 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN QUE PERMITA SELECCIONAR SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA PARA APLICACIONES EN BAJA TENSIÓN.

Cristian Alexander Agudelo Carvajal

Germán Arturo Hincapié Bernal

Ingeniería en Electromecánica

Director del trabajo de grado

Santiago Gómez Arango

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

30 de enero de 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Los sistemas de puesta a tierra que se usan hoy en día no siempre cumplen con los requisitos que las normas actuales como la RETIE y la NTC2050 las denotan. Para ello se realizó un software que permita calcular sistemas de puesta tierra básicos para aplicaciones residenciales en baja tensión. Dicho software se elaboró con la ayuda de un programa llamado Matlab, el cual está disponible en la universidad Instituto Tecnológico Metropolitano.

Basados en datos de trabajos ya realizados en otras universidades y con la información técnica y teórica que se tiene de este sistema, se hace una interfaz con cálculos para sistemas de puesta a tierra simples (Con una sola varilla o electrodo), sistema compuesto (Con malla y electrodos) y un módulo que permita calcular en general y de manera más rápida un sistema de puesta a tierra simple, de malla o de ambos. Las ecuaciones usadas para este software están basadas en las plateadas por Sverak y Schwarz, las cuales permiten calcular de manera precisa la resistencia total de un sistema de puesta a tierra, ya que este valor es el que determina si está dentro o fuera del rango que las normas permiten, según terreno de aplicación y su tipo de sistema eléctrico.

Para validar la eficiencia del software se tomaron como referencia los ejemplos y situaciones plateadas en un trabajo de la Universidad Nacional, donde se platearon varios casos y tipos de sistemas de varillas o mallas e incluso combinadas, con sus respectivos resultados. Sin embargo, se encontraron algunos errores que dificultaron la validación de los cálculos, como en el caso de las ecuaciones de Schwarz con el sistema de varilla, malla y combinado, pero se logró aclarar corroborando las fórmulas con otro trabajo similar.

Los resultados obtenidos son los mismos que los calculados en los trabajos de los cuales se sostuvo el proyecto y se compararon, tanto para las ecuaciones de Sverak y las de Schwarz, mirando así que los resultados de la resistencia total de los sistemas de puesta a tierra son muy similares.

Palabras claves: Sistema de puesta a tierra, sistema tipo malla, sistema con electrodo, sistema combinado, malla, varilla, electrodo, resistividad del suelo, resistencia de puesta a tierra, sistema eléctrico, baja tensión, descargas atmosféricas, cable, conectores.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradecer a Dios por la vida y la oportunidad de poder haber terminado con éxito esta carrera para nuestros fines profesionales y crecimiento diario de nuestro saber. A nuestros padres por el esmero y dedicación en nuestra crianza y el apoyo continuo con nuestras metas y sueños, por su soporte económico que hicieron posible la ejecución de las actividades e insumos para nuestras carreras. A nuestros docentes del programa que de una u otra manera nos dieron las bases necesarias para superar nuestras metas y lograr así el desarrollo de este proyecto con los conocimientos y la asesoría que nos brindaron durante todo el pregrado y en la elaboración de este trabajo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

SPT Sistema de puesta a tierra.

RETIE Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas.

NTC Norma Técnica Colombiana.

ITM Instituto Tecnológico Metropolitano.

BT Baja Tensión.

RSPT Resistencia de sistema de puesta a tierra.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	9
3. METODOLOGÍA.....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	33
6. REFERENCIAS	35
7. APENDICE A.	36

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades:

El software SPT CALCULADOR es una herramienta dinámica que permite al usuario realizar cálculos de sistemas de puesta a tierra para aplicaciones de baja tensión.

En su programación se aplican los métodos y conceptos de resistividad del terreno necesarios para realizar un adecuado cálculo de sistemas de puesta a tierra, desarrollados por Wenner, Sverak y Schwarz.

Existen varios métodos para calcular la resistividad del terreno: mediante gráficos, expresiones analíticas y métodos matriciales (Moreno, 1998). De lo anterior, el cálculo de la resistividad del terreno se basa en la técnica de los 4 puntos y el cálculo de la resistencia de los sistemas de puesta tierra, entre ellos, la malla de conductores, malla de varillas o electrodos, combinación de malla-electrodos y el sistema simple de una sola varilla como electrodo.

El software permite al usuario ingresar los valores necesarios para realizar los cálculos de una manera ágil, mostrando diferentes configuraciones y garantizando resultados óptimos en el diseño de su sistema de puesta a tierra.

1.2. Problema abordado:

Los sistemas de puesta a tierra no se hacen con los requerimientos que indican las normas NTC 2050, RETIE, IEEE Std 81-1983, ASTM G57-95a. Estas indican que es indispensable saber qué tipo de suelo hay, el equipo correcto para realizar las mediciones y finalmente seleccionar los elementos que vamos a utilizar, ya que cada sistema de puesta a tierra es diferente (Colella et al., 2017).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Este trabajo presenta una herramienta en ambiente virtual, que permita diseñar sistemas de puesta a tierra para aplicaciones en baja tensión, los cuales involucran en su estructura los siguientes elementos: conductor, conector y electrodo tipo varilla.

1.3. Objetivos.

1.3.1. General:

Diseñar una herramienta de simulación que permita calcular y seleccionar sistemas de puesta a tierra, para aplicaciones en baja tensión.

1.3.2. Específicos:

- Seleccionar los métodos de cálculo a utilizar analizando los diferentes diseños de sistemas de puesta tierra.
- Diseñar la interfaz de simulación.
- Realizar medidas de campo con el Telurómetro para determinar la resistividad del terreno.
- Validar los resultados de la simulación con otros simuladores y sistemas reales.

1.4. Organización de la tesis:

En el capítulo 1, se realiza una argumentación basada en artículos y normas actuales, también de tiempos atrás donde se evidencian las pautas y los requisitos que se deben tener en cuenta para implementar los sistemas de puesta a tierra. Además, se muestran otros trabajos donde se realizan modelos a seguir para los cálculos de las resistencias de los SPT.

En el capítulo 2, se encuentran todas aquellas definiciones teóricas y conceptuales de los términos y temas que se involucran con el proyecto, dando a conocer los elementos para la comprensión del trabajo y del objetivo planteado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el capítulo 3, se muestra detalladamente cómo se realizó la selección del programa, las ecuaciones para los cálculos, la aplicabilidad y la interfaz gráfica para la elaboración del software, que permitirá los cálculos de los SPT con los elementos: Conductor, electrodo y conector.

En el capítulo 4, se observa la eficiencia del software comparado con los resultados de otras investigaciones y de situaciones reales.

En el capítulo 5, se realizan las conclusiones de los resultados que se obtuvieron con el uso del Software frente a situaciones reales de implementación de los SPT. También se toman en cuenta las diferencias o similitudes de los resultados obtenidos con cálculos y otro software en otros trabajos similares ya desarrollados por otras universidades.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) se emplean en las instalaciones eléctricas para dirigir a tierra las alteraciones de corriente causadas por defectos en las instalaciones o por las descargas atmosféricas (rayos), las cuales pueden representar peligro para los equipos electrónicos y aún más para la integridad física del ser humano. (Michaels, 1995)

Un sistema de puesta tierra está definido según el código eléctrico colombiano NTC 2050 como la conexión entre un sistema eléctrico y el suelo o un cuerpo conductor que sirva en lugar del suelo, por medio de un conductor conectado a un electrodo en un sistema de potencia específico. (Ministerio de desarrollo económico, 1998)

En el reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), la tabla 15.2 establece los parámetros mínimos de área, diámetro, espesor y recubrimiento, los cuales deben cumplir los electrodos que se usen para realizar instalaciones de sistemas de puesta a tierra. En los sistemas de baja tensión, es frecuente instalar como electrodo una varilla de acero recubierto de cobre, esta consiste en una pieza metálica con una longitud no menor a 2,4 m y un diámetro 15mm. (Ministerio de minas y energía, 2013). Donde también se especifica otros o tipos de electrodos para un sistema de puesta a tierra como son: sistema de varilla, sistema de plancha, sistema de red o malla.

