máximo hinchamiento la mezcla que se genera es demasiado líquida para su actuación como relleno en tomas de tierra por esto es más adecuada una proporción de 1 litro de bentonita por 6 o 7 litros de agua.

Con esto se genera una mezcla relativamente pastosa y estable que actuara como un relleno que nos genera un contacto franco entre el electrodo de tierra y la tierra del entorno sin dejar huecos ni generar discontinuidad eléctrica.

La conjunción de estas dos características hace que sea un relleno de muy buenas prestaciones ya que baja la resistencia eléctrica y además asegura un magnifico contacto entre el electrodo y la tierra; además el agua captada es retenida muy firmemente por la bentonita de tal manera que solo se pierde cuando se somete a calor intenso (en cuyo caso perdería todas sus propiedades) (Tarazona Tinoco , 2008) (Cordova Maas, 2011).

3.2.3 Instrucciones de instalación

- En instalaciones de Sistemas de Puesta a Tierra Horizontal y Vertical.
- Para la preparación de la misma tierra extraída del hoyo o zanja previa tamizada (1m³ de tierra x 6 sacos de Bentonita Sódica).
- Para la preparación con tierra vegetal (1m³ de tierra vegetal x 3 sacos de Bentonita Sódica)
- Para trabajos directos con el electrodo mallas, aplicar bentonita sódica con un espesor de 15 a 20 cm, cubriendo todo el área de zanja, luego llenar con tierra de chacra humedeciendo y compactando por capas.

3.3 Hidrosolta

Hidrosolta es un suelo artificial de baja impedancia y alta capacitancia que se usa para conformar un circuito RC en sintonía con la energía de fallas a tierra provenientes de una descarga eléctrica o estática.

La utilización de Hidrosolta en los sistemas de puesta a tierra conlleva en beneficios económicos desde un comienzo debido a que las dimensiones del sistema disminuyen, adicionalmente disminuye la corrosión del cobre y mantiene o mejora las condiciones iniciales del sistema aumentando su vida útil (Hidrocol & Cia Ltda Cl).

Es una mezcla de óxido de metales tenso-activos con las siguientes características

- Conductor anisótropo, iguales características en diferente dirección.
- Extraordinaria movilidad de carga y velocidad de polarización.
- tenso – activación, lo cual conlleva que a mayor energía de entrada presenta, mayor capacidad de almacenamiento.
- no necesita mantenimiento debido a que es electro Valente con el cobre lo cual evita la corrosión manteniendo la humedad
- presenta una resistividad muy baja $0.3 \Omega.m$
- dominio de energías transitorias
- retención de la humedad
- fácil de instalar

3.3.1 Instrucciones de instalación. La HIDROSOLTA no se puede mezclar con otros tipos de elementos como tierra negra, azufre, carbón, etc.; puesto que disminuye o anula su efectividad. Debe utilizarse disolviéndose solo con agua y la cantidad mínima por foso debe ser de una dosis.

3.3.2 Pozo vertical capacitivo

- Excavar un foso circular de acuerdo a la tabla 9.
- Disolver 3 kg de HIDROSOLTA en un balde con 5 litros de agua e impregne las paredes del foso o con esta mezcla.
- Preparar una mezcla homogénea en proporción de una dosis de HIDROSOLTA por 5 litros de agua hasta llegar a una consistencia espesa.
- Ubicar el dispositivo de puesta a tierra en el centro del foso, rellenar el núcleo del dispositivo con tierra y verter la mezcla homogénea en el espacio entre las paredes y el dispositivo, dejando libre los últimos 40 a 60 cm del foso.
- Conectar la lámina de cobre del dispositivo al cable conductor a tierra usando soldadura exotérmica.
- Rellenar con suelo natural, compactando únicamente cuando se termine de tapar el foso.

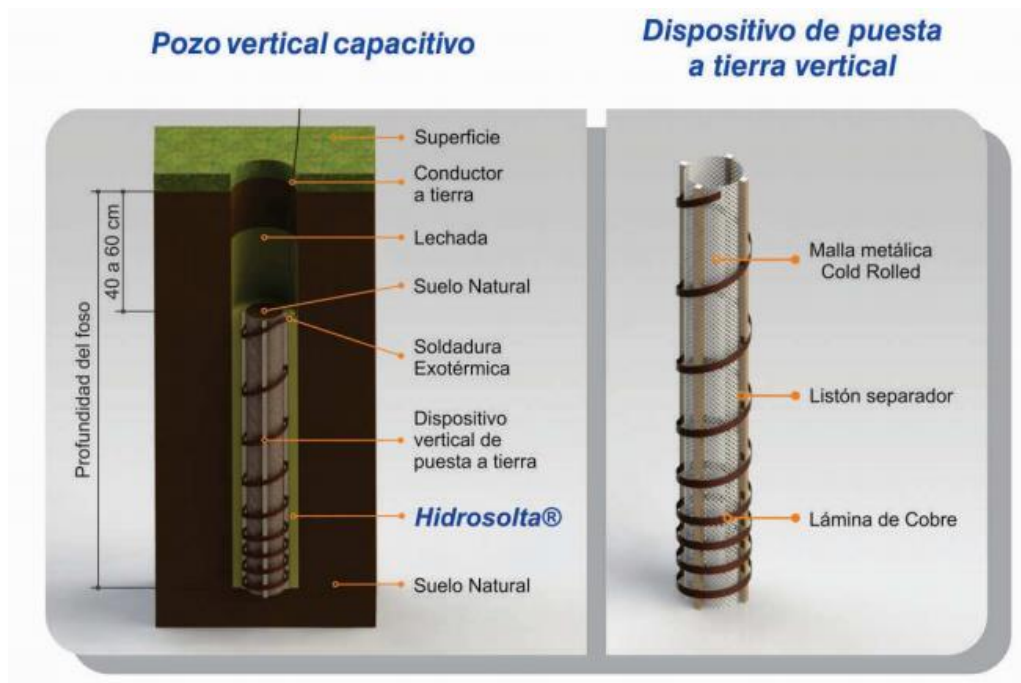


Figura 18 Instalación en pozo vertical – HIDROSOLTA. Adaptado de. Hidrocol & Cia Ltda CL, «HIDROSOLTA suelo artificial para sistemas de puesta a tierra,» Recuperado e: <http://www.hidrosolta.com/>.

3.3.3 Pozo plano capacitivo

- Excavar un foso circular de acuerdo a la tabla 9.
- Disolver 3 kg de HIDROSOLTA en un balde con 5 litros de agua e impregne las paredes del foso o con esta mezcla.
- Preparar una mezcla homogénea en proporción de una dosis de HIDROSOLTA por 3 litros de agua hasta llegar a una consistencia espesa.
- Ubicar en el fondo del foso una malla metálica que ocupe toda la base y verter por encima una capa de aproximadamente 2.5 cm de la mezcla homogénea de HIDROSOLTA, cubriéndola completamente.

- Sobre la capa de HIDROSOLTA colocar cilindros de PVC de 2" x 1.5 cm de altura. Como alternativa se pueden reemplazar los cilindros de PVC por listones de madera o largueros en PVC.
- Conectar la lámina de cobre del dispositivo de puesta a tierra al cable conductor a tierra por medio de soldadura exotérmica.
- Colocar el dispositivo de puesta a tierra apoyando en los cilindros de PVC, impidiendo que la malla y la lámina de cobre del dispositivo de puesta a tierra entren en contacto.
- Extender otra capa de aproximadamente 2.5 cm HIDROSOLTA mezclada, cubriendo completamente la lámina de cobre del dispositivo de puesta a tierra.
- Colocar otra malla metálica que cubra la HIDROSOLTA sobre el dispositivo de puesta a tierra, impidiendo que la malla y la lámina de cobre del dispositivo entren en contacto.
- Rellenar con suelo natural, compactando únicamente cuando termine de tapar el foso.

