



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

#### PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN”**

#### **AUTORES:**

Caiza Moreno Jefferson Fernando

Torres Gonzaga Christian Fernando

#### **TUTOR:**

Ing. MSc. Pesántez Palacios Gabriel Napoleón

LATACUNGA – ECUADOR

Septiembre 2020

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Caiza Moreno Jefferson Fernando** y **Christian Fernando Torres Gonzaga**, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**”, siendo **Ing. MSc. Pesántez Palacios Gabriel Napoleón**, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

  
\_\_\_\_\_  
Caiza Moreno Jefferson Fernando  
C.C.171806423-9

  
\_\_\_\_\_  
Torres Gonzaga Christian Fernando  
C.C.180484588-9

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN”**, de los señores **Caiza Moreno Jefferson Fernando** y **Torres Gonzaga Christian Fernando**, de la Carrera de **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de **Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Septiembre, 2020

  
\_\_\_\_\_  
**Tutor**  
Ing. MSc. Pesántez Palacios Gabriel Napoleón  
C.C. 030189388-9

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de **Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**; por cuanto, los postulantes: **Caiza Moreno Jefferson Fernando** y **Christian Fernando Torres Gonzaga**, con el título de Proyecto de titulación: “**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Septiembre, 2020

Para constancia firman:

  
\_\_\_\_\_  
**Lector 1 (Presidente)**  
Ing. MSc. Xavier Proaño  
C.C. 050265642-4

  
\_\_\_\_\_  
**Lector 2**  
Ing. MSc. Franklin Medina  
C.C. 050125961-8

\_\_\_\_\_  
**Lector 3 (Secretario)**  
Ing. MSc. Wilian Guaman  
C.C. 060357895-6

## **AGRADECIMIENTOS**

*Primeramente, agradecemos a Dios y la Virgen por bendecirnos y cuidarnos durante toda nuestra etapa universitaria, por habernos dado fuerzas, conocimiento y sabiduría para cumplir con el deseo de ser profesionales.*

*Nuestro más sincero y grande agradecimiento al Ing. MSc. Gabriel Pesántez, por habernos guiado, enseñado y compartido sus conocimientos, para culminar con nuestro proyecto de investigación.*

*Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi que nos abrió las puertas para formarnos como profesionales en la carrera de Ingeniería Eléctrica y a todos nuestros docentes que día a día nos supieron guiar y llenar de nuevos conocimientos.*

***Jefferson Caiza y Christian Torres***

## **DEDICATORIA**

*Este logro primeramente se lo dedico a Dios por haberme dado la vida, salud, fuerza, inteligencia, sabiduría y entusiasmo, para seguir adelante cada día de mi vida y permitirme haber llegado a este tan anhelado momento de mi formación como profesional.*

*A mis padres Sandra y Ernesto que fueron las personas que apoyaron cada día con sus mensajes de aliento, impulsándome a seguir adelante y no detenerme antes las adversidades que se presentaron en el camino. A mi abuelita Mariana que durante toda mi vida la he considerado como mi propia madre, ha estado conmigo siempre en los buenos y malos momentos, guiándome y aconsejádme que siempre debo ir por el camino del bien para ser una persona buena, responsable, respetuosa, honesta y cumplidora en mis estudios para llegar a ser un buen profesional.*

*A mis tíos Carlos y Roció que creyeron en mi desde que inicie mi formación académica, de una u otra manera contribuyeron en esta etapa tan importante de mi vida. Por ultimo a mis hermanos que sigan adelante con sus estudios que en esta vida nada es imposible siempre y cuando luchen por conseguirlo.*

**Jefferson Caiza**

## **DEDICATORIA**

*Con mucha alegría dedico este proyecto a Dios por mantenerme con vida y salud, por darme fuerzas y permitirme culminar con esta etapa tan importante de mi vida.*

*A mi hija Darla Torres, siendo mi principal impulso y motivación para seguir adelante, a mis padres por darme su amor y confianza, por ser los pilares fundamentales de mi carrera universitaria, a mis hermanos que son parte de mi vida. Esto fue posible gracias a todos ellos.*

*Dedicado con mucho amor y cariño.*

**Christian Torres**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	i
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN .....	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA .....	v
DEDICATORIA .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xvi
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	3
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	4
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	4
Beneficiarios directos: .....	4
Beneficiarios indirectos: .....	4
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
6. OBJETIVOS.....	5
General.....	5
Específicos .....	5
7. ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS .....	6
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA .....	7
8.1. Sistema de puesta a Tierra (SPT) .....	7
8.2. Importancia de los sistemas de puesta a tierra .....	7
8.3. Aplicación de los sistemas de puesta a tierra .....	7
8.4. Diseño de sistemas de puesta a tierra .....	8
8.5. Clasificación de los sistemas de puesta a tierra.....	8
8.6. Características de los sistemas de puesta a tierra .....	8
8.7. Red de puesta a tierra .....	8
8.8. Componentes de los sistemas de puesta a tierra.....	9
8.8.1. Electrodo de puesta a tierra .....	9



8.8.2.	Electrodos horizontales o contrapesos .....	9
8.8.3.	Conductores de enlace .....	9
8.8.4.	Malla de tierra .....	9
8.8.5.	Conectores .....	9
8.8.6.	Suelda Exotérmica .....	9
8.8.7.	Hilo de guarda.....	10
8.8.8.	Cimentación .....	10
8.9.	Resistencia del terreno .....	10
8.10.	Elementos que influyen en la resistencia del terreno .....	10
8.11.	Tipos de suelo.....	11
8.12.	Métodos para la medida de la resistividad del terreno .....	11
8.12.1.	Método de Wenner.....	11
8.12.2.	Método de dos capas.....	12
8.12.3.	Método de Schlumberger – Palmer .....	14
8.13.	Métodos de la medición de la resistividad de puesta a tierra .....	14
8.13.1.	Método de la pendiente .....	15
8.13.2.	Método de curva de caída de potencial.....	15
8.13.3.	Método de la regla del 62% .....	16
8.13.4.	Método de la intersección de curvas .....	16
8.14.	Puesta a tierra en subestaciones .....	17
8.14.1.	Normas aplicadas .....	17
8.15.	Valores permitidos de resistencia eléctrica en subestaciones .....	17
8.16.	Metodología para diseñar el SPT en S/E.....	18
8.16.1.	Resistividad del suelo .....	18
8.16.2.	Corriente de diseño .....	18
8.16.3.	Sección y diámetro del conductor.....	19
8.16.4.	Tensión de paso y toque.....	20
8.16.5.	Factor de reducción superficial .....	21
8.16.6.	Geometría de la malla .....	21
8.16.7.	Resistencia de la malla.....	22
8.16.8.	Corriente de la malla.....	22
8.16.9.	Elevación del potencial de tierra ( <b>GPR</b> ) .....	24
8.16.10.	Tensiones reales de diseño de la malla .....	24
8.16.11.	Coeficientes geométricos .....	24
8.16.12.	Verificación de tensiones permitidas .....	25

8.17.	Puesta a tierra en líneas de transmisión.....	25
8.18.	Normas aplicadas .....	25
8.18.1.	Instructivo CELEC EP para el diseño de puesta a tierra en L/T I05.PAV.02.01.02.....	25
8.18.2.	MEXICANA Redes de Tierra para estructuras de L/T aéreas de 69 a 400 KV.....	26
8.19.	Valores permitidos de resistencia eléctrica y tensiones de una línea de transmisión.....	26
8.20.	Metodología para diseñar el SPT en L/T .....	26
8.20.1.	Resistividad del suelo .....	27
8.20.2.	Resistencia eléctrica de la red de tierra.....	27
8.20.3.	Componentes para evaluar la resistencia de puesta a tierra.....	27
8.20.4.	Instalación de elementos recomendados según el nivel de resistividad de suelo.....	29
9.	PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS .....	30
10.	METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....	30
	Modalidades de la investigación.....	30
	Niveles o tipos de investigación .....	30
	Métodos de la investigación .....	30
	Técnicas de investigación .....	31
11.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	31
	Flujograma principal del programa.....	31
	Análisis de resultados obtenidos en el programa.....	32
	Dimensionamiento del caso base para SPT en una subestación .....	32
	Comparación de resultados entre normas e instructivos, empleando datos del SPT de la subestación A .....	38
	Dimensionamiento del caso base para el SPT en una línea de transmisión.....	42
	Caso base realizado con el procedimiento de CELEC.....	42
	Caso base del programa con el procedimiento de la norma mexicana.....	44
	Comparación del programa entre CELEC y norma mexicana para el mismo caso de estudio.....	47
12.	IMPACTOS .....	49
	Impacto técnico.....	49
	Impacto social .....	49
	Impacto económico.....	50
13.	PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO.....	50

14.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	51
	Conclusiones .....	51
	Recomendaciones .....	52
15.	BIBLIOGRAFÍA .....	52
16.	ANEXOS .....	55
	Anexo I: Glosario de términos o abreviaturas .....	55
	Anexo II. Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (Alimentadores) .....	56
	Anexo III. Configuración del radio medio entre varillas .....	56
	Anexo IV: Electrodo verticales y Contra – antenas recomendadas para el diseño de un sistema de puesta a tierra en L/T según el límite de resistividad del suelo .....	57
	Anexo V. Diagramas de flujos .....	58
	Anexo VI. Validación de la herramienta informática para la resistividad del suelo por el método de 2 capas .....	62
	Anexo VII. Validación de la herramienta informática para SPT en subestaciones .....	62
	Anexo VIII. Validación de la herramienta informática para SPT en líneas de transmisión ...	66
	Anexo IX. Resolución de los ejercicios para subestaciones .....	69
	Anexo X. Resolución de los ejercicios para líneas de transmisión .....	84
	Anexo XI. Manual de instalación del programa .....	96
	Anexo XII. Manual de uso del programa .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Método de Wenner para la medición de la resistividad. ....	12
<b>Figura 2.</b> Suelo estratificado de dos capas. ....	13
<b>Figura 3.</b> Método de Schlumberger – Palmer. ....	14
<b>Figura 4.</b> Método de la pendiente. ....	15
<b>Figura 5.</b> Método de caída de potencial. ....	15
<b>Figura 6.</b> Método de la regla del 62%. ....	16
<b>Figura 7.</b> Método de la intersección de curvas. ....	17
<b>Figura 8.</b> Electrodo horizontales de 1 punta. ....	27
<b>Figura 9.</b> Electrodo verticales y malla de puesta a tierra. ....	28
<b>Figura 10.</b> Electrodo verticales y malla de puesta a tierra. ....	29
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujos general. ....	31
<b>Figura 12.</b> Malla cuadrada sin varillas. ....	33
<b>Figura 13.</b> Malla cuadrada con varillas ....	34
<b>Figura 14.</b> Malla rectangular sin varillas ....	35
<b>Figura 15.</b> Malla rectangular con varillas. ....	36
<b>Figura 16.</b> Malla en L sin varillas. ....	37
<b>Figura 17.</b> Malla en L con varillas. ....	38
<b>Figura 18.</b> Diseño de la malla para la subestación A. ....	39
<b>Figura 19.</b> Configuración diseño combinado con 2 contrapesos. ....	43
<b>Figura 20.</b> Configuración diseño combinado con contrapesos adicionales. ....	44
<b>Figura 21.</b> Diseño de Pat con cimentación en concreto. ....	45
<b>Figura 22.</b> Diseño de Pat con cimentación en acerada. ....	46
<b>Figura 23.</b> Diseño de Pat con CELEC. ....	47
<b>Figura 24.</b> Diseño de Pat con la norma mexicana. ....	48
<b>Figura 25.</b> Flujograma del SPT en subestaciones empleando por el instructivo de CELEC. .	58
<b>Figura 26.</b> Flujograma del SPT en subestaciones mediante la norma IEEE Std-80. ....	59
<b>Figura 27.</b> Flujograma del SPT en líneas transmisión empleando por el instructivo de CELEC. ....	60
<b>Figura 28.</b> Flujograma del SPT en líneas de transmisión mediante la norma mexicana. ....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Fórmulas para hallar la resistividad del suelo. ....	12
<b>Tabla 2:</b> Selección del valor $\rho_a/\rho_1$ en pendiente de la curva obtenida de $\rho_2/\rho_1$ .....	13
<b>Tabla 3:</b> Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.....	18
<b>Tabla 4:</b> Factor de decremento de CELEC – TRANELECTRIC.....	18
<b>Tabla 5:</b> Factor de decremento de la norma IEEE Std – 80. ....	19
<b>Tabla 6:</b> Sección y diámetro del conductor. ....	19
<b>Tabla 7:</b> Constante de materiales.....	20
<b>Tabla 8:</b> Fórmulas para la tensión de paso y toque. ....	21
<b>Tabla 9:</b> Tipos de malla a tierra. ....	22
<b>Tabla 10:</b> Tipos de fallas a tierra. ....	23
<b>Tabla 11:</b> Tensiones de diseño. ....	24
<b>Tabla 12:</b> Coeficientes geométricos. ....	24
<b>Tabla 13.</b> Valores aceptables de resistencia eléctrica dependiendo del nivel de tensión y su altitud.....	26
<b>Tabla 14.</b> Tipos de cimentaciones. ....	27
<b>Tabla 15.</b> Parámetros para el cálculo de la resistencia. ....	29
<b>Tabla 16.</b> Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se debe instalar..	30
<b>Tabla 17.</b> Datos para el caso base.....	32
<b>Tabla 18.</b> Resultados de la malla cuadrada sin varillas. ....	32
<b>Tabla 19.</b> Resultados de la malla cuadrada con varillas. ....	33
<b>Tabla 20.</b> Resultados de la malla rectangular sin varillas.....	34
<b>Tabla 21.</b> Resultados de la malla rectangular con varillas.....	35
<b>Tabla 22.</b> Resultados de la malla en L sin varillas. ....	36
<b>Tabla 23.</b> Resultados de la malla en L con varillas. ....	37
<b>Tabla 24.</b> Datos de la subestación A.....	38
<b>Tabla 25.</b> Resultados obtenidos por CELEC. ....	39
<b>Tabla 26.</b> Resultados obtenidos por la IEEE Std-80. ....	39
<b>Tabla 27.</b> Proforma de materiales CELEC unión soldada.....	40
<b>Tabla 28.</b> Proforma de materiales CELEC unión emperrada.....	41
<b>Tabla 29.</b> Proforma de materiales por la IEEE Std-80. ....	41
<b>Tabla 30.</b> Resultados de la configuración electrodos verticales 4 varillas. ....	42
<b>Tabla 31.</b> Resultados configuración electrodos horizontales o contrapesos.....	42
<b>Tabla 32.</b> Resultados configuración electrodos verticales con malla. ....	43
<b>Tabla 33.</b> Resultados configuración de sistema combinado con 1 contrapeso.....	43

<b>Tabla 34.</b> Resultados configuración de sistema combinado con 2 contrapesos. ....	43
<b>Tabla 35.</b> Resultados configuración de sistema combinado con contrapeso adicional. ....	44
<b>Tabla 36.</b> Resistencia de cimentación en acero y concreto, sin elementos adicionales.....	45
<b>Tabla 37.</b> Resistencia de cimentación en acero y concreto, con elementos adicionales. ....	46
<b>Tabla 38.</b> Resultados L/T aplicando instructivo CELEC. ....	47
<b>Tabla 39.</b> Proforma L/T aplicando instructivo CELEC.....	48
<b>Tabla 40.</b> Resultados L/T aplicando la norma mexicana.....	48
<b>Tabla 41.</b> Proforma L/T aplicando norma mexicana. ....	49
<b>Tabla 42.</b> Presupuesto del proyecto. ....	50
<b>Tabla 43:</b> Impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución. ....	56
<b>Tabla 44.</b> Configuración de las varillas para el RMG. ....	56
<b>Tabla 45.</b> Electrodo verticales y Contra – antenas para el diseño de un SPT en L/T según el límite de resistividad.....	57
<b>Tabla 46.</b> Validación del ejercicio (Documento IEEE Std-80 vs Programa suelo de 2 capas).....	62
<b>Tabla 47.</b> Validación del ejercicio (Instructivo CELEC vs Programa CELEC). ....	63
<b>Tabla 48.</b> Validación del ejercicio (Norma IEEE Std-80 vs Programa CELEC). ....	63
<b>Tabla 49.</b> Validación del ejercicio (Norma IEEE Std-80 vs Programa IEEE Std-80). ....	64
<b>Tabla 50.</b> Validación del ejercicio (Documento IEEE Std-80 vs Programa IEEE Std-80)....	65
<b>Tabla 51.</b> Datos obtenidos en el ETAP.....	66
<b>Tabla 52.</b> Validación ETAP con (CELEC vs IEEE Std-80).....	66
<b>Tabla 53.</b> Validación (Programa L/T CELEC vs línea 1 y 2 de 69 kV).....	67
<b>Tabla 54.</b> Validación (Programa L/T CELEC vs línea 1 de 69 kV).....	67
<b>Tabla 55.</b> Validación (Programa L/T CELEC vs línea 3 de 138 kV).....	67
<b>Tabla 56.</b> Validación (Programa L/T CELEC vs línea 3 de 138 kV con contrapesos). ....	67
<b>Tabla 57.</b> Validación de cimentación acerada. ....	68
<b>Tabla 58.</b> Validación de cimentación en concreto.....	68
<b>Tabla 59.</b> Validación de cimentación en concreto con electrodos adicionales.....	68

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### TITULO: “DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN”

**Autor/es:** Caiza Moreno Jefferson Fernando

Torres Gonzaga Christian Fernando

#### RESUMEN

Este trabajo presenta la investigación de los sistemas de puesta a tierra aplicando diferentes normas tanto para subestaciones como para líneas de transmisión. Dado que en nuestro país no existe un programa que permita considerar la normativa más específica en la explique, indique o muestre el procedimiento de cálculo de un sistema de puesta a tierra más apropiado, por lo que el programa se sustentará en base a normativas nacionales e internacionales que se encuentren vigentes, con el fin de mejorar los SPT (Sistemas de Puesta a Tierra), porque hoy en día el sector eléctrico ecuatoriano está explotando la energía renovable e implementado nuevas subestaciones y expandiendo las líneas de transmisión, por lo que es necesario tomar en cuenta el diseño correcto de un SPT para brindar seguridad a las personas, protección en los sistemas y equipos eléctricos, previendo con ello pérdidas humanas o económicas. El trabajo de investigación se enfoca en desarrollar una herramienta informática en el software libre “Python”, para mediante ello realizar los respectivos cálculos como son la resistividad, corrientes de diseño, sección de conductor, voltajes de toque y paso, resistencia del mallado, corriente máxima de la malla, tensiones de diseño, etc. obteniendo el diseño adecuado del sistema de puesta a tierra en las subestaciones o líneas de transmisión, basándose en distintos métodos de cálculos, para obtener la resistencia eléctrica del suelo independientemente de la forma de malla, configuración de electrodos, conductores y contrapesos. El software se maneja de una manera dinámica que permitirá ir cambiando variables para el diseño de la red de tierra ya sea en subestaciones o líneas de transmisión con el fin de tener el resultado adecuado a las condiciones ingresadas, mostrando gráficamente los conductores, mallado y electrodos en resolución 3D. Además, este programa tiene la capacidad de crear una proforma detallando la cantidad de material a utilizarse en el Sistema de Puesta a Tierra con el fin de comparar resultados y costos entre los diseños realizados por las distintas normativas y que el diseñador pueda tomar la mejor decisión de aplicación al SPT.

**Palabras claves:** Sistema de Puesta a Tierra, Subestaciones, Líneas de Trasmisión.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL**

**THEME: DEVELOPMENT OF A COMPUTER TOOL FOR THE DESIGN OF  
GROUNDING SYSTEMS IN SUBSTATIONS AND TRANSMISSION LINES**

**Authors:** Caiza Moreno Jefferson Fernando  
Torres Gonzaga Christian Fernando

**ABSTRACT**

This work presents the investigation of grounding systems by applying different standards for both substations and transmission lines. Since in our country there is no program that allows us to consider the most specific regulations in the explain, indicate or show the procedure for calculating a more appropriate grounding system, so the program will be based on national and international regulations that are in force, in order to improve the PTSTs (Grounding Systems), because today the Ecuadorian electricity sector is exploiting renewable energy and implementing new substations and expanding transmission lines, so it is necessary to take into account the correct design of an SPT to provide safety for people, protection in electrical systems and equipment, thus anticipating human or economic losses. The research work focuses on developing a computer tool in the free software "Python", in order to perform the respective calculations such as resistivity, design currents, conductor section, touch and step voltages, mesh resistance, maximum mesh current, design stresses, etc. obtaining the proper design of the grounding system in the substations or transmission lines of transmission , based on different calculation methods, to obtain the electrical resistance of the soil regardless of the mesh shape, electrode configuration, conductors and counterweights. The software is handled in a dynamic way that will allow to change variables for the design of the ground network either in substations or transmission lines in order to have the appropriate result to the conditions entered, graphically showing the conductors, meshing and electrodes in 3D resolution. In addition, this program has the ability to create a proforma detailing the amount of material to be used in the Grounding System in order to compare results and costs between the designs made by the different regulations and that the designer can make the best application decision to the SPT.

**Keywords:** Grounding System, Substations, Submission Lines.



## AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente de Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los señores egresados de la **CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA y APLICADAS: CAIZA MORENO JEFFERSON FERNANDO Y TORRES GONZAGA CHRISTIAN FERNANDO** cuyo título versa “**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA EN SUBESTACIONES Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, septiembre del 2020

Atentamente,



MSc. Alison Mena Barthelotty  
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS  
C.C. 0501801252



## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

### **Título del proyecto:**

Desarrollo de una herramienta informática para el diseño de sistemas de puestas a tierra en subestaciones y líneas de transmisión.

### **Fecha de inicio:**

Mayo 2020

### **Fecha de finalización:**

Septiembre 2020

### **Lugar de ejecución:**

San Felipe, Eloy Alfaro, Latacunga, Cotopaxi, Universidad Técnica de Cotopaxi

### **Facultad que auspicia:**

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

### **Carrera que auspicia:**

Ingeniería Eléctrica

### **Proyecto de investigación vinculado:**

- Diseño de sistema de puesta a tierra para subestaciones y líneas de transmisión
- Simulación en el software de Phyton/Spyder

### **Equipo de Trabajo:**

- Ing. MSc. Pesántez Palacios Gabriel Napoleón
- Caiza Moreno Jefferson Fernando
- Torres Gonzaga Christian Fernando

### **Tutor de titulación:**

**Nombres y apellidos:** Gabriel Napoleón Pesántez Palacios

**Fecha de Nacimiento:** 15/05/1988

**Estado Civil:** Soltero

**Nacionalidad:** Ecuatoriana

**Cedula de ciudadanía:** 030189388-9

**Dirección:** Urbanización “Los Arupos “

**Teléfono:** 0998596423

**Email:** gabriel.pesantes3889@utc.edu.ec

**Nivel primario:** Escuela Ciudad de Azogues

**Nivel secundario:** Colegio Juan Bautista Vázquez

**Nivel superior:** Universidad De Cuenca

**Datos personales (Postulante 1):**

**Nombres y apellidos:** Caiza Moreno Jefferson Fernando

**Fecha de Nacimiento:** 17/08/1996

**Estado Civil:** Soltero

**Nacionalidad:** Ecuatoriana

**Cedula de ciudadanía:** 171806423-9

**Dirección:** Taisha OE10-94 y Julián Estrella – Barrio Santa Bárbara Baja – Quito

**Teléfono:** 0985805299

**Email:** jefferson.caiza4239@utc.edu.ec

**Nivel primario:** Escuela Particular Nuestra Señora de los Dolores, Machachi – Ecuador

**Nivel secundario:** Academia Aeronáutica “Mayor Pedro Trasversari”, Quito – Ecuador

**Datos personales (Postulante 2):**

**Nombres y apellidos:** Torres Gonzaga Christian Fernando

**Fecha de Nacimiento:** 5/03/1994

**Estado Civil:** Soltero

**Nacionalidad:** Ecuatoriana

**Cedula de ciudadanía:** 180484588-9

**Dirección:** Cien Fuegos s/n y Reina del Cisne – Izamba, Barrio Corazón de Jesús - Ambato

**Teléfono:** 0992928581

**Email:** christian.torres5889@utc.edu.ec

**Nivel primario:** Escuela Fiscal “Juan Benigno Vela”, Ambato - Ecuador

**Nivel secundario:** “Colegio Técnico Atahualpa”, Ambato - Ecuador

**Área de Conocimiento:**

- Sistemas Eléctricos de Potencia
- Diseño de Alto Voltaje
- Operación de Subestaciones
- Líneas de Trasmisión
- Seguridad industrial

**Línea de investigación:** Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

**Sub líneas de investigación de la Carrera:** Explotación y diseño de Sistemas Eléctricos de Potencia.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

El presente trabajo está orientado en el desarrollo de una herramienta informática para el diseño de sistemas de puestas a tierra en S/E y L/T, mediante el software de Phyton/Spyder, aplicando procedimientos de normas nacionales e internacionales para el SPT. El programa permite realizar varios diseños de la malla, calculando los diferentes parámetros que intervienen dentro del sistema, entre los principales; las tensiones tolerables de toque y paso que deben ser mayores a las tensiones tolerables reales, exportando los resultados a una hoja de Excel.

Además, permite el ingreso de diversos datos para la configuración de malla siendo rectangular cuadrada o en L, y mostrándola en resolución 3D, permitiendo ir variando la resistencia de la red de malla y poder compararla con la resistencia del sistema establecida para las subestaciones y líneas de transmisión. Además, el programa cuenta con una base de datos donde se pueden visualizar las distintas tablas de conductores, factores, impedancias, etc. También cuenta con una lista de materiales y precios, con la finalidad de crear la proforma en base al SPT diseñado.

### **3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Actualmente en el Ecuador no existe una normativa clara que especifique el procedimiento para realizar el diseño del sistema de puesta a tierra en subestaciones o líneas de transmisión, lo más cercano a esto que se tiene es un instructivo establecido por CELEC, que está basada en las normas IEEE std-80.

Por esta razón, se ve la necesidad de abordar el tema con el fin de analizar lo antes mencionado en base a eso se considera importante implementar una herramienta informática que permita realizar el cálculo de los diferentes parámetros de resistividad y resistencia en varios tipos de suelos y espacios donde pueda configurarse automáticamente el sistema de puesta a tierra.

EL constante aumento en la demanda energética crea la necesidad de que el sector eléctrico ecuatoriano se amplíe constantemente, lo se están construyendo nuevas centrales de generación, subestaciones y expandiendo líneas de transmisión, por lo que es necesario realizar el estudio de los diferentes tipos de suelos empezando por conocer la resistividad de los mismos donde se instalaran los sistemas de puesta a tierra para subestaciones y torres en líneas de transmisión, ya que es un sistema de seguridad que conlleva a diferentes funciones como salvaguardar la vida de personas, protección de los sistemas y equipos eléctricos, por esta razón se debe realizar minuciosamente los cálculos de los sistemas de puesta a tierra previamente a su instalación.

### **4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO**

#### **Beneficiarios directos:**

- Estudiante de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi y otras carreras afines.

#### **Beneficiarios indirectos:**

- Diseñadores de sistemas de puesta a tierra.
- Constructores de proyectos eléctricos para subestaciones y líneas transmisión.

### **5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Los sistemas de puesta a tierra están diseñados en base a normativas internacionales vigentes mal aplicadas, por lo que no garantiza la calidad y confiabilidad del sistema ante una falla, esto causa errores de diseño, calculo y medición de la resistencia del SPT, teniendo como resultado datos incorrectos y elevados valores al momento de presentarse una falla en la subestación o línea de trasmisión.

Por lo general se pone énfasis en los voltajes tolerables de toque y paso, que son los encargados de indicar si el sistema de puesta a tierra está diseñado correctamente, caso contrario estos valores pueden afectar a los equipos que conformen el SEP, ocasionando averías y produciendo pérdidas económicas, en el peor de los casos hasta la muerte de las personas que se encuentren cerca del perímetro de la malla.

En el Ecuador se carece de una normativa clara y concisa, para determinar el diseño de sistemas de puesta a tierra en subestaciones y líneas de transmisión, en fusión a esta carencia se tomará como referencia el instructivo elaborada por CELEC, para generar una herramienta informática que facilite este estudio, también se basará en normas internaciones como la IEEE Std – 80 y Std – 81.