Para garantizar un sistema de puesta a tierra, el factor fundamental es la medición de resistividad del terreno porque esto define los elementos que lo componen (conductor, conectores y tipo de electrodo) y de acuerdo con el punto de instalación, cada SPT es diferente. Por tal razón, dichas mediciones deben hacerse de manera concreta y puntual para garantizar un sistema de puesta a tierra que cumpla con el propósito de su funcionamiento. (Maier, Pavel, Beleiu, & Pica, 2017)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Existen varios métodos para calcular la resistividad del terreno: mediante gráficos, expresiones analíticas, métodos matriciales (Moreno, 1998), estas técnicas permiten comparar las variaciones de los resultados evidenciando las limitaciones de los mismos.

Otras recomendaciones dadas por empresas dedicadas a la generación de energía y que adoptaron de la Norma técnica Colombiana NTC 2050 y del Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE), delinean los pasos y requisitos que se deben tener en cuenta antes de implementar un sistema de puesta a tierra, algunas de ellas son la RA6-015 y RA6-014 las cuales dan un instructivo de cómo se lleva a cabo el procedimiento de medición de la resistividad del terreno y de la medición de la resistencia del STP. (Área Ingeniería Distribución EPM, 2008), (Área Ingeniería Distribución EPM, 2012)

Investigaciones en la Universidad de Cluj-Napoca en Rumania, Implementaron un algoritmo para determinar la cantidad de electrodos mediante las aplicaciones de la resistividad del terreno y la resistencia de los materiales de los sistemas de puesta a tierra, lograron determinar de acuerdo al área disponible para el montaje del sistema, la cantidad de electrodos necesarios para generar el valor deseado de resistencia de puesta tierra minimizando así los costos de los materiales para el diseño de los SPT. (Maier, Pavel, Beleiu, & Pică, 2017)

Un sistema de puesta a tierra es un conjunto de elementos eléctricos los cuales permiten construir un camino seguro para las descargas de corrientes, las cuales pueden ser producidas por corto circuitos o eventos atmosféricos (descarga natural), protegiendo así la integridad de las personas y los equipos electrónicos que se encuentren expuestos (Ramirez Castaño & Cano Plata, 2010)(Ramirez Castaño & Cano Plata, 2010). Por tal motivo todas las instalaciones eléctricas deben poseer un sistema de puesta a tierra el cual debe cumplir con los requisitos mencionados en el capítulo 15.1 del reglamento técnico de instalaciones eléctricas. (Ministerio de minas y energía, 2013). Garantizando así la seguridad y el buen funcionamiento de los aparatos eléctricos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

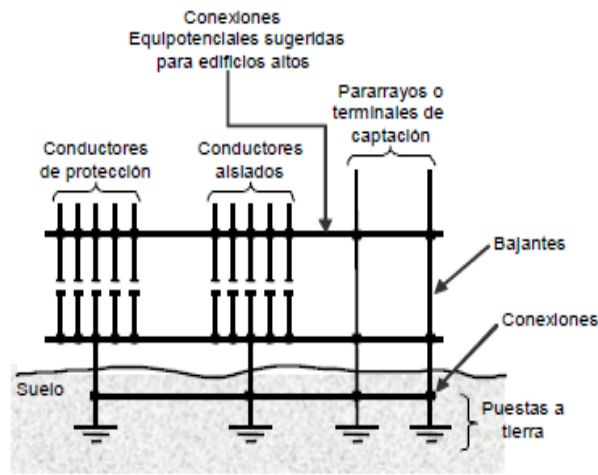


Figura 1. Sistemas con puesta a tierra. (Ministerio de desarrollo económico, 1998)

2.1. Diseño de un sistema de puesta a tierra.

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra se debe calcular los valores de tensión de paso y de contacto permitidos en la tabla 15.1 del RETIE, tomando como base una resistencia de $1k\Omega$ y un peso de 50Kg en promedio del cuerpo humano, las ecuaciones para cada uno de los sistemas sería el siguiente: (Ramirez Castaño & Cano Plata, 2010)

Tensión de paso máxima soportada por un cuerpo de 50kg de peso:

$$E_{p50} = (1000 + 6C_s P_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

Tensión de contacto máxima soportada por un cuerpo de 50kg de peso:

$$E_{c50} = (1000 + 1.5C_s P_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La resistividad del suelo es el factor más importante para poder realizar el cálculo del sistema de puesta a tierra, en 1915 el Dr. Frank Wenner desarrollo una ecuación la cual utilizando unos electrodos enterrados, se podía obtener la resistividad del terreno aplicando una corriente directa sobre estos,(R. Ruelas Gomez, 2012), actualmente se usa este método para calcular la resistividad del terreno, pero con la ayuda de equipos como el Teluometro estas mediciones cada vez son más exactas. Otros métodos como el de Schlumberger el cual consiste en una modificación al método de Wenner variando las distancias de los electrodos de los extremos, siendo este método efectivo para medir capas de suelo más profundas sin la necesidad de realizar varias mediciones al terreno.

Para realizar un diseño de puesta a tierra existen muchos documentos y métodos los cuales ayudan al diseñador a tomar decisiones de cuáles y cuantos elementos debe incluir en su diseño, llegando así a desarrollar nuevas configuraciones que se ajustan a su proyecto en particular, estos diseños deben de ponerse a prueba para asegurar que el sistema cumpla con los requisitos mínimos permitidos por el RETIE, por tal razón es importante contar con equipos de medición confiables y realizar un estudio detallado del terreno para conocer objetos metálicos enterrados que pueden afectar los valores medidos. (Michaels, 1995)

Nota: La resistividad del terreno varía dependiendo de su composición.

Una configuración geométrica muy utilizada para implementar un sistema de puesta a tierra es el de malla, la cual está conformada por un número determinado de conductores separados de manera uniforme y enterrados a una profundidad que depende de la resistividad del terreno, la longitud total del arreglo es directamente proporcional al número de conductores utilizados, se debe garantizar que no haya calentamiento en las uniones de los conductores para obtener resistencias muy bajas siendo este un método muy eficaz pero costoso,(J.Verona Lobo;C.Triviño Bernate., 2008) un arreglo de electrodos enterrados en paralelo ofrece un índice de reducción de resistencia muy bajo y utilizando un criterio optimo el cual consiste en un algoritmo que se puede usar en cualquier cálculo de sistema de puesta a tierra en general reduciendo así sobrecostos por cantidad y calidad

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de materiales, siendo muy beneficioso para el inversionista y los contratistas que diseñan e implementan los sistemas de puesta a tierra.

2.2. Materiales de los sistemas de puesta a tierra.

Los materiales usados para implementar un sistema de puesta a tierra deben estar debidamente certificados y cumplir con unas especificaciones mínimas.