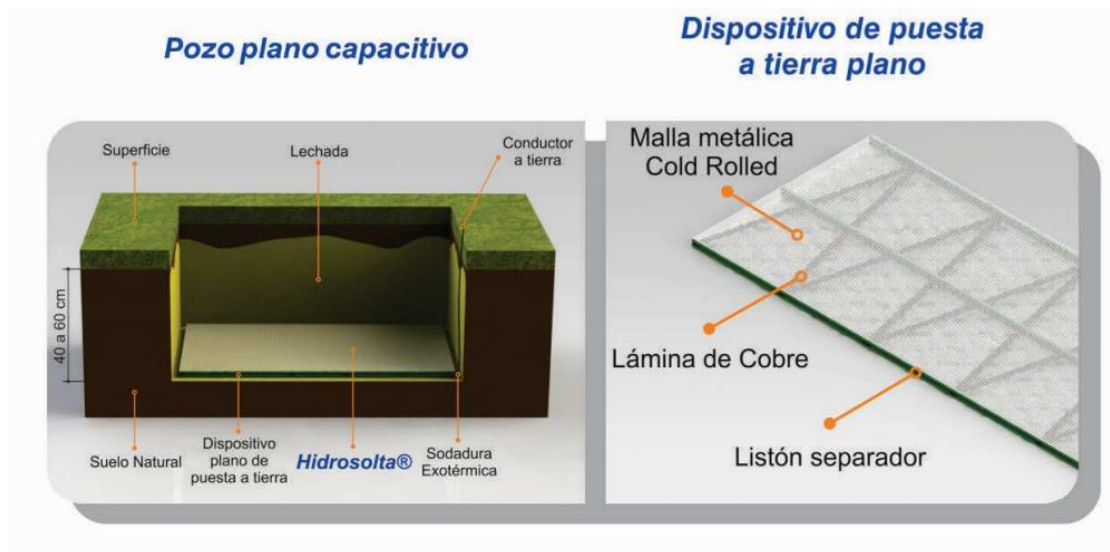


Figura 19 Instalación en pozo horizontal – HIDROSOLTA. Adaptado de: Hidrocol & Cia Ltda Cl, «HIDROSOLTA suelo artificial para sistemas de puesta a tierra,» Recuperado de: <http://www.hidrosolta.com/>.

Tabla 9.

Dimensiones del SPT sugerido por HIDROSOLTA

DISEÑO SPT POR CAPCITANCIA					
CARGAS		Hasta 1 KW	1-5 KW	5-10 KW	10-75 KW
Cantidad de hidrosolta		1 Dosis	2 Dosis	3 Dosis	6 Dosis
POZO VERTICAL CAPACITIVO	Profundidad del foso	85 cm	110 cm	135 cm	200 cm
	Diámetro del foso	30 cm	30 cm	30 cm	31 cm
	Altura del dispositivo	25 cm	50 cm	75 cm	140 cm
POZO PLANO CAPACITIVO	Profundidad del foso	60 cm	60 cm	60 cm	60 cm
	Dimensiones del foso	50*55 cm	55*95 cm	75*95 cm	100*95 cm
	Dimensiones del dispositivo	45*50 cm	50*90 cm	70*90 cm	95*90 cm

A continuación en la tabla 10 se muestran las características físicas y químicas del producto.

Tabla 10.

Características producto HIDROSOLTA

Propiedades físicas y químicas	
Resistividad	0.3 – 0.4 Ω .m
pH	7.5 – 13.5
Densidad	1.2 – 1.6 gr/cm ³
Calor específico	2.7 J/g

3.4 Conducrete

Es un material a base de cemento y carbón que reduce de manera significativa la impedancia y mejora el desempeño, confiabilidad y durabilidad de los sistemas de tierras. Esto les da una mayor protección a sus equipos contra descargas eléctricas y descargas atmosféricas.

El CONDUCRETE es vendido en forma de polvo, es fácil de instalar en seco, directo de la bolsa o es mezclado con agua en forma de suspensión o semi-liquida y es bombeado dentro de una zanja o dentro del pozo vertical (SAE, Soluciones innovadoras sistemas de tierras físicas).

3.4.1 Características y beneficios. Libre de mantenimiento: los electrodos del CONDUCRETE no requieren de mantenimiento durante su vida útil. El CONDUCRETE no requiere rellenos adicionales de material con las sales u otros productos que así lo requieren.

Ambientalmente neutral/ PH neutro: el CONDUCRETE no tiene impacto negativo en el ambiente, ha sido aprobado para un uso por agencias reguladoras en muchos lugares donde son particularmente sensibles a la contaminación ambiental, donde la contaminación cruzada de acuíferos subterráneos es una preocupación latente.

Es impermeable al agua y su pH es neutro al endurecer y no corroerá a los conductores de cobre

El CONDUCRETE tiene niveles de solubilidad muy por debajo de los límites máximos de solubilidad permitidos

Expectativa de vida extendida: puede reducir la corrosión electrolítica. Puede extender la vida útil de los sistemas de tierras por un factor de hasta 10. Los electrodos protegidos por el CONDUCRETE pueden llegar a durar un estimado de 25 años para muchos casos.

Las fotos a continuación contienen dos muestras de cobre una de ellas sin protección alguna y la otra encapsulado en CONDUCTRETE. El CONDUCTRETE reduce la corrosión electrolítica alrededor de un 86%.



Figura 20 Comparación de muestra de cobre sin protección vs protegida con CONDUCTRETE. Adaptado de: SAE, Soluciones innovadoras sistemas de tierras físicas, «SAE,» Recuperado de: <https://www.saeinc.com/>.

3.4.2 Resistencia a la compresión y baja contracción.. El CONDUCTRETE tiene una resistencia a la compresión de 21 mpa (3,045 psi) después de 28 días, esto significa que los electrodos del CONDUCTRETE son permanentes, no se diluirán y soportarán corrientes de falla a tierra de alta intensidad.

El CONDUCTRETE según pruebas muestra que tiene una contracción del 0.015% a los 28 días.

3.4.3 Resultados de pruebas de alta corriente/alto voltaje. Pruebas independientes realizadas en laboratorios de alta tensión a muestras prefabricadas de CONDUCTRETE indican que son capaces de soportar fallas de 1682V/688 Amperes con duración de 500 ms.

Absorción de agua: Es un material altamente higroscópico, pruebas de laboratorio muestran que el CONDUCTRETE absorberá hasta un 34% de su peso en agua. Esta ventaja es especialmente

importante para ambientes áridos. Constantemente está hidratándose y por lo tanto absorbe la humedad disponible del subsuelo que lo rodea. El resultado es un electrodo que ofrece una resistencia más estable a tierra a través del tiempo, aún en épocas de sequía.

Baja impedancia: La habilidad de proveer baja impedancia es crítica para disipar la energía de los rayos rápidamente de manera que proteja los activos contra daños. La baja impedancia del CONDUCRETE se debe a la baja resistencia y baja inductancia de una mezcla única de materiales.

Menor resistencia: Una menor Resistencia resulta en una mayor Conductividad. Pruebas independientes de laboratorios indican que el CONDUCRETE tiene una muy baja resistividad (3.06 ohm-cm) (SAE, Soluciones innovadoras sistemas de tierras físicas).