Por este motivo se va a desarrollar una herramienta informática, para calcular los sistemas de puesta a tierra en S/E y L/T, con la finalidad de comprobar si la resistencia calculada por medio del programa será la misma a la establecida en los estudios previos para la construcción y también se ocupará para realizar nuevos diseños de sistemas de puestas a tierra, permitiendo realizar algunas pruebas antes de construir un sistema de puestas a tierra.

## **6. OBJETIVOS**

### **General**

Elaborar una herramienta informática para el diseño de sistemas de puestas a tierra en subestaciones y líneas de transmisión a diferentes niveles de voltajes, con la finalidad de cumplir con el diseño correcto según la normativa seleccionada.

### **Específicos**

- Analizar las distintas normas nacionales e internacionales empleadas para la implementación de procedimientos que se deben considerar en el cálculo de los sistemas de puestas a tierra.
- Realizar un análisis bibliográfico de los métodos de cálculo que se pueden utilizar para determinar la resistividad del suelo dependiendo del área de construcción de la subestación o torre de transmisión.
- Diseñar la herramienta informática en el software de Python que permita seleccionar los distintos métodos de cálculos para diseñar un sistema a puesta a tierra en subestaciones y líneas de transmisión.

## 7. ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

	OBJETIVOS	ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD	MEDIOS DE VERIFICACIÓN
1	Analizar las distintas normas nacionales e internacionales empleadas para la implementación de procedimientos que se deben considerar en el cálculo de los sistemas de puestas a tierra.	Análisis bibliográfico de las normativas internacional de sistemas de puesta a tierra.  Determinación de los principales parámetros establecidos en el instructivo de CELEC sobre los SPT en S/E y L/T.	Procedimiento de cálculo para sistemas de puesta a tierra en subestación y líneas de transmisión.	<b>Técnica:</b> Investigación documental <b>Instrumento:</b> Textos, libros, artículos, revistas, tesis y normativas.
2	Realizar un análisis bibliográfico de los métodos de cálculo que se pueden utilizar para determinar la resistividad del suelo dependiendo del área de construcción de la subestación o torre de transmisión.	Estudio de los diferentes métodos de medición de la resistividad del suelo.  Determinación de las diversas configuraciones de la geometría de malla y patas de la torre dependiendo del área de construcción .	Fundamentación científica técnica y metodología.	<b>Técnica:</b> Investigación aplicada <b>Instrumento:</b> Análisis matemático
3	Diseñar la herramienta informática en el software de Python que permita seleccionar los distintos métodos de cálculos para diseñar un sistema a puesta a tierra en S/E y L/T.	Programación de los procedimientos de cálculo en el software de Phyton, para la determinación del SPT.  Comparación de diseños y resultados finales entre las diferentes normativas de los SPT.	Simulador para el diseño de sistemas de puesta a tierra en S/E o L/T.  Verificación de resultados finales para la aprobación del diseño de SPT.	<b>Técnica:</b> Investigación práctica <b>Instrumento:</b> Simulación en el Software de Phyton.

## **8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA**

### **8.1. Sistema de puesta a Tierra (SPT)**

En [1] el sistema de puesta a tierra “comprende de toda ligación metálica directa, sin fusible ni protección alguna, de sección suficiente, entre determinados elementos o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo, con objetivo de conseguir que el conjunto de instalaciones, edificios y superficie próxima del terreno no existan diferentes de potencial peligrosas y que al mismo tiempo, permita el paso a tierra de las corrientes de falla o de las descargas de origen atmosférico”.

### **8.2. Importancia de los sistemas de puesta a tierra**

En [2] menciona que la importancia de los sistemas de puesta a tierra es para evitar que cualquier equipo descargue su potencial eléctrico a tierra a través de nuestro cuerpo. En condiciones normales, cualquier equipo puede tener en sus partes metálicas una carga eléctrica bien por electricidad estática o bien por una derivación; para evitar precisamente una descarga eléctrica cuando tocamos dicho equipo se exige que este tenga sus partes metálicas con toma de tierra.

Es importante saber que el sistema de puesta a tierra es necesario en cualquier tipo de instalación eléctrica, sobre todo en S/E y L/T, ya que los operadores están expuestos a altos voltajes. Todas las estructuras metálicas deben mantener el menor potencial posible con respecto a tierra, sea en condiciones normales o falla, para evitar la presencia de potenciales peligrosos.

Por tal motivo las puestas a tierra son muy útiles, para reducir estos potenciales, se debe considerar que el valor de la resistencia de la puesta a tierra debe ser mínima con el fin de proveer la eliminación de la corriente de falla. Los SPT deben ser fiables, seguros y debe tener la capacidad de despejar las fallas en un corto tiempo, para evitar daños a equipos eléctricos u ocasionar lesiones corporales a los operadores y evitar pérdidas económicas.

### **8.3. Aplicación de los sistemas de puesta a tierra**

Por lo general los sistemas de puesta a tierra tienen varias utilidades, como pueden ser: en subestaciones, líneas de transmisión, residencias, edificios, equipos eléctricos, generadores, etc. El sistema de puesta a tierra generalmente es diseñado minuciosamente, para tener una resistencia baja con el fin de tener velocidad al momento de despejar una falla, estos SPT se pueden diseñar para las subestaciones de alta y media tensión, como en las líneas de transmisión.



#### 8.4. Diseño de sistemas de puesta a tierra

Básicamente el diseño de sistemas de puesta a tierra se basa en definiciones tradicionales, aun sabiendo que su aplicación es sumamente compleja por lo cual le denominamos como un arte el saber construir un sistema de puesta a tierra teniendo en cuenta que son diferentes los tipos de suelos, elementos y equipos a proteger.

#### 8.5. Clasificación de los sistemas de puesta a tierra

En nuestro entorno existen varios tipos de sistemas de puesta a tierra por lo cual mencionaremos los principales y que servirán para el desarrollo del proyecto [3]:

- **Puesta a tierra de los sistemas eléctricos:** El propósito de aterrizar los sistemas eléctricos es para limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o, de contactos no intencionales con cables de voltajes.
- **Puesta a tierra en los equipos eléctricos:** Su propósito es eliminar los potenciales de toque que puedan poner en peligro la vida y las propiedades y, para que operen las protecciones por sobrecorrientes de los equipos.
- **Puesta a tierra de protección atmosférica:** Sirve para canalizar la energía de los rayos a tierra sin mayores daños a personas y propiedades. Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios.

#### 8.6. Características de los sistemas de puesta a tierra

Las principales características de los sistemas de puesta a tierra son los siguientes:

- **Protección de las personas:** Protege a las personas de tener accidentes leves o graves contra los efectos de la electricidad.
- **Protección de las instalaciones:** Se encarga de proteger contra sobrecorrientes a todos los equipos que se encuentren conectados al sistema de puesta a tierra.
- **Conducir corrientes de falla:** El SPT busca disipar de la manera más rápida posible las corrientes de falla hacia tierra evitando daños a equipos y pérdidas económicas.

#### 8.7. Red de puesta a tierra

Los sistemas simples de puesta a tierra constan de un único electrodo de puesta a tierra hincado en el terreno. El uso de un único electrodo de puesta a tierra es la forma más común de realizar dicha puesta a tierra y puede encontrarse fuera de las viviendas o lugar de trabajo. Los sistemas complejos de puesta a tierra constan de varias varillas de puesta a tierra conectadas entre sí, de

redes en malla o retícula, de placas de puesta a tierra y de bucles de puesta a tierra. Estos sistemas comúnmente se instalan en las subestaciones de generación de energía eléctrica, oficinas centrales y sitios de torres celulares [4].

## **8.8. Componentes de los sistemas de puesta a tierra**

### **8.8.1. Electrodo de puesta a tierra**

Los electrodos de puesta a tierra también conocidos como electrodos verticales, por lo general son varillas copperweld de 5/8 o 3/4 que se encuentran fijamente enterradas en el suelo.

### **8.8.2. Electrodo horizontal o contrapesos**

En [5] los electrodos horizontales o contrapesos son conductores de gran longitud enterrados horizontalmente, son muy usados en las puestas a tierra de torres de transmisión porque tienen mayor área de contacto con el terreno.

### **8.8.3. Conductores de enlace**

Los conductores de enlace transmiten el potencial de seguridad y referencia existente en el suelo a cualquier equipo o lugar de la instalación. Estos conductores deben tener un correcto dimensionamiento, para que sea efectiva la seguridad y estabilidad de los electrodos de puesta a tierra a un componente que esté en puntos remotos con respecto a estos [6].

### **8.8.4. Malla de tierra**

La malla de tierra está compuesta por varios conductores desnudos, generalmente de cobre que permiten la conexión de los equipos eléctricos de una instalación a tierra. En [7] las mallas son electrodos más complejos que las varillas y la evaluación de su comportamiento se dificultan.

### **8.8.5. Conectores**

Son elementos que sirven para la conexión de conductores en el SPT, estos pueden ser para uniones en cruz o paralelo, para cruce de cables en mallas etc. Generalmente son fabricadas en aleación Cu/Zn, cobre o acero galvanizado con tornillería de acero inoxidable resistente a la corrosión.

### **8.8.6. Solda Exotérmica**

Son más eficientes a comparación de los conectores, estas pueden soldarse en cobre, cobre a acero, acero a acero y aluminio a aluminio. Este tipo de unión se realiza en pocos segundos ya que mediante de una carga explosiva se funde el material compactándose entre sí.

### 8.8.7. Hilo de guarda

El hilo o cable de guarda es un conductor instalado en paralelo por encima de los conductores de fase. Este elemento se encuentra ubicado en la cima de la estructura con el fin de apantallar los conductores de fase.

### 8.8.8. Cimentación

En [8] todas las estructuras auto-soportadas de líneas de transmisión tienen 4 patas como cimentación, pudiendo ser que estén embebidas en concreto, conocida como cimentación de concreto o enterradas directamente en el suelo, conocida como cimentación de acero. Las cimentaciones son un caso de estudio principal ya que estas son las encargadas de transmitir las cargas de las distintas estructuras al terreno.

Por lo general se construyen cimentaciones de concreto armado porque estas garantizan la estabilidad de las torres de transmisión e incluyen un estudio geotécnico para su aprobación de nivel de seguridad y economía.

- **Cimentación grilla o emparrillado:** Este tipo de cimentaciones están enterradas directamente en el suelo por lo que se le denomina cimentación en acero.
- **Cimentación en concreto:** En [9] la cimentación en concreto se expone el caso cuando las patas de la torre están sobre una losa de cimentación y se emplea cuando la capacidad de carga del suelo es muy baja.

## 8.9. Resistencia del terreno

Se responde al primer interrogante que, posiblemente, pueda apuntarse sobre qué es lo que caracteriza una puesta a tierra eléctrica, esto es, la naturaleza de la resistencia de los electrodos que la establecen, razonándose sobre la dependencia que, en grado sumo, tiene la resistividad del terreno en la resistencia que presentan los mismos y la fuerte influencia que, sobre la resistividad, ejercen una serie de factores [10].

### 8.10. Elementos que influyen en la resistencia del terreno

Los elementos que influyen en la resistividad del terreno son los siguientes:

- **Temperatura:** Se debe considerar la temperatura en donde se va a ubicar el SPT, dependiendo como varía la resistividad con temperaturas extremadamente bajas.
- **Humedad:** Se debe saber que a mayor humedad se reduce la resistividad del terreno, caso contrario aumentará, por lo que se busca conseguir que el terreno sea muy húmedo.

- **Salinidad:** Se puede añadir sales a geles para mejorar la resistividad con el fin de convertir al terreno en excelente conductor. La salinidad influye directamente al terreno.

### 8.11. Tipos de suelo

Existen distintos tipos de terreno dependiendo de las peculiaridades de cada uno, se analizarán los siguientes casos:

- **Suelo blando o arcilloso:** También conocido como terreno pesado por lo general retiene mucho el agua formándose charcos, conteniendo altos nutrientes debido a la afinidad estrecha que se encuentra entre las numerosas partículas unidas a los minerales.
- **Suelo duro o arenoso:** Es un terreno incapaz de retener líquidos, por lo general es áspero y seco al contacto porque las partículas están muy separadas entre sí, permitiendo drenar de manera rápida razón por la cual no retiene los nutrientes.
- **Suelo rocoso:** Son suelos semi-impermeables que tienen formaciones de piedra de distintos tamaños en su composición, es bueno para hacer construcciones y poco fértil.
- **Suelo uniforme:** Es usado sólo cuando existe una variación moderada de la resistividad aparente. En condiciones de suelo homogéneo, que raramente ocurren en la práctica, el modelo de suelo uniforme puede ser razonablemente exacto [11].
- **Suelo no uniforme:** Se da cuando existe una gran variación entre las medidas, en un suelo no uniforme se tendrá que considerar la resistividad que se obtiene en las 2 capas del suelo, mediante el método de Wenner y considerando el método de determinación por curvas.

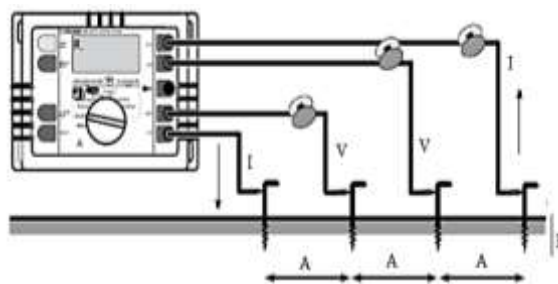
### 8.12. Métodos para la medida de la resistividad del terreno

En [12] para que el diseño de una instalación de un sistema de puesta a tierra sea correcto se requiere conocer el valor de la resistividad del terreno según la profundidad, y proporcionar la elección óptima sobre la disposición para que el sistema de puesta a tierra, obtenga buenos resultados técnico-económicos. Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales, cada una teniendo diferente resistividad. Para diseñar un SPT (Sistema de Puesta a Tierra), se debe tomar presente la información del terreno que se procura adquirir bajo las condiciones más desfavorables.

#### 8.12.1. Método de Wenner

En un caso particular el método de 4 electrodos, se dispone en línea recta y equidistante a una distancia “a”, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del

suelo. No es necesario que la profundidad de los electrodos sobrepase los 30 cm. El aparato de medida es un telurómetro clásico con 4 terminales: los 2 electrodos extremos son los de inyección de corriente de medida (I) y los 2 centrales son los electrodos de medida de voltaje (V). En la práctica se puede admitir que la resistividad aparente es, básicamente, la de las capas comprendidas entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual la densidad de corriente se ha reducido a la mitad del valor en superficie, es decir, la profundidad de investigación es “ $0,75 \cdot a$ ”. El eje del sondeo eléctrico vertical y en consecuencia de medida de resistividad se encuentra en el medio del sistema simétrico compuesto por los cuatro electrodos, entre los dos de voltaje [13].



**Figura 1.** Método de Wenner para la medición de la resistividad.  
Fuente: [12].

Luego de haber conseguido el valor de la resistencia del suelo que se obtiene por medio de las mediciones realizadas con el telurómetro, se procede a calcular el valor de la resistividad del terreno. En este cálculo se emplearán las siguientes dos condiciones:

**Tabla 1:** Fórmulas para hallar la resistividad del suelo.

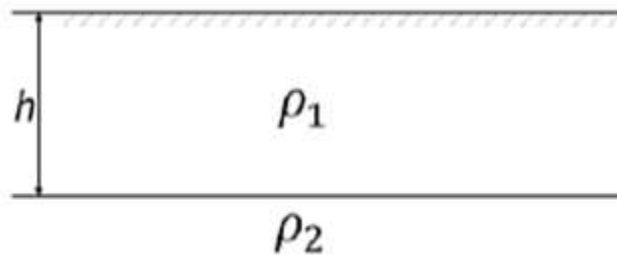
Condición	Fórmula
$(a < 20b)$	$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$
$(a > 20b)$	$\rho = 2\pi a R$

Fuente: [14].

### 8.12.2. Método de dos capas

En [15] el modelo del suelo se establece a partir de la interpretación de las mediciones de resistividad aparente obtenidas con el método de Wenner. El modelo de suelo a dos capas es a menudo una aproximación cercana a la condición real de suelo que consiste en dos capas horizontales homogéneas, como se observa en la figura 2.

La primera y más superficial, tiene una resistividad  $\rho_1$  y su profundidad es  $h$ . La segunda y más inferior, tiene una resistividad  $\rho_2$  y una profundidad infinita. Este modelo tiene como principal ventaja determinar de forma sencilla y precisa la resistencia de puesta a tierra, tensiones de toque y paso, para diferentes configuraciones.



**Figura 2.** Suelo estratificado de dos capas.  
Fuente: [15].

De acuerdo a lo presentado en [14] para aplicar el método no uniforme o también conocido como de 2 capas, se debe realizar el siguiente procedimiento para determinar la resistividad del suelo, dependiendo del sector en donde se va a ubicar la subestación, el procedimiento a seguir es:

- Dibujar la gráfica de la resistividad aparente  $\rho_a$  en el eje “y”, mientras que la separación entre picas “a” en el eje “x”.
- Calcular  $\rho_1$  y  $\rho_2$  a partir de la gráfica trazada:
  - $\rho_1$ : El valor correspondiente de  $\rho_a$  será el más elevado.
  - $\rho_2$ : El valor correspondiente de  $\rho_a$  será el más reducido.
- Determinar  $\rho_2/\rho_1$  y seleccione una curva que coincida del método gráfico de Sunde's que se muestran en la gráfica de la tabla 2 y dibujar una nueva curva.
- Seleccionar un valor  $\rho_a/\rho_1$  dentro de la región de pendiente propia de  $\rho_2/\rho_1$ .

**Tabla 2:** Selección del valor  $\rho_a/\rho_1$  en pendiente de la curva obtenida de  $\rho_2/\rho_1$ .

Fórmula	Gráfico
$\rho_{a(n1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n}$ $\frac{\rho_a}{\rho_1} \approx \frac{\rho_{a(n2)}}{\rho_1}$	<p>El gráfico muestra una serie de curvas que representan diferentes relaciones de resistividad <math>\rho_2/\rho_1</math>. El eje vertical representa <math>\rho_a/\rho_1</math> y el eje horizontal representa <math>a/h</math>. Las curvas se elevan desde un punto en el eje vertical (representando <math>\rho_1</math>) y se nivelan a un valor más alto (representando <math>\rho_2</math>). Una línea horizontal y una línea vertical se muestran para indicar cómo se selecciona un punto en la curva y se lee el valor correspondiente en el eje X.</p>

Fuente: [14].

- Leer el valor correspondiente para  $(a/h)$  en el eje X. Se toma el valor de  $(a/h)$  en función del punto donde se intersecan los valores de  $\rho_a/\rho_1$  y  $\rho_2/\rho_1$  en la pendiente de la curva.

f) Calcular  $\rho_a$

$$\rho_a = \frac{\rho_a}{\rho_1} \cdot \rho_1 = \frac{\rho_{a(n2)}}{\rho_1} \cdot \rho_1 \quad (1)$$

NOTA: Al seleccionar el valor “a” correspondiente al gráfico de la resistividad aparente trazado en el literal (a). El nuevo valor de “a” se determinará en función del valor del cálculo previo en el literal “f” que será el nuevo valor para trazar en la curva, para tomar el nuevo valor en “a”.

g) Calcular la profundidad de la capa superior, usando la separación de prueba apropiada.

$$h = \frac{a}{\left(\frac{a}{h}\right)} \quad (2)$$

### 8.12.3. Método de Schlumberger – Palmer

En este arreglo, al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (A) y medición (V) están situados en línea recta, la variante de este arreglo radica en que la separación entre electrodos es, aunque simétrica, desigual para la correspondiente entre los electrodos de tensión y entre los de corriente [16].

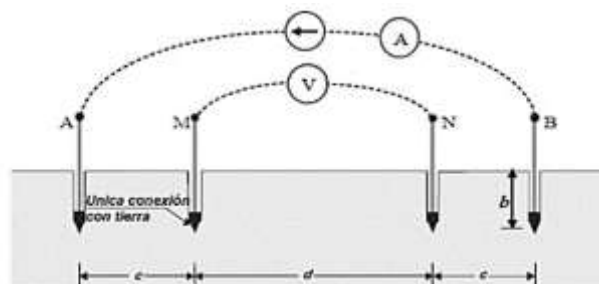


Figura 3. Método de Schlumberger – Palmer.

Fuente: [16].

La manera más adecuada para calcular el modelo del terreno, consiste en separar de manera progresiva (1m, 2m, 3m, 4m y 5m) los electrodos alrededor de un punto central, mediante la utilización de la siguiente fórmula se calcula la resistividad del terreno:

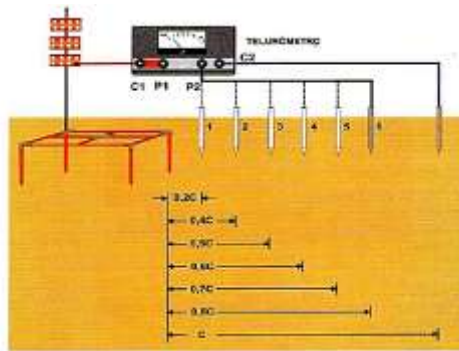
$$\rho = \pi \times c \times (c + d) \times \frac{R}{d} \quad (3)$$

### 8.13. Métodos de la medición de la resistividad de puesta a tierra

La tecnología actual establece claramente que no existe artificio o medición indirecta alguna que sustituya la medición directa de la resistencia de puesta a tierra con una técnica adecuada. Estas mediciones son muy importantes para verificar la efectividad de una puesta a tierra recientemente construida o para detectar cambios como parte de una rutina de mantenimiento [13].

### 8.13.1. Método de la pendiente

Este método se utiliza para medir sistemas de puesta a tierra de tamaño considerable, cuya máxima longitud supera los 30 m o cuando la posición del centro de la puesta a tierra no es conocido o inaccesible como un edificio. La figura 4 muestra el procedimiento sugerido para medir técnicamente las resistencias de puesta a tierra en grandes sistemas [17].

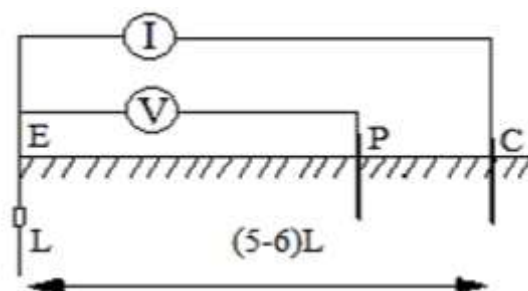


**Figura 4.** Método de la pendiente.  
Fuente: [13].

Para emplear este método se toman varias medidas moviendo los electrodos de voltaje al 20,40 y 60% del electrodo principal (C) a una cierta distancia de la malla, obteniendo  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , para poder calcular el valor del cambio de la pendiente.

### 8.13.2. Método de curva de caída de potencial

En [12] menciona que se clava el electrodo de corriente a una cierta distancia, de manera que se esté fuera de la zona de influencia de la puesta a tierra incógnita y luego se mide el valor de resistencia de puesta a tierra, variando la distancia del electrodo de tensión, se puede observar que existe una zona de potencial plana, equivalente a un valor constante de resistencia.



**Figura 5.** Método de caída de potencial.  
Fuente: [17].

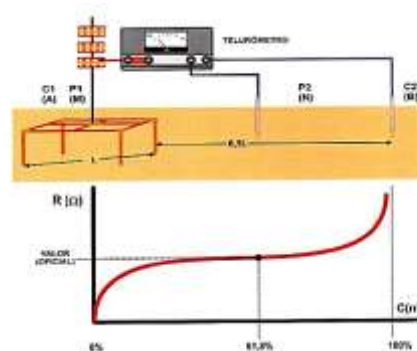
Para que el método sea más simple se puede reducir el número de medidas a tres. Si se hace un promedio de ellas y el valor de cada medida se encuentra dentro del error aceptable para la medición (por ejemplo 5%), comparándola con el promedio, entonces, el valor "oficial" promedio hallado es el verdadero valor de la resistencia de puesta a tierra. Si se determina la



mayor dimensión de la puesta a tierra ( $L$ ), se puede decir que una distancia apropiada es cuando está entre 5 y 6 veces dicha dimensión [17].

### 8.13.3. Método de la regla del 62%

En [13] desarrollado por G. F. Tagg y publicado el autor menciona que las zonas de influencia de puestas a tierra pueden ser tan grandes que, para evitar la superposición de estas áreas, quien va a medir debe tomar distancias considerables entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra por evaluar. Es fundamental para el método, que las áreas de influencia no se superpongan entre sí. Se basa en tomar la puesta a tierra como una semiesfera, con la que se obtiene el valor de 0,6180.



**Figura 6.** Método de la regla del 62%.  
Fuente: [13].

La distancia entre el electrodo de corriente y la puesta a tierra por evaluar debe ser entre 5 y 6 veces la mayor dimensión de la puesta a tierra o el diámetro equivalente. Para este método habitualmente, una separación de 20 metros es suficiente. El método, como se aplica actualmente, se recomienda hacer 3 mediciones, la primera con el electrodo de tensión al 62% de la distancia del de corriente y las otras dos a  $\pm 10\%$  de ese punto, si los valores obtenidos no varían en más de un 10% el valor verdadero de las resistencias es el obtenido en el punto del 62% y no el obtenido como promedio, si varían en más de 10% entonces de debe incrementar la distancia del electrodo de corriente [12].

### 8.13.4. Método de la intersección de curvas

En [13] este método se desarrolló para grandes puestas a tierra (más de 20000 m<sup>2</sup>) y resuelve varios problemas: de un lado ya no exige ubicar el electrodo de corriente a distancias tan largas, elimina dudas sobre influencias mutuas entre electrodos, tampoco es exigente en determinar el centro eléctrico. Consiste en obtener varias curvas de resistencia de dispersión y asumiendo varias posiciones del centro eléctrico, por medio de un procedimiento sencillo se obtiene la verdadera resistencia de puesta a tierra.

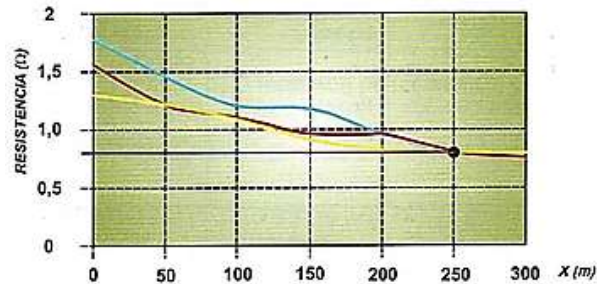


Figura 7. Método de la intersección de curvas.

Fuente: [13].

## 8.14. Puesta a tierra en subestaciones

Los SPT en subestaciones poseen una gran área para la instalación del patio de maniobras, este diseño se lleva a cabo por medio de la utilización de varillas, conductor, uniones o suelda exotérmica con la finalidad de garantizar que se cumplan las condiciones de seguridad en las personas y equipos, permitiendo que las protecciones despejen las fallas de manera rápida para minimizar los daños en el sistema.

### 8.14.1. Normas aplicadas

Se detallará de manera breve las normativas aplicadas para el diseño del programa de SPT en S/E.

#### 8.14.1.1. Instructivo de CELEC

Realizado por CELEC EP – TRANSELECTRIC en el año 2018 para el diseño de puesta a tierra en subestaciones, en donde se encuentra basado en normativas internacionales, garantizando la seguridad de las personas y equipos mediante la geometría de la malla, resistencia de puesta a tierra y las tensiones admisibles de (toque – paso).

#### 8.14.1.2. IEEE Std – 80; Std – 81

La IEEE Std-81 expone diferentes metodologías para efectuar las mediciones de resistividad eléctrica, resistencia y los voltajes superficiales de un sistema de puesta a tierra, enfocadas a subestaciones y líneas de transmisión. La IEEE Std-80 describe el procedimiento de diseño de la malla de puesta a tierra de una subestación, asegurando niveles seguros de tensiones de paso y contacto, garantizando la seguridad de las personas y equipos expuestos a tensiones peligrosas durante descargas atmosféricas o fallas del sistema [18].

## 8.15. Valores permitidos de resistencia eléctrica en subestaciones

En [4] menciona que las normas NFPA y IEEE han recomendado un valor de resistencia de puesta a tierra sea de  $5,0 \Omega$  o menos.