2.2.1. Electrodo de puesta a tierra:

Este va enterrado al suelo y pueden ser: varillas, tubos, placas, flejes, alambres o cables desnudos, pero no pueden ser de aluminio; para garantizar una resistencia a la corrosión por 15 años a partir de la fecha de instalación, se debe realizar una prueba de inmersión en cámara salina por 1000 horas para simular el desgaste del material expuesto en el sitio donde se va a instalar, los recubrimientos para los electrodos deben cumplir los requisitos mínimos exigidos en la tabla 15.2 del RETIE.

2.2.2. Conductor del electrodo de puesta a tierra:

Es el acople entre el electrodo o malla y el barraje principal de puesta a tierra, puede ser de cobre u otros materiales conductores o la combinación entre ellos, debiendo cumplir una resistencia a la corrosión por el tiempo de vida útil de este.

2.2.3. Conductor de puesta a tierra de equipos:

Es un conductor que presta protección a los equipos eléctricos, deben ser continuos sin interrupciones y sus empalmes deben ser con soldadura o conectores certificados, acompaña a los conductores activos durante todo su recorrido y van por la misma

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

canalización, si se requiere recubrimiento este debe ser de color verde, verde con rayas amarillas, de lo contrario deben ser marcado en los puntos de inspección y extremos con marcas verdes.

2.2.4. Unión entre el electrodo y el conductor de puesta a tierra:

La unión del electrodo y el conductor de puesta a tierra deben hacerse con soldadura exotérmica (ver Figura 2 y 3) o con un conector para enterramiento directo debidamente certificado (Ver figura 4).

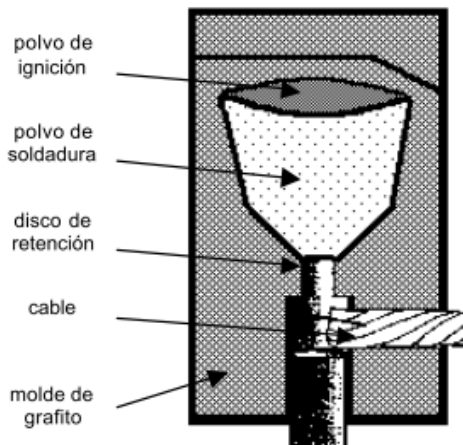


Figura 2. Soldadura Exotérmica. (Gonzales, 2004)



Figura 3. Unión de cables de puesta a tierra por soldadura exotérmica. (M.Martins, 2012)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

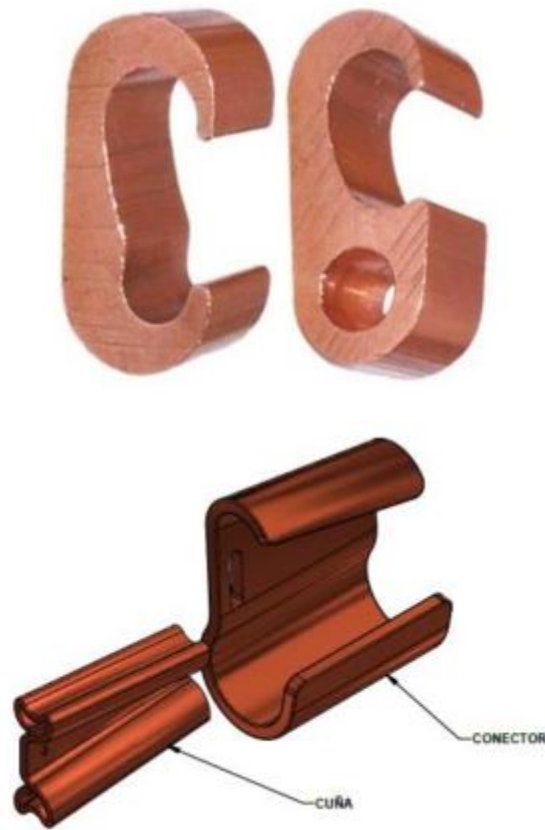


Figura 4. Conectores certificados para SPT. (Grupo de Homologación Técnica EPM, 2015)

2.3. Resistencia de la puesta a tierra.

La resistencia a tierra está constituida por las siguientes partes:

2.3.1. La resistencia del conductor:

Usualmente el conductor es de cobre y su resistividad muy baja, pudiendo ser despreciada.

2.3.2. Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo:

La resistividad es muy baja y si el suelo alrededor del electrodo está libre de grasas o componentes orgánicos puede ser despreciada.

2.3.3. Resistividad del suelo:

Es la que constituye la tierra que rodea el electrodo, y varía en gran medida a la composición del suelo. (Moreno, 1988)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4. Resistividad del terreno.

2.4.1. Método de Wenner:

Consiste en la medición de la resistencia del suelo con un equipo especial (Teluometro) y la técnica de 4 electrodos enterrados en el suelo a medir con ciertas profundidades (a) y (b). El equipo mide la resistencia ($R=V/I$) del volumen del suelo cilíndrico de radio (a) encerrado entre los electrodos internos (Cárdenas Valencia & Galvis García, 2011), así como se muestra en la figura 5.

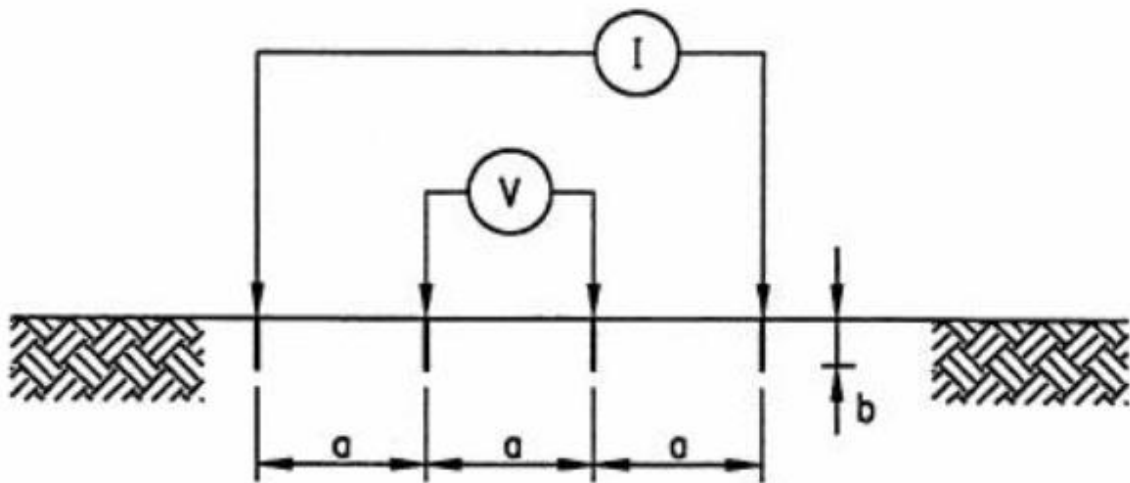


Figura 5. Método de medición Wenner.(Área Ingeniería Distribución EPM, 2008)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Para el diseño y programación del software que permita calcular la resistencia de un sistema de puesta tierra (Sea con electrodo tipo varilla o malla) en aplicaciones de baja tensión, se escogió la plataforma de GUIDE del programa Matlab, el cual está implementado en la universidad ITM en versión académica.

Con la aplicación del software Matlab se realiza una programación para realizar cálculos de SPT en tres modalidades:

- Resistividad del terreno y sistema simple (con una sola varilla como electrodo).
- Sistema compuesto (malla y varillas como electrodo de puesta a tierra).
- Sistema general o simplificado (malla como electrodo de puesta a tierra).