3.4.4 Instrucciones de instalación

3.4.4.1 Instalaciones horizontales. Hacer una zanja a la profundidad, ancho y longitud diseñada, compactar el fondo de la zanja. Típicamente la zanja es de 0.5 m de ancho y 0.6 m de profundidad. La longitud de la zanja es determinada por la resistividad del suelo en el sitio y el valor de la resistencia requerido.

Colocar el cable de cobre en el centro de la zanja

Colocar el cemento conductivo en seco sobre el cable, cubrir el cable con un espesor de 4cm con CONDUCRETE.

Cubrir con una pala un nivel de 10 cm de tierra suelta del lugar sobre el cemento conductivo

Rellenar el resto de la zanja usando el resto del suelo local que se excavo

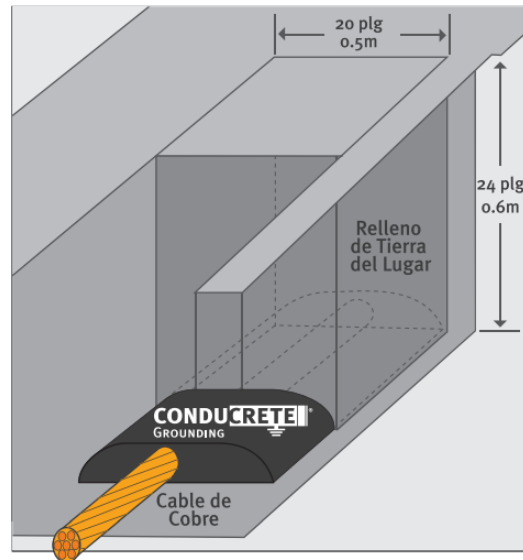


Figura 21 Instalación horizontal- CONDUCTRETE. Adaptado de: SAE, Soluciones innovadoras sistemas de tierras físicas, «SAE,» recuperado de: <https://www.saeinc.com/>.

3.4.4.2 Instalaciones verticales. Perforar un hoyo a la profundidad y diámetro determinados por la resistividad del suelo en el sitio y el valor requerido de resistencia.

Colocar un conductor en medio del hoyo perforado

Mezclar CONDUCTRETE en forma de suspensión con agua (16 litros de agua/bolsa de 24.9 kg) y bombearlo al hoyo desde el fondo para desplazar cualquier lodo o agua, conforme el hoyo se llena.

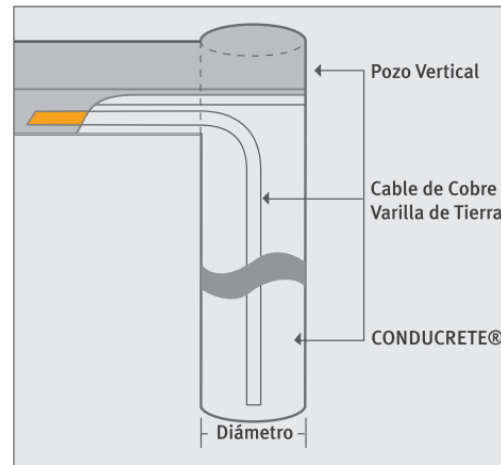


Figura 22 Instalación vertical-CONDUCRETE. Adaptado de: SAE, Soluciones innovadoras sistemas de tierras físicas, «SAE,» recuperado de: <https://www.saeinc.com/>.

3.5 Celec

Cemento eléctricamente conductivo para la conexión a tierra (puesta a tierra) con un aspecto similar al concreto logrado a través de una dosificación especial.

Su formulación permite que la resistencia mecánica a la compresión y flexión garanticen un contacto permanente entre el conductor y su recubrimiento, produciendo así un aumento artificial de la sección transversal del conductor, lo cual, sumado a su buena conductividad eléctrica es apto para ser utilizado en terrenos de altas resistividades.

Este cemento conductivo es útil para sitios de altas resistividades en donde se hace muy difícil alcanzar valores apropiados de impedancia de fuente y resistencia DC (Protecem S.A, s.f.).

3.5.1 Características

- Libre de mantenimiento eléctrico

- Baja inductancia
- Baja impedancia total
- Resistividad: $0.048\Omega \cdot m$
- Presenta la rigidez de un mortero
- Funciona en estado seco
- Granulometría fina en polvo gris
- PH: 10.9 - 12.1
- Densidad: $1.2 - 1.86 \text{ g/cm}^3$.
- Presentación: CELEC está disponible en bolsas de 25 Kg.
- Cumple con el estándar internacional IEC 62561-7
- Cumple con el estándar 558/00 de Ontario Regulation.

3.5.2 Pruebas

- *Corriente tipo rayo*: Alcanza una densidad de 120KA/m^2 sin cambiar su resistencia. (Con onda normalizada 8/20 μsec , IEEE).
- *Corrosión de cobre*: Hasta 169 años de duración del electrodo.
- *Corrosión de acero*: hasta 23 años de vida de los electrodos.
- Lixiviado no contaminante

3.5.3 Instrucciones de instalación

3.5.3.1 Instalaciones verticales. Se excava un hueco circular de aproximadamente 30 cm de diámetro y de la profundidad de la varilla.

Utilizando un tubo de PVC de 4" como formaleta en el centro del hueco, se rellena y compacta con tierra alrededor del tubo, con movimientos circulares permitiendo que este no se fije a la tierra. (Retirar el Tubo, solo se usa como molde, en caso de dejarlo aislaría el sistema de puesta a tierra).

Se coloca la varilla verticalmente y centrada en el tubo de PVC de 4"

En un recipiente grande o caneca se mezcla el Cemento Conductor CELEC con agua hasta formar una masa homogénea semejante a un mortero.

En porciones se aplica esta mezcla hasta cubrir la varilla. Colocando en el extremo el correspondiente conector o soldadura exotérmica y el cable de cobre que iría hacia el equipo a proteger.

Un bulto de 25 Kg rinde para una varilla de 2, 4 m.

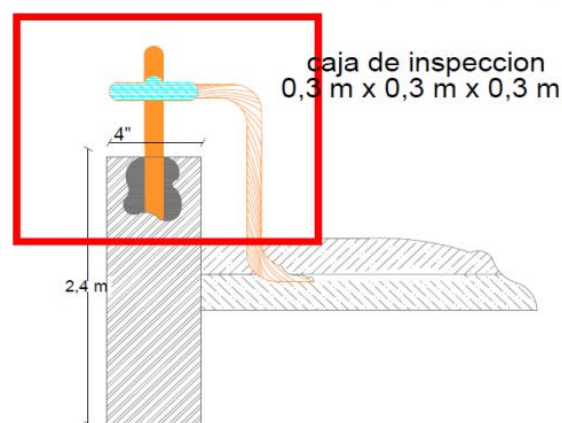


Figura 23 Electrodo vertical – CELEC. Adaptado de: Protecem S.A, «CELEC cemento conductor para puesta a tierra,» [En línea]. Available: <https://cementocelec.com/es>. [Último acceso: Mayo 2019].

3.5.3.2 Instalaciones horizontales. Por el recorrido del conductor de malla se excava una zanja de aproximadamente 30 cm de ancho y de 75 cm de profundidad con respecto al nivel final.

En un recipiente grande o caneca se mezcla el Cemento Conductivo CELEC con agua hasta formar una masa homogénea semejante a un mortero.

Se aplica una capa de esta mezcla en el fondo de la zanja extendiéndola uniformemente, con un ancho de 30 cm y un espesor de 2,5 cm.