**Tabla 3:** Valores de referencia para resistencia de puesta a tierra.

Resistencias del sistema de puesta a tierra de la subestación	Valor máximo de resistencia ( $\Omega$ )
Subestación de alta tensión	1 $\Omega$
Subestación de distribución	5 $\Omega$
Subestación de media tensión	10 $\Omega$

Fuente: [14].

## 8.16. Metodología para diseñar el SPT en S/E

A continuación, se describe los parámetros que deben ser considerados para el cálculo de los sistemas de puesta a tierra en subestaciones con la finalidad de que las tensiones tolerables y la resistencia de la malla no sean elevadas.

### 8.16.1. Resistividad del suelo

La resistividad del suelo se calcula en base a la resistencia del terreno aplicando los distintos métodos, para hallar la resistividad dependiendo del tipo de suelo.

### 8.16.2. Corriente de diseño

Se basa en la consideración de la corriente de cortocircuito “ $I_{cc}$ ” en función del factor de decremento, el mismo que puede variar en función de un tiempo de descarga pertinente. La corriente de diseño de la red de tierra, se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$I_D = I_{cc} * D_c \quad (4)$$

El valor de la corriente máxima de falla a tierra “ $I_{cc}$ ” viene dado de un estudio de cortocircuito previamente realizado, que corresponde a la corriente asimétrica máxima que puede presentarse. El factor de decremento “ $D_c$ ” se elegirá de acuerdo tiempo de descarga o duración de la falla, previniendo que los equipos de una subestación sean afectados.

Para la selección del factor de decremento se utilizarán las tablas dependiendo de la normativa, que se esté analizando. La primera tabla esta dada por el instructivo de CELEC.

**Tabla 4:** Factor de decremento de CELEC – TRANELECTRIC.

Factor de Decremento	
Tiempo de Descarga	Dc
0,8	1,65
0,5	1
0,25	1,1
0,1	1,25

Fuente: [19].

En la tabla 5 se muestran, los datos establecidos por la norma IEEE Std – 80.

**Tabla 5:** Factor de decremento de la norma IEEE Std – 80.

Factor de decremento					
Duración de la Falla		Factor de Decremento (X/R)			
Segundos	Ciclos de 60 Hz	10	20	30	40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	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

Fuente: [14].

### 8.16.3. Sección y diámetro del conductor

La sección y diámetro del conductor “ $d_c$ ”, se puede calcular dependiendo de la normativa a utilizarse y las condiciones donde se ubicará la subestación. Se utilizará los datos de la tabla 6 como referencia, para escoger el conductor que se ocupará en el diseño de la malla.

**Tabla 6:** Sección y diámetro del conductor.

Sección y diámetro del conductor					
MCM	Área (mm <sup>2</sup> )	Diámetro (mm)	MCM	Área (mm <sup>2</sup> )	Diámetro (mm)
2/0	67,44	9,27	700	354,095	21,25
3/0	85,03	10,40	750	380,031	22,00
4/0	107,22	11,68	800	405,366	22,72
250	126,677	12,70	900	456,037	24,10
300	152,612	13,91	1000	506,708	25,40
350	177,348	15,03	1250	633,384	28,40
400	202,683	16,06	1500	760,061	31,11
450	228,018	17,04	1750	836,738	33,60
500	253,354	17,96	2000	1013,415	35,92
600	304,025	19,67			

Fuente: [19].

#### a) Sección del conductor

En la sección del conductor según la norma a emplearse, se utilizara las siguientes fórmulas dependiendo de los parámetros que se consideren [14] [19]:

- En CELEC se utiliza la siguiente expresión para calcular la sección del conductor:

$$S_c = \frac{I_{ccmax}}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33 * t}}} * 0.0005067 \quad (5)$$

NOTA: Para la temperatura máxima en las uniones de la malla puede ser empernado (250 °C) o soldado (450 °C). Además, la temperatura ambiente del suelo será 40°C.

- La norma IEEE Std-80 emplea la siguiente expresión considerando algunos aspectos de

acuerdo al tipo de conductor que se seleccione en la tabla 7.

$$A_{kcmil} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \times \ln\left(\frac{K_O + T_m}{K_O + T_a}\right)}} \quad (6)$$

- Cuando se tiene un suelo de 2 capas se aplicará la expresión simplificada, conociendo la constante de los materiales y el tiempo de falla:

$$A_{kcmil} = I_{ccmax} \cdot K_f \cdot \sqrt{T_f} \quad (7)$$

En la siguiente tabla se puede escoger el coeficiente del material “K<sub>f</sub>”, para emplearse en las ecuaciones (6) y (7) dependiendo los distintos parámetros y el material que se ocupe.

**Tabla 7:** Constante de materiales.

Descripción	K <sub>f</sub>	α <sub>r</sub>	K <sub>O</sub>	T <sub>m</sub>	ρ <sub>r</sub>	TCAP
Cobre, recocido suave	7	100	0,00393	234	1083	1,72
Cobre, comercial duro	7,06	97	0,00381	242	1084	1,78
Cobre, comercial duro 1	11,78	97	0,00381	242	1084	1,78
Alambre de acero revestido de cobre	10,45	40	0,00378	245	1084	4,4
Alambre de acero revestido de cobre 1	12,06	30	0,00378	245	1084	5,86
Varilla de acero revestido de cobre	14,64	17	0,00378	245	1084	10,1
Alambre de acero revestido de aluminio	17,26	20,3	0,0036	258	657	8,48
Acero, 1020	18,39	10,8	0,00377	245	1510	15,9
Varilla de acero inoxidable	14,72	9,8	0,00377	245	1400	17,5
Varilla de acero galvanizada	28,96	8,6	0,0032	293	419	20,1
Acero inoxidable, 304	30,05	2,4	0,0013	749	1400	72

Fuente: [14].

## b) Diámetro del conductor

Para obtener el diámetro del conductor se utiliza las siguientes ecuaciones, el resultado debe ser comparado en la tabla 6, según este análisis se escoge el calibre del conductor. En el caso de considerar la sección del conductor en (mm<sup>2</sup>), se aplicará la siguiente ecuación:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}} \quad (8)$$

Para la sección del conductor A<sub>kcmil</sub>:

$$d_c = 0.803 \cdot \sqrt{A_{kcmil}} \quad (9)$$

### 8.16.4. Tensión de paso y toque

Una vez determinado el factor de corrección debido a la capa superficial de material aislante, se pueden obtener los voltajes de paso y choque máximos para la malla de tierra [20], para

aquellas personas con peso corporal de 50 kg y 70 kg. La selección del “ $t_s$ ” se basa en el tiempo estimado, para el despeje de cualquier falla a tierra que pueda presentarse, además la tensión de paso y toque máxima permitida depende del peso de la persona y se calcula mediante las fórmulas de la tabla 8.

**Tabla 8:** Fórmulas para la tensión de paso y toque.

Tensión	Peso	
	70 kg	50kg
Paso	$E_s = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$	$E_s = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$
Toque	$E_t = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$	$E_t = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$

Fuente: [20].

### 8.16.5. Factor de reducción superficial

En [20] explica cómo considerar el efecto que se produce por la presencia del material superficial “Se considera un factor denominado reducción superficial, el mismo que contempla una corrección para calcular la resistencia efectiva de un pie en presencia de una capa de material superficial”.

El cálculo del factor  $C_s$  dependerá de la resistividad del material superficial y del suelo en donde se va a realizar el diseño de la malla, como se muestra en la ecuación (10).

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} \quad (10)$$

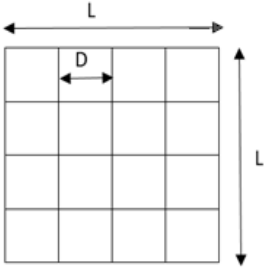
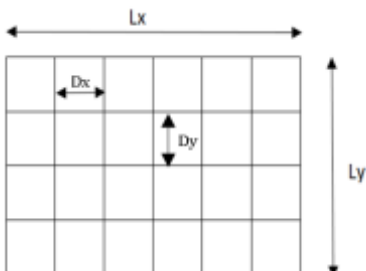
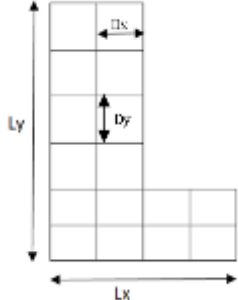
En el caso más frecuente, se utiliza grava como material superficial, el cual presenta una resistividad “ $\rho_s$ ” de 3000  $\Omega\text{m}$  y un espesor de la capa “ $h_s$ ” de 0.1 m hasta 0.3 m aproximadamente.

### 8.16.6. Geometría de la malla

La geometría de la malla dependerá del lugar en donde se construirá la subestación, así como de las dimensiones mínimas que deberá tener esta superficie, en función del cumplimiento de las distancias de seguridad determinadas en la coordinación de aislamiento y de las longitudes de equipos y estructuras que se dispondrán dentro de la subestación [20].

Las dimensiones para el diseño de una subestación se obtienen considerando el espacio que será utilizado por los equipos y las distancias de seguridad que se debe cumplir, según los reglamentos. Para calcular el área de construcción dependerá de la forma del mallado que se va a realizar, además hay que considerar los siguientes 3 casos:

**Tabla 9:** Tipos de malla a tierra.

Cuadrada	Rectangular	En forma de L
		
$A = L^2$	$A = L_x \cdot L_y$	$A = [L_y \cdot (L_x - L_x')] + [L_y' \cdot L_x']$

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El espacio entre conductores “D” se debe ir ajustando de acuerdo a los valores ingresados en  $D_x$  y  $D_y$ , para que el mallado sea más geométrico se recomienda utilizar cantidades divisibles acorde al tamaño de la malla.

**Longitud interna del conductor:** Depende de la forma y separación entre conductores de la malla, se obtiene con la siguiente ecuación.

$$L_C = N \cdot L_X + M \cdot L_Y \quad (11)$$

**Longitud total del conductor a enterrarse:** Es la sumatoria de la longitud interna del conductor más el número de varillas multiplicado por la longitud de la misma, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$L_T = L_C + N_V L_V \quad (12)$$

### 8.16.7. Resistencia de la malla

En [20] una malla de tierra el valor de su resistencia al paso de corriente debe ser el mínimo posible, por lo que es muy importante obtener la resistencia de diseño de la malla para poder juzgar si se encuentra dentro de los parámetros exigidos:

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

### 8.16.8. Corriente de la malla

Para obtener la corriente de la malla se debe tener en cuenta que la corriente que se usará es la de cortocircuito monofásico para el lado del transformador conectado en delta, ya que el lado del transformador conectado en estrella aterrizado constituye una fuente local de corriente y no contribuye al incremento del potencial de tierra [20].

El valor máximo de la corriente de falla a tierra que circula por el mallado de la subestación hasta la tierra se calcula con siguiente ecuación:

$$I_G = I_f \cdot S_f \cdot D_f \cdot D_c \quad (14)$$

La corriente simétrica de falla o conocida como “3I<sub>o</sub>”, se puede hallar dependiendo del tipo de falla que se presente como se demuestra en la tabla 10 y en algunos casos considerando la resistencia de falla.

**Tabla 10:** Tipos de fallas a tierra.

Tipo de falla	Resistencia de falla	Fórmula
Línea – Tierra	Despreciar	$I_f = 3 \frac{\frac{V_{(L-L)}}{\sqrt{3}}}{X_{(+)} + X_{(-)} + X_{(0)}}$
Línea – Tierra	No Despreciar	$I_f = 3 \frac{\frac{V_{(L-L)}}{\sqrt{3}}}{3 \times R_f + Z_{(+)} + Z_{(-)} + Z_{(0)}}$
Línea – Línea – Tierra	Despreciar	$I_f = 3 \frac{V_{(L-L-T)} \times X_{(-)}}{X_{(+)} \cdot (X_{(0)} + X_{(-)}) + (X_{(-)} \cdot X_{(0)})}$
Línea – Línea – Tierra		No Despreciar
$I_f = 3 \frac{V_{(L-L-T)} \times (R_{(-)} + X_{(-)})}{(R_{(+)} + X_{(+)}) (R_{(0)} + R_{(-)} + 3R_f + (X_{(0)} + X_{(-)})) + (X_{(0)} + X_{(-)}) + ((R_{(-)} + X_{(-)}) (R_{(0)} + 3R_f + X_{(0)}))}$		

Fuente: [14].

El factor de divisor de corriente se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$S_f = \frac{Z_{equi}}{R_g + Z_{equi}} \quad (15)$$

Además, se utilizará la tabla 43 ubicada en el anexo II, para determinar la impedancia equivalente dependiendo del número de líneas y neutros que puede tener una línea de transmisión.

El factor de decremento es muy importante en el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por la siguiente expresión [11]:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{\left(\frac{2 \cdot t_f}{T_a}\right)}\right)} \quad (16)$$

Para determinar la constante de tiempo del componente DC se emplea la siguiente ecuación:

$$T_a = \frac{X}{R} \cdot \frac{1}{2\pi f} \quad (17)$$



NOTA: El factor de crecimiento “C<sub>p</sub>” por lo general será 1, dado que el mallado de puesta a tierra se construye teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación sin considerar futuros aumentos de carga ni de alimentadores.

### 8.16.9. Elevación del potencial de tierra (G<sub>PR</sub>)

En [21] determina que el máximo potencial eléctrico que un electrodo de tierra, malla o sistema puede alcanzar con respecto a un punto distante de tierra asumido a ser el potencial de tierra remota. Elevación de voltaje debido a fallas en el sistema y por la configuración de la conexión de los cables de neutro al sistema de tierra.

$$G_{PR} = I_G * R_G \quad (18)$$

### 8.16.10. Tensiones reales de diseño de la malla

Las tensiones reales de diseño E<sub>s</sub> y E<sub>m</sub> deberán ser menores que las tensiones E<sub>p</sub> y E<sub>t</sub> respectivamente, se calcula con las expresiones de la siguiente tabla.

**Tabla 11:** Tensiones de diseño.

Tensión máxima de malla	Tensión real de paso
$E_m = \frac{K_i * K_m * \rho * I_G}{L_M}$	$E_s = \frac{\rho * I_G * K_s * K_i}{L_S}$

Fuente: [22].

### 8.16.11. Coeficientes geométricos

Para determinar los coeficientes geométricos es necesario tener en cuenta algunos parámetros como tamaño de la malla, diámetro del conductor y espaciamientos entre conductores, entre otros, como se muestra en las ecuaciones de la tabla.

**Tabla 12:** Coeficientes geométricos.

Coeficiente K <sub>m</sub>	
$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$	
Coeficiente K <sub>ii</sub>	Coeficiente K <sub>h</sub>
$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$	$K_h = \sqrt{h+1}$
Longitud efectiva enterrada L <sub>M</sub>	Longitud efectiva del conductor enterrado L <sub>S</sub>
$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \cdot L_R$	$L_S = 0.75 \cdot L_C + 0.85 \cdot L_R$
Coeficiente K <sub>i</sub>	$K_i = 0.644 + 0.148 * n$
Coeficiente K <sub>s</sub>	$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$

Fuente: [14] [22].

Nota: El coeficiente  $K_{ij}$  cuando el diseño tiene varillas en las esquinas toma el valor de 1 y cuando no tiene varillas en las esquinas se aplica la fórmula, esta condición también se aplica para la longitud efectiva enterrada.

#### **8.16.12. Verificación de tensiones permitidas**

Se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones [11]:

- La tensión de malla debe ser mayor que la tensión tolerable de toque ( $E_m < E_t$ ), sino cumple esta condición el diseño debe ser modificado.
- Si ambas tensiones calculadas de toque y de paso son menores que las tensiones tolerables, el diseño sólo necesita los refinamientos requeridos para proporcionar acceso a las bajantes de los equipos ( $E_s < E_p$ ). Si no, el diseño preliminar debe ser modificado.
- Si se exceden las tensiones tolerables de toque y paso, es necesaria la revisión del diseño de la malla, estas revisiones pueden incluir espaciamientos de conductores más pequeños, varillas adicionales de tierra, etc.

#### **8.17. Puesta a tierra en líneas de transmisión**

En [23] el sistema de puesta a tierra comprende la unión de todas las partes metálicas de una instalación con un grupo de electrodos enterrados en el suelo, con el objetivo de que en la superficie y vecindades de la instalación eléctrica no exista diferencias de potencial peligrosas y permita el paso de corrientes de fallas o de descargas atmosféricas.

El sistema de puesta a tierra sirve para la evacuación rápida de las sobrecorrientes que puedan darse por situaciones atmosféricas, se conoce que la salida de operación de una L/T ocasiona la interrupción de la energía eléctrica y por ende grandes pérdidas económicas.

#### **8.18. Normas aplicadas**

Las normas que se aplican en este proyecto son el “Instructivo para el diseño de puesta a tierra en líneas de transmisión” diseñada por la Corporación Ecuatoriana del Ecuador CELEC EP y Redes de Tierra para estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69 a 400 KV, con el objetivo de cumplir que la resistencia de puesta a tierra se encuentre en los rangos establecidos.

##### **8.18.1. Instructivo CELEC EP para el diseño de puesta a tierra en L/T I05.PAV.02.01.02**

La Comisión Eléctrica del Ecuador ha planteado un instructivo para el diseño de puesta a tierra en líneas de transmisión con el objetivo de normalizar el procedimiento de cálculo para un SPT en una L/T. Además, establece criterios técnicos normalizados y buenas prácticas de diseño

recogidas de los estudios desarrollados y aplicados en proyectos construidos por la unidad de negocio CELEC EP – TRANSELECTRIC, permitiendo alcanzar valores de resistencia de puesta a tierra adecuados, con el fin de facilitar la disipación de corrientes de falla y por descargas atmosféricas [5].

### 8.18.2. MEXICANA Redes de Tierra para estructuras de L/T aéreas de 69 a 400 KV

Esta norma fue elaborada en México por la Comisión Federal de Electricidad de México creada en Agosto de 1999 en convenio con las bases generales para la normalización en CFE. En [8] da a conocer que tiene como objetivo normalizar los criterios para diseñar, construir, medir, mantener y corregir las redes de tierra destinadas a la protección de líneas de transmisión aéreas de 69 a 400 KV. Básicamente esta norma indica la forma de medición para la resistividad y resistencia eléctrica en líneas aéreas en construcción o líneas aéreas en operación, lo cual se debe llenar varios formatos según corresponda y mediante sus valores de mediciones y/o cálculos se debe mejorar la red de tierra y cumplir con la resistencia eléctrica adecuada que no sea mayor a 10 ohm.

### 8.19. Valores permitidos de resistencia eléctrica y tensiones de una línea de transmisión

La importancia de evaluar la resistencia de un sistema de puesta a tierra es que tenga que cumplir con los rangos indicados según las normativas que están siendo utilizadas en el proyecto. A continuación, se clasifica los niveles de tensión de las líneas de transmisión con su respectivo valor de resistencia que son utilizados en la normativa de CELEC. EP – TRANSELECTRIC [5].

**Tabla 13.** Valores aceptables de resistencia eléctrica dependiendo del nivel de tensión y su altitud.

Nivel de la Línea de Transmisión (KV)	Resistencia a considerarse en ( $\Omega$ ) entre 0 a 1000 msnm	Resistencia a considerarse en ( $\Omega$ ) mayores a 1000 msnm
69	15 ( $\Omega$ ) para todas las cotas	
138	10	15
230	5	10
500	10 ( $\Omega$ ) para todas las cotas	

Fuente: [5].

NOTA: En consideración a la norma mexicana la resistencia eléctrica tiene un valor máximo aceptable de 10  $\Omega$ , para el nivel tensión de 69 a 400 KV.

### 8.20. Metodología para diseñar el SPT en L/T

A continuación, se describe la metodología empelada para el diseño del sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas, de manera que la resistencia eléctrica este en el nivel de tensión establecido sin poner en riesgo la seguridad de las personas.

### 8.20.1. Resistividad del suelo

La resistividad del suelo se calcula en base a la resistencia del terreno aplicando los distintos métodos, para hallar la resistividad dependiendo del tipo de suelo donde se va a construir la torre de trasmisión.

### 8.20.2. Resistencia eléctrica de la red de tierra

La resistencia eléctrica se escoge de acuerdo con el nivel de tensión de la línea de trasmisión a diseñarse de acuerdo a lo establecido en la tabla 13, que depende de los metros sobre el nivel del mar (msnm).

### 8.20.3. Componentes para evaluar la resistencia de puesta a tierra

Los componentes que se ocupan para evaluar la resistencia de puesta a tierra son los siguientes:

#### 8.20.3.1. Cimentaciones

Se puede utilizar cimentaciones de acero y concreto en cada una de las patas de la torre, que depende directamente de los elementos que influyen en la resistencia y resistividad del suelo.

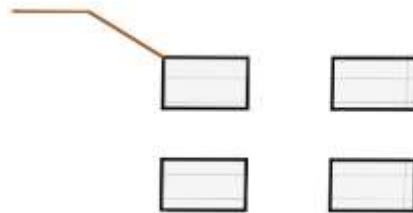
**Tabla 14.** Tipos de cimentaciones.

Acero	Concreto
$R = \frac{\rho}{2\pi L} * \left[ \left( \ln \frac{4L}{r} \right) - 1 \right]$	$R = \frac{\rho}{2\pi L} * \left[ \rho_c \left( \ln \frac{D}{d} \right) + \rho \left( \left( \ln \frac{8L}{D} \right) - 1 \right) \right]$

Fuente: [24].

#### 8.20.3.2. Electrodo horizontales o contrapesos

Los contrapesos por lo general se utilizan en casos donde no se puede obtener un valor exacto de la resistencia en suelos de alta resistividad, por lo general se forma de un solo conductor [5].



**Figura 8.** Electrodo horizontales de 1 punta.

Fuente: Autores.

El conductor que utiliza CELEC para los electrodos horizontales es el concéntrico recubierto de cobre 3x8, que se utiliza en varios contrapesos cortos de hasta 100 m. Para realizar el cálculo de la resistencia de electrodos horizontales se ocupa la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} * \left[ \left( \ln \frac{2L}{\sqrt{4rh}} - 1 \right) \right] \quad (19)$$

Los materiales para la construcción del sistema de puesta a tierra por normativa mexicana son: alambre de cobre o cable de acero recubierto de cobre, electrodos verticales que pueden tener longitudes de 1.5 m, 3 m y 6 m. Para las conexiones deben ser soldables de tipo exotérmico y se aplica la ecuación 20 para calcular la resistencia [8]:

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

### 8.20.3.3. Electrodo verticales

Según [5] la formulación utilizada en proyectos de CELEC EP, para el diseño de puesta a tierra en torres de transmisión los electrodos verticales a utilizar son varillas como mínimo 2 que dependerá del tipo de terreno y del RMG, aplicando la siguiente formula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{\text{RMG}} \quad (21)$$

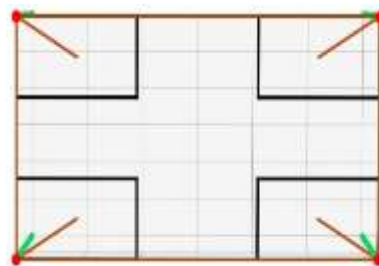
El radio medio entre varillas (RMG) se calculará dependiendo de la cantidad de varillas a utilizarse como se puede visualizar en la tabla 44 del anexo III.

Además, en la norma mexicana emplea la ecuación 22 para hallar la resistencia de conexión a tierra de un electrodo vertical, utilizando la siguiente fórmula [8]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left[ \left( \ln \frac{4L}{r} \right) - 1 \right] \quad (22)$$

### 8.20.3.4. Electrodo verticales y malla de puesta a tierra

Está conformado por 4 electrodos verticales unidos entre si por medio de una malla construida por el conductor, como se puede observar en la figura 9.



**Figura 9.** Electrodo verticales y malla de puesta a tierra.  
Fuente: Autores.

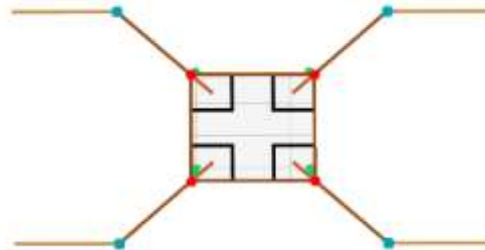
Para obtener la resistencia de puesta a tierra se la calcula con la siguiente ecuación:

$$R_G = \rho * \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h*\sqrt{\left(\frac{20}{A}\right)}} \right) \right] \quad (23)$$

### 8.20.3.5. Sistema combinado

A medida que las instalaciones eléctricas aumentan su capacidad, el recurso eléctrico también lo hace, por tanto, el S.P.T. alcanza mayor importancia. La distribución de los electrodos también cambia añadiéndose electrodos horizontales distribuidos en forma de malla [23].

El sistema combinado esta conformado de electros verticales, malla y contrapesos como se puede observar en la figura 10, que se encuentra unido entre si para conseguir una resistencia mas baja.



**Figura 10.** Electrodo verticales y malla de puesta a tierra.

Fuente: Autores.

Para realizar el cálculo de la resistencia de un sistema de puesta a tierra de sistemas combinados se basa en obtener una resistencia total se obtiene considerando la resistencia de tierra entre conductores (malla) y varillas enterradas; como se expresa la siguiente ecuación:

$$R_T = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (24)$$

En la tabla 15 se dará a conocer como se calcula cada uno de los parámetros que interfiere en el cálculo de la resistencia total.

**Tabla 15.** Parámetros para el cálculo de la resistencia.

<b>Resistencia de tierra de una malla horizontal rectangular</b>	$R_1 = \frac{\rho}{\pi l_1} \left[ \ln \left( \frac{2l_1}{\sqrt{2hr_c}} \right) + K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 \right]$
<b>Resistencia de todas las varillas de tierra</b>	$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n l_2} \left[ \ln \left( \frac{8l_2}{d} \right) - 1 + \frac{2K_1 l_2}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$
<b>Resistencia mutua malla - varilla</b>	$R_{12} = \frac{\rho}{\pi l_1} \left[ \ln \left( \frac{2l_1}{l_2} \right) + K_1 \frac{l_1}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right]$

Fuente: [5].

### 8.20.4. Instalación de elementos recomendados según el nivel de resistividad de suelo

En la tabla 45 del anexo IV se muestra la configuración de contra-antenas y electrodos para el sistema de puesta a tierra en L/T según la Comisión Federal de Electricidad “Red de puesta a tierra para estructura de líneas de transmisión aéreas de 69 a 400 KV en construcción”.

En [24] los contrapesos o contra-antenas de la red de puesta a tierra se deben instalar en zanjas de 0.3 m de ancho, con las profundidades indicadas en la siguiente tabla:

**Tabla 16.** Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se debe instalar.

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Tipo de terreno</b>
0.8	No cultivable
1.5	De cultivo
0.4	Rocoso

Fuente: [24].

## 9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

La herramienta informática permitirá obtener el adecuado diseño de un sistema de puesta a tierra considerando los parámetros de resistividad del suelo, resistencia de la malla, tensiones de toque y paso, geometría de la malla y configuración de las patas de una torre.

## 10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La metodología empleada en el presente proyecto se basa en la recopilación de información de las diversas fuentes bibliográficas, para la elaboración de una herramienta informática.

### Modalidades de la investigación

**Investigación biográfica:** Mediante la investigación bibliográfica, se utiliza normativas estandarizadas, libros, artículos científicos y papers, tratando de profundizar el estudio de los sistemas de puesta a tierra, dependiendo principalmente de la resistividad del suelo y la configuración del sistema que permita obtener un resultado deseado.

### Niveles o tipos de investigación

**Descriptiva:** Esta investigación facilita la descripción de las variables independientemente, se realiza un análisis para evaluar los parámetros de resistividad del suelo, resistencia de la malla, tensiones de toque y paso, geometría de la malla y configuración de las patas de una torre, en diferentes normativas nacionales e internacionales vigentes, para obtener resultados eficaces del diseño de puesta a tierra que se vaya a realizar.

**Explicativa:** Con este tipo de investigación, conlleva a describir paso a paso y explicar los procedimientos que se desarrollan en el transcurso del proyecto, está al límite de responder las inquietudes existentes. Además, se centra en reflejar resultados claros y concisos del desarrollo de un sistema de puesta a tierra en una subestación o torre de transmisión.