Dichas opciones permiten al usuario calcular la resistencia del sistema de puesta a tierra, de acuerdo a la aplicación en la que va ser implementada, y así determinar el tipo de SPT se ajusta a cada aplicación particular.

Cabe aclarar que el software está diseñado para aplicaciones en baja tensión.

3.1. Selección de fórmulas para el cálculo de RSPT en la plataforma virtual (GUIDE)

Basados en datos obtenidos de trabajos similares de la Universidad Nacional y la Universidad de Antioquia, así como anotaciones del curso de Instalaciones eléctricas del pensum para la Ingeniería Electromecánica, dictada por el docente Santiago Gómez. Se escogieron dos métodos para cálculo de RSPT y un método para el cálculo de la resistividad del terreno.

3.1.1. Resistividad del suelo.

Para el cálculo de la resistividad del terreno se tomó como base las anotaciones del curso de instalaciones eléctricas y también la norma RA6-015 de EPM, usando el método de Wenner.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con el valor (R) que el equipo nos muestra se realiza el cálculo a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{4\pi Ra}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2+4b^2}}\right)} \quad (3)$$

Esta misma fórmula fue la que se aplicó al software para el cálculo de la resistividad del terreno. Adicionalmente, se muestran (Ver Tabla 1) los rangos de los valores de la resistividad según el tipo de terreno y se pueden comparar con el cálculo realizado en el software, de acuerdo con el tipo de suelo donde se hará la aplicación del SPT.

Tabla 1.

Rangos de resistividad de varios tipos de suelo.

Tipo de terreno	Resistividad ρ (Ω -m)
Terrenos vegetales húmedos	10 - 50
Arcilla, gredas, limos	20 - 60
Arenas arcillosas	80 - 120
Fangos, turbas	150 - 300
Arenas	250 - 500
Suelos pedregosos	300 - 400
Rocas	1.000 - 10.000
Concreto húmedo	100 - 240
Concreto seco	10.000 - 50.000

Rangos del valor de la Resistividad en distintos tipos de terreno, según mediciones y cálculos con el método de Wenner. (Cárdenas Valencia & Galvis García, 2011)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.1.2. Cálculo de un sistema de puesta a tierra de una sola varilla.

Para obtener la resistencia de una varilla enterrada como sistema de puesta a tierra, se usa la fórmula planteada por Dwight. (Rojas, 2016)

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * L} \left[\ln \left(\frac{4 * L}{(D/1000)} \right) \right] \quad (4)$$

3.1.3. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra por expresiones analíticas.

3.1.3.1. Cálculo de la resistencia de sistemas combinados (Malla-Varillas) en suelo homogéneo, método de Schwarz.

En 1954 el matemático Laurent Schwarz desarrollo expresiones analíticas simplificadas (ecuaciones) para calcular la resistividad de puesta a tierra para terrenos homogéneos, siendo estas expresiones usadas actualmente.

- Resistencia de tierra de una malla horizontal rectangular:

$$R_M = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{h'} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right) \quad (5)$$

- Resistencia de un sistema de varillas:

$$R_v = \frac{\rho}{\pi ml} \left[\ln \frac{8l}{d} - 1 + \frac{2K_1 L}{\sqrt{A} * (\sqrt{(m-1)^2}} \right] \quad (6)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Resistencia mutua mallas-varillas:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L} \left(\ln \frac{2L}{l} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right) \quad (7)$$

- Resistencia total del sistema combinado:

$$R_T = \frac{R_M R_V - (R_m)^2}{R_M + R_V - 2R_m} \quad (8)$$

3.1.3.2. Resistencia de un sistema de malla, método de Sverak (Forma simplificada).

J. Sverak introdujo una ecuación simplificada para calcular el efecto de la longitud del conductor en relación con una placa sólida, este método ha sido probado y da resultados muy idénticos a los de la ecuación de Schwarz.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \left(\sqrt{\left(\frac{20}{A} \right)} \right)} \right) \right] \quad (9)$$

3.2. Desarrollo del Software SPT Calculador.

Usando la plataforma de Matlab 2017 (GUIDE), se procede a realizar un primer ambiente de simulación con la programación del sistema simple y resistividad del suelo. Se realizan los primeros bosquejos del programa para su interfaz de usuario.

Se ingresa el cálculo de la resistividad del terreno usando el método de Wenner (Ver ecuación 3). Se tienen problemas con la fórmula para el cálculo de la resistencia del sistema simple (Ver ecuación 4), sin embargo, se encuentra la manera de corregir e implementar la correcta.

Así se obtiene el primer módulo del software (Resistividad y Sistema Simple).

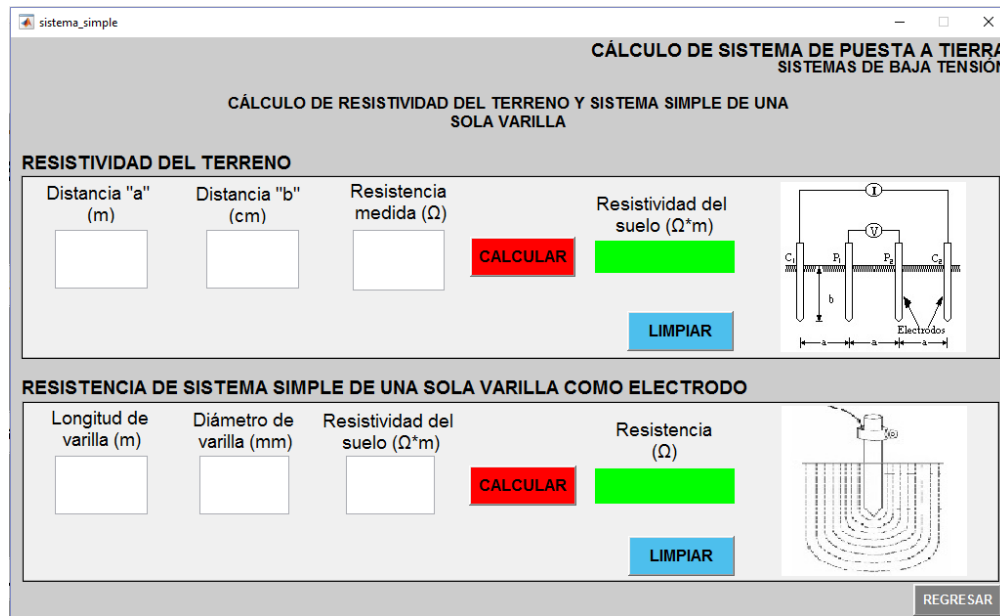


Figura 6. Interfaz módulo resistividad y sistema simple.

A continuación se procede con la programación e interfaz del método de Schwarz (Resistencia de SPT malla-varilla en suelo homogéneo), para la cual se tienen cuatro ecuaciones (Ver ecuaciones 5, 6, 7 y 8), las cuales se combinan y así se obtiene el cálculo de la RSPT.

Para encontrar la forma de relacionar estas ecuaciones en el programa, se deben calcular simultáneamente para dar el resultado total, sin embargo, hubo un problema con la ecuación (6), que generó que los cálculos no concordaran con los ejemplos que se tomaron para corroborar su funcionamiento. Posteriormente, se encuentra la forma correcta de ésta

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

y se implemente en el programa, obteniendo así los resultados esperados con los ejemplos tomados de base.