Sobre esta capa se instala el conductor de puesta a tierra y se realizan las correspondientes soldaduras. Se debe ubicar el conductor lo más recto posible en el centro de la zanja.

Se aplica otra capa de Cemento Conductivo CELEC mezclado con agua sobre el conductor extendiéndola uniformemente, con un ancho de 30 cm y un espesor de 2,5 cm.

Finalice el relleno de la zanja con tierra, compactando únicamente cuando termine de tapar la zanja. Con las especificaciones anteriormente dadas, un bulto de 25 Kg rinde aproximadamente 1,4 m de zanja.

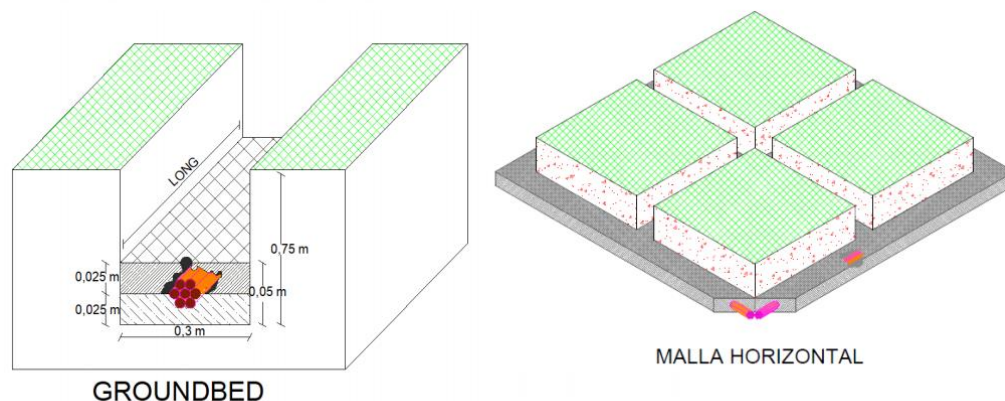


Figura 24 Malla horizontal- CELEC Adaptado de: Protecem S.A, «CELEC cemento conductivo para puesta a tierra,» [En línea]. Available: <https://cementocelec.com/es>. [Último acceso: Mayo 2019].

3.6 Aglomerante conductivo GL

En la tabla 11 se presenta las características físicas y químicas del aglomerante (GLGROUND)

Tabla 11.

Características AGLOMERANTE CONDUCTIVO GL

Propiedades físicas y químicas	
Punto de ebullición	>1000°C (>1832 °F)
Solubilidad (agua)	Ligero (0.1 – 1%)
Resistividad	0.25 -0-38 Ω .m
Densidad	1400 -1800 kg/m ³
Presentación	25 kg

- Cumple ampliamente con los requisitos de calidad estipulados por la normatividad vigente. Evaluado y avalado por la corporación para la investigación de la corrosión (CIC) - UIS. Certificado CIDET
- No es contaminante: Sus componentes son amigables con el medio ambiente, no se degrada.
- No es corrosivo: No contiene ácidos o sales que puedan producir corrosión en los electrodos.
- Alta capacidad a la compresión y baja contracción.

3.6.1 Ventajas aducidas por el proveedor

- Reduce drásticamente y de forma permanente los valores de resistencia de puesta a tierra.
- Provee una protección superior a sus equipos contra sobretensiones en la puesta a tierra por descargas eléctricas.
- Conduce efectivamente la energía eléctrica independiente de las condiciones ambientales.
- Aumenta la vida útil de los electrodos debido a que los protege de la corrosión y del vandalismo.
- Es libre de mantenimiento.

3.6.2 Instrucciones de instalación. El AGLOMERANTE CONDUCTIVO GL es fácil de instalar tanto para sistemas horizontales como verticales, en seco o mezclado con agua.

3.6.2.1 *Sistemas horizontales*

- Excave la zanja a la profundidad, ancho y longitud diseñada, limpie y compacte el fondo de la zanja. Generalmente la zanja es de 0.3 m de ancho y 0.5 m de profundidad.
- La longitud es calculada con la resistividad del suelo en el sitio y los requisitos técnicos de resistencia y tensiones requeridos.
- Vierta una capa de AGLOMERANTE GL en el fondo de la zanja esparcida uniformemente con un espesor no mayor a 2,5 cm. Compacte suavemente.

- Instale el cable sobre esta primera capa en el centro de la zanja. Vierta una segunda capa de AGLOMERANTE GL sobre el cable hasta cubrirlo totalmente con un espesor de 2,5 cm. Compacte suavemente.
- Cubra por lo menos un nivel de 10 cm de tierra suelta del lugar sobre el aglomerante conductivo. Compacte suavemente.
- Rellene por capas de 10 cm, compacte de manera firme la zanja usando el material restante del suelo que se excavo.

3.6.2.2 Sistemas verticales

- Excave un hueco a la profundidad y diámetro determinados por la resistividad del suelo en el sitio y el valor requerido de resistencia.
- Instale un electrodo o un conductor en medio del hueco excavado.
- Mezcle el AGLOMERANTE GL con Agua (aproximadamente 16 litros de agua por bolsa de 25Kg) y viértalo en el hueco cubriendo el electrodo. Puede aumentar el rendimiento de la mezcla si utiliza una formaleta cilíndrica (tuvo PVC) alrededor del electrodo, que se debe retirar al final.

3.6.2.3 Recomendaciones para obtener mejores resultados. Aunque el AGLOMERANTE GL se puede instalar en su forma natural de polvo seco. Es conveniente realizar una mezcla con agua con el fin de verter el producto en las zanjas o pozos para cubrir efectivamente los conductores o electrodos.

Para dosificar el material requerido por una instalación se debe conocer la resistividad natural del terreno y las características técnicas o condiciones eléctricas de la instalación a proteger.

3.7 FAVIGEL

FAVIGEL es un suelo artificial desarrollado en Colombia, es un suelo artificial compuesto, que surgió de un amplio plan de investigación interdisciplinaria, como respuesta a la necesidad imperiosa de obtener un agente que redujera en forma muy efectiva y permanente la resistencia de las puestas a tierra. Permite un tratamiento físico-químico al terreno circundante al electrodo que le garantiza un aumento considerable a su conductividad. Su nombre se originó de nombre de quien lo desarrolló y de la consistencia que toma cuando se hidrata (Casas Ospina, 2008).

3.7.1 Ventajas aducidas por el proveedor

- Exigencias de excavación
- Producto ecológico, debido a que sus componentes no son perjudiciales para el ser humano o para los animales.
- Alta efectividad en la reducción de la resistencia de puesta a tierra
- Facilidad de aplicación, no requiere hidratación previa, elimina manejo de recipientes o herramientas adicionales.

3.7.2 Como se realiza su hidratación. En todos los casos este producto se aplica en estado seco. La hidratación puede ser natural o manual y se puede cuando se halla vertido en la excavación o antes. No requiere hidratación previa por agitación, ni preparaciones especiales en cubetas, ni cargar elementos especiales hasta el sitio. Si se desea obtener resultados inmediatos debe agregarse aproximadamente cinco galones de agua por cada dosis utilizada. En sitios a la intemperie, alejados o de difícil acceso como torres de líneas de transmisión o de comunicaciones, no exige transporte de agua hasta el sitio puesto que se hidrata con agua lluvia.