### Métodos de la investigación

**Hipotético- Inductivo:** Este método depende de las variables y características de la S/E o L/T, también de la ubicación, posición y lugar en el que se va a construir el sistema de puesta a tierra, a través de la investigación realizada se pretende aceptar o rechazar estas afirmaciones.

## Técnicas de investigación

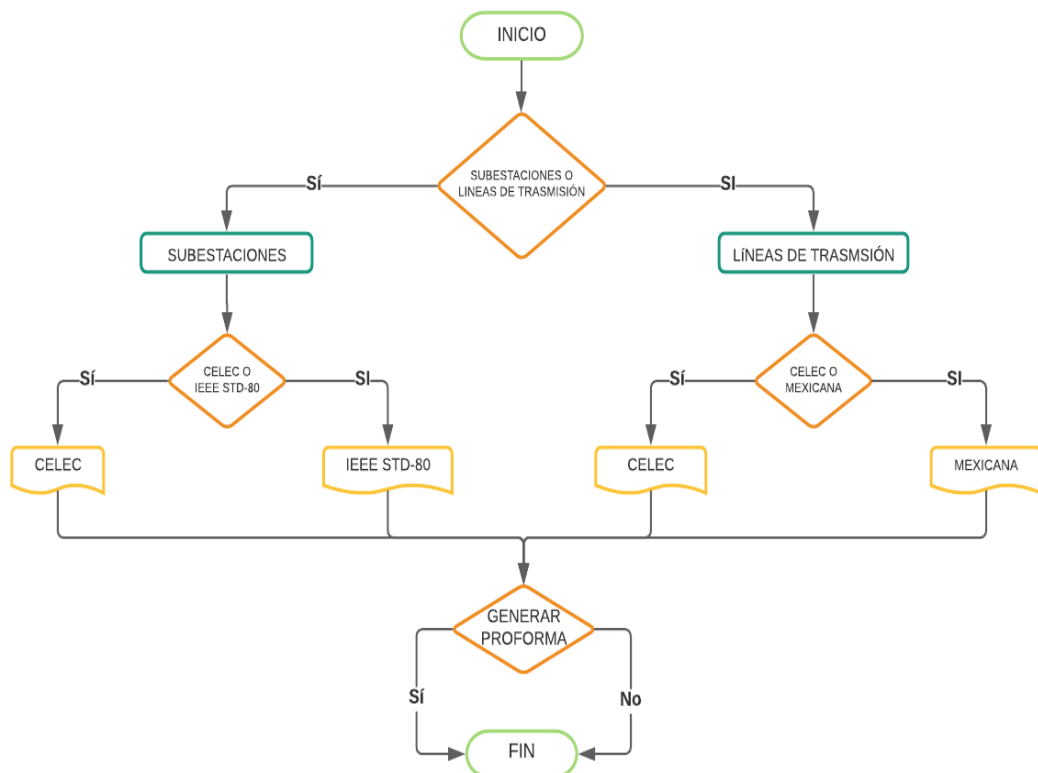
**Observación:** Es la técnica que conlleva más importancia en una investigación ya que permite enfocarse en los mínimos detalles que hacen más llamativo al proyecto, sobre todo para el investigador, facilitando la obtención de resultados.

**Simulación:** La simulación de la herramienta informática se realizó en el software de Python/Spyder, el cual es un ambiente dinámico que permite el desarrollo integrado de múltiples plataformas en código abierto, que permita diseñar un SPT y analizar resultados.

## 11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### Flujograma principal del programa

El siguiente flujograma corresponde a la lógica empleada en la programación de la herramienta informática; donde se presenta el respectivo procedimiento para la obtención del SPT en subestaciones y líneas de transmisión, este programa analizará diferentes parámetros para la obtención de la resistencia del SPT, como tensiones de paso y toque, corriente de malla, geometría del mallado, sección del conductor, entre otros; teniendo la finalidad de obtener un diseño correcto y proceder a generar una proforma de materiales. En el anexo V se detallará el procedimiento de cálculo según su respectiva norma.



**Figura 11.** Diagrama de flujos general.

**Fuente:** Autores.



### Análisis de resultados obtenidos en el programa

Una vez terminado el diseño del programa se procede a dimensionar un caso base para el sistema de puesta a tierra en subestaciones y otro caso para líneas de transmisión. Luego se realizará una comparación aplicado cada una de las normativas para determinar cuál será la más viable y menos costosa.

### Dimensionamiento del caso base para SPT en una subestación

En este caso se tendrá un área de 2700 m<sup>2</sup> para la construcción de una subestación, con una resistividad del terreno de 400 Ω–m. Este análisis inicia con una malla cuadrada en el caso que el diseño no cumpla con las condiciones de resistencia, voltajes de toque y paso establecidos, se debe buscar una configuración adecuada para que cumpla con los parámetros de diseño.

Para todos los cálculos se consideran los siguientes datos que son más relativos para el diseño de una subestación:

**Tabla 17.** Datos para el caso base.

Duración de la falla ( $t_f = t_s$ )	0,5 seg
Resistividad de la capa superficial	2500
Espesor de la capa superficial	0,1 m
Corriente simétrica de falla	5174,5 A
Material del conductor de la malla	Cobre con conductividad del 97% a 40°C
X/R	3,465
Profundidad de la malla	0,5 m
Profundidad de enterramiento de la malla	0,9 m
Corriente de falla	16 kA
Peso personal	50 kg
Factor de división de corriente	0,2435
Frecuencia	60 Hz
Factor de decremento (Con formula)	1,0091
<b>NOTA:</b> La subestación tiene una barra de 115 kV en el caso de una falla (L-T), no se desprecia la resistencia 0 Ω, para el cálculo de la impedancia equivalente se considera con una secuencia positiva 2.242+6.29j y cero 6.191+24.404j del sistema con varillas en las esquinas.	

**Fuente:** Elaboración propia.

### – Malla cuadrada

La configuración de la malla cuadrada es de 40 m x 40 m, con una separación entre conductores de 8 m, este caso no posee varillas.

**Tabla 18.** Resultados de la malla cuadrada sin varillas.

Tipo de malla			CUADRADA	
Area		A	1600	m <sup>2</sup>
Resistividad del Terreno		$\rho$	400	Ωm
Longitud de los conductores		LT	480	m
Corriente de diseño		ID	16	kA

Conductor		Cobre comercial duro 1		
Sección del Conductor Normalizada		Sc	2/0	AWG
Sección del Conductor		Sc	67,44	mm <sup>2</sup>
Diámetro del Conductor		d	9,27	mm
Tensión de Paso		Ep	1983,2931	V
Tensión de Toque		Et	618,8599	V
Resistencia de la Malla		Rg	5,1871	$\Omega$ m
Corriente de falla Máxima		IG	1271,5156	A
Elevación de Potencial de Tierra		GPR	6595,4784	V
Valor Geométrico		Km	0,9105	
Factor de Irregularidad		Ki	1,532	
Valor Geométrico		Ks	0,3931	
Tensión Máxima de la Malla		Em	1477,9395	V
Tensión Real de Paso		Epr	850,7399	V
Epr	850,7399	<	1983,2931	Ep
Em	1477,9395	>	618,8599	Et
Rg	5,1871	>	5	5 $\Omega$
*** DISEÑO INCORRECTO ***				

Fuente: Elaboración propia.

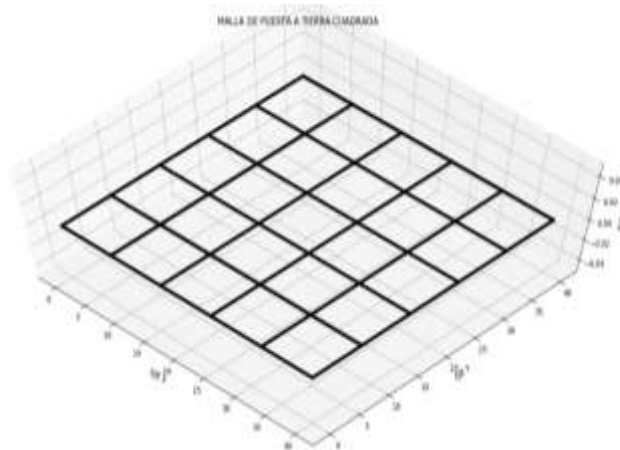


Figura 12. Malla cuadrada sin varillas.

Fuente: Autores.

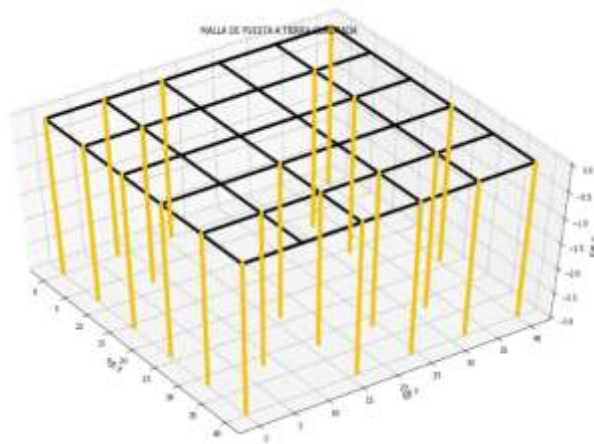
El diseño antes mencionado no cumple con los parámetros establecidos, por lo cual se añadirá 22 varillas copperweld de 3 metros espaciadas en la malla para mejorar la resistencia de la malla.

Tabla 19. Resultados de la malla cuadrada con varillas.

Tipo de malla		CUADRADA		
Area	A	1600	m <sup>2</sup>	
Resistividad del Terreno	$\rho$	400	$\Omega$ m	
Longitud de los conductores	LT	546	m	
Corriente de diseño	ID	16	kA	
Conductor		Cobre comercial duro 1		
Sección del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG	
Sección del Conductor	Sc	67,44	mm <sup>2</sup>	
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm	
Tensión de Paso	Ep	1983,2931	V	
Tensión de Toque	Et	618,8599	V	

Resistencia de la Malla	Rg		5,0864	$\Omega$ m
Corriente de falla Máxima	IG		1271,5156	A
Elevación de Potencial de Tierra	GPR		6467,4368	V
Valor Geométrico	Km		0,9105	
Factor de Irregularidad	Ki		1,532	
Valor Geométrico	Ks		0,3931	
Tensión Máxima de la Malla	Em		1209,4220	V
Tensión Real de Paso	Epr		736,0404	V
Epr	736,0404	<	1983,2931	Ep
Em	1209,4221	>	618,8599	Et
Rg	5,0864	>	5	5 $\Omega$
*** DISEÑO INCORRECTO ***				

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 13.** Malla cuadrada con varillas

**Fuente:** Autores.

El voltaje de la malla sigue siendo mayor que el voltaje tolerable de toque, razón por lo cual el diseño de red tierra sigue siendo incorrecto, y debe modificarse nuevamente.

#### – Malla rectangular

Se ha cambiado la configuración de la malla donde se ocupará toda el área disponible del terreno para realizar una malla rectangular de 60 m x 45 m, con una separación entre conductores de 5m, sin varillas para el SPT.

**Tabla 20.** Resultados de la malla rectangular sin varillas.

Tipo de malla		RECTANGULAR		
Area	A	2700	m2	
Resistividad del Terreno	$\rho$	400	$\Omega$ m	
Longitud de los conductores	LT	1185	m	
Corriente de diseño	ID	16	kA	
Conductor	Cobre comercial duro 1			
Seccion del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG	
Seccion del Conductor	Sc	67,44	mm2	
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm	
Tensión de Paso	Ep	1983,2931	V	
Tensión de Toque	Et	618,8599	V	
Resistencia de la Malla	Rg	3,7092	$\Omega$ m	
Corriente de falla Máxima	IG	1271,5156	A	

Elevación de Potencial de Tierra		GPR	4716,3056	V
Valor Geométrico		Km	0,6883	
Factor de Irregularidad		Ki	2,3229	
Valor Geométrico		Ks	0,4397	
Tensión Máxima de la Malla		Em	686,2019	V
Tensión Real de Paso		Epr	584,5749	V
Epr	584,5749	<	1983,2931	Ep
Em	686,2019	>	618,8599	Et
Rg	3,7092	<	5	5 $\Omega$
*** DISEÑO INCORRECTO ***				

Fuente: Elaboración propia.

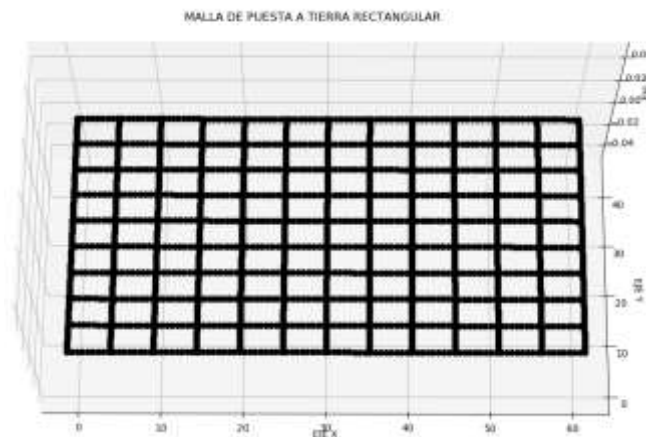


Figura 14. Malla rectangular sin varillas

Fuente: Autores.

Nuevamente se puede visualizar que las condiciones requeridas para un diseño de puesta a tierra son incorrectas por lo cual se debe modificar la configuración de malla, distancia entre conductores, o en último de los casos se debería tratar el suelo para mejorar la resistividad. En el siguiente diseño de malla rectangular, se añadirá 22 varillas copperweld de 6 metros.

Tabla 21. Resultados de la malla rectangular con varillas.

Tipo de malla		RECTANGULAR		
Area	A	2700	m <sup>2</sup>	
Resistividad del Terreno	$\rho$	400	$\Omega$ m	
Longitud de los conductores	LT	1317	m	
Corriente de diseño	ID	16	kA	
Conductor	Cobre comercial duro 1			
Seccion del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG	
Seccion del Conductor	Sc	67,44	mm <sup>2</sup>	
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm	
Tensión de Paso	Ep	1983,2931	V	
Tensión de Toque	Et	618,8599	V	
Resistencia de la Malla	Rg	3,6754	$\Omega$ m	
Corriente de falla Máxima	IG	1271,5156	A	
Elevación de Potencial de Tierra	GPR	4673,3283	V	
Valor Geométrico	Km	0,6883		
Factor de Irregularidad	Ki	2,3229		
Valor Geométrico	Ks	0,4397		
Tensión Máxima de la Malla	Em	579,7925	V	

Tensión Real de Paso		Epr	519,0479	V
Epr	519,0479	<	1983,2931	Ep
Em	579,7925	<	618,8599	Et
Rg	3,6754	<	5	5 $\Omega$
*** DISEÑO CORRECTO ***				

Fuente: Elaboración propia.

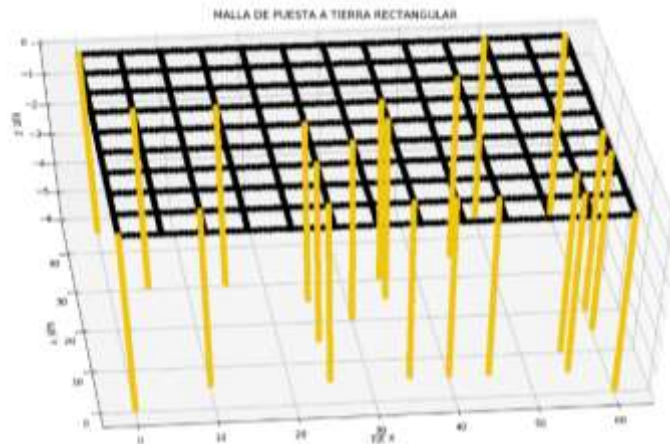


Figura 15. Malla rectangular con varillas

Fuente: Autores.

Se puede verificar que, al momento de añadir las varillas en la malla rectangular se mejoró la resistencia del sistema disminuyendo la corriente de falla máxima y la tensión de malla. Entonces; se ha llegado a culminar con el diseño de SPT obteniendo un sistema satisfactorio, en la cual se puede verificar que la tensión de malla  $E_m < E_t$  y la tensión real de paso  $E_{pr} < E_p$ , cumpliendo con los parámetros establecidos.

#### – Malla en L

En este caso se utilizará los datos anteriores, con la diferencia que se realizará el diseño de una malla en L con las siguientes dimensiones  $L_x = 60\text{m}$ ,  $L_y = 45\text{m}$ ,  $L_x' = 30\text{m}$ ,  $L_y' = 25\text{m}$ , sin varillas y con separación de 5 m en cada lado.

Tabla 22. Resultados de la malla en L sin varillas.

Tipo de malla		EN L	
Area	A	2100	m <sup>2</sup>
Resistividad del Terreno	$\rho$	400	$\Omega\text{m}$
Longitud de los conductores	LT	945	m
Corriente de diseño	ID	16	kA
Conductor	Cobre, comercial duro 1		
Seccion del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG
Seccion del Conductor	Sc	67,44	mm <sup>2</sup>
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm
Tensión de Paso	Ep	1983,2931	V
Tensión de Toque	Et	618,8599	V
Resistencia de la Malla	Rg	4,2361	$\Omega\text{m}$
Corriente de falla Máxima	IG	1271,5156	A
Elevación de Potencial de Tierra	GPR	5386,2671	V
Valor Geométrico	Km	0,6918	

Factor de Irregularidad	Ki	2,2788	
Valor Geométrico	Ks	0,4397	
Tensión Máxima de la Malla	Em	848,4825	V
Tensión Real de Paso	Epr	719,0646	V
Epr	719,0646	<	1983,2931 Ep
Em	848,4825	>	618,8599 Et
Rg	4,2361	<	5 5 Ω
*** DISEÑO INCORRECTO ***			

Fuente: Elaboración propia.

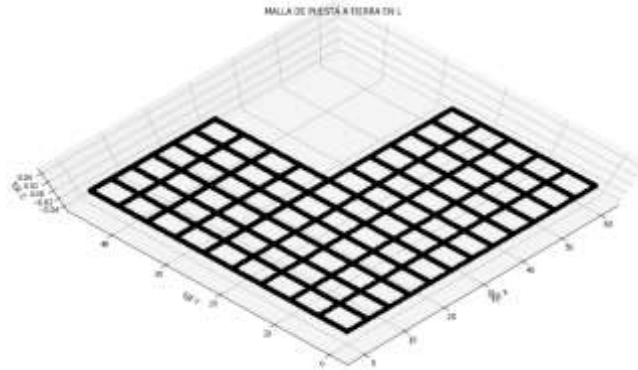


Figura 16. Malla en L sin varillas.

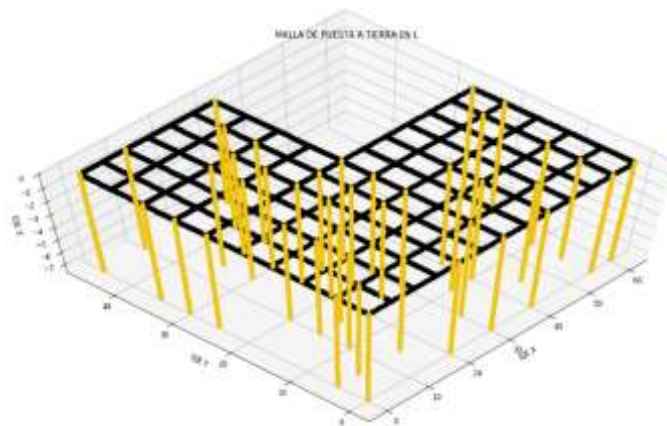
Fuente: Autores.

La configuración de la malla en L sin varillas no satisface la tensión de la malla, razón por la cual se colocará 44 varillas de 7.5 metros en el diseño.

Tabla 23. Resultados de la malla en L con varillas.

Tipo de malla	EN L		
Area	A	2100	m <sup>2</sup>
Resistividad del Terreno	$\rho$	400	Ωm
Longitud de los conductores	LT	1275	m
Corriente de diseño	ID	16	kA
Conductor	Cobre, comercial duro 1		
Seccion del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG
Seccion del Conductor	Sc	67,44	mm <sup>2</sup>
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm
Tensión de Paso	Ep	1983,2931	V
Tensión de Toque	Et	618,8599	V
Resistencia de la Malla	Rg	4,1265	Ωm
Corriente de falla Máxima	IG	1271,5156	A
Elevación de Potencial de Tierra	GPR	5246,9090	V
Valor Geométrico	Km	0,6918	
Factor de Irregularidad	Ki	2,2788	
Valor Geométrico	Ks	0,4397	
Tensión Máxima de la Malla	Em	535,7011	V
Tensión Real de Paso	Epr	515,1752	V
Epr	515,1752	<	1983,2931 Ep
Em	535,7011	<	618,8599 Et
Rg	4,1265	<	5 5 Ω
*** DISEÑO CORRECTO ***			

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 17.** Malla en L con varillas.

**Fuente:** Autores.

Comparados los dos diseños correctos, se tiene que la malla rectangular tiene una resistencia de  $3,68 \Omega$  debido que la rectangular ocupa toda el área de  $2700 \text{ m}^2$  de construcción y la configuración de malla en L tiene  $4,13 \Omega$  dado que ocupa una menor cantidad de área para el diseño. Cabe recalcar que la longitud y el número de electrodos verticales afectan proporcionalmente a la resistencia de malla, razón por la cual es un elemento que debe ser considerado en el SPT.

### **Comparación de resultados entre normas e instructivos, empleando datos del SPT de la subestación A**

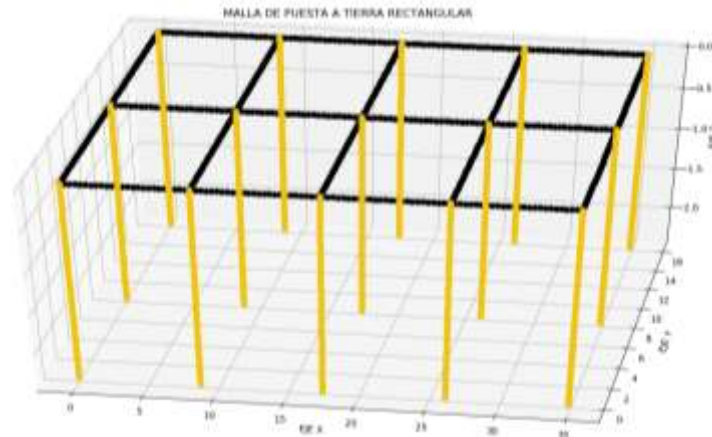
A continuación, se muestra el diseño del SPT para una subestación de 3 MVA 0.38/138 kV, los datos recopilados para el proyecto son los siguientes:

**Tabla 24.** Datos de la subestación A.

Resistividad	$\rho = 36.68 \Omega\text{m}$
Corriente de falla	$I_F = 13.8 \text{ KA}$
Duración de la falla	$t_s = 0.5 \text{ seg}$
Corriente Simétrica de falla trifásica	$3I_o = 793 \text{ A}$
Temperatura ambiente	$T_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
Factor de decremento	$D_f = 1$
Conductor de cobre desnudo	2/0 AWG
Peso del personal	50 kg
Resistividad de la capa superficial	$\rho_s = 2500 \Omega\text{m}$
Espesor de la capa superficial	$h_s = 0.05 \text{ m}$
Configuración de la malla: <b>RECTANGULAR</b> $L_x = 34.8 \text{ m}, L_y = 16 \text{ m}, D_x = 8.7 \text{ m}, D_y = 8 \text{ m}$	
Cantidad y longitud de varillas: $N_V = 15$ , $L_V = 2.4 \text{ m}$	
Profundidad de la malla	$h = 0.305 \text{ m}$
Relación X/R	$X/R = 1.43$
Factor de división de corriente	$s_f = 1$
Profundidad de referencia (Con varillas en las esquinas)	$h_o = 0.40 \text{ m}$

**Fuente:** Elaboración propia.

El diseño de la geometría de la malla para la subestación A, es el siguiente:



**Figura 18.** Diseño de la malla para la subestación A.

**Fuente:** Autores.

– **Instructivo de CELEC**

Los resultados obtenidos mediante la herramienta informática son los siguientes:

**Tabla 25.** Resultados obtenidos por CELEC.

Tipo de malla		RECTANGULAR	
Area	A	556,8	m <sup>2</sup>
Resistividad del Terreno	$\rho$	36,68	$\Omega$ m
Longitud de los conductores	LT	220,4	m
Corriente de diseño	ID	13,8	kA
Conductor	Cobre Desnudo Rígido		
Seccion del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG
Seccion del Conductor	Sc	67,44	mm <sup>2</sup>
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm
Tensión de Paso	Ep	1476,2725	V
Tensión de Toque	Et	492,1047	V
Resistencia de la Malla	Rg	0,8426	$\Omega$ m
Corriente de falla Máxima	IG	793	A
Elevación de Potencial de Tierra	GPR	668,1818	V
Valor Geométrico	Km	1,0674	
Factor de Irregularidad	Ki	1,2014	
Valor Geométrico	Ks	0,5855	
Tensión Máxima de la Malla	Em	153,5271	V
Tensión Real de Paso	Epr	121,1399	V
Epr	121,1399	<	1476,2725 Ep
Em	153,5271	<	492,1047 Et
Rg	0,8426	<	5 5 $\Omega$
*** DISEÑO CORRECTO ***			

**Fuente:** Elaboración propia.

– **Norma IEEE Std – 80**

Los resultados obtenidos mediante la herramienta informática son los siguientes:

**Tabla 26.** Resultados obtenidos por la IEEE Std-80.

Tipo de malla		RECTANGULAR	
Area	A	556,8	m <sup>2</sup>
Resistividad del Terreno	$\rho$	36,68	$\Omega$ m
Longitud de los conductores	LT	220,4	m



Corriente de diseño	ID	13,8	kA
Conductor	Cobre, commercial duro 1		
Seccion del Conductor Normalizada	Sc	2/0	AWG
Seccion del Conductor	Sc	67,44	mm <sup>2</sup>
Diámetro del Conductor	d	9,27	mm
Tensión de Paso	Ep	1476,2725	V
Tensión de Toque	Et	492,1047	V
Resistencia de la Malla	Rg	0,8426	$\Omega$ m
Corriente de falla Máxima	IG	793	A
Elevación de Potencial de Tierra	GPR	668,1818	V
Valor Geométrico	Km	1,0674	
Factor de Irregularidad	Ki	1,2014	
Valor Geométrico	Ks	0,5855	
Tensión Máxima de la Malla	Em	153,5271	V
Tensión Real de Paso	Epr	121,1399	V
Epr	121,1399	<	1476,2725 Ep
Em	153,5271	<	492,1047 Et
Rg	0,8426	<	5 5 $\Omega$
*** DISEÑO CORRECTO ***			

**Fuente:** Elaboración propia.

Se puede determinar que la utilización del instructivo de CELEC y la norma IEEE Std – 80 para el cálculo de diseños de puesta a tierra son procedimientos totalmente confiables, los cuales se podrían utilizar a consideración del diseñador. A criterio de los redactores del proyecto, se recomienda utilizar la normativa IEEE Std – 80, porque es una norma estandarizada a nivel mundial y además realiza los distintos procedimientos detalladamente.

#### – Proforma de materiales

En el caso del instructivo de CELEC se realizó las proformas utilizando las siguientes uniones:

#### Proforma CELEC unión soldada

**Tabla 27.** Proforma de materiales CELEC unión soldada.

Razón Social / Nombre: EMPRESA A					
RUC / CI: 999999999					
Dirección: ECUADOR					
Teléfono: 0999999999					
Fecha: 11/09/20 - 11:57:48-AM					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Cobre desnudo rigido 2/0 AWG	m	184,40	11,35	2092,94
2	Varilla Cooperweld 254 micras 5/8 3m	u	12,00	20,00	240,00
3	Molde Thermold cable cable tipo CC-4 2/0	u	1,00	140,00	140,00
4	Carga para Suelda 115 x 1	u	7,00	7,49	52,43
5	Molde Thermold cable cable tipo CC-2 2/0	u	1,00	140,00	140,00
6	Carga para Suelda 90.0 x 1.0	u	8,00	6,50	52,00
7	Molde Thermold cable varilla tipo CR-2 2/0	u	2,00	140,00	280,00
8	Carga para Suelda 90.0 x 1.0	u	15,00	6,50	97,50
				Subtotal	3094,87
				IVA 12%	371,38
				<b>TOTAL</b>	<b>3466,25</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

## Proforma CELEC unión empernada

**Tabla 28.** Proforma de materiales CELEC unión empernada.

Razón Social / Nombre: EMPRESA A					
RUC / CI: 9999999999					
Dirección: ECUADOR					
Teléfono:0999999999					
Fecha:11/09/20 - 12:02:59-PM					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Cobre desnudo rígido 2/0 AWG	m	184,40	11,35	2092,94
2	Varilla Cooperweld 254 micras 5/8 3m	u	12,00	20,00	240,00
3	Mango de union en cruz 2/0	u	7,00	14,56	101,92
4	Mango de union "T" (1 Pieza) 2/0	u	8,00	11,28	90,24
5	Mango de union "T" (2 Pieza) 2/0	u	15,00	11,28	169,20
				Subtotal	2694,30
				IVA 12%	323,32
				<b>TOTAL</b>	<b>3017,62</b>

Fuente: Elaboración propia.