Se tiene como resultado final el segundo módulo del software (Sistema combinado malla-varillas)

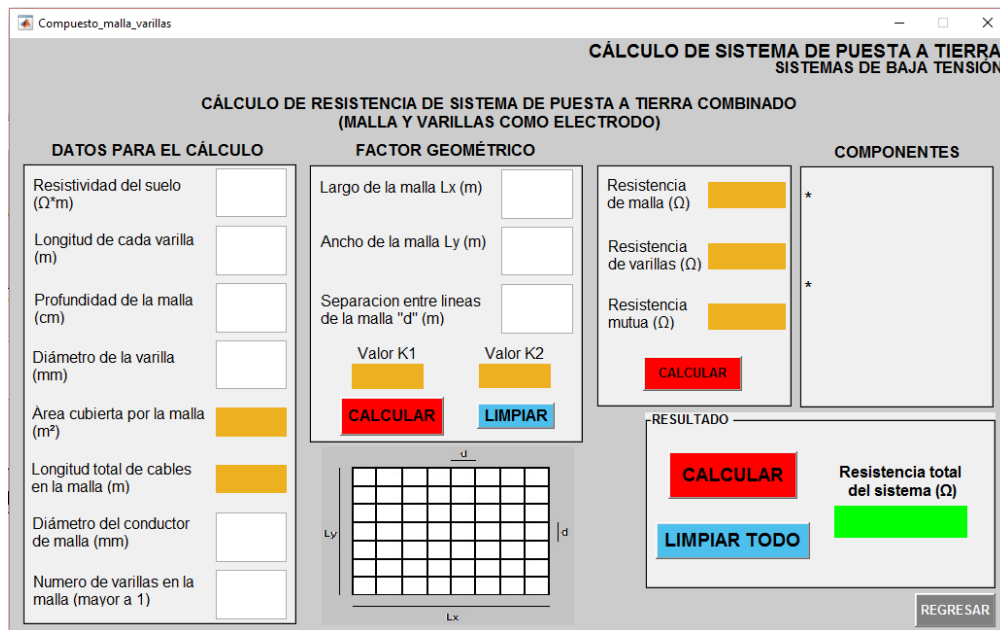


Figura 7. Interfaz modulo sistema combinado malla-varilla

Finalizando con la programación se implemente el método de Sverak, la cual consiste en una ecuación simplificada (Ver ecuación 9) que permite calcular un SPT tipo malla, sin o con electrodos.

La interfaz es similar a el modulo anterior, pero éste necesita menos datos para realizar el cálculo. También, se muestra con dinámica el proceso para entregar el resultado de la RSPT.

En este módulo se destaca la propiedad de recibir tanto los datos para calcular solo una malla de conductores y para combinarla con electrodos tipo varilla, contando con campos

de ingreso de datos por separado para cada elemento, que permitió ejecutar la ecuación y compararla.

Se define entonces la interfaz del último modulo del software (Sistema General).

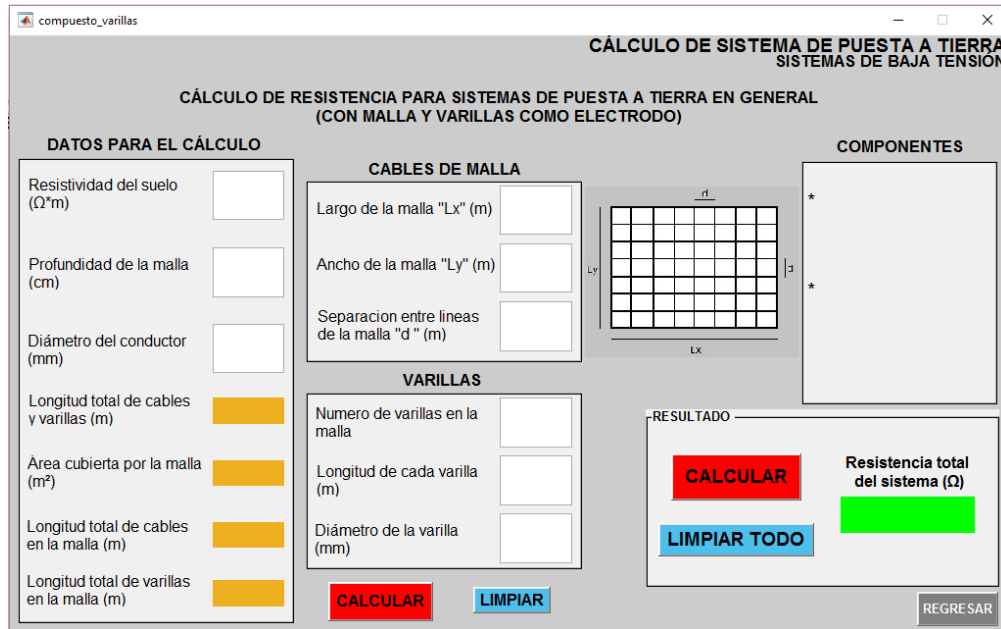


Figura 8. Interfaz módulo sistema general.

Por último, se hace una portada o un menú donde se puede direccionar al método que se quiera usar según el cálculo y SPT a realizar.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 9. Interfaz de menú.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para comprobar que el software “SPT Calculador” realiza con veracidad los cálculos de las resistencias de sistemas de puesta a tierra, se tomaron como referencia los siguientes casos o situaciones planteadas en los trabajos “**Anotaciones sobre algunos métodos de cálculo de la resistencia de puesta a tierra**”, Universidad de Antioquia (Moreno, 1988) y de “**Sistemas de Puesta a Tierra: Diseño con IEEE-80 y evaluado con MEF**”, Universidad Nacional (Ramirez Castaño & Cano Plata, 2010).

- **Caso 1: Malla cuadrada sin varillas de tierra.**

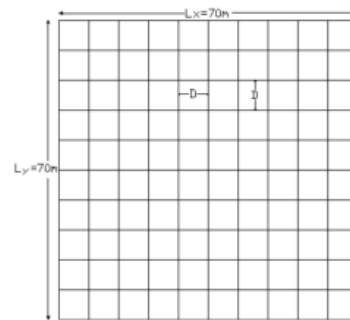
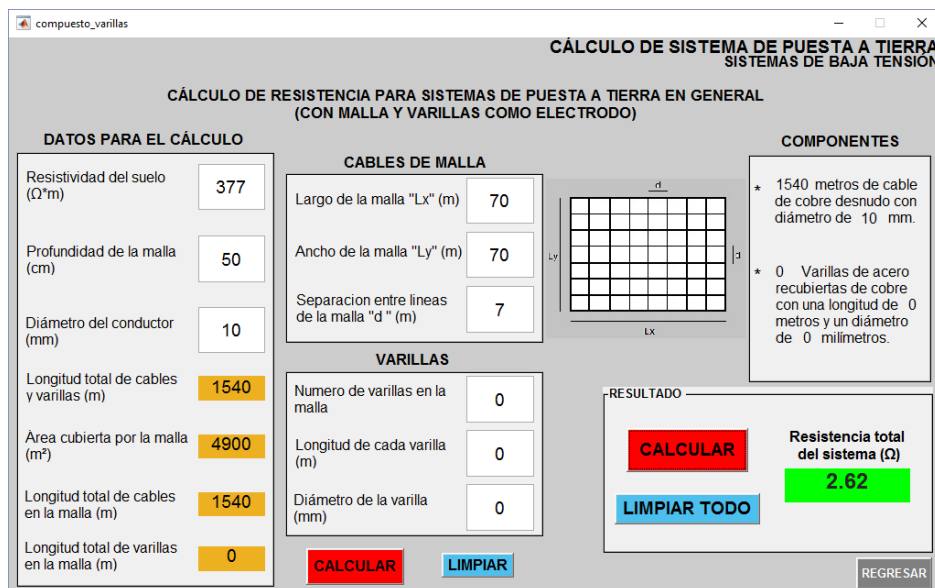
$$P = 377 \Omega\text{-m}$$

$$h = 50 \text{ cm}$$

$$A = L_x:70\text{m} \times L_y:70\text{m}$$

$$d = 7 \text{ m}$$

$$dc = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$$

CÁLCULO DE SISTEMA DE PUESTA A TIERRA
SISTEMAS DE BAJA TENSION

CÁLCULO DE RESISTENCIA PARA SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN GENERAL
(CON MALLA Y VARILLAS COMO ELECTRODO)