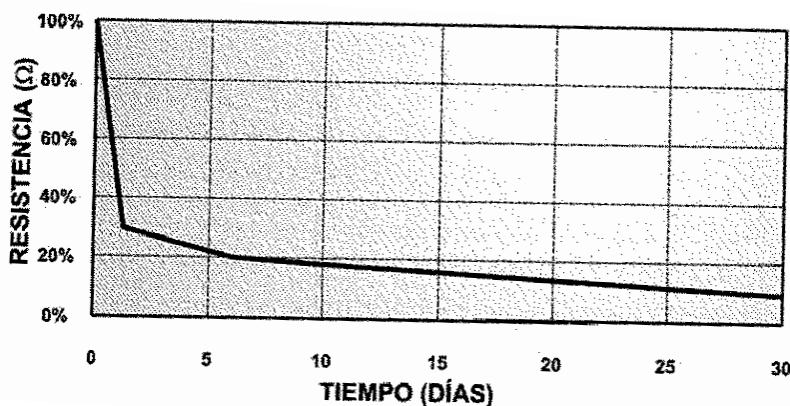


Figura 25 Reducción de la resistencia de puesta a tierra con FAVIGEL. Adaptado de: Casas Ospina F., (2008) Tierras Soporte de la seguridad electrica, Bogota : SEGELECTRICA ,.

3.7.3 Lugar de uso. El procedimiento desarrollado se puede aplicar a cualquier tipo de terreno, en cualquier clima, a cualquier tipo de sistema de puesta a tierra y en todo tipo de excavación, siempre y cuando los materiales sean de buena calidad.

Aunque los suelos se han tipificado de diferentes maneras, el método de aplicación de FAVIGEL fue concebido para aplicación en terrenos con problemas de alta resistividad, así:

Clase A: Suelo blando ácido, que a pesar de su baja resistividad (50 a 200 $\Omega.m$) presenta una acción corrosiva por las aguas que circulan.

Clase B: Suelo arenoso seco, fácil de trabajar, con mediana resistividad, entre 500 y 1000 $\Omega.m$

Clase C: Suelo de rocas duras, con alta resistividad, normalmente entre 1000 y 10.000 $\Omega.m$

A continuación en la tabla 12 se presenta un plan de mantenimiento al que debe ser sometido el compuesto mejorador de sistemas de puestas a tierra FAVIGEL para mantener el buen funcionamiento del producto. En la tabla 13 tendremos las características físicas y químicas del producto.

Tabla 12.

Plan de mantenimiento

Ítem	Realizar a	Acción preventiva
1	Seis meses	Revisión, aprietes y ajustes necesarios Revisión de estructuras de anclaje aisladores y conectores
2	Cada año	Medición de resistencia de puesta a tierra Medición de equipotencialidad Revisión y ajustes necesarios Revisión de estructuras de anclaje
3	Cinco años	Evaluación de resistencia de cada puesta a tierra Medición de equipotencialización de cada SPT Medición de resistencia de puesta a tierra de todo el SPT interconectado
4	Diez años	Exploración de conexiones del electrodo de tierra (una muestra) Las actividades propias de cada año
5	Veinte años	Diagnosticar Evaluar Rediseñar

Ítem	Realizar a	Acción preventiva
Proyectar acciones correctivas		

Tabla 13.

Características FAVIGEL

Propiedades físicas y químicas	
Temperatura de fusión	1200 °C
Resistividad	0.5 Ω.m
Humedad relativa	Menor al 8%
pH	Entre 7 y 7.5
Densidad	0.91 gr/cm ³
Calor específico	1.02096 J/g °C

3.8 THOR GEL

Es un gel de hexacianoferrato de cobre ($C_6Cu_2FeN_6$) insoluble en agua, que permite el libre tránsito de electrones por su enredado tridimensional y que adhiere muy bien a los electrodos de cobre en las puestas a tierra.

Facilita el movimiento de ciertos iones dentro de la malla, de modo que pueden cruzarlo en uno u otro sentido; esto lo convierte en un conductor eléctrico de baja resistencia.

Posee aditivos que controlan el nivel del pH de los suelos, y neutralizan además los efectos corrosivos de las sales que mejoran la conductividad eléctrica del pozo a tierra, garantiza la ausencia de fenómenos corrosivos por un periodo de 4 años.

Actúa eficientemente en medios ácidos y/o alcalinos, trabajando con la misma eficiencia sin descomposición, gracias a su estabilidad química.

Presenta gran capacidad de absorción de agua que permite la constante generación, alargando su tiempo de vida.

El método de aplicación consiste en incorporar al pozo los electrolitos que aglutinados bajo la forma de un Gel, mejoren la conductibilidad de la tierra, y retengan la humedad en el pozo, por un período prolongado. De esta manera se garantiza una efectiva reducción de la resistencia eléctrica y una estabilidad que no se vea afectada por las variaciones del clima (para-rayos).

3.8.1 Composición. Es un producto de una reacción química entre sus componentes. No es una mezcla de las sustancias que lo componen, es decir, éstas pierden sus propiedades originales para formar el nuevo producto que es el GEL aplicado en el suelo. La tabla 14 nos muestra como está compuesto el producto.

Tabla 14.

Composición THOR GEL

Componentes	Fórmula
Sulfato de cobre	(CuO ₄ S)
Carbonato de sodio	(CNa ₂ O ₃)
Hexacianoferrato de sodio	(C ₆ Cu ₂ FeN ₆)

3.8.2 Rendimiento. La aplicación del THORGEL es de 1 a 3 dosis por metro cúbico, según sea la resistividad natural del terreno y la resistencia final deseada. En la tabla 15 se muestra la dosificación recomendada por THOR GEL teniendo en cuenta la naturaleza del terreno donde se desea utilizar el compuesto, mientras que en la tabla 16 nos presenta sus características físicas y químicas.

Tabla 15.

Rendimiento THOR GEL

Naturaleza del terreno	Resistividad [$\Omega.m$]	Dosis [m^3]
Terrenos cultivables y fértiles	50	1
Terraplenes compactos y húmedos	50	1
Terrenos cultivables poco fértiles	500	1 – 2
suelos pedregoso desnudos arena seca, permeable	3000	2
suelos rocosos fraccionados	6000	2 – 3
Suelos rocosos compactos	14000	3

Tabla 16.

Características THOR GEL

Propiedades físicas y químicas	
Solubilidad en agua	Insoluble
Ph	9 – 10
Densidad aparente	1 – 1.40 gr/cm³
% de disminución de resistividad en suelos	98 %

3.9 PROTEGEL

Es un preparado químico con el que se consigue, una notable reducción de la resistencia a tierra en terrenos de elevada resistividad. Con la preparación adecuada, la dosis de PROTEGEL se transforma en un material gelatinoso (GEL) altamente Higroscópico que se distribuye por el terreno en forma de ramificaciones radicales, lo que le permite absorber grandes cantidades de agua. De esta forma, la superficie del electrodo estará en contacto con un terreno altamente conductor, con lo que la resistencia a tierra se ve notablemente reducida y, como consecuencia, el

paso de la corriente del electrodo al terreno se realiza de una forma mucho más eficiente (KLK electro materiales S.A).

3.9.1 Características El gel obtenido con la adecuada preparación de PROTEGEL presenta las siguientes características:

- Estabilidad química.
- Insolubilidad en el agua.
- No corrosivo.
- No degradable por los elementos químicos del terreno.
- pH 7.3

Puede ser instalado en zonas de severa contaminación, altos niveles de corrosión marina e industrial y en zonas de diversos niveles de resistividad de terreno, incluyendo algunas zonas rocosas con las siguientes condiciones ambientales:

- Altura sobre el nivel del mar hasta 1000m.
- Humedad relativa desde 70 hasta 100
- Temperatura ambiente 15°C a 35 °C
- Resistividades del terreno Hasta 5000 Ohm-m

3.9.2 Rendimiento (dosis de 6 kg). Se recomienda la utilización de una dosis de PROTEGEL por metro cúbico de tierra, para la instalación de un electrodo de 2 a 3 m de longitud. En el caso de mallas reticuladas de electrodos interconectados, se recomienda utilizar de una a tres dosis de por cada metro cúbico de tierra tanto para los electrodos como para las zanjas de interconexión.