## Proforma IEEE con uniones soldadas

**Tabla 29.** Proforma de materiales por la IEEE Std-80.

Razón Social / Nombre: EMPRESA A					
RUC / CI: 9999999999					
Dirección: ECUADOR					
Teléfono:0999999999					
Fecha:11/09/20 - 13:27:48-PM					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Cobre, comercial duro 1	m	184,40	12,50	2305,00
2	Varilla Cooperweld 254 micras 5/8 3m	U	12,00	20,00	240,00
3	Molde Thermold cable cable tipo CC-4	U	1,00	140,00	140,00
4	Carga para Suelta 115 x 1 para molde CC-4	U	7,00	7,49	52,43
5	Molde Thermold cable cable tipo CC-2	U	1,00	140,00	140,00
6	Carga para Suelta 90 x 1 para molde CC-2	U	8,00	6,50	52,00
7	Molde Thermold cable varilla tipo CR-2	U	2,00	140,00	280,00
8	Carga para Suelta 90 x 1 para molde CR-2	U	15,00	6,50	97,50
				Subtotal	3306,93
				IVA 12%	396,83
				<b>TOTAL</b>	<b>3703,76</b>

Fuente: Elaboración propia.

Comparando las proformas obtenidas por el instructivo de CELEC, se tiene una diferencia en los costos totales de \$ 448,63 dólares entre los tipos de unión soldada y empernada. Teniendo en cuenta que las uniones soldadas son más costosas porque se consideran mejores desde el aspecto técnico, práctico y confiable evitando pérdidas de corriente. En cambio, al comparar los costos entre uniones soldadas del instructivo CELEC y la norma IEEE Std – 80 se tiene una diferencia de \$ 237,51 dólares; esto se debe a que el costo del conductor Cobre comercial duro 1, es más elevado en comparación al conductor de Cobre desnudo rígido.

### Dimensionamiento del caso base para el SPT en una línea de transmisión

El análisis de resultado se basa en el desarrollo de un caso base donde se pueda ir desarrollando el dimensionamiento de un diseño de puesta a tierra, utilizando las diferentes configuraciones que presenta el instructivo de CELEC y la norma mexicana.

#### Caso base realizado con el procedimiento de CELEC

En este caso se diseñará el sistema de puesta a tierra para una línea de 500 kV, con resistividad del terreno de 473,93  $\Omega\text{m}$  en un suelo duro, se utilizará las diferentes configuraciones hasta encontrar con la que cumpla una resistencia menor a 10  $\Omega$ .

##### – Electrodo verticales

En esta configuración se utilizará 4 varillas copperweld de 3 metros y distancia entre varillas de la torre de transmisión es de 14 metros.

**Tabla 30.** Resultados de la configuración electrodo verticales 4 varillas.

Nivel de Voltaje	V	500	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	473,93	$\Omega\text{m}$
Resistencia	R L/T	10	$\Omega$
	!!! Diseño Incorrecto !!!		
R	22,3425	>	10 $\Omega$

**Fuente:** Elaboración propia.

##### – Electrodo horizontales o contrapesos

Se ubicará un contrapeso de 50 m en una de las patas de la torre, este caso se ocupará un conductor con radio de 0,00703 m, estará enterrado 0,8 m.

**Tabla 31.** Resultados configuración electrodo horizontales o contrapesos.

Nivel de Voltaje	V	500	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	473,93	$\Omega\text{m}$
Resistencia	R L/T	10	$\Omega$
Configuración de PaT		Electrodo Horizontales o Contrapeso	
Ubicación del Contrapeso		1 Pata	
Largo del Conductor	Lc	50	m
Radio del Conductor	r	0.00703	m
Profundidad de Enterramiento	h	0.8	m
	*** Diseño Incorrecto ***		
R	19,6140078	>	10 $\Omega$

**Fuente:** Elaboración propia.

##### – Electrodo verticales y malla de puesta a tierra

Para esta configuración se utilizará 4 varillas copperweld de 3 m con una apertura de las patas de 13 metros a la estructura de la torre, con un chicote de 3 m para cada pata y la malla será enterrada a una profundidad de 0,8 m.

**Tabla 32.** Resultados configuración electrodos verticales con malla.

Nivel de Voltaje	V	500	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	473,93	$\Omega\text{m}$
Resistencia	r	10	$\Omega$
Profundidad de Enterramiento	h	0,8	m
Número de Varillas	Nr	4	
Longitud de las Varillas	Lr	3	m
Apertura de Patas Estructura	Ape	13	m
Long. del Conductor Pata-Varilla	Lpv	3	m
!!! Diseño Incorrecto !!!			
R	17,16008883	>	10 $\Omega$

Fuente: Elaboración propia.

### – Sistema combinado

Con los mismos datos del caso anterior se añadirá los siguientes 3 contrapesos en cada pata de la torre, con radio de 0.00703 m:

#### Primer contrapeso: 5 Metros

**Tabla 33.** Resultados configuración de sistema combinado con 1 contrapeso.

Nivel de Voltaje	V	500	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	473,93	$\Omega\text{m}$
Resistencia	r	10	$\Omega$
Long. Primer Contrapeso	L1c	5	m
!!! Diseño Incorrecto !!!			
R	11,2121918	>	10 $\Omega$

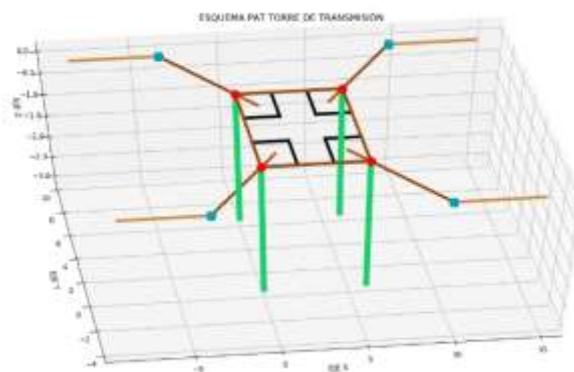
Fuente: Elaboración propia.

#### Segundo contrapeso: 6 Metros

**Tabla 34.** Resultados configuración de sistema combinado con 2 contrapesos.

Nivel de Voltaje	V	500	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	473,93	$\Omega\text{m}$
Resistencia	r	10	$\Omega$
Long. Primer Contrapeso	L1c	5	m
Long. Segundo Contrapeso	L2c	6	m
*** Diseño Correcto ***			
R	9,24916435	<	10 $\Omega$

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 19.** Configuración diseño combinado con 2 contrapesos.

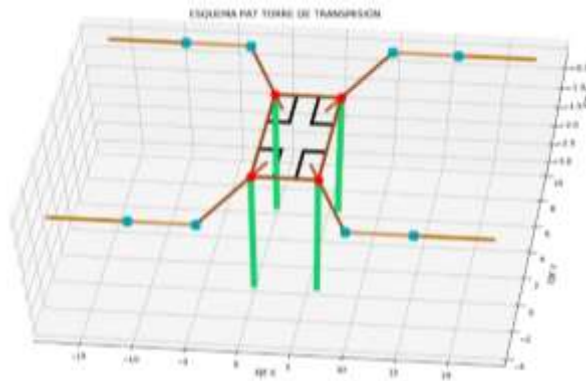
Fuente: Autores.

### Contrapeso adicional: 7 Metros

**Tabla 35.** Resultados configuración de sistema combinado con contrapeso adicional.

Nivel de Voltaje	V	500	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	473,93	$\Omega\text{m}$
Resistencia	r	10	$\Omega$
Long. Primer Contrapeso	L1c	5	m
Long. Segundo Contrapeso	L2c	6	m
Long. Contrapeso Adicional	Lca	7	m
	*** Diseño Correcto ***		
R	7,7802504	<	10 $\Omega$

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 20.** Configuración diseño combinado con contrapesos adicionales.

Fuente: Autores.

En este caso de estudio se realizaron varias configuraciones, donde se puede verificar que la resistencia se va disminuyendo proporcionalmente. La resistencia adecuada tiene que ser menor o igual a  $10 \Omega$  y la que se encontró es de  $7,78 \Omega$ ; hallada en el diseño de un sistema combinado con contrapesos de 18 metros por pata, 4 varillas copperweld de 3/4 y una malla de  $14\text{m} \times 14\text{m}$ .

### Caso base del programa con el procedimiento de la norma mexicana

El análisis que se desarrollará a continuación es para el diseño del sistema de puesta a tierra para una torre de transmisión de 230 kV, existe una resistividad de terreno de  $517.12 \Omega\text{-m}$ . Se utilizarán electrodos de (1.5, 3 y 6 m), tomados de la normativa mexicana.

El diseño se lo irá configurando de las distintas maneras que ofrece el programa con el fin de conocer su funcionamiento y de encontrar el valor de resistencia adecuado para el sistema. El primer paso es escoger el tipo de cimentación, para poder observar la diferencia de entre la cimentación en acero y concreto, se calculará para los dos casos.

Asumiendo para el caso se utiliza electrodos de 3m con radio de 0.16m y los parámetros para una cimentación de concreto son: resistividad del concreto  $100 \Omega\text{m}$ , el envolvente del concreto es 0.7m y el diámetro del conductor 0.2 m.

**Tabla 36.** Resistencia de cimentación en acero y concreto, sin elementos adicionales.

TIPO DE CIMENTACIÓN	RESISTENCIA ( $\Omega$ )
ACERO	22,753
CONCRETO	19,046
DISEÑO INCORRECTO	

Fuente: Elaboración propia.

#### – Cimentación en concreto

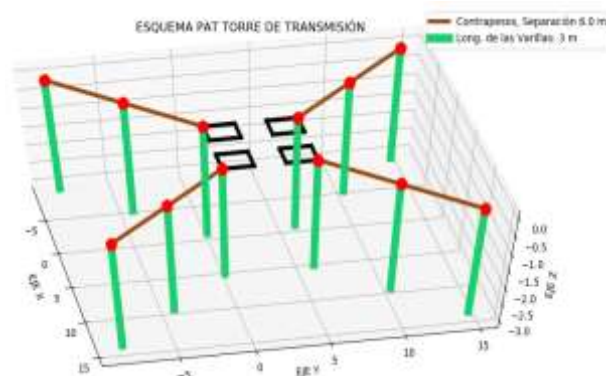
Se puede verificar claramente que es mejor la cimentación en concreto ya que resulta una resistencia menor, esto se debe a que el concreto tiene una resistividad relativamente baja en condiciones de humedad, y la resistividad del suelo en sí misma. Pero para el caso no cumple con una resistencia menor a  $10 \Omega$ , lo cual se ingresarán electrodos adicionales.

Escogiendo la resistencia de cimentación en concreto de  $19,046 \Omega$  se le añadirá 1 contrapeso de 6m y dos electrodos de 3m en cada pata de la torre. Con estos elementos adicionales la resistencia del sistema es de  $12,09\Omega$ .

El diseño es incorrecto lo cual se tiene que incrementar más elementos para mejorar la resistencia del sistema, es decir, ahora se utilizará dos contrapesos de 6m y tres electrodos verticales de 3m por pata. Estos electrodos se pondrán al inicio y final de cada contrapeso instalado. El resultado de la resistencia es de  $7.74 \Omega$ , lo cual podemos decir que el diseño es correcto.

$$R = 7,74 < 10 \Omega$$

En la siguiente figura se muestra la configuración total del sistema:



**Figura 21.** Diseño de Pat con cimentación en concreto.

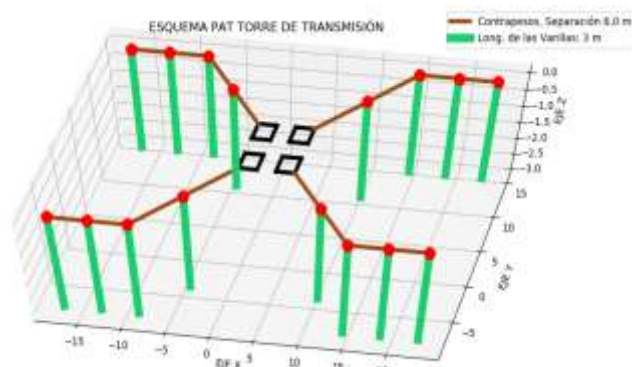
Fuente: Autores.

#### – Cimentación acerada

Considerando el análisis para cimentación en acero, observamos que la resistencia es de  $22.753 \Omega$ , por ende, se debe añadir electrodos verticales y contra-antenas. Buscando tener el diseño correcto, se empezará incrementando al sistema una contra-antena y un electrodo vertical por

pata. Se obtuvo la resistencia de  $17,42 \Omega$ . Disminuyo un poco, pero no es adecuada para el sistema, entonces se ira añadiendo más elementos hasta lograr tener la resistencia correcta.

Luego se añadió 2 contra-antenas y 2 electrodos verticales la resistencia es de  $9.63 \Omega$ , el resultado cumple, pero está cerca de su límite por lo que se necesita mejorar el sistema de puesta a tierra. El sistema requiere de más elementos por lo cual ahora se realizará el cálculo aumentando dos contra-antenas y un electrodo, teniendo una configuración total de cuatro contra-antenas y tres electrodos verticales por pata. La resistencia total es de  $5.09 \Omega$  lo cual es menor a  $10 \Omega$  y con ello se obtuvo el diseño correcto que es el siguiente:



**Figura 22.** Diseño de Pat con cimentación en acerada.

**Fuente:** Autores.

Comparando los dos diseños antes realizados se tiene una resistencia de  $7,74 \Omega$  para la cimentación de concreto y  $5,09 \Omega$  para la cimentación de acero. La diferencia entre ellas es que los diseños poseen distintas configuraciones como podemos observar en las gráficas. En la siguiente tabla se podrá notar las cantidades totales de elementos utilizados en cada diseño.

**Tabla 37.** Resistencia de cimentación en acero y concreto, con elementos adicionales.

Tipo de cimentación	Resistencia (R) $\Omega$	Contra-pesos totales	Electrodos verticales
En acero	7,74	8	12
En concreto	5,09	16	12

**Fuente:** Elaboración propia.

Se puede observar que las dos configuraciones obtuvieron la resistencia del sistema adecuada como para ser instaladas, pero el diseño escogido en este caso es el de cimentación en concreto por que utiliza la mitad de contra-antenas a comparación de la otra configuración. Cabe recalcar que la resistencia en acero es menor a la de concreto debido a la cantidad de contra-antenas que la norma recomienda que se utilice.

## Comparación del programa entre CELEC y norma mexicana para el mismo caso de estudio

A continuación, se diseñará una torre para una línea de transmisión de 230 kV situada a 2850 m.s.n.m y la resistividad del suelo en un terreno duro se obtiene mediante el método de Schlumberger con una separación entre electrodos (Voltaje – Corriente) de 2 metros y 0,5 metros entre electrodos voltaje, la resistencia medida con el telurómetro del terreno es de 12,5  $\Omega$ .

### Instructivo CELEC

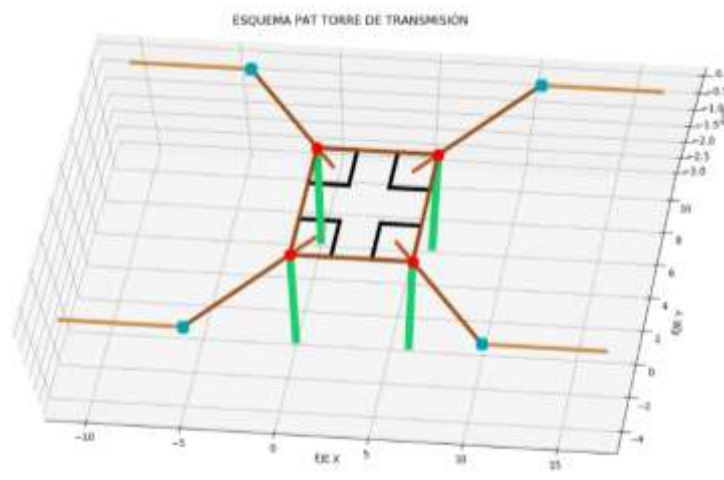
Para este caso se trabajará con un sistema combinado con 2 contrapesos de 6 metros por cada tramo con un radio de 0.1 m, 4 varillas cooperweld de 3 m que conforman el mallado y una apertura de 8 m entre patas, la longitud pata varilla será de 3 m y el SPT estará enterado a 0,5 m desde del suelo.

**Tabla 38.** Resultados L/T aplicando instructivo CELEC.

Nivel de Voltaje	V	230	kV
Resistividad del Terreno	$\rho$	392,699082	$\Omega$ m
Altura de la Instalación	H	> 1000	msnm
Resistencia	R L/T	10	$\Omega$
Configuración de PaT		Sistema Combinado	
Long. Primer Contrapeso	L1c	6	m
Long. Segundo Contrapeso	L2c	6	m
*** Diseño Correcto ***			
R	7,33473047	<	10 $\Omega$

**Fuente:** Elaboración propia.

Diseño de la puesta a tierra:



**Figura 23.** Diseño de Pat con CELEC.

**Fuente:** Autores.



Proforma de materiales:

**Tabla 39.** Proforma L/T aplicando instructivo CELEC.

Razón Social / Nombre: ELECTRICA L/T					
RUC / CI:1234567890					
Dirección: LATACUNGA					
Teléfono:09 912 34567					
Fecha:11/09/20 - 08:29:56-PM					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Varilla de 3/4 x 3m	U	4	33,5	134
2	Carga para Suelta Molde CS-3	U	4	6,5	26
3	Conductor de acero recubierto de cobre 3x8 AWG	m	96	7,8	748,8
4	Carga para Suelta Molde CR-2	U	4	6,5	26
5	Carga para Suelta Molde CC-4	U	4	7,49	29,96
6	Carga para Suelta Molde CC-1	U	4	5,25	21
7	Molde Thermold cable a superficie tipo CS-3	U	1	140	140
8	Molde Thermold cable varilla tipo CR-2	U	1	140	140
9	Molde Thermold cable cable tipo CC-4	U	1	140	140
10	Molde Thermold cable cable tipo CC-1	U	1	140	140
				Subtotal	1545,76
				IVA 12%	185,49
				<b>TOTAL</b>	<b>1731,25</b>

Fuente: Elaboración propia.

### Norma Mexicana

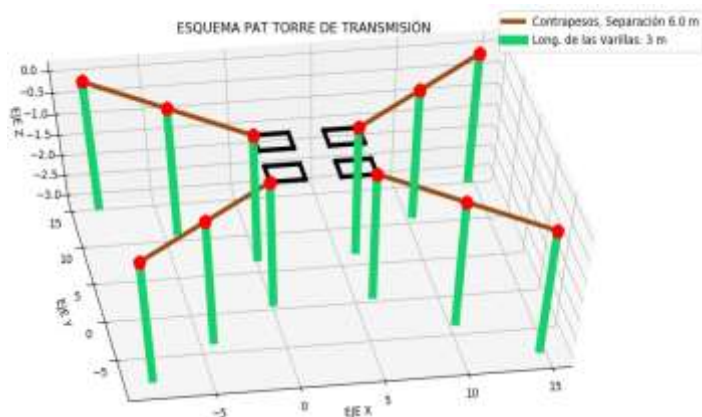
En este caso se aplicará cimentación en concreto con una resistividad de 100 Ω-m, diámetro del concreto de 0.7 m, electrodos de 3 m y 2 contra-antenas de 6 m por pata para un diámetro del 0,2m.

**Tabla 40.** Resultados L/T aplicando la norma mexicana.

*** NORMA MEXICANA ***				
Tipo de Cimentación			En Concreto	
Resistividad del Terreno		ρ	392,699	Ωm
R	5,89	<	10	Ω
*** DISEÑO CORRECTO ***				

Fuente: Elaboración propia.

Diseño de la puesta a tierra:



**Figura 24.** Diseño de Pat con la norma mexicana.

Fuente: Autores.

Proforma de materiales:

**Tabla 41.** Proforma L/T aplicando norma mexicana.

Razón Social / Nombre: ELECTRICA L/T					
RUC / CI:1234567890					
Dirección: LATACUNGA					
Teléfono:09 912 34567					
Fecha:11/09/20 - 09:29:56-PM					
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Conductor de acero recubierto de cobre 3x8 AWG	m	48	7,8	374,4
2	Varillas de 3/4	m	36	6,67	240,12
3	Molde Thermold cable a superficie tipo CS-3	u	1	140	140
4	Carga para Suelta Molde CS-3	u	4	6,50	26
5	Molde Thermold cable varilla tipo CR-2	u	2	140	280
6	Carga para Suelta Molde CR-2	u	12	6,5	78
				Subtotal	1138,52
				IVA 12%	136,62
				<b>TOTAL</b>	<b>1275,14</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

En este caso de estudio se puede determinar que la resistencia obtenida por CELEC es de 7.33 ohm, esto se obtiene utilizando un sistema combinado ocupando 2 contrapesos de 6m por pata y 4 electrodos verticales unidas por medio del conductor para formar el mallado. A diferencia de la norma mexicana que en cambio utiliza 12 electrodos verticales y 2 contra-antenas de 6 m por pata dando un total de 48 m de contra-antenas, obtenido una resistencia de 5.89 ohm; se puede verificar que esta resistencia es mejor que la de CELEC, debido a que se utiliza distintas cantidades de material en el SPT. En consideración a la proforma de materiales se tiene una diferencia de \$456,11 dólares.

## 12. IMPACTOS

### Impacto técnico

Este proyecto permite demostrar el diseño de un sistema de puesta a tierra para una subestación o línea de transmisión por medio de la visualización de gráficas tridimensionales antes de llevarse a cabo la construcción, además presenta un valor total de materiales a utilizarse en el sistema de puesta a tierra facilitando la obtención del costo del proyecto.

### Impacto social

El proyecto es funcional e innovador para docentes, estudiantes de Ingeniería Eléctrica e ingenieros dedicados al diseño de puesta a tierra, los cuales tendrán un procedimiento establecido para el diseño de sistema de puesta a tierra por medio de una norma nacional o internacional, considerando los parámetros que brinden confiabilidad y seguridad ante bruscas

elevaciones de potencial evitando que se provoquen grandes pérdidas económicas y humanas en el caso de que alguna persona se encuentre cerca de una subestación o torre.

### Impacto económico

El programa permitirá conocer el precio total y de manera detallada la cantidad de materiales que se necesitará para la construcción del sistema de puesta a tierra para una S/E o L/T.

## 13. PRESUPUESTO PARA LA PROPUESTA DEL PROYECTO

Tabla 42. Presupuesto del proyecto.

RECURSOS	CANTIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR UNITARIO	TOTAL
<b>RECURSOS HUMANOS</b>				
Programador	2	Personas	\$450,00	\$900,00
Asesor	1	Persona	\$400,00	\$400,00
<b>Total recursos humanos</b>				\$1.300,00
<b>MATERIALES</b>				
Papel bond	2	Resmas	\$5,00	\$10,00
Impresiones B/N	400	Unidad	\$0,05	\$20,00
Impresiones a color	150	Unidad	\$0,10	\$15,00
Carpetas	2	Unidad	\$0,40	\$0,80
Anillados	3	Unidad	\$4,00	\$12,00
Empastados	2	Unidad	\$20,00	\$40,00
Lápices	3	Unidad	\$1,00	\$3,00
<b>Total materiales</b>				\$100,80
<b>TECNOLÓGICOS</b>				
Computador	600	Horas	\$0,45	\$270,00
Internet	400	Horas	\$0,50	\$200,00
Scanner	30	Unidad	\$0,50	\$15,00
<b>Total recursos tecnológicos</b>				\$485,00
<b>MOVILIZACIÓN Y TRANSPORTE</b>				
Alimentación	20	Unidad	\$2,50	\$50,00
Movilización	10	Unidad	\$5,00	\$50,00
<b>Total recursos movilización y transporte</b>				\$100,00
<b>EXTRAS</b>				
Gastos Extras				\$50,00
<b>SUB TOTAL RECURSOS</b>				\$1.985,80
<b>TOTAL RECURSOS</b>				<b>\$2.035,80</b>

Fuente: Elaboración propia.

## 14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- El procedimiento establecido para el cálculo de sistemas de puesta a tierra en subestaciones mediante la normativa IEEE Std – 80, considera más parámetros y variables haciendo que la norma obtenga resultados más reales y precisos, en comparación al instructivo de SPT de CELEC.
- Las configuraciones de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión, la norma mexicana considera 4 configuraciones de electrodos adicionales teniendo en su caso más crítico un contrapeso de 30 metros de longitud y 6 electrodos verticales, por pata dependiendo de su nivel de resistividad a diferencia del instructivo de CELEC que ofrece varias configuraciones como son: electrodos verticales, contrapesos, malla de puesta a tierra y sistema combinado.
- El método de Wenner es el más conocido y practico, el cual ubica los electrodos de corriente y voltaje en línea recta separados a una misma distancia, estos electrodos obtienen el valor de la resistencia del suelo mediante la inyección de corriente a baja frecuencia a través de la tierra.
- El programa de cálculo desarrollado en el software de Python, permite realizar múltiples diseños de SPT en subestaciones o líneas de transmisión, siendo dinámico en la selección de la normativa o instructivo a utilizarse. Además, muestra las configuraciones de malla por medio de gráficas en 3D y exporta los resultados en archivos de Excel.
- La medición de la resistencia del terreno debe realizarse en las condiciones más críticas, utilizando correctamente cualquier método para la obtención de la resistividad del suelo, siendo un dato primordial para el dimensionamiento del sistema de puesta a tierra para subestaciones o líneas de transmisión.
- Las subestaciones y líneas de transmisión deben tener un SPT de resistencia baja, ya que es un sistema de protección contra las corrientes de falla, descargas atmosféricas o fallas en condiciones normales, debe estar diseñado acorde a las dimensiones del área de construcción brindando confiabilidad y seguridad, para evitar pérdidas económicas y humanas.

## Recomendaciones

- Los precios de materiales utilizados para la proforma pueden ser actualizados o modificados en la hoja Excel de puesta a tierra, utilizado por la programación de para obtener una proforma con costos actualizados.
- Los archivos de EXCEL son generados automáticamente y se guardan en la carpeta principal, estos documentos deberán estar cerrados, eliminados o movidos antes de volver a ejecutar el programa, caso contrario saldrá un error, porque los datos no se pueden sobre escribir en un documento abierto.
- Revisar los procedimientos que se encuentran en los instructivos de CELEC, normativas IEEE Std-80 y mexicana L/T (69 a 400 kV), para un mejor entendimiento de los diseños de puesta a tierra en subestaciones y líneas de transmisión, facilitando la utilización de la herramienta informática en Python.
- Se recomienda realizar la construcción de la malla y colocación de electrodos verticales con suelda exotérmica, ya que este material funde al material formando una sola masa compacta evitando tener puntos calientes dando fiabilidad y garantía al SPT.
- Al realizar el diseño de la geometría de la malla colocar una separación pequeña entre conductores y adjuntando una cierta cantidad de varillas, para mediante ello obtener una resistencia extremadamente baja.