DATOS PARA EL CÁLCULO

Resistividad del suelo ($\Omega\text{-m}$)	377
Profundidad de la malla (cm)	50
Diámetro del conductor (mm)	10
Longitud total de cables y varillas (m)	1540
Área cubierta por la malla (m^2)	4900
Longitud total de cables en la malla (m)	1540
Longitud total de varillas en la malla (m)	0

CABLES DE MALLA

Largo de la malla "Lx" (m)	70
Ancho de la malla "Ly" (m)	70
Separación entre líneas de la malla "d" (m)	7

VARILLAS

Numero de varillas en la malla	0
Longitud de cada varilla (m)	0
Diámetro de la varilla (mm)	0

COMPONENTES

- * 1540 metros de cable de cobre desnudo con diámetro de 10 mm.
- * 0 Varillas de acero recubiertas de cobre con una longitud de 0 metros y un diámetro de 0 milímetros.

RESULTADO

CALCULAR Resistencia total del sistema (Ω)
2.62

LIMPIAR TODO **REGRESAR**

Figura 10. Resultado en el software caso 1.

- **Caso 2: Malla cuadrada con varillas de tierra.**

$P = 100 \Omega\text{-m}$

$h = 50 \text{ cm}$

$A = L_x:10\text{m} \times L_y:10\text{m}$

$d = 0.4 \text{ m}$

$d_c = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$

$n = 8 \text{ varillas}$

$L_r = 3 \text{ m}$

$d_r = 10 \text{ mm}$

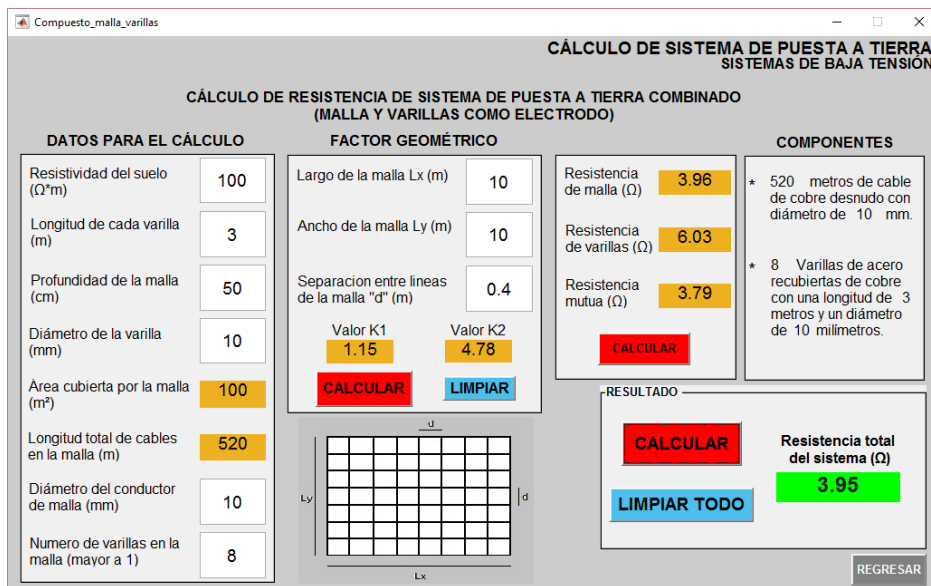


Figura 11. Resultado en el software caso 2.

- **Caso 3: Malla cuadrada sin varillas de tierra.**

$P = 100 \Omega\text{-m}$

$h = 50 \text{ cm}$

$A = L_x:10\text{m} \times L_y:10\text{m}$

$d = 0.4 \text{ m}$

$d_c = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$

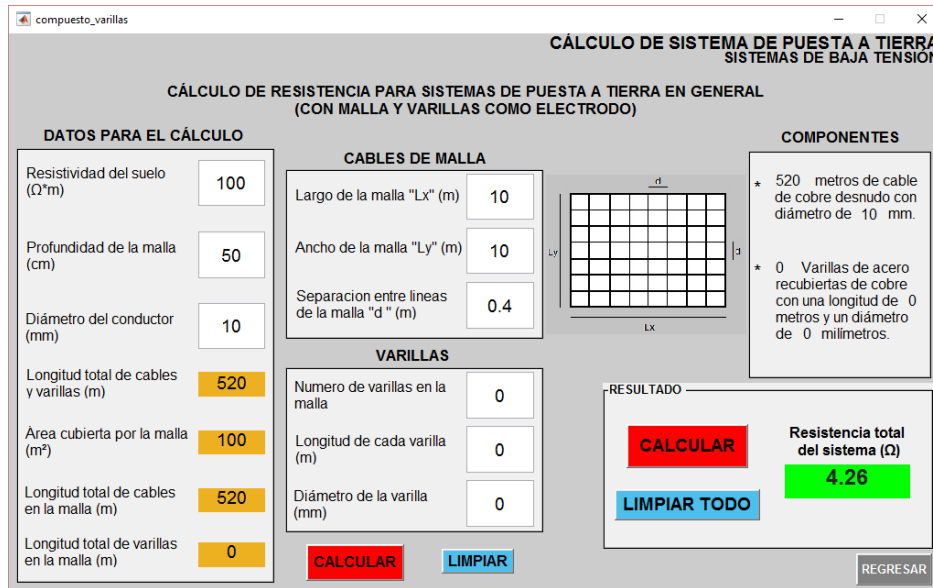


Figura 12. Resultado en el software caso 3.

- **Caso 4: Malla cuadrada con varillas de tierra.**

$P = 100 \Omega \cdot m$

$h = 50 \text{ cm}$

$A = L_x:10m \times L_y:10m$

$d = 0.625 \text{ m}$

$d_c = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$

$n = 4 \text{ varillas}$

$L_r = 3 \text{ m}$

$d_r = 10 \text{ mm}$

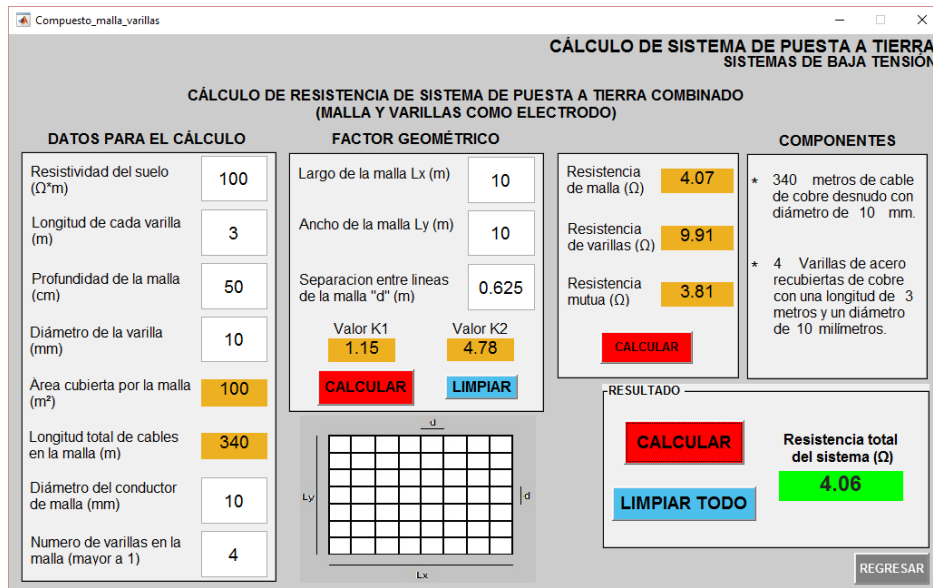


Figura 13. Resultado en el software caso 4.