3.9.3 Presentación. Una dosis de PROTEGEL se presenta embalada en una caja de cartón de 26 x 22 x 11 cm.

Cada caja contiene una dosis de 6 Kg, distribuida en tres bolsas de plástico marcadas como:

Bolsa 1, Bolsa 2 y Bolsa 3.

La dosis de PROTEGEL, embalada en su caja y almacenada en un lugar apropiado y seco, puede almacenarse prácticamente por un tiempo ilimitado.

3.9.4 Instrucciones de instalación

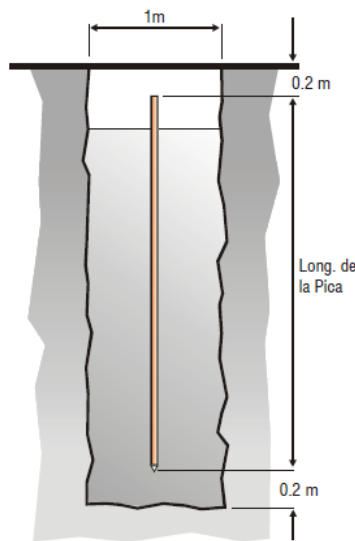
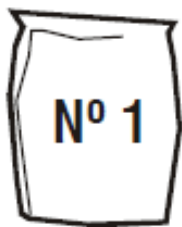
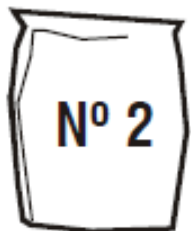


Figura 26 Instalación electrodo vertical – PROTEGEL. Adaptado de: KKK electro materiales S.A, «KKK committed to service,» [En línea]. Available: <https://www.kkk.es>. [Último acceso: Mayo 2019].

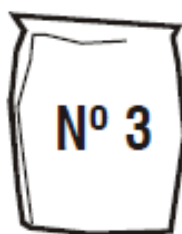
Para cada electrodo, debe excavar un pozo de aproximadamente 1 m x 1 m de sección y de una profundidad de unos 0,4 m mayor que la longitud del electrodo a instalar.



El contenido de la Bolsa 1 de PROTEGEL, sin añadir agua, debe mezclarse lo mejor posible con la tierra obtenida del pozo excavado para la colocación del electrodo, asegurando su disgregación cerniéndola con un tamiz de 6 mm de luz aproximadamente.



El contenido de la Bolsa 2 de PROTEGEL debe disolverse en 20 litros de agua. (Utilizar un envase no metálico).



El contenido de la Bolsa 3 de PROTEGEL también debe disolverse en 20 litros de agua. (Utilizar un envase no metálico y distinto del anterior).

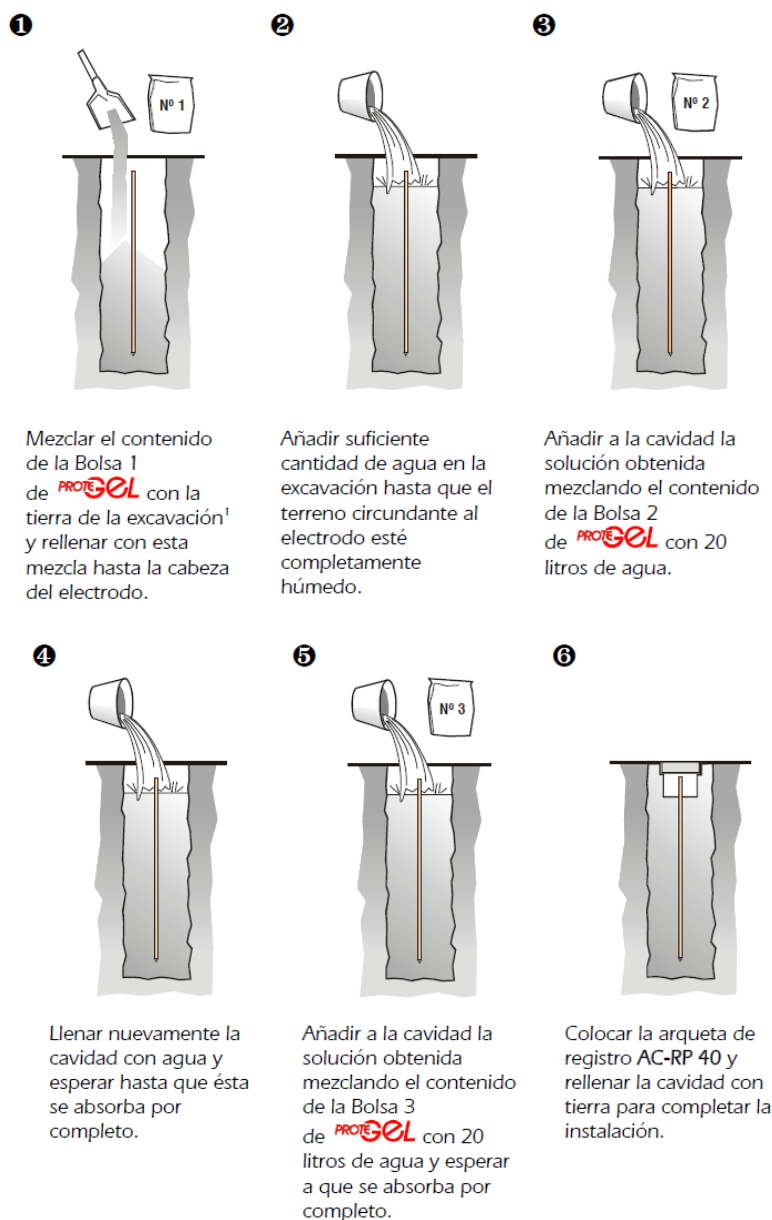


Figura 27 Instrucciones de instalación – PROTEGEL. Adaptado de: KLK electro materiales S.A, «KLK committed to service,» [En línea]. Available: <https://www.klk.es>. [Último acceso: Mayo 2019].

3.9.5 Mantenimiento. Debe realizarse un control periódico de la instalación y en caso de que se produzca una incremento apreciable de la resistencia a tierra, se repotenciará aplicando un nuevo tratamiento con PROTEGEL. Para ello, seguir el procedimiento anterior a partir del paso N° 2.

En cualquier caso, es recomendable mantener húmedo el terreno del pozo de puesta a tierra

PROTEGEL hace recomendación de la dosis que debe ser utilizada en el SPT según las características del terreno donde se va instalar además de la frecuencia de mantenimiento y cantidad necesaria de pozos de tierra (tabla 17) (KLK electro materiales S.A).

Tabla 17.