## 15. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Mujal Rosas, «Tecnología Eléctrica,» Universitat Politècnica de Catalunya, SL, Barcelona, 2003.
- [2] F. Ladreda, «Prevención de riesgos laborales para Electricidad,» Lex Nova, España, 2009.
- [3] R. A. Chiriboga Guaras, «PROYECTO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA NORMALIZADA PARA CENTROS DE TRANSFORMACIÓN EN EL SECTOR DEL NUEVO AEROPUERTO DE QUITO PARROQUIA DE TABABELA,» ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, 2008.
- [4] FLUKE, «Resistencia de Puesta a tierra,» Fluke Corporation, EE.UU, 2017.
- [5] CELEC EP TRANSELECTRIC, «Instructivo para el diseño de puesta a tierra en líneas de transmisión,» CELEC, Quito, 2018.
- [6] S. Martinez, «Sistema de puesta a tierra,» 11 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://n9.cl/v400v>. [Último acceso: 9 Julio 2020].

- [7] G. Moreno Ospina, J. A. Valencia Velásquez, C. A. Cárdenas Agudelo y W. M. Villa Acevedo, «Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas ante fallas eléctricas y rayos,» Universidad de Antioquia, Bogotá, 2007.
- [8] COMISIÓN FEDERALEAL DE ELECTRICIDAD, «REDES DE TIERRA PARA ESTRUCTURAS DE LINEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS DE 69 A 400 KV,» CFE, MÉXICO, AGOSTO 1999.
- [9] M. S. Ruiz de Abarca, «SOLUCIONES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES DE TORRES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA DE ALTA TENSIÓN,» UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, El Salvador, 2018.
- [10] R. García Márquez, PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS, Barcelona: Alfaomega - Marcombo, 1999.
- [11] J. S. Ramirez Castaño y E. A. Cano Plata, «SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2010.
- [12] W. H. Miño Marcillo y L. O. Freire Martinez, «ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN EL ALIMENTADOR 01CV13B1S1-ORIENTAL DE LA SUBESTACIÓN 01CV EL CALVARIO DE ELEPCO S.A.,» Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, 2011.
- [13] F. Casas Ospina, Tierras Soporte de la Seguridad Eléctrica, Bogotá: ICONTEC, 2005.
- [14] IEEE Std 80, «IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,» Revision of IEEE Std 80-2000, New York, 2013.
- [15] W. Villa Acevedo, J. Rodríguez Serna y J. Saldarriaga Loaiza, «Estimación de Parámetros del Suelo de dos Capas usando el Algoritmo de Optimización de Mapeo Media-Varianza,» *Scielo*, vol. 30, n° 1, p. 12, 2019.
- [16] Normas EPM RA6-014, «Medida de resistividad eléctrica del suelo,» EPM, Colombia, 2006.
- [17] R. P. Chuquirima Flores y I. G. Quimbita Borja, «DIAGNOSTICO Y MEJORAMIENTO DE PUESTA A TIERRA EN LOS PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA AMBATO S.A. EN LA ZONA DE CONCESIÓN DE LA PROVINCIA DE TUNGURAHUA PARA QUE OPERE EL SISTEMA ELÉCTRICO CON BUENA CALIDA,» Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2015.
- [18] R. I. Caycedo Rodriguez, «EVALUACIÓN Y MEJORA DEL PROCESO DE DISEÑO ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LAS ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN INTERVENIDAS POR CODENSA,» Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2018.
- [19] CELEC EP, «Instructivo para el diseño de puesta a tierra en subestaciones,» CELEC, Quito, 2018.

- [20] J. L. Altamirano Pérez, «Diseño del nuevo laboratorio de prueba para transformadores de potencia y de una alimentación independiente para el laboratorio de distribución existente de la empresa ECUATRAN S.A.,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [21] W. E. Pérez Loarca, C. J. Serrano Barrios y O. O. Surgio Guevara, «Manual de aplicación de la norma IEEE Std 81 para líneas y subestaciones eléctricas de transmisión,» Universidad de el Salvador, San Salvador, 2015.
- [22] M. Vignolo y F. Berrutti, «Mallas de Tierra en Alta Tensión,» Universidad de la República, Montevideo, 2011.
- [23] S. J. P. Hidalgo, «Software para el análisis y diseño de sistemas optimizados de puestas a tierra para líneas de transmisión de 500 KV, aplicado al proyecto COCA - INGA,» Escuela Politecnica Nacional, Quito, 2012.
- [24] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD , «RED DE PUESTA A TIERRA PARA ESTRUCTURA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS DE 9 KV A 400 KV EN CONSTRUCCIÓN,» CFE, MÉXICO, 2019.

## 16. ANEXOS

### Anexo I: Glosario de términos o abreviaturas

<b>A</b> = Área de la malla de tierra (m <sup>2</sup> ).
<b>a</b> = Distancia entre varillas (m).
<b>b</b> = Profundidad a la que se enterró el electrodo (m).
<b>C<sub>s</sub></b> = Factor de reducción superficial.
<b>d</b> = Diámetro del conductor (m <sup>2</sup> ).
<b>D</b> = Separación entre conductores (m).
<b>D<sub>c</sub></b> = Factor de decremento.
<b>dc</b> = Diámetro del conductor.
<b>h</b> = Profundidad de la malla (m).
<b>h<sub>s</sub></b> = Grosor de la capa superficial (m).
<b>ID</b> = Corriente de diseño (A).
<b>I<sub>cc</sub></b> = Corriente máxima de falla a tierra (A).
<b>I<sub>g</sub></b> = Corriente de la malla (A).
<b>I<sub>G</sub></b> = Corriente de falla máxima de la malla (A).
<b>I<sub>f</sub></b> = Corriente de falla de la malla (A), igual a la I <sub>cc</sub> .
<b>I<sub>o</sub></b> = Corriente simétrica de falla (A).
<b>K<sub>f</sub></b> = Constante de los materiales.
<b>L<sub>c</sub></b> = Longitud Interna del conductor.
<b>L<sub>v</sub></b> = Longitud de la varilla.
<b>L<sub>T</sub></b> = Longitud total del conductor (m).
<b>M</b> = Número de conductores de longitud L <sub>y</sub> .
<b>n</b> = Es el número de mediciones realizadas.
<b>N</b> = Número de conductores de longitud L <sub>x</sub> .
<b>n</b> = Número de conductores transversales o longitudinales.
<b>N<sub>v</sub></b> = Numero de varillas.
<b>ρ</b> = Resistividad del terreno (Ohmios-m).
<b>ρ<sub>a</sub></b> = Resistividad aparente.
<b>ρ<sub>c</sub></b> = Resistividad del concreto (Ohmios-m).
<b>ρ<sub>a(n1)</sub></b> = Es la resistividad aparente nueva calculada 1.
<b>ρ<sub>a(n2)</sub></b> = Es la resistividad aparente nueva calculada 2.
<b>ρ<sub>1</sub></b> = Resistividad aparente más reducida.
<b>ρ<sub>2</sub></b> = Resistividad aparente más elevada.
<b>R</b> = Resistencia medida del suelo (Ω).
<b>R<sub>g</sub></b> = Resistencia de la malla (Ohmios).
<b>S<sub>c</sub></b> = Sección del conductor (mm <sup>2</sup> ).
<b>S<sub>f</sub></b> = Factor de división de la corriente de falla.
<b>t</b> = Tiempo de duración de la falla (s).
<b>T</b> = Tiempo de duración de la falla (s).
<b>T<sub>a</sub></b> = Temperatura ambiente del suelo (40°C).
<b>T<sub>m</sub></b> = Temperatura máxima en las uniones de la malla.
$\frac{a}{h}$ = Espaciamiento de prueba correspondiente a la gráfica de Sunde.
<b>L</b> = Largo de la varilla bajo tierra (m).



<b>RMG</b> = Radio medio entre varillas.
<b>S</b> = Distancia entre varillas (m).
<b>r</b> = Radio de los electrodos (m).
<b>h</b> = Profundidad de enterramiento.
<b>r<sub>c</sub></b> = Radio del conductor (m).
<b>l<sub>1</sub></b> = Longitud total de los conductores que forman la malla (m).
<b>l<sub>2</sub></b> = Longitud de una varilla (m).
<b>K<sub>1</sub>; K<sub>2</sub></b> = Constantes que dependen de la geometría de la malla.

## Anexo II. Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (Alimentadores)

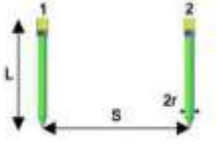
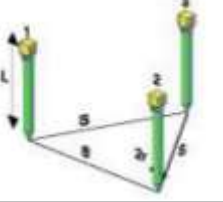
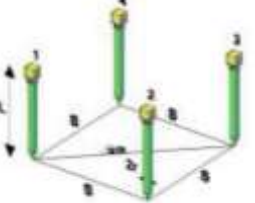
**Tabla 43:** Impedancias equivalentes de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución.

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

Fuente: [14].

## Anexo III. Configuración del radio medio entre varillas

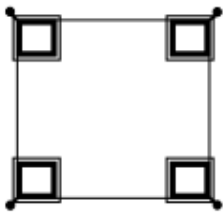
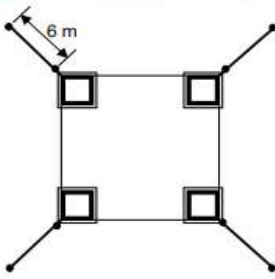
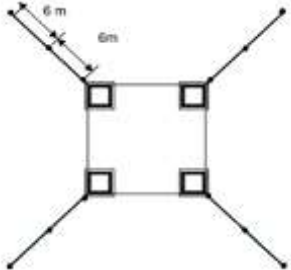
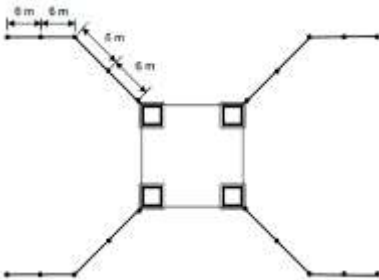
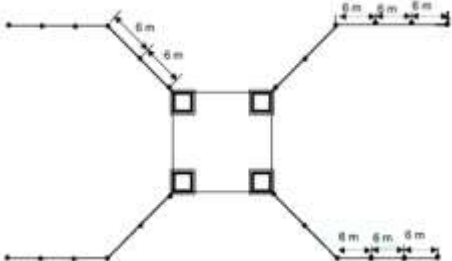
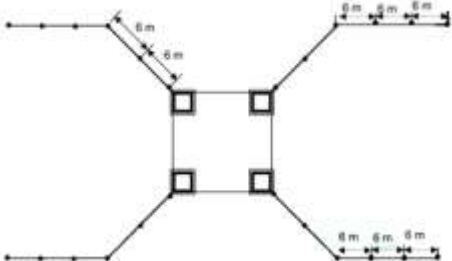
**Tabla 44.** Configuración de las varillas para el RMG.

Electrodos	Forma del electrodos	Fórmula
2 varillas verticales		$RMG = \sqrt{r * S}$
3 varillas verticales		$RMG = \sqrt[3]{r * S^2}$
4 varillas verticales		$RMG = \sqrt[4]{\sqrt{2} * r * S^3}$

Fuente: [5].

**Anexo IV:** Electrodo verticales y Contra – antenas recomendadas para el diseño de un sistema de puesta a tierra en L/T según el límite de resistividad del suelo

**Tabla 45.** Electrodo verticales y Contra – antenas para el diseño de un SPT en L/T según el límite de resistividad.

Intervalo de resistividad recomendada de diseño $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Longitud de contra-antenas y numero de sus electrodos por pata		
	Longitud de contra-antena por pata (m)	No. De electrodos verticales p/contra-antena (varillas)	Figura
Menor que 100	3	1	
100 a 300	6	2	
300 a 500	12	3	
500 a 750	24	5	
750 a 1000	30	6	
Mayor que 1000	30	6	

Fuente: [24].

## Anexo V. Diagramas de flujos

### Anexo V.1. Flujograma del SPT en subestaciones empleando por el instructivo de CELEC

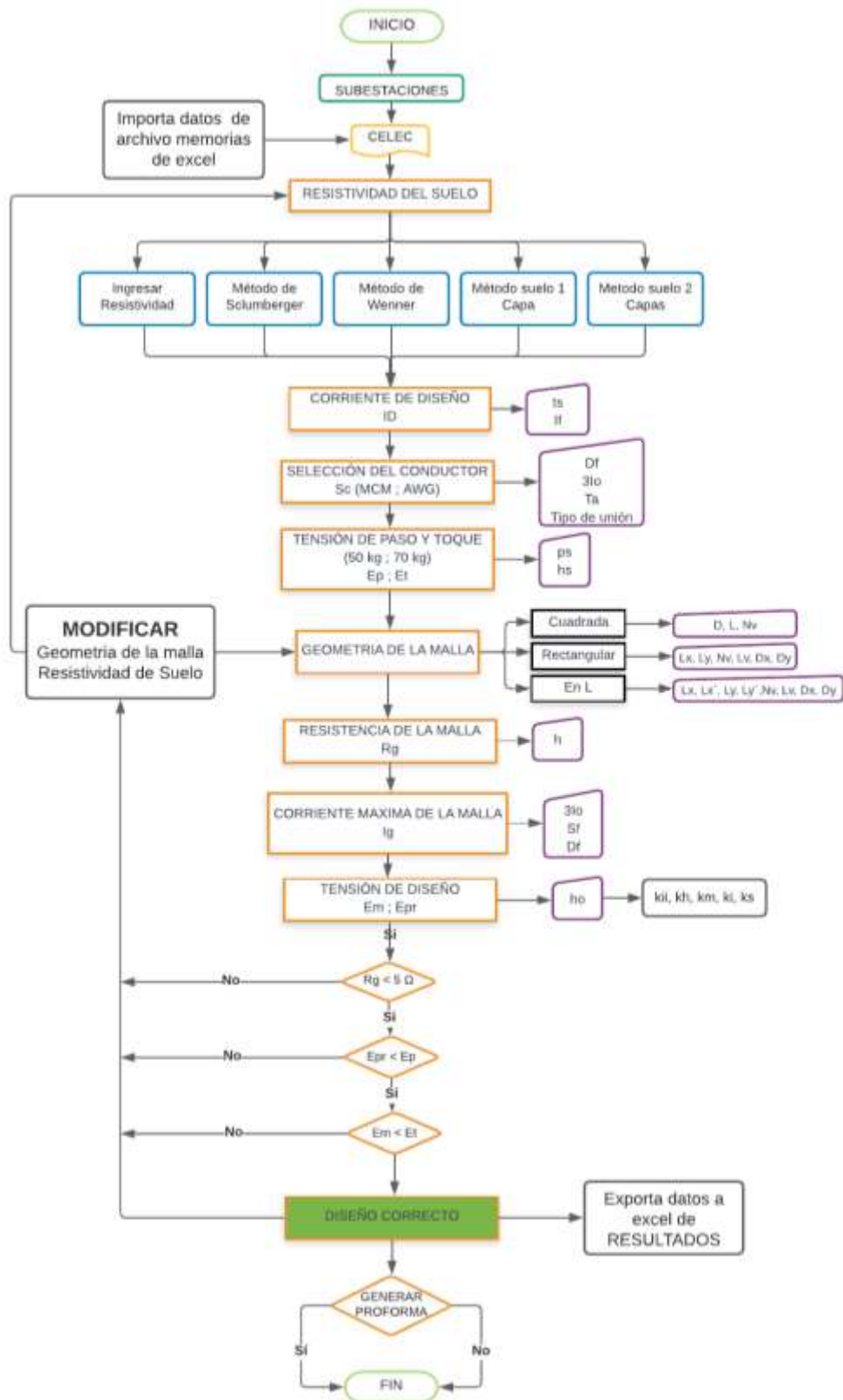


Figura 25. Flujograma del SPT en subestaciones empleando por el instructivo de CELEC.

Fuente: Autores.

Anexo V.2. Flujograma del SPT en subestaciones mediante la norma IEEE Std-80

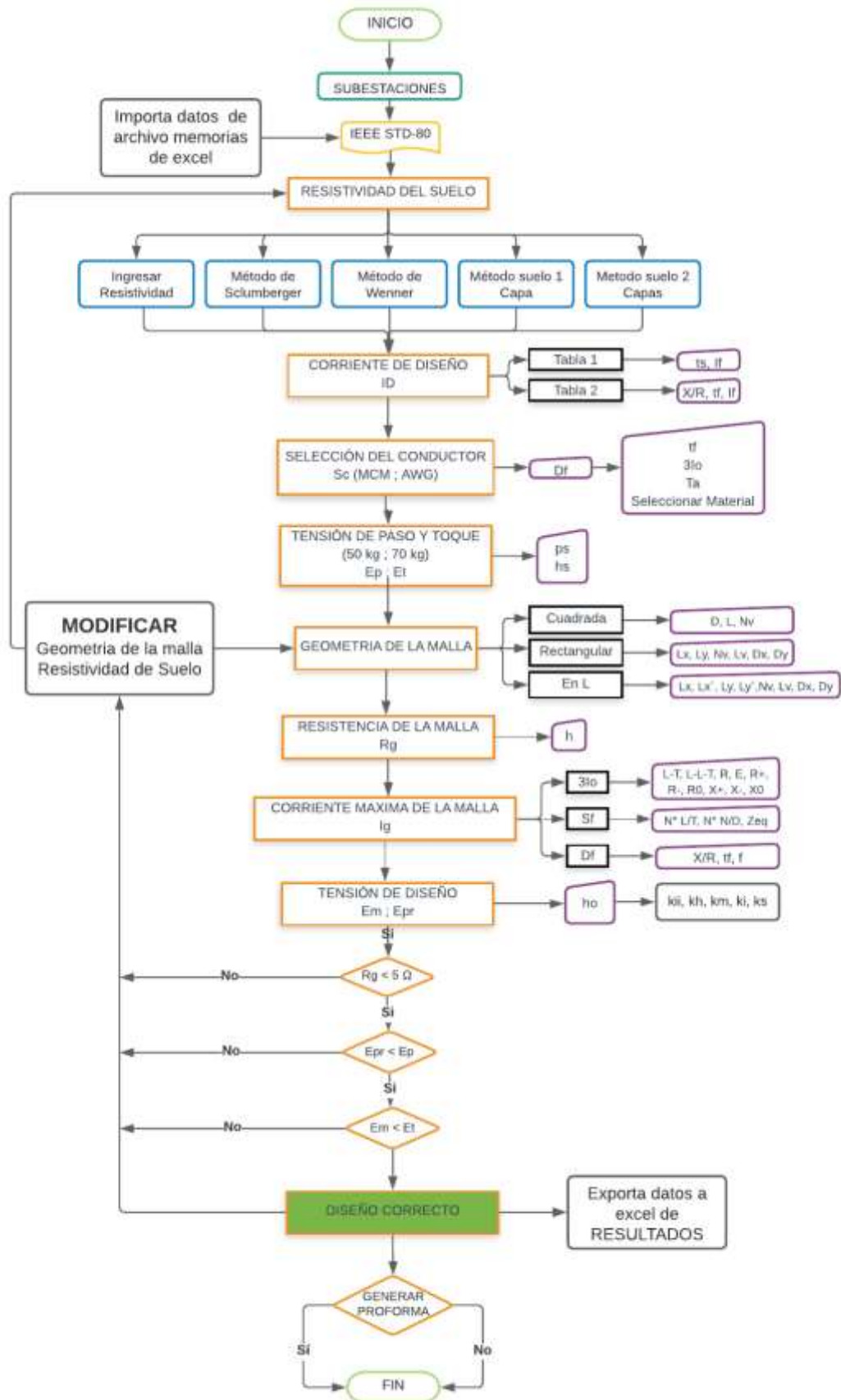


Figura 26. Flujograma del SPT en subestaciones mediante la norma IEEE Std-80. Fuente: Autores.

Anexo V.3. Flujograma del SPT en líneas transmisión empleando por el instructivo de CELEC

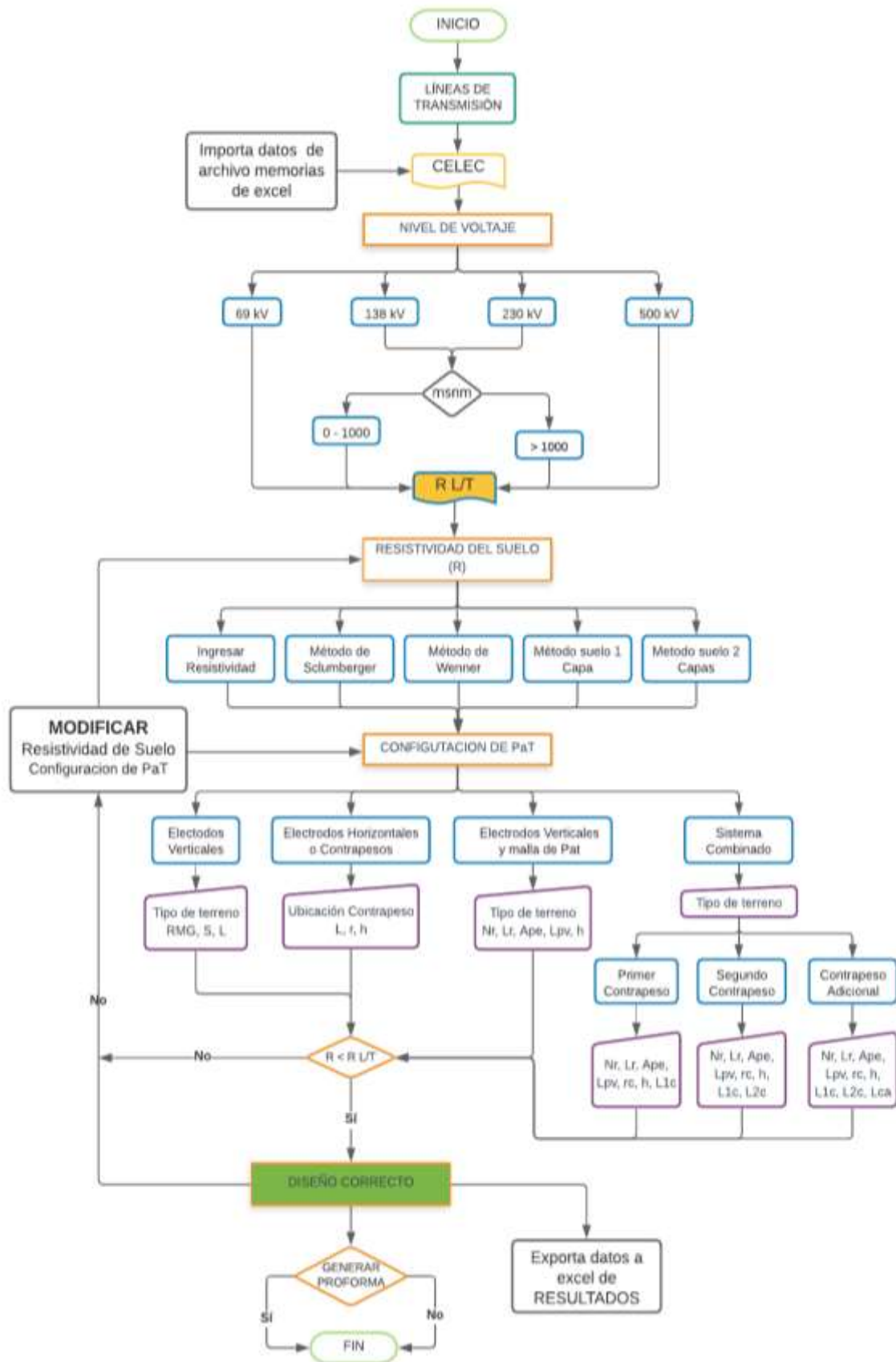
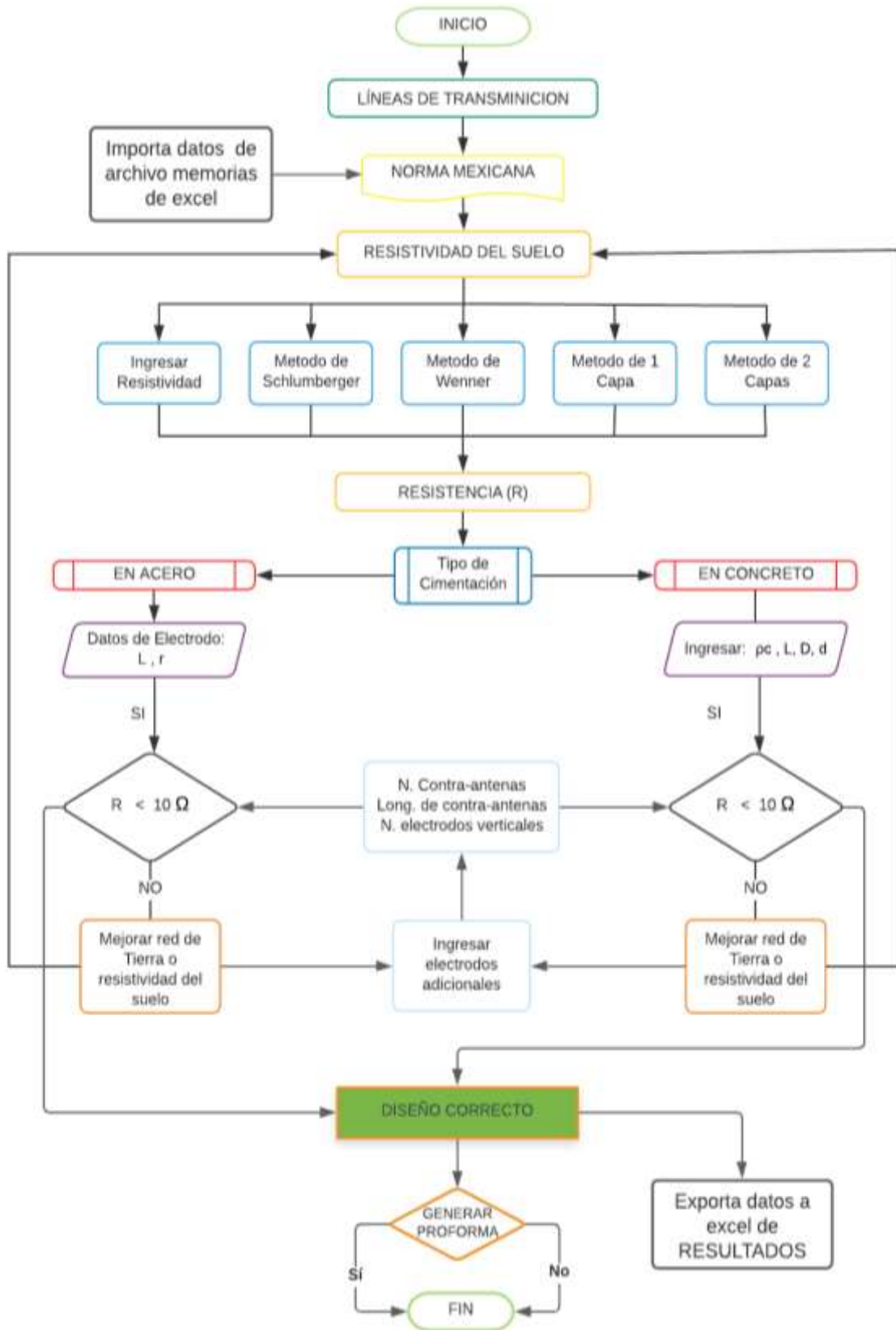


Figura 27. Flujograma del SPT en líneas transmisión empleando por el instructivo de CELEC.

Fuente: Autores.

**Anexo V.4.** Flujograma del SPT en líneas de transmisión mediante la norma mexicana



**Figura 28.** Flujograma del SPT en líneas de transmisión mediante la norma mexicana.

**Fuente:** Autores.

### Anexo VI. Validación de la herramienta informática para la resistividad del suelo por el método de 2 capas

La resistividad del suelo por el método de 2 capas, se validará comparando con el ejercicio propuesto en el documento de SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF, con 15 datos medidos en un terreno donde se diseñará una subestación. En el Anexo IX.1. se podrá observar el procedimiento para obtener el valor de la resistividad.

**Tabla 46.** Validación del ejercicio (Documento IEEE Std-80 vs Programa suelo de 2 capas).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA Suelo 2 capas	% DE VARIACIÓN
N° de mediciones	15	15	0
$\rho_1(\Omega\text{-m})$	439,82	439,82	0
$\rho_2(\Omega\text{-m})$	100,63	100,53	0,099
$\rho_{aprom}(\Omega\text{-m})$	210	211,46	0,690
Gráfica para hallar "a"			
a (m)	8,3	8,3	0
$\frac{\rho_2}{\rho_1}(\Omega\text{-m})$	0,23	0,23	0
$\frac{\rho_{aprom}}{\rho_1}(\Omega\text{-m})$	0,5	0,48	4,167
a/h	1,8	1,8	0
H (m)	4,61	4,61	0
$\rho_a$	145,6	147,2211	1,101
Gráfica disposición de la malla			

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 46 se puede hacer la comparación entre la curva (a vs R) dada por el documento y la desarrollada por el programa, se puede verificar que las gráficas son similares y la variación de los resultados son mínimos, observando que la disposición de la malla es la misma.