- **Caso 5: Malla rectangular sin varillas de tierra.**

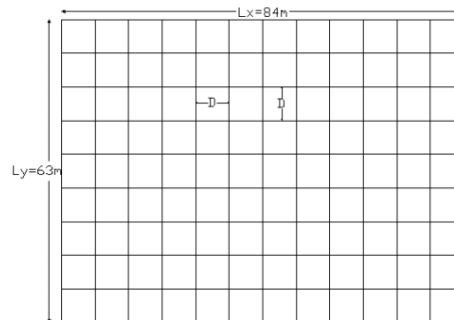
$P = 377 \Omega \cdot m$

$h = 50 \text{ cm}$

$A = L_x:84\text{m} \times L_y:63\text{m}$

$d = 7 \text{ m}$

$dc = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$



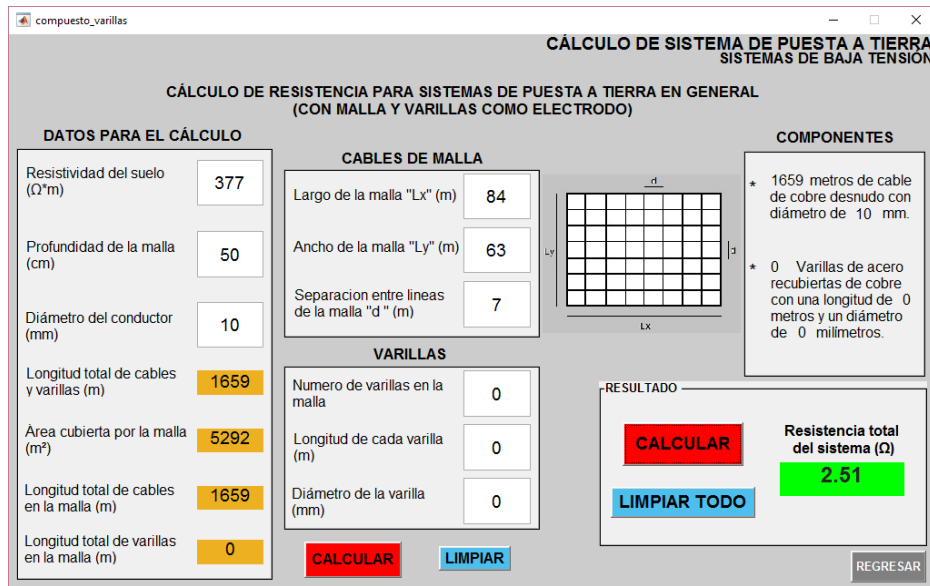


Figura 14. Resultado en el software caso 5.

- **Caso 6: Malla cuadrada con electrodos.**

$P = 377 \Omega \cdot m$

$h = 50 \text{ cm}$

$A = Lx:70m \times Ly:70m$

$d = 7 \text{ m}$

$dc = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$

$n = 20 \text{ varillas}$

$Lr = 7.5 \text{ m}$

$dr = 10 \text{ mm}$

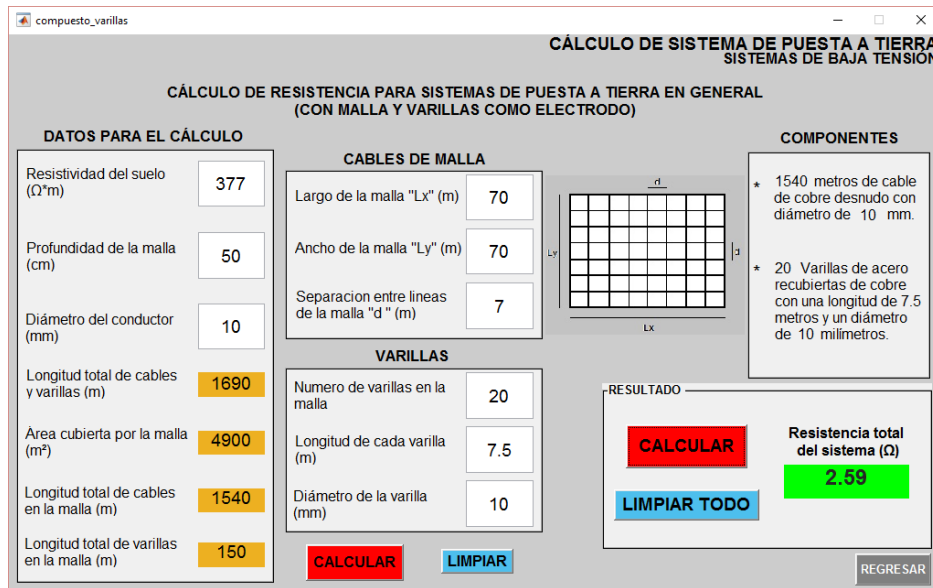


Figura 15. Resultado en el software caso 6.