Dosificación PROTEGEL

RESISTIVIDAD		
DEL SUELO	CARACTERISTICAS	VALOR OFRECIDO
$\Omega.m$		
5000	Cantidad necesaria de pozos de tierra.	Según el número de electrodos en la MALLA
	Cantidad de dosis por cada pozo.	3 dosis
	Tiempo de duración de resistencia menor a 25 Ohm del conjunto, sin hacer mantenimiento.	Una duración de 3 a 4 años
	Recomendación de mantenimiento	Agregar $\frac{1}{2} m^3$ agua por pozo durante el año.
	Cantidad necesaria de pozos de tierra.	5 pozos teniendo 3 metros de distancia entre ellos
2000	Cantidad de dosis por cada pozo.	3 dosis por cada pozo
	Tiempo de duración de resistencia menor a 25 Ohm del conjunto, sin hacer mantenimiento.	Una duración de 3 a 4 años
	Recomendación de mantenimiento	$\frac{1}{2} m^3$ agua por cada año
	Cantidad necesaria de pozos de tierra.	3 pozos

RESISTIVIDAD		
DEL SUELO	CARACTERISTICAS	VALOR OFRECIDO
$\Omega.m$		
1000	Cantidad de dosis por cada pozo.	2 dosis por pozo
	Tiempo de duración de resistencia menor a 25 Ohm del conjunto, sin hacer mantenimiento.	Duración de 3 a 4 años
	Recomendación de mantenimiento	$\frac{1}{2} m^3$ agua por cada año
	Cantidad necesaria de pozos de tierra.	1 pozo
	Cantidad de dosis por cada pozo.	2 dosis por pozo
500	Tiempo de duración de resistencia menor a 25 Ohm del conjunto, sin hacer mantenimiento.	Duración de 3 a 4 años
	Recomendación de mantenimiento	$\frac{1}{2} m^3$ agua por cada año
	Cantidad necesaria de pozos de tierra.	1 pozo
	Cantidad de dosis por cada pozo.	2 dosis
200	Tiempo de duración de resistencia menor a 25 Ohm del conjunto, sin hacer mantenimiento.	Duración de 3 a 4 años
	Recomendación de mantenimiento	$\frac{1}{2} m^3$ agua por cada año

3.10 Análisis comparativo del desempeño de los productos

Teniendo en cuenta las características de los productos expuestos anteriormente y las observaciones de personas que han tenido experiencia con este tipo de compuestos, se presenta a

continuación en la tabla 18 una síntesis de las ventajas, desventajas y características relevantes de los diferentes grupos de compuestos que se pueden encontrar actualmente en el mercado como son los cementos conductivos, bentonita, geles y las sales conductivas.

Tabla 18.

Observaciones en campo

Material	Observaciones en campo
Sales conductivas	Fue el primer método que se utilizó para el mejoramiento de puestas a tierra, fácil de usar y se tenían resultados inmediatos. Las sales incrementan la cantidad de iones conductivos alrededor del electrodo. Para aplicar estas sales se mezclaba con la tierra o se hacía una solución para hidratar dichas sales. Por ser sales, se creaba corrosión en los materiales, muchas veces se sobredimensionaba la cantidad a aplicar y afectaba a los conectores, provocando aislamientos en la malla. Otro factor importante es la cantidad de agua presente en el sector, bien sea por agua aplicada o por lluvias, causando pérdida de las sales por el alto nivel de agua presente.
Geles	Básicamente son arcillas muy hidratadas tiene un aspecto entre sólido y líquido. Inicialmente la base de estas geles es la bentonita, relativamente económica, se usaba mucho en el sector petrolero. Eléctricamente tienen la ventaja de que al estar en condiciones sobre hidratadas, funcionan como sales aportando iones conductivos. Al ser una masa hidratada se puede rellenar alrededor del electrodo y también en zanjas recubriendo en 2 capas al conductor. Se pueden aplicar secas o húmedas, por ejemplo, el favigel, su aspecto es como un talco, se aplica seco y se hidrata luego aplicándole agua o con lluvia. En cambio la hidrosolta ya viene prehidratado y tiene aspecto de masa homogénea.

Material	Observaciones en campo
	Desventajas similares a las sales, si se hidrata demasiado o se aplica en terrenos como lajas, laderas o piedras, no retiene el material se pierde fácilmente por brechas, queda el hueco vacío alrededor del electrodo, no queda compacto y se presenta discontinuidad. Si no se hidrata y el terreno se seca demasiado, generalmente pierden propiedades conductivas, se aísla la malla. Exige mucho mantenimiento. Hidrosolta fue el producto pionero en Colombia. Se empezaron a aplicar técnicas en el mejoramiento. Son más costosos porque ya tienen procesos industriales.
Cementos conductivos	Los cementos conductivos son un desarrollo americano, entre las primeras marcas que se comercializaron están Erico (USA), Conducrete (Canadá). El primero que apareció en Colombia fue Celec. La filosofía del cemento es que el producto se comporte como cemento hidráulico, que se solidifique y en esa condición mantenga su conductividad. Básicamente para su instalación se crea un mortero donde se funde una columna, aumentando el volumen cilíndrico alrededor de las varillas, y en los cables o mallas, se crear una placa de cemento por debajo del cable y otra por encima del cable, su tamaño fluctúa entre 15 a 30 cm de ancho con un espesor de 5 cm. No lo va a afectar la sequía ni la humedad, al cubrir sólidamente el conductor entra a formar parte del electrodo, se incrementa el volumen real, favorece el mantenimiento de los electrodos porque al cubrirlos los protege de la acidez natural del suelo. Estamos cambiando la resistividad alrededor del electrodo, incrementando el área del electrodo con otro material.

De la tabla anterior se puede concluir que actualmente los productos que tienen más ventajas para el tratamiento de puestas a tierra son los cementos conductivos.

3.11 Recomendaciones cuando no se puede mejorar una puesta a tierra

Puede resultar que en determinadas condiciones de la instalación, como pueden ser altos valores de resistividad del terreno, elevadas corrientes de falla a tierra o prolongados tiempos de despeje de las mismas, no sea posible o resulte muy costoso construir un sistema de puesta a tierra que garantice los umbrales de tensión seguros para el ser humano. En estos casos el RETIE recomienda tomar las siguientes medidas:

- a. Hacer inaccesibles zonas donde se prevea la superación de los umbrales de soportabilidad para seres humanos.
- b. Instalar pisos o pavimentos de gran aislamiento.
- c. Aislar todos los dispositivos que puedan ser sujetados por una persona.
- d. Establecer conexiones equipotenciales en las zonas críticas.
- e. Aislar el conductor del electrodo de puesta a tierra a su entrada en el terreno.
- f. Disponer de señalización en las zonas críticas donde puedan trabajar profesionales competentes, siempre que cuenten con las instrucciones sobre el tipo de riesgo y estén dotados de los elementos de protección personal con aislamiento adecuado.

3.12 Exigencias de inspección y mantenimiento del sistema de puesta a tierra

Los componentes del sistema de puesta a tierra tienden a perder su efectividad después de unos años, debido a corrosión, fallas eléctricas, daños mecánicos e impactos de rayos. Los trabajos de inspección y mantenimiento deben garantizar una continua actualización del SPT para el

cumplimiento del RETIE. Si una inspección muestra que se requieren reparaciones, estas deben ser realizadas sin retraso y no ser pospuestas hasta el próximo ciclo de mantenimiento.

La inspección debe hacerse por un especialista en el tema, el cual debe entregar registros de lo observado, dicha inspección incluye la verificación de la documentación técnica, reportes visuales, pruebas y registros. Todo SPT debe ser inspeccionado de acuerdo con la tabla 19 (Ministerio de Minas y Energía, 2013).

Nivel de tensión de la instalación	Inspección visual (años)	Inspección visual y mediciones (años)	Sistemas críticos inspección visual y mediciones (años)
Baja	1	5	1
Media	3	6	1
Alta y Extra Alta	2	4	1

Los intervalos de la anterior tabla pueden variar, según condiciones climáticas locales, fallas que comprometan la integridad del SPT, normas de seguridad industrial, exigencias de compañías de seguros, procedimientos o regulaciones técnicas de empresa.