### Anexo VII. Validación de la herramienta informática para SPT en subestaciones

La validación se la obtuvo mediante los ejercicios propuestos en el instructivo de CELEC, la norma IEEE Std-80 y el documento SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA: Diseñado con IEEE – 80 y evaluado con el MEF. En el anexo IX se puede observar el procedimiento de resolución de los ejercicios realizados.

### Anexo VII.1. Comparación de resultados

**CASO 1:** Se tomará como referencia el ejercicio planteado en el instructivo de puesta a tierra de CELEC, para una malla cuadrada de 12 m x 12 m sin varillas con una separación entre conductores de 1 m, el conductor que se utilizará es el cobre desnudo rígido de 350 MCM.

**Tabla 47.** Validación del ejercicio (Instructivo CELEC vs Programa CELEC).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA CELEC		% DE VARIACIÓN
A (m <sup>2</sup> )	144	144		0,000
$\rho$ ( $\Omega$ -m)	123,08	123,0876		0,006
L <sub>T</sub> (m)	312	312		0,000
I <sub>D</sub> (kA)	37	37		0,000
Conductor	Cobre desnudo rígido	Cobre desnudo rígido		-
S <sub>c norm.</sub>	350 MCM	350 MCM		-
S <sub>c</sub> (mm <sup>2</sup> )	152,05	152,0545	177,348	0,003
d (mm)	13,91	13,9141	15,03	0,029
E <sub>p</sub> (V)	3019,63	3029,1741		0,315
E <sub>t</sub> (V)	921,4	923,8172		0,262
R <sub>g</sub> ( $\Omega$ )	4,3	4,359		1,354
I <sub>G</sub> (A)	1564,2	1564,2		0,000
GPR (V)	-	6818,3478		-
k <sub>ji</sub>	0,57	0,6057		5,894
k <sub>n</sub>	1,41	1,4142		0,297
k <sub>m</sub>	0,52	0,5021		3,565
k <sub>i</sub>	2,27	2,568		11,604
k <sub>s</sub>	0,63	0,6364		1,006
E <sub>m</sub> (V)	727,9	795,6687		8,517
E <sub>pr</sub> (V)	1188,92	1344,8066		11,59

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 47 se puede observar que los parámetros  $K_{ji}$ ,  $K_m$ ,  $K_s$ ,  $E_m$  y  $E_{PR}$ , establecidos en el instructivo de CELEC presentan un error de aplicación de datos en las distintas fórmulas respectivamente, la variación máxima se presenta en el factor  $K_i$  con un 11,604%.

**CASO 2:** Dado la gran variación que se presenta en el caso 1, se validará nuevamente aplicando el programa procedimiento CELEC, en este caso se tomará como referencia el ejercicio planteado en la norma IEEE Std-80 del año 2013, que considera una malla cuadrada de 70 m x 70 m, ingresando 20 varillas copperweld de 7.5 m, utilizando una separación entre conductores de 7 m, considerando que el conductor es el cobre desnudo rígido de 2/0 AWG.

**Tabla 48.** Validación del ejercicio (Norma IEEE Std-80 vs Programa CELEC).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA CELEC		% DE VARIACIÓN
A (m <sup>2</sup> )	4900	4900		0,000
$\rho$ ( $\Omega$ -m)	400	400		0,000
L <sub>T</sub> (m)	1690	1690		0,000
I <sub>D</sub> (kA)	37	37		0,000
Conductor	Cobre desnudo rígido	Cobre desnudo rígido		-



$S_{c \text{ norm.}}$	2/0 AWG	2/0 AWG		-
$S_c$ (mm <sup>2</sup> )	30,24	31,1502	67,44	2,922
$d$ (mm)	6,2	6,2978	9,27	1,553
$E_p$ (V)	2686,6	2696,0971		0,352
$E_t$ (V)	838,2	840,5479		0,271
$R_g$ ( $\Omega$ )	2,75	2,7526		0,094
$I_G$ (A)	1908	1908		0,000
$GPR$ (V)	5247	5251,9608		0,094
$k_{ji}$	1	1		0,000
$k_h$	1,225	1,2247		0,024
$k_m$	0,77	0,7837		1,748
$k_i$	2,272	2,272		0,000
$k_s$	0,406	0,4061		0,025
$E_m$ (V)	747,4	760,7691		1,757
$E_{pr}$ (V)	548,9	549,1108		0,038

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 48 se puede observar que el ejercicio establecido por la norma IEEE Std-80 al momento de calcularse con la herramienta informática posee una variación máxima del 1,75%. Razón por la cual se considera que estas variaciones están dentro de un límite razonable y con esto se puede corroborar que el programa está funcionando de manera correcta.

**CASO 3:** Se validará con el procedimiento IEEE Std-80 establecido en el programa, en este caso se tomará como referencia el ejercicio planteado en la norma IEEE Std-80 del año 2013, considerando una malla cuadrada de 70 m x 70 m, ingresando 20 varillas copperweld de 7.5 m, con una separación entre conductores 7m, considerando que el conductor que se utilizará es alambre de acero revestido de cobre de 2/0 AWG.

**Tabla 49.** Validación del ejercicio (Norma IEEE Std-80 vs Programa IEEE Std-80).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA IEEE STD-80		% DE VARIACIÓN
$A$ (m <sup>2</sup> )	4900	4900		0,000
$\rho$ ( $\Omega$ -m)	400	400		0,000
$L_T$ (m)	1690	1690		0,000
$I_D$ (kA)	37,96	37,962		0,005
<b>Conductor</b>	Alambre de acero revestido de cobre	Alambre de acero revestido de cobre		-
$S_{c \text{ norm.}}$	2/0 AWG	2/0 AWG		-
$A_{kcmil}$ (kcmils)	59,81	58,5221	-	2,201
$d$ (mm)	6,2	6,143	9,27	0,928
$E_p$ (V)	2686,6	2696,0971		0,352
$E_t$ (V)	838,2	840,5479		0,279
$R_g$ ( $\Omega$ )	2,75	2,7526		0,094
$I_G$ (A)	1908	1908,1074		0,006
$GPR$ (V)	5247	5252,2564		0,100
$k_{ji}$	1	1		0,000
$k_h$	1,225	1,2247		0,024
$k_m$	0,77	0,7837		1,748
$k_i$	2,272	2,272		0,000
$k_s$	0,406	0,4061		0,025

$E_m$ (V)	747,4	760,8119	1,763
$E_{pr}$ (V)	548,9	549,1417	0,044

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 49 se puede observar que los resultados obtenidos poseen una variación máxima del 2,201%; razón por la cual se considera que estas variaciones están dentro de un límite aceptable y con esto se puede corroborar que el programa está funcionando correctamente.

**CASO 4:** Esta última validación se realizará comparando el programa procedimiento IEEE Std-80 con el ejercicio planteado en el documento de sistemas de puesta a tierra evaluado por el MEF, para una geometría de malla tipo L, las medidas son:  $L_x = 84\text{m}$ ,  $L_y = 98\text{m}$ ,  $L_x' = 42\text{m}$ ,  $L_y' = 42\text{m}$ , con 32 varillas copperweld de 10 m para el mallado, con una separación entre conductores  $D_x = D_y = 7\text{ m}$ , el conductor que se utilizará es de cobre comercial duro 1 de 2/0 AWG. Además, se considera un voltaje del sistema de 115 kV, para una falla línea-tierra con una resistencia despreciable.

**Tabla 50.** Validación del ejercicio (Documento IEEE Std-80 vs Programa IEEE Std-80).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA IEEE STD-80		% DE VARIACIÓN
A (m <sup>2</sup> )	5880	5880		0,000
$\rho$ ( $\Omega\text{-m}$ )	377	377		0,000
$L_T$ (m)	2182	2182		0,000
$I_D$ (kA)	37	37		0,000
Conductor	Cobre, comercial duro 1	Cobre, comercial duro 1		-
$S_c$ norm.	2/0	2/0		-
$A_{kcmil}$ (kcmils)	56	56,1698	-	0,302
d (mm)	6,0091	6,018	9,27	0,148
$E_p$ (V)	1640,5	1643,6013		0,189
$E_t$ (V)	533,2	533,9369		0,138
$R_g$ ( $\Omega$ )	2,34	2,3403		0,013
$I_G$ (A)	1679,08	1678,5670		0,004
GPR (V)	3929,047	3928,3504		0,009
$k_{ji}$	1	1		0,000
$k_h$	1,225	1,2247		0,024
$k_m$	0,747	0,7591		1,594
$k_i$	2,595	2,5957		0,019
$k_s$	0,406	0,4062		0,049
$E_m$ (V)	513,8	522,1397		1,609
$E_{pr}$ (V)	399,7	399,8997		0,068

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 50 se puede observar que los resultados obtenidos poseen una variación máxima del 1,609 % en la tensión de la malla, razón por la cual se considera que este porcentaje de variaciones está en los límites tolerables, corroborando que el programa está funcionando correctamente.

**Anexo VII.2.** Comparación con los resultados obtenidos en la subestación A desarrollado en el programa de ETAP

En la siguiente tabla se muestra los resultados del estudio de una malla rectangular de puesta a tierra, datos obtenidos por el diseñador de la subestación A, el cálculo se realizó en el programa de ETAP Versión 16.0.0.

**Tabla 51.** Datos obtenidos en el ETAP.

<b>RESUMEN DEL ESTUDIO DE MALLA DE PUESTA A TIERRA - METODO IEEE 80-2013</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>R<sub>g</sub> (ohmios)</b>	<b>GPR (v)</b>	<b>Tolerable</b>
Resistencia del Sistema de Tierra	0,853		
Elevación de potencial de tierra		679,2	
Voltaje de Paso			492,1
Voltaje de toque			1476,1

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se realizará una comparación entre los resultados obtenidos el programa de ETAP con el procedimiento de CELEC y IEEE Std-80, para determinar la variación que existe en cada caso.

**Tabla 52.** Validación ETAP con (CELEC vs IEEE Std-80).

<b>Parámetros</b>	<b>ETAP</b>	<b>PROGRAMA CELEC</b>	<b>PROGRAMA IEEE STD-80</b>	<b>% VARIACIÓN ETAP-CELEC</b>	<b>% VARIACIÓN ETAP-IEEE</b>
<b>R<sub>g</sub> (Ω)</b>	0,853	0,8426	0,8426	1,234	1,234
<b>GPR (V)</b>	679,2	668,1818	668,1818	1,649	1,649
<b>E<sub>p</sub> (V)</b>	492,1	492,1047	492,1047	0,001	0,001
<b>E<sub>t</sub> (V)</b>	1476,1	1476,27249	1476,27249	0,012	0,012

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 52 se puede apreciar que el resultado los voltajes tolerables de toque y paso son los mismos con un porcentaje mínimo de variación. Además los resultados de la elevación de potencial de tierra GPR, varían un 1,649%, en cuanto la resistencia de la malla  $R_g$  es la misma para los tres programas, por lo cual se puede validar que el programa está funcionando correctamente.

**Anexo VIII.** Validación de la herramienta informática para SPT en líneas de transmisión

La validación se obtuvo mediante el diseño de las siguientes líneas de transmisión: línea 1 a 69kV, línea 2 a 69 KV, línea 3 de 138 Kv y ejemplos planteados en la norma mexicana. Además, en el anexo X se puede observar el procedimiento de resolución de los ejercicios analizados.

**Anexo VIII.1.** Comparación del programa L/T CELEC con las líneas de 69 kV y 138 kV

1. En la comparación del programa se utilizará la configuración de electrodos verticales.

**Tabla 53.** Validación (Programa L/T CELEC vs línea 1 y 2 de 69 kV).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA L/T CELEC	% DE VARIACIÓN
<b>Caso 1: 2 varillas</b>			
R ( $\Omega$ )	17,3	17,22	0,465
<b>Caso 2: 3 varillas</b>			
R ( $\Omega$ )	-	10,05	-
<b>Caso 3: 4 varillas</b>			
R ( $\Omega$ )	4,27	4,27	0,000

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 53 se validará la herramienta informática con los datos de la línea 2 de 69 kV para el caso 1 y 2 los resultados tienen un pequeño margen de variación. En el caso 3 la línea 1 de 69 kV no muestra un porcentaje de variación.

2. Para esta comparación se utilizará la configuración de electrodos horizontales o contrapesos.

**Tabla 54.** Validación (Programa L/T CELEC vs línea 1 de 69 kV).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA L/T CELEC	% DE VARIACIÓN
<b>Caso 1</b>			
R ( $\Omega$ )	2,29	2,297	0,305
<b>Caso 2</b>			
R ( $\Omega$ )	1,27	1,267	0,237
<b>Caso 3</b>			
R ( $\Omega$ )	0,69	0,693	0,433
<b>Caso 4</b>			
R ( $\Omega$ )	0,31	0,308	0,649

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 54 se aplicará 4 casos de estudio para validar la herramienta informática con los datos de la línea 1 de 69 kV, se puede observar que el margen de variación es mínimo.

3. En esta comparación se utilizará la configuración de electrodos verticales y malla de puesta a tierra.

**Tabla 55.** Validación (Programa L/T CELEC vs línea 3 de 138 kV).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA L/T CELEC	% VARIACIÓN DV-PC
R ( $\Omega$ )	6,8204	6,82	0,006

Fuente: Elaboración propia.

4. En este último caso se utilizará la configuración de SPT para un sistema combinado.

**Tabla 56.** Validación (Programa L/T CELEC vs línea 3 de 138 kV con contrapesos).

Parámetros	DOCUMENTO	PROGRAMA L/T CELEC	% DE VARIACIÓN
<b>Caso 1: Primer Contrapeso</b>			
R ( $\Omega$ )	2,194	2,193	0,046
<b>Caso 2: Segundo Contrapeso</b>			
R ( $\Omega$ )	0,0141	0,0141	0,000
<b>Caso 3: Tercer Contrapeso</b>			
R ( $\Omega$ )	4,416	4,416	0,001

Fuente: Elaboración propia.

En la validación de la puesta a tierra con el sistema combinado y electrodos verticales con malla se ocupará los datos empleados para una la línea de 138kV de Loreto – Oso, los márgenes de variación son mínimos como se puede observar en las tablas 55 y 56.

#### **Anexo VIII.2.** Validación de los ejercicios de L/T de la norma mexicana

1. La comprobación de este caso se lo realiza con distintas resistividades que se mostraran a continuación, con una cimentación de acero, considerando 3 metros de longitud para el modelo del electrodo con un radio de 0,10 m.

**Tabla 57.** Validación de cimentación acerada.

<b>CIMENTACIÓN EN ACERO</b>			
<b>Resistividad (<math>\Omega m</math>)</b>	<b>Resistencia x Pata R (<math>\Omega</math>)</b>		<b>% de Variación</b>
	<b>Norma</b>	<b>Programa</b>	
100	5	5,0233	0,464
300	15	15,07	0,464
500	25	25,1166	0,464
750	37,5	37,6749	0,464
1000	50	50,2332	0,464

**Fuente:** Elaboración propia.

2. Para el caso de cimentación en concreto se considera que la longitud del electrodo es de 3 m, el diámetro del conductor es de 0.2 m, el diámetro del concreto que envuelve la estructura de la pata es de 0.7 m y la resistividad de dicho concreto es de 100  $\Omega m$ .

**Tabla 58.** Validación de cimentación en concreto.

<b>CIMENTACIÓN EN CONCRETO</b>			
<b>Resistividad (<math>\Omega m</math>)</b>	<b>Resistencia x Pata R (<math>\Omega</math>)</b>		<b>% de Variación</b>
	<b>Norma</b>	<b>Programa</b>	
100	5	5,0233	0,464
300	12	11,7469	2,155
500	19	18,4705	2,867
750	26,8	26,8749	0,279
1000	35	35,2794	0,792

**Fuente:** Elaboración propia.

En las tablas 57 y 58 se puede visualizar que los resultados de resistencia del SPT presentan un mínimo margen de variación y no cumplen con lo establecido, por lo que se debe aplicar electrodos adicionales, para la cimentación de acero y concreto.

Aplicando los electrodos adicionales se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 59.** Validación de cimentación en concreto con electrodos adicionales.

<b>CIMENTACIÓN EN CONCRETO CON ELECTRODOS ADICIONALES</b>			
<b>Resistividad (<math>\Omega m</math>)</b>	<b>Resistencia x Pata R (<math>\Omega</math>)</b>		<b>% de Variación</b>
	<b>Norma</b>	<b>Programa</b>	
100 $\Omega m$	No requiere electrodos adicionales		-

300 $\Omega m$	8,33	8,33	0,000
500 $\Omega m$	8,33	8,33	0,000
750 $\Omega m$	6,94	6,94	0,000
1000 $\Omega m$	7,58	7,58	0,000

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla 59 se puede visualizar que los resultados obtenidos por el programa, donde se constata que los resultados son los mismos a comparación de la norma mexicana y cumple con el nivel de resistencia apropiado para el sistema de puesta a tierra en la línea de transmisión.

**Anexo IX.** Resolución de los ejercicios para subestaciones

### **PRIMER CASO: Procedimiento CELEC – ejercicio instructivo CELEC**

#### **Resistividad del suelo (Método de Wenner)**

Distancia entre electrodos:  $a = 3 \text{ m}$  Resistencia medida:  $R = 6.53 \Omega$

Profundidad de los electrodos:  $b = 0$

$$a < 20b \quad \rightarrow \quad \rho = 2\pi a R = 2\pi * 3 * 6.53 = 123.0876 \Omega m$$

#### **Corriente de diseño $I_D$**

Tiempo de falla:  $T_s = T_f = 0.5 \text{ seg}$  Corriente de falla:  $I_F = 37 \text{ KA}$

$$I_D = I_F * D_f = 37 * 1 = 37 \text{ KA}$$

#### **Sección del conductor $S_C$**

Factor de decremento:  $D_F = 1$  Temperatura ambiente:  $T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

Corriente Simétrica de falla trifásica:  $3I_O = 36723 \text{ A}$

Tipo de unión: EMPERNADA  $\rightarrow T_m = 250 \text{ }^\circ\text{C}$

$$I_{cc \text{ max}} = 3I_O * D_F = 36723 * 1 = 36723 \text{ A}$$

$$S_C = \frac{I_{cc \text{ max}}}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33 * T_f}}} * 0.0005067 = \frac{36723}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{250 - 40}{234 + 40} + 1\right)}{33 * 0.5}}} * 0.0005067 = 152.0544 \text{ mm}^2$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4 * S_C}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 152.0544}{\pi}} = 13.9140$$

Entonces selección de calibre del conductor:  $S_C = 350 \text{ MCM}$

#### **Tensión de toque y paso**

Peso = 70 kg

Espesor de la capa superficial:  $h_s = 0.1 \text{ m}$

Resistividad de la capa superficial:  $\rho_s = 3000 \Omega m$

Factor de disminución de la capa superficial:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{123.0876}{3000}\right)}{2 * 0.1 + 0.09} = 0.7024$$

Tensión tolerable de paso:  $E_{S\ 70\text{kg}} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$

$$E_{S\ 70\text{kg}} = (1000 + 6 * 0.7024 * 3000) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 3029.2205\ \text{V}$$

Tensión tolerable de toque:  $E_{T\ 70\text{kg}} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$

$$E_{T\ 70\text{kg}} = (1000 + 1.5 * 0.7024 * 3000) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 923.8287\ \text{V}$$

### Geometría de la malla

Tipo = CUADRADA

Numero de varillas:  $N_V = 0$

Separación entre conductores:  $D = 1\ \text{m}$

Longitud de varillas:  $L_V = 0\ \text{m}$

Tamaño de la malla:  $L = L_x = L_y = 12\ \text{m}$

Área:  $A = L * L = 12 * 12 = 144\ \text{m}^2$

Perímetro:  $L_p = 4 * L = 4 * 12 = 48\ \text{m}$

Distancia máxima entre dos puntos:  $D_m = \sqrt{2 * L^2} = \sqrt{2 * 12^2} = 16.97\ \text{m}$

N. conductores en el eje X:  $N = 1 + \frac{L_x}{D} = 1 + \frac{12}{1} = 13$

N. conductores en el eje Y:  $M = 1 + \frac{L_y}{D} = 1 + \frac{12}{1} = 13$

Longitud de varillas:  $L_R = N_V * L_V = 0 * 0 = 0\ \text{m}$

Longitud interna del conductor:  $L_C = (N * L_x) + (N * L_y)$

$$L_C = (13 * 12) + (13 * 12) = 312\ \text{m}$$

Longitud total de conductores:  $L_T = L_C + L_R = 312 + 0 = 312\ \text{m}$

### Resistencia de la malla

Profundidad de la malla:  $h = 1\ \text{m}$

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \left( \sqrt{\frac{20}{A}} \right)} \right) \right] = 123.0876 \left[ \frac{1}{312} + \frac{1}{\sqrt{20 * 144}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + 1 * \left( \sqrt{\frac{20}{144}} \right)} \right) \right] = 4.3590\ \Omega\text{m}$$

### Corriente de la malla $I_g$

Corriente Simétrica de falla trifásica:  $3I_0 = 2607 \text{ A}$

Factor de división de corriente:  $S_F = 0.6$

Factor de decremento:  $D_F = 1$

Factor de crecimiento:  $C_P = 1$

$$I_G = 3I_0 * S_F * D_F * C_P = 2607 * 0.6 * 1 * 1 = 1564.2 \text{ A}$$

Elevación de Potencial de tierra:  $GPR = I_G * R_g = 1564.2 * 4.3590 = 6818.3478 \text{ V}$

### Tensiones de diseño

Malla: *SIN VARILLAS EN LAS ESQUINAS*

Profundidad de referencia:  $h_o = 1 \text{ m}$

Factor geométrico n, número de conductores paralelos de una malla:

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} = \frac{2 * 312}{48} = 13$$

Malla cuadrada por tanto:  $n_b = n_c = n_d = 1$

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d = 13 * 1 * 1 * 1 = 13$$

Factor de corrección:  $K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} = \frac{1}{(2*13)^{2/13}} = 0.6057$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = 1.4142$$

Valor geométrico:  $K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{1^2}{16*1*0.01503} + \frac{(1+2*1)^2}{8*1*0.01503} - \frac{1}{4*0.01503} \right) + \frac{0.6058}{1.4142} * \ln \left( \frac{8}{\pi(2*13-1)} \right) \right] = 0.5021$$

Factor de irregularidad:  $K_i = 0.644 + 0.148 * n = 0.644 + 0.148 * 13 = 2.568$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * 1} + \frac{1}{1 + 1} + \frac{1}{1} * (1 - 1^{13-2}) \right] = 0.6364$$

Longitud efectiva  $L_M$ : Sin varillas en las esquinas

$$L_M = L_C + L_R = 312 + 0 = 312 \text{ m}$$

### Tensión real máxima de la malla

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M} = \frac{123.0876 * 1564.2 * 0.5021 * 2.568}{312} = 795.678 \text{ V}$$

### Tensión real de paso

Longitud efectiva del conductor enterrado:



$$L_S = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R = 0.75 * 312 + 0.85 * 0 = 234$$

$$E_{PR} = \frac{\rho * I_G * K_i * K_S}{L_S} = \frac{123.0876 * 1564.2 * 2.568 * 0.6364}{234} = 1344.67V$$

### Verificación del diseño (SPT)

$$(E_m < E_{T 70kg}) = 795.678 V < 923.8287 V$$

La tensión de la malla es menor que el voltaje de toque tolerable para 70 kg, por lo que cumple con la primera condición para que el sistema sea adecuado. A continuación, se procede a comparar la tensión real de paso con la tensión de paso para 70kg.

$$(E_{PR} < E_{S 70kg}) = 1344.67 V < 3029.2205 V$$

**DISEÑO CORRECTO:** Las condiciones cumplen con lo establecido por lo que el diseño no debe ser modificado, es decir no necesita q se cambien configuraciones de malla, ingresar electrodos, mejorar resistividad del suelo entre otros.