- **Caso 7: Malla rectangular con electrodos.**

$P = 377 \Omega \cdot m$

$h = 50 \text{ cm}$

$A = Lx:84m \times Ly:63m$

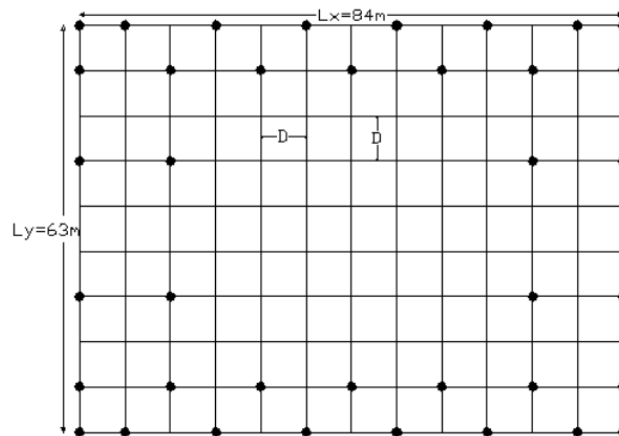
$d = 7 \text{ m}$

$dc = 2/0 \text{ AWG} = 0.01 \text{ m}$

$n = 38 \text{ varillas}$

$Lr = 10 \text{ m}$

$dr = 16 \text{ mm}$



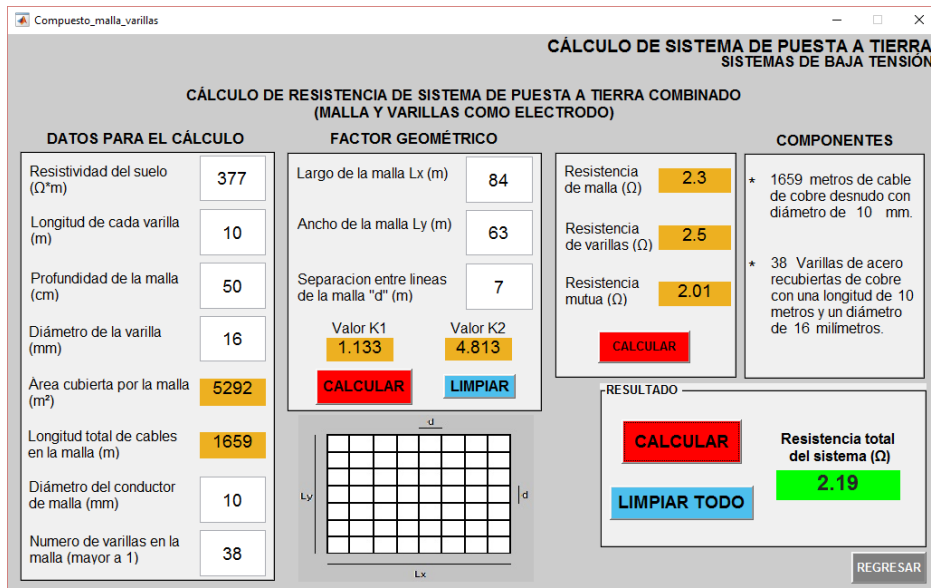


Figura 16. Resultado en el software caso 7.

De acuerdo a los ejemplos tomados como base y los resultados obtenidos con el software, se comparan los resultados en la Tabla 2:

Tabla 2.

Comparación de resultados según ejemplos tomados como base, con el SPT Calculador.

Caso o situación	Método utilizado	Resultado RSPT según el trabajo	Resultado SPT Calculador
1	Sverak (Sistema general)	2.616 Ω	2.62 Ω
2	Schwarz (Sistema combinado)	4.65 Ω	3.95 Ω
3	Sverak (Sistema general)	4.45 Ω	4.26 Ω
4	Schwarz (Sistema combinado)	4.81 Ω	4.06 Ω
5	Sverak (Sistema general)	2.5103 Ω	2.51 Ω
6	Sverak (Sistema general)	2.594 Ω	2.59 Ω
7	Schwarz (Sistema combinado)	2.19 Ω	2.19 Ω

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Comparativo de resultados obtenidos en el software SPT Calculador con base a los casos tomados como ejemplos. (Propia autoría)

Se puede evidenciar que los resultados comparados con los trabajos tomamos de base y los cálculos realizados con el software están ajustados, teniendo en cuenta que el método de Schwartz es más preciso comparado con el método de Sverak, debido a que este es un método simplificado que permite realizar el cálculo de una manera corta.

Adicionalmente, implementando el método de Schwartz en el software y aplicado a un sistema combinado (Malla-Varillas), muestra que el resultado entregado por el software se ajusta a lo esperado.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones:

- El software desarrollado permite realizar el cálculo de un sistema de puesta a tierra para aplicaciones en baja tensión.
- La programación está basada en los métodos (Wenner, Sverak y Schwarz) que son considerados como válidos por las normas nacionales e internacionales para el cálculo de SPT.
- En la validación de herramienta muestra situaciones reales y de diseño, donde los resultados obtenidos tienen la similitud con los resultados del software.
- Es una herramienta dinámica que otorga la manera de modificar las variables que se involucran en estos sistemas y así se pueden hacer varias configuraciones del SPT escogiendo la opción acorde a cada caso.
- Las ecuaciones planteadas y programadas en el software permiten al usuario modificar las variables en el SPT y muestra el resultado de la RSPT con cada cambio realizado.
- La interfaz gráfica de la herramienta, presenta un ambiente amigable, ya que el GUIDE de Matlab permite crear esta plataforma con diseños y estructuras que son claros y didácticos para el usuario.
- El módulo de cálculo de resistividad del terreno y de la RSPT simple, es la opción para aquellos usuarios que quieren hacer un cálculo rápido combinando el resultado previo de una medición de resistividad del terreno, con la resistencia de un sistema simple (un solo electrodo).
- Las pruebas de los resultados de los ejemplos y situaciones planteadas, con los resultados arrojados por el software SPT Calculador, mostraron valores aceptados

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

por norma. Así demuestra la confiabilidad y el respaldo que tiene el software para los cálculos de SPT.

- El manual de usuario presenta una guía donde al seguir los pasos propuestos y ejemplos de operación, se puede aprender a utilizar el software.

5.2. Recomendaciones:

- Para el uso del software de una manera correcta y profesional, tener presente la normatividad y los estándares de la localidad, que definan las especificaciones de los componentes de los SPT a implementar y los rangos permisibles del valor de la RSPT.
- Los resultados de RSPT que entregue el software, dependen estrictamente de la veracidad de los datos que el usuario utilice. Adicionalmente, usar el software para solamente en aplicaciones de baja tensión.

5.3. Trabajo futuro:

- Aumentar la plataforma del software para que permita los cálculos de sistemas en media tensión y alta tensión. Así como incluir otros métodos de cálculo de RSPT que ofrezcan al usuario una amplia variedad de opciones.
- Elaborar una interfaz aplicable a dispositivos móviles para tener esta herramienta a disposición en cualquier momento o situación que se requiera.
- Al ingresar datos al software, evitar que el usuario obtenga resultados erróneos y guiar el paso a paso en el ingreso de campos de datos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

6. REFERENCIAS

Área Ingeniería Distribución EPM. RA6--015 (2008). EPM.

Área Ingeniería Distribución EPM. RA6-015 Medida de resistencia de puesta a tierra (2012). Colombia: EPM.

Cárdenas Valencia, J. D., & Galvis García, E. (2011). *Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de Wenner*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/2568>

Colella, P., Pons, E., Tommasini, R., Sanseverino, E. R., Luisa, M., Silvestre, D., & Zizzo, G. (2017). Earth Resistance Measurements in Urban Contexts : Problems and Possible Solutions. *IEEE*, (1), 2–7.

Gonzales, C. (2004). *Resistencia de las puestas a tierra*.

Grupo de Homologación Técnica EPM. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA CONECTOR DE PUESTA A TIERRA, Pub. L. No. Versión 1.0, 19 (2015). Colombia: EPM.

J.Verona Lobo;C.Triviño Bernate. (2008). METODOS PARA MEDICION DE RESISTIVIDAD Y RESISTENCIA EN TERRENOS, USADOS PARA PIUESTA A TIERRA.

M.Martins. (2012). Puesta a tierra. Retrieved January 24, 2018, from <http://aterramiento.blogspot.com.co/2012/>

Michaels, K. M. (1995). Earth ground resistance testing for low-voltage power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(1), 206–213. <https://doi.org/10.1109/28.363027>

Ministerio de desarrollo económico. NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 2050 (1998). Medellín, colombia.

Ministerio de minas y energía. REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE), Resolución 90708 § (2013). Colombia.

Moreno, G. (1988). *Anotaciones sobre algunos metodos de calculo de la resistencia de puesta a tierra*. Medellín.

R. Ruelas Gomez. (2012). teoria y diseños de sistemas de tierras.

Ramirez Castaño, S., & Cano Plata, E. A. (2010). *Sistemas de Puesta a Tierra: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/4770/>

Rojas, G. (2016). *Manual De Sistemas De Puesta a Tierra* (Vol. 1).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


7. APENDICE A.

MANUAL DE USUARIO “SPT Calculador”.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES  _____

 _____

FIRMA ASESOR  _____

FECHA ENTREGA: 31/01/2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____