3.12.1 Pruebas. Las pruebas que deben realizarse según el RETIE como parte de inspección son:

- Realizar ensayos de equipotencialidad.
- Medir resistencia de puesta a tierra. Los resultados deben quedar consignados en los reportes de inspección.
- Medir corrientes espurias o de modo común.

3.12.2 Registros. El RETIE expone la información que debe ser documentada y evidenciada mediante registros durante la inspección del SPT.

- a. Condiciones generales de los conductores del sistema.
- b. Nivel de corrosión.
- c. Estado de las uniones de los conductores y componentes.
- d. Valores de resistencia.
- e. Desviaciones de los requisitos respecto del RETIE.
- f. Documentar todos los cambios frente a la última inspección.
- g. Resultados de las pruebas realizadas.
- h. Registro fotográfico.
- i. Rediseño o propuesta de mejoras del SPT si se requieren.

4. Conclusiones

El sistema de puesta tierra es una parte esencial de toda instalación y su función principal es la protección de las personas, que pueden estar sometidas a tensiones peligrosas de paso, de contacto o transferidas cuando se presenta una falla. Dada la importancia de la puesta a tierra en instalaciones, este trabajo de grado se centró en revisar el método de diseño de la puesta a tierra y las medidas que se deben tomar desde el diseño cuando se sobrepasen los umbrales soportabilidad de tensión del ser humano.

La resistividad del terreno es el factor principal en el diseño, construcción y mantenimiento de un SPT ya que esta afecta directamente la impedancia de tierra impidiendo alcanzar el valor requerido para un funcionamiento correcto del sistema de puesta a tierra.

Los criterios de diseño de un sistema de puesta a tierra, con el algoritmo propuesto por el estándar IEEE 80, indican que un sistema de puesta a tierra debe diseñarse pensando en 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 bajo condiciones de falla.

La resistividad del suelo cambia en función de la temperatura, por eso la utilización de tratamientos químicos del suelo en circunstancias en las que no es posible garantizar un valor de resistencia de tierra para el SPT que le permita un correcto funcionamiento con la variación del sistema de electrodos. Es importante tener presente que todo lo que permita mejorar el sistema de puesta a tierra va terminar en una operación exitosa para la protección de sistemas industriales, electrónicos y la seguridad de las personas.

Los tratamientos para terrenos de sistemas de puesta a tierra pueden clasificarse en geles y cementos conductivos además de tener en cuenta la bentonita como tratamiento natural para el mejoramiento de SPT. El terreno se manifiesta negativamente a través de la corrosión en los electrodos, manifestándose en un incremento de la resistencia de dispersión y perjudicando el cumplimiento de los objetivos para los cuales está diseñado un SPT.

Los cementos conductivos tienen como ventaja el aumento de la vida útil de los electrodos ya que por su consistencia, pH y conductividad protegen los electrodos de la corrosión y el vandalismo. Son una buena opción para SPT ubicados en lugares donde se presentan sequías o tiempos lluviosos ya que los cementos conductivos no se ven afectados por la sequía ni la

humedad, al cubrir sólidamente el conductor entra a formar parte del electrodo incrementando su volumen real.

Las sustancias clasificadas como geles resultan efectivas para la reducción de la resistencia del SPT, eléctricamente tienen la ventaja de que al estar en condiciones sobre hidratadas, funcionan como sales aportando iones conductivos. Al ser una masa hidratada se puede rellenar alrededor del electrodo y también en zanjas. En los geles es necesario e importante hacer un adecuado y constante mantenimiento para mantener el valor de la resistencia ya que por las características propias del producto y debido al cambio de las condiciones climáticas este valor tiende a aumentar.

Es importante tener en cuenta al momento de seleccionar el adecuado tratamiento químico para el suelo, los valores de la resistividad, pH, tipo y frecuencia del mantenimiento de los diferentes productos para el tratamiento del terreno.

Cuando encontremos una situación en que existan altos valores de resistividad del terreno, en donde ni siquiera los tratamientos químicos puedan ser una solución, se deben tomar medidas para no exponer a las personas a tensiones por encima de los umbrales de soportabilidad del ser humano, generando un área restringida, con condiciones de acceso solo a personal capacitado y competente.

Referencias Bibliográficas

Casas Ospina, F. (2008). *TIERRAS Soporte de la seguridad electrica* . Bogota : SEGELECTRICA

coparoman. (29 de diciembre de 2015). Recuperado el mayo de 2019, de <https://coparoman.blogspot.com/2015/12/conexion-tierra.html>

Cordova Maas, B. (2011). *aplicacion de pozos de materiales de baja resistividad en subestaciones electricas para reducir la resistencia de la red de tierras*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

EPM, Area Ingenieria Distribucion . (2008). Medida de resistividad electrica del suelo.

Falcon Chavez, J. (2016). El electrodo de puesta a tierra . Copper Alliance.

Garcia Marquez, R. (s.f.). *Puesta a tierra de instalaciones electricas* . Barcelona : Marcombo, S.A.

GLGGROUND. (s.f.). *Ground lightning*. Recuperado el Mayo de 2019, de <https://www.glground.co>

Hidrocol & Cia Ltda Cl. (s.f.). *HIDROSOLTA suelo artificial para sistemas de puesta a tierra*. Recuperado el Mayo de 2019, de <http://www.hidrosolta.com/>

IEEE Power and Energy Society . (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding . *IEEE Std 80™-2013*. New York.

KLK electro materiales S.A. (s.f.). *KLK committed to service*. Recuperado el Mayo de 2019, de <https://www.klk.es>

Ministerio de Minas y Energía. (2013). reglamento tecnico de instalaciones electricas (RETIE). *Anexo general del RETIE resolucion 90708*. Colombia.

Molina Rodriguez, J. (24 de noviembre de 2010). *blogspot*. Recuperado el Mayo de 2019, de <http://jeferson-molina.blogspot.com/2010/11/sistemas-de-puestas-tierra.html>

Moreno Ospina, G., Valencia Velasquez, J. A., Cardenas Agudelo, C., & Villa Acevedo , W. (2009). *Fundamentos e ingenierias de las puestas a tierra*. Medellin : Editorial Universidad de Antioquia.

para-rayos. (s.f.). *para-rayos*. Recuperado el Mayo de 2019, de <https://www.para-rayos.com/>

Protecem S.A. (s.f.). *CELEC cemento conductivo para puesta a tierra*. Recuperado el Mayo de 2019, de <https://cementocelec.com/es>

Rojas, G. (s.f.). manual de sistemas de puesta a tierra . GEDISTRUT.

SAE, Soluciones innovadoras sistemas de tierras fisicas. (s.f.). SAE. Recuperado el Mayo de 2019, de <https://www.saeinc.com/>

Sinchi Sinchi , F. M. (2017). *diseño y determinacion de un sistema de puesta a tierra mediante pruebas de campo con elementos comunes utilizados en la region, incluyendo gem y electrodo quimico*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politecnica Salesiana.

Society, I. P. (2007). IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. *IEEE Std 142*. New York.

Tarazona Tinoco , E. I. (2008). *Practicas y usos de puestas a tierra en redes electricas de baja tension; Mejoramiento de las puestas a tierra - tratamiento mediante insumos quimicos*. Lima: Universidad Nacional de Ingenieria.

UNE- Normalizacion Española. (2018). componentes de los sistemas de proteccion contra rayos. Parte 7: requisitos para los compuestos que mejoran las puestas a tierra. *Norma Española, UNE-EN IEC 62561-7*. Madrid .