### SEGUNDO CASO: Procedimiento CELEC – ejercicio norma IEEE Std-80

Resistividad del suelo:  $\rho = 400 \Omega m$

#### Corriente de diseño

$$T_s = T_f = 0.5 \text{ seg}$$

$$I_F = 37 \text{ KA}$$

$$I_D = I_F * D_f = 37 * 1 = 37 \text{ KA}$$

#### Sección del conductor

$$D_F = 1.4$$

$$3I_O = 6814 \text{ A}$$

$$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tipo de Unión = SOLDADA  $\rightarrow T_m = 450$

$$I_{cc \text{ max}} = 3I_O * D_F = 6814 * 1.4 = 9539.6 \text{ A}$$

$$S_C = \frac{I_{cc \text{ max}}}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33 * T_f}}} * 0.0005067 = \frac{9539.6}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{450 - 40}{234 + 40} + 1\right)}{33 * 0.5}}} * 0.0005067 = 31.1502 \text{ mm}^2$$

$$d_c = \sqrt{\frac{4 * S_C}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 28.2139}{\pi}} = 6.2978 \text{ mm}$$

Entonces selección de calibre del conductor:  $S_C = 2/0 \text{ AWG}$

#### Tensión de toque y paso

$$\text{Peso} = 70 \text{ kg}$$

$$\rho_s = 2500 \Omega m$$

$$h_s = 0.102 \text{ m}$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{400}{2500}\right)}{2 * 0.102 + 0.09} = 0.7428$$

$$E_{s\ 70kg} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 6 * 0.7428 * 2500) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 2695.9068\ V$$

$$E_{T\ 70kg} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 1.5 * 0.7428 * 2500) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 840.5003\ V$$

### Geometría de la malla

Tipo = CUADRADA

$$D = 7 \qquad L = 70 \qquad N_V = 20 \qquad L_V = 7.5\ m$$

$$\text{Área: } A = L * L = 70 * 70 = 4900\ m^2$$

$$\text{Perímetro: } L_P = 4 * L = 4 * 70 = 280\ m$$

$$\text{Distancia máxima entre dos puntos: } D_m = \sqrt{2 * L^2} = \sqrt{2 * 70^2} = 98.9949\ m$$

$$\text{N. conductores en el eje X: } N = 1 + \frac{L_x}{D} = 1 + \frac{70}{7} = 11$$

$$\text{N. conductores en el eje Y: } M = 1 + \frac{L_y}{D} = 1 + \frac{70}{7} = 11$$

$$\text{Longitud de varillas: } L_R = N_V * L_V = 20 * 7.5 = 150\ m$$

Longitud interna del conductor:

$$L_C = (N * L_x) + (N * L_y) = (11 * 70) + (11 * 70) = 1540\ m$$

$$\text{Longitud total de conductores: } L_T = L_C + L_R = 1540 + 150 = 1690\ m$$

### Resistencia de la malla

Profundidad de la malla:  $h = 0.5\ m$

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \left( \frac{\sqrt{20}}{\sqrt{A}} \right)} \right) \right] = 400 \left[ \frac{1}{1690} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 * \left( \frac{\sqrt{20}}{\sqrt{4900}} \right)} \right) \right] = 2.7526\ \Omega m$$

### Corriente de la malla $I_g$

Corriente Simétrica de falla trifásica:  $3I_O = 3180\ A$

Factor de división de corriente:  $S_F = 0.6$

Factor de decremento:  $D_F = 1$       Factor de crecimiento:  $C_P = 1$

$$I_G = 3I_O * S_F * D_F * C_P = 3180 * 0.6 * 1 * 1 = 1908\ A$$

$$GPR = I_G * R_g = 1908 * 2.7526 = 5251.9608\ V$$

**Tensiones de diseño**

Malla: CON VARILLAS EN LAS ESQUINAS

Profundidad de referencia:  $h_o = 1 \text{ m}$

Factor geométrico n:

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} = \frac{2 * 1540}{280} = 11$$

Malla cuadrada por tanto:  $n_b = n_c = n_d = 1$

$$n = n_a * n_b * n_c * n_d = 11 * 1 * 1 * 1 = 11$$

Factor de corrección:  $K_{ii} = 1 \rightarrow$  Porque posee varillas en las esquinas

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

Valor geométrico:  $K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{7^2}{16*0.5*0.00927} + \frac{(7+2*0.5)^2}{8*7*0.00927} - \frac{0.5}{4*0.00927} \right) + \frac{1}{1.2247} * \ln \left( \frac{8}{\pi(2*11-1)} \right) \right] = 0.7837$$

Factor de irregularidad:  $K_i = 0.644 + 0.148 * n = 0.644 + 0.148 * 11 = 2.272$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} * (1 - 0.5^{11-2}) \right] = 0.4061$$

Longitud efectiva  $L_M$ : Con varillas en las esquinas

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

$$L_M = 1540 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] * 150 = 1786.3643$$

**Tensión máxima de la malla**

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M} = \frac{400 * 1908 * 0.7837 * 2.272}{1786.3643} = 760.7229 \text{ V}$$

**Tensión real de paso**

$$L_s = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R = 0.75 * 1540 + 0.85 * 150 = 1282.5$$

$$E_{PR} = \frac{\rho * I_G * K_i * K_s}{L_s} = \frac{400 * 1908 * 2.272 * 0.4061}{1282.5} = 549.0631 \text{ V}$$

**Verificación del diseño (SPT)**

$$(E_m < E_{T 70kg}) = 760.7229 V < 840.5003 V$$

$$(E_{PR} < E_{S 70kg}) = 549.0631 V < 2695.9068 V$$

EL DISEÑO (SPT) ES CORRECTO

### TERCER CASO: Procedimiento y ejercicio norma IEEE STD-80

#### Resistividad del suelo

$$\rho = 400 \Omega m$$

#### Corriente de diseño

$$\text{Selección: TABLA 2} \quad T_s = T_f = 0.5 \text{ seg.} \quad I_F = 37 \text{ KA}$$

$$\text{Relación X/R: } X/R = 10 \quad D_f = 1.026$$

$$I_D = I_F * D_f = 37 * 1.026 = 37.962 \text{ KA}$$

#### Sección del conductor

$$\text{Factor de decremento: } D_F = 1 \quad \text{Tiempo de falla: } T_f = 0.5 \text{ seg.}$$

$$\text{Corriente Simétrica de falla trifásica: } 3I_0 = 6814 \text{ A}$$

$$\text{Temperatura ambiente: } T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Selección del material: ALAMBRE DE ACERO REVESTIDO DE COBRE 2}$$

$$TCAP = 3.8 \text{ J/cm}^3 * \text{ }^\circ\text{C} \quad \rho_r = 4.4 \mu\Omega - \text{cm a } 20^\circ\text{C} \quad T_m = 1084 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_r = 0.00378 /$$

$$\text{ }^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C}$$

$$k_o = 245 \text{ }^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C}$$

$$A_{KCMIL} = 11.2105 * \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_o + T_m}{k_o + T_a}\right)}} = 11.2105 * \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{3.8}{0.5 * 0.00378 * 4.4}\right) * \ln\left(\frac{245 + 1084}{245 + 40}\right)}} = 58.5221 \text{ kcmils}$$

$$d_c = 0.803 * \sqrt{A_{kcmil}} = 0.803 * \sqrt{58.5221} = 6.1429 \text{ mm}$$

Selección del conductor: 2/0 AWG

#### Tensión de toque y paso

$$\text{Peso} = 70 \text{ kg}$$

$$\rho_s = 2500 \Omega m$$

$$h_s = 0.102 \text{ m}$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{400}{2500}\right)}{2 * 0.102 + 0.09} = 0.7428$$

$$E_{S 70kg} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{s\ 70kg} = (1000 + 6 * 0.7428 * 2500) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 2695.9068\ V$$

$$E_{T\ 70kg} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{T\ 70kg} = (1000 + 1.5 * 0.7428 * 2500) * \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 840.5003\ V$$

### Geometría de la malla

Tipo = CUADRADA

$$D = 7 \qquad L = 70 \qquad N_V = 20 \qquad L_V = 7.5\ m$$

Área:  $A = L * L = 70 * 70 = 4900\ m^2$

Perímetro:  $L_P = 4 * L = 4 * 70 = 280\ m$

Distancia máxima entre dos puntos:  $D_m = \sqrt{2 * L^2} = \sqrt{2 * 70^2} = 98.9949\ m$

N. conductores en el eje X:  $N = 1 + \frac{L_x}{D} = 1 + \frac{70}{7} = 11$

N. conductores en el eje Y:  $M = 1 + \frac{L_y}{D} = 1 + \frac{70}{7} = 11$

Longitud de varillas:  $L_R = N_V * L_V = 20 * 7.5 = 150\ m$

Longitud interna del conductor:

$$L_C = (N * L_x) + (N * L_y) = (11 * 70) + (11 * 70) = 1540\ m$$

Longitud total de conductores:  $L_T = L_C + L_R = 1540 + 150 = 1690\ m$

### Resistencia de la malla

Profundidad de la malla:  $h = 0.5\ m$

$$R_g = \rho * \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \left( \sqrt{\frac{20}{A}} \right)} \right) \right] 400 * \left[ \frac{1}{1690} + \frac{1}{\sqrt{20 * 4900}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 * \left( \sqrt{\frac{20}{4900}} \right)} \right) \right] = 2.7526\ \Omega m$$

### Corriente de la malla $I_g$

Corriente Simétrica de falla trifásica: CALCULAR  $3I_o$

Tipo de Falla: LINEA – TIERRA

Resistencia de falla: NO DESPRECIAR  $\rightarrow RF = 0\ \Omega$

Voltaje del Sistema: 115 KV

SECUENCIA	RESISTENCIA ( $\Omega$ )	REACTANCIA ( $\Omega$ )	IMPEDANCIA ( $Z$ )
(+)	4	10j	4+10j
(-)	4	10j	4+10j
(0)	10	40j	10+40j

$$I_o = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{3 * RF + Z_{(+)} + Z_{(-)} + Z_{(0)}} = \frac{115/\sqrt{3}}{3 * 0 + (4 + 10j) + (4 + 10j) + (10 + 40j)}$$

$$= 1.05992 \text{ KA}$$

$$3I_o = 3 * I_o = 3 * 1.05992 = 3179.8 \text{ A} = 3.1798 \text{ KA}$$

Factor de división de corriente:  $S_F = 0.6$

Factor de decremento: FORMULA:  $D_F = ?$

Frecuencia= 60 Hz

Relación X/R (Ingresar):  $X/R = 0.05$

Constante de tiempo para el factor  $D_F$ :  $T_a = \frac{X}{R} \left( \frac{1}{60 * 2\pi} \right) = 0.05 * \left( \frac{1}{60 * 2\pi} \right) = 0.000132$

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} * \left( 1 - e^{-2t_f/T_a} \right)} = \sqrt{1 + \frac{0.000132}{0.5} * \left( 1 - e^{-2 * 0.5 / 0.000132} \right)} = 1.0001$$

Factor de crecimiento:  $C_p = 1$

$$I_G = 3I_o * S_F * D_F * C_p = 3179.8 * 0.6 * 1.0001 * 1 = 1908.070 \text{ A}$$

Elevación de potencial de tierra:  $GPR = I_G * R_g = 1908.070 * 2.7526 = 5252.1556 \text{ V}$

### Tensiones de diseño

*Malla: CON VARILLAS EN LAS ESQUINAS*

Profundidad de referencia:  $h_o = 1 \text{ m}$

Factor geométrico n:  $n = n_a * n_b * n_c * n_d$

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} = \frac{2 * 1540}{280} = 11$$

*Malla cuadrada por tanto:  $n_b = n_c = n_d = 1$*

$$n = 11 * 1 * 1 * 1 = 11$$

Factor de corrección:  $K_{ii} = 1 \rightarrow$  Porque posee varillas en las esquinas

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

Valor geométrico:  $K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{7^2}{16 * 0.5 * 0.00927} + \frac{(7+2 * 0.5)^2}{8 * 7 * 0.00927} - \frac{0.5}{4 * 0.00927} \right) + \frac{1}{1.2247} * \ln \left( \frac{8}{\pi(2 * 11 - 1)} \right) \right] = 0.7837$$

Factor de irregularidad:  $K_i = 0.644 + 0.148 * n = 0.644 + 0.148 * 11 = 2.272$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} * (1 - 0.5^{11-2}) \right] = 0.4061$$

Longitud efectiva  $L_M$ : Con varillas en las esquinas

$$L_M = L_C + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_V}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R 1540 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] * 150 = 1786.3643$$

**Tensión máxima de la malla**

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M} = \frac{400 * 1908.070 * 0.7837 * 2.272}{1786.3643} = 760.7508 V$$

**Tensión real de paso**

$$L_S = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R = 0.75 * 1540 + 0.85 * 150 = 1282.5$$

$$E_{PR} = \frac{\rho * I_G * K_i * K_s}{L_S} = \frac{400 * 1908.070 * 2.272 * 0.4061}{1282.5} = 549.0833 V$$

**Verificación del diseño (SPT)**

$$(E_m < E_{T 70kg}) = 760.7508 V < 840.5003 V$$

$$(E_{PR} < E_{S 70kg}) = 549.0833 V < 2695.9068 V$$

EL DISEÑO (SPT) ES CORRECTO

**CUARTO CASO: Procedimiento IEEE Std-80 y Ejercicio documento IEEE Std-80**

**Resistividad del suelo**

$$\rho = 377 \Omega m$$

**Corriente de diseño**

(TABLA 1)

$$I_F = 37 KA$$

$T_s: T_f: 0.5 seg$

$$I_D = I_F * D_f = 37 * 1 = 37 KA$$

**Sección del conductor**

Factor de decremento: *CALCULAR* :  $D_F$

Tiempo de falla:  $t_f = t_c = 0.5 seg.$

$$3I_O = 10740.2 A$$

Relación X/R:  $X/R = 16.87$

Constante de tiempo para el factor  $D_F$ :  $T_a = \frac{X}{R} \left( \frac{1}{60 * 2\pi} \right) = 16.87 * \left( \frac{1}{60 * 2\pi} \right) = 0.04474$

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} * \left(1 - e^{-2t_f/T_a}\right)} = \sqrt{1 + \frac{0.04474}{0.5} * \left(1 - e^{-2*0.5/0.04474}\right)} = 1.04378$$

$$I_F = 3I_O * D_F = 10740.2 * 1.04378 = 11210.40 \text{ A} = 11.2104 \text{ KA}$$

Selección del material: **COBRE, COMERCIAL DURO 1**

$$TCAP = 3.42 \text{ J/cm}^3 * ^\circ\text{C}$$

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

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

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

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

$$T_a = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$A_{KCMIL} = 11.2105 \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c * \alpha_r * \rho_r}\right) \ln\left(\frac{k_o + T_m}{k_o + T_a}\right)}} = 11.2105 \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{3.42}{0.5 * 0.00381 * 1.78}\right) * \ln\left(\frac{242 + 1084}{242 + 40}\right)}} = 56.0052 \text{ kcmils}$$

$$d_c = 0.803 * \sqrt{A_{kcmil}} = 0.803 * \sqrt{56.0052} = 6.0093 \text{ mm}$$

Selección del conductor: **2/0 AWG**

### Tensión de toque y paso

$$Peso = 50 \text{ kg}$$

$$h_s = 0.102 \text{ m}$$

$$\text{Resistividad del suelo: } \rho_s = 2000 \text{ } \Omega\text{m}$$

$$\text{Tiempo de descarga: } t_s = 0.5 \text{ seg}$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2 * h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 * \left(1 - \frac{377}{2000}\right)}{2 * 0.102 + 0.09} = 0.7515$$

$$E_{S_{50kg}} = (1000 + 6 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 6 * 0.7515 * 2000) * \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 1643.4406 \text{ V}$$

$$E_{T_{50kg}} = (1000 + 1.5 * C_s * \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} = (1000 + 1.5 * 0.7515 * 2000) * \frac{0.116}{\sqrt{0.5}} = 533.8967 \text{ V}$$

### Geometría de la malla

$$\text{Tipo} = L$$

$$L_x = 84 \text{ m}$$

$$L_y = 98 \text{ m}$$

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

$$N_V = 32$$

$$L'_x = 42 \text{ m}$$

$$L'_y = 42 \text{ m}$$

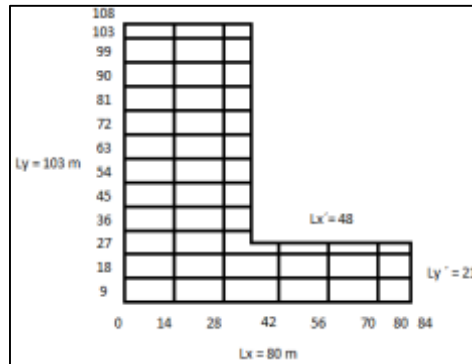
$$D_y = 7 \text{ m}$$

$$L_V = 10 \text{ m}$$

$$\text{Área: } A = [L_y * (L_x - L'_x)] + [L'_y * L'_x] = [98 * (84 - 42)] + [42 * 42] = 5880 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro: } L_P = (L_x + L_y) * 2 = (84 + 98) * 2 = 364 \text{ m}$$





Distancia máxima entre dos puntos:

$$D_m = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} = \sqrt{84^2 + 98^2} = 129.0736$$

$$D = \frac{D_x + D_y}{2} = \frac{7 + 7}{2} = 7$$

N. conductores en el eje X:  $N = \frac{L_x}{D_x} + 1 = \frac{84}{7} + 1 = 13$

N. conductores en el eje Y:  $M = \frac{L_y}{D_y} + 1 = \frac{98}{7} + 1 = 15$

Longitud de varillas:  $L_R = N_V * L_V = 32 * 10 = 320 \text{ m}$

Longitud interna del conductor:

$$L_C = [(N * L_y) + (M * L_x)] - [N' * (L_y - L_y') + (M' * L_x')]$$

$$L_C = [(13 * 98) + (15 * 84)] - [6 * (98 - 42) + (8 * 42)]$$

$$L_C = 2534 - 672 = 1862 \text{ m}$$

Longitud total de conductores:  $L_T = L_C + L_R = 1862 + 320 = 2182 \text{ m}$

### Resistencia de la malla

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

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + h * \left( \frac{\sqrt{20}}{A} \right)} \right) \right] = 377 * \left[ \frac{1}{2182} + \frac{1}{\sqrt{20 * 5880}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + 0.5 * \left( \frac{\sqrt{20}}{\sqrt{5880}} \right)} \right) \right] = 2.3403 \Omega \text{m}$$

Corriente Simétrica de falla trifásica: CALCULAR  $3I_o$

Tipo de Falla: LINEA - TIERRA Voltaje del Sistema: 115 KV

Resistencia de falla: NO DESPRECIAR →  $R_F = 0 \Omega$

SECUENCIA	RESISTENCIA ( $\Omega$ )	REACTANCIA ( $\Omega$ )	IMPEDANCIA ( $Z$ )
(+)	2.242	6.29 j	2.242+ 6.29 j
(-)	2.242	6.29 j	2.242+ 6.29 j
(0)	6.191	24.404 j	6.191 + 24.404 j

$$I_o = \frac{V_{LL}/\sqrt{3}}{3 * R_F + Z_{(+)} + Z_{(-)} + Z_{(0)}} = \frac{115/\sqrt{3}}{3 * 0 + (2.242 + 6.29 j) + (2.242 + 6.29 j) + (6.191 + 24.404 j)} = 1.7248 \text{ KA}$$

$$3I_o = 3 * I_o = 3 * 1.7248 = 5174.4 \text{ A} = 5.1744 \text{ A KA}$$

Factor de división de corriente: *CALCULAR:*  $S_F = ?$

# Líneas de transmisión: 2 # Neutros de distribución: 4

$$R_{tg} = 100 \quad ; \quad R_{dg} = 200 \quad \rightarrow \quad 1.09 + 0.208 j$$

$$S_F = \frac{Z_{equiv}}{R_g + Z_{equiv}} = \frac{1.09 + 0.208 j}{2.3403 + (1.09 + 0.208 j)} = |0.320256 + 0.041217 j| = 0.323$$

Factor de decremento: *CALCULAR:*  $D_F = ?$

$f = 60 \text{ Hz}$

$t_f = 0.5 \text{ seg}$

Relación X/R: *INGRESAR:*  $X/R = 1.75$

$$T_a = \frac{X}{R} \left( \frac{1}{60 * 2\pi} \right) = 1.75 * \left( \frac{1}{60 * 2\pi} \right) = 0.004642$$

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} * \left( 1 - e^{-2t_f/T_a} \right)} = \sqrt{1 + \frac{0.004642}{0.5} * \left( 1 - e^{-2*0.5/0.004642} \right)} = 1.0046$$

Factor de crecimiento:  $C_P = 1$

$$I_G = 3I_o * S_F * D_F * C_P = 5174.4 * 0.323 * 1.0046 * 1 = 1679.02 \text{ A}$$

Elevación de potencial de tierra:  $GPR = I_G * R_g = 1679.02 * 2.3403 = 3929.41 \text{ V}$

### Tensiones de diseño

*Malla: CON VARILLAS EN LAS ESQUINAS*

Profundidad de referencia:  $h_o = 1 \text{ m}$

Factor geométrico n:  $n = n_a * n_b * n_c * n_d$

Para malla tipo L los factores geométricos son:

$$n_a = \frac{2 * L_C}{L_P} = \frac{2 * 1862}{364} = 10.2307$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}} = \sqrt{\frac{364}{4\sqrt{5880}}} = 1.0893$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x * L_y}{A} \right]^{0.7 * A / L_x * L_y} = \left[ \frac{84 * 98}{5880} \right]^{0.7 * 5880 / 84 * 98} = 1.1832$$

$$n_d = 1$$

$$n = 10.2307 * 1.0893 * 1.1832 * 1 = 13.1859$$

Factor de corrección:  $K_{ii} = 1 \rightarrow$  Porque posee varillas en las esquinas

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}} = 1.2247$$

$$d_c = 0.00927 \text{ mm}$$

Valor geométrico:  $K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left( \frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right]$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{7^2}{16*0.5*0.00927} + \frac{(7+2*0.5)^2}{8*7*0.00927} - \frac{0.5}{4*0.00927} \right) + \frac{1}{1.2247} * \ln \left( \frac{8}{\pi(2*13.1859-1)} \right) \right] = 0.7591$$

Factor de irregularidad:

$$K_i = 0.644 + 0.148 * n = 0.644 + 0.148 * 13.1859 = 2.5955$$

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

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2 * 0.5} + \frac{1}{7 + 0.5} + \frac{1}{7} * (1 - 0.5^{13.1859-2}) \right] = 0.4062$$

Longitud efectiva  $L_M$ : Con varillas en las esquinas

$$L_M = L_c + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{L_V}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R = 1862 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{10}{\sqrt{84^2 + 98^2}} \right) \right] * 320 = 2388.25$$

**Tensión máxima de la malla**

$$E_m = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_M} = \frac{377 * 1679.02 * 0.7591 * 2.5955}{2388.25} = 522.20 \text{ V}$$

**Tensión real de paso**

$$L_s = 0.75 * L_C + 0.85 * L_R = 0.75 * 1862 + 0.85 * 320 = 1668.5$$

$$E_{PR} = \frac{\rho * I_G * K_i * K_s}{L_s} = \frac{377 * 1679.02 * 2.5955 * 0.4062}{1668.5} = 399.97 \text{ V}$$

**Verificación del diseño (SPT)**

$$(E_m < E_{T 50kg}) = 522.20 \text{ V} < 533.8967 \text{ V}$$

$$(E_{PR} < E_{S 50kg}) = 399.97 \text{ V} < 1643.4406 \text{ V}$$

EL DISEÑO (SPT) ES CORRECTO

### Anexo IX.1. Resistividad del suelo método de dos capas

A continuación, se muestra los valores medidos del suelo para el análisis de la resistividad aparente.

TABLA DE MEDIDAS			
Medida Número	Resistencia ( $\Omega$ )	Distancia entre electrodos (m)	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
1	140	0,5	439,822972
2	67,33	1	423,046867
3	28,04	2	352,361032
4	16,42	3	309,509708
5	11,15	4	280,230065
6	8,3	5	260,75219
7	3,1	10	194,778745
8	1,5	15	141,371669
9	0,97	20	121,893795
10	0,74	25	116,238928
11	0,59	30	111,21238
12	0,5	35	109,955743
13	0,42	40	105,557513
14	0,37	45	104,615035
15	0,32	50	100,530965

Determinar  $\rho_{\min} = 100.5309$  y  $\rho_{\max} = 439.8229$ .

$$\frac{\rho_{\min}}{\rho_{\max}} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{100.5309}{439.8229} = 0.2285$$

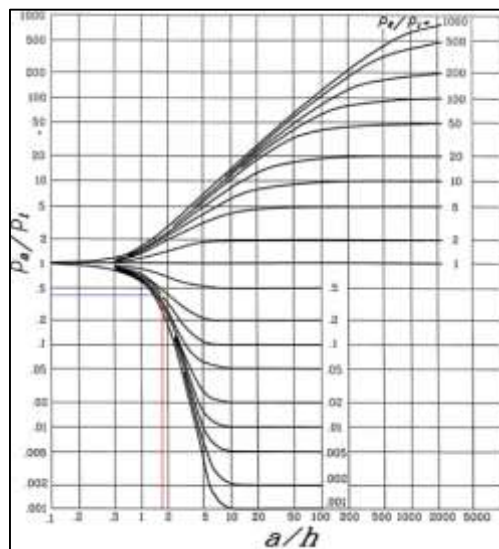
Factor de Reflexión:  $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{100.5309 - 439.8229}{100.5309 + 439.8229} = -0.6279$

Resistividad aproximada:  $\rho_{(aV1)} = \frac{\sum \text{Resistividad}}{N} = \frac{3171.88}{15} = 211.4586 \Omega m$

$$\rho_a = \frac{\rho_{(aV1)}}{\rho_1} = \frac{211.46}{439.82} = 0.48$$

$$a/h = 1.8$$

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



Resistividad aparente:

$$\rho = \frac{L_R \cdot \rho_{\min} \cdot \rho_{\max}}{\rho_{\min}(H - h) + \rho_{\max}(L_R + h - H)} = \frac{10 \cdot 439.8229 \cdot 100.5309}{100.5309 \cdot (4.61 - 0.5) + 439.8229 \cdot (10 + 0.5 - 4.61)} = 147.2025 \Omega\text{m}$$

**Anexo X.** Resolución de los ejercicios para líneas de transmisión

**Anexo X.1.** Ejercicios para CELEC

**Puesta a tierra con ELECTRODOS VERTICALES**

**Caso 1: Línea 2 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**RMG:** 2 Varillas

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 89,10  $\Omega\text{m}$

**Distancia entre varillas (S):** 3,10 m

**Tipo de terreno:** Blando

**Largo de la varilla (L):** 3 m

$$RMG = \sqrt{r \cdot s} = \sqrt{(0,00795)(3,10)} = 0,1569 \text{ m}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{RMG}\right) = \frac{89,10}{2\pi(3)} \cdot \ln\left(\frac{2(3)}{0,1569}\right) = 17,22 \Omega$$

15  $\Omega$  < 17,22  $\Omega$  (**Diseño Incorrecto**)

**Caso 2: Línea 2 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**RMG:** 3 Varillas

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 78,4  $\Omega\text{m}$

**Distancia entre varillas (S):** 4 m

**Tipo de terreno:** Roca y terreno duro

**Largo de la varilla (L):** 3 m

$$RMG = \sqrt[3]{r \cdot s^2} = \sqrt[3]{(0,00955)(4)^2} = 0,5346 \text{ m}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{RMG}\right) = \frac{78,4}{2\pi(3)} \cdot \ln\left(\frac{2(3)}{0,5346}\right) = 10,05 \Omega$$

15  $\Omega$  > 10,05  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

**Caso 3: Línea 1 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**RMG:** 4 Varillas

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 42,95  $\Omega\text{m}$

**Distancia entre varillas (S):** 4 m

**Tipo de terreno:** Blando

**Largo de la varilla (L):** 3 m

$$RMG = \sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r \cdot s^3} = \sqrt[4]{(\sqrt{2})(0,00795)(4)^3} = 0,921 \text{ m}$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{RMG}\right) = \frac{42,95}{2\pi(3)} \cdot \ln\left(\frac{2(3)}{0,921}\right) = 4,27 \Omega$$

15  $\Omega$  > 4,27  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

### **Puesta a tierra con ELECTRODOS HORIZONTALES O CONTRAPESOS**

#### **Caso 1: Línea 1 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**Radio del conductor (r):** 0,00463m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 42,95  $\Omega$ m

**Profundidad de enterramiento (h):**

0,50m

**Ubicación del contrapeso:** 1 Pata

**Largo del conductor (L):** 40m

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2L}{\sqrt{4rh}}\right) - 1 \right] = \frac{42,95}{\pi(40)} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2(40)}{\sqrt{4(0,00463)(0,5)}}\right) - 1 \right] = 2,297 \Omega$$

15  $\Omega$  > 2,297  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

#### **Caso 2: Línea 1 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**Radio del conductor (r):** 0,00463m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 42,95  $\Omega$ m

**Profundidad de enterramiento (h):**

0,50m

**Ubicación del contrapeso:** 2 Patas

**Largo del conductor (L):** 80m

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2L}{\sqrt{4rh}}\right) - 1 \right] = \frac{42,95}{\pi(80)} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2(80)}{\sqrt{4(0,00463)(0,5)}}\right) - 1 \right] = 1,267 \Omega$$

$$Rh = \frac{R}{2} = \frac{1,267 \Omega}{2} = 0,634 \Omega$$

15  $\Omega$  > 0,634  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

#### **Caso 3: Línea 1 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**Ubicación del contrapeso:** 3 Patas

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 42,95  $\Omega$ m

**Largo del conductor (L):** 160m

**Radio del conductor (r):** 0,00463m

**Profundidad de enterramiento (h):**  
0,50m

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2L}{\sqrt{4rh}} \right) - 1 \right] = \frac{42,95}{\pi(160)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(160)}{\sqrt{4(0,00463)(0,5)}} \right) - 1 \right] = 0,693 \Omega$$

$$Rh = \frac{R}{3} = \frac{0,693 \Omega}{3} = 0,231 \Omega$$

15  $\Omega > 0,231 \Omega$  (**Diseño Correcto**)

#### **Caso 4: Línea 1 de 69kV**

**Nivel de voltaje:** 69 Kv

**Radio del conductor (r):** 0,00463m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 42,95  $\Omega$ m

**Profundidad de enterramiento (h):**  
0,50m

**Ubicación del contrapeso:** 4 Patas

**Largo del conductor (L):** 400m

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2L}{\sqrt{4rh}} \right) - 1 \right] = \frac{42,95}{\pi(400)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(400)}{\sqrt{4(0,00463)(0,5)}} \right) - 1 \right] = 0,308 \Omega$$

$$Rh = \frac{R}{4} = \frac{0,308 \Omega}{4} = 0,077 \Omega$$

15  $\Omega > 0,077 \Omega$  (**Diseño Correcto**)

### **Puesta a tierra con ELECTRODOS VERTICALES Y MALLA DE PUESTA A TIERRA**

#### **Caso 1: Línea 3 de 138kV**

**Nivel de voltaje:** 138 Kv

**Longitud de las varillas (Lr):** 3m

**Msnm:** 900

**Apertura de las patas de la estructura (Ape):** 4m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 95,8  $\Omega$ m

**Longitud del conductor Pata – Varilla (Lpv):** 3m

**Numero de varillas (Nr):** 4

**Profundidad de enterramiento (h):** 0,5m

$$S = Ape + 1 = 4 + 1 = 5m$$

$$P = S \cdot 4 = 5 \cdot 4 = 20m$$

$$A = (Ape + \sqrt{2} \cdot Lpv)^2 = (4 + \sqrt{2} \cdot 3)^2 = 67,94m^2$$

$$Ltc = P + (Lpv \cdot Nr) = 20 + (3 \cdot 4) = 32m$$

$$Ltv = Nr \cdot Lr = 4 \cdot 3 = 12m$$

$$LT = Ltc + Ltv = 32 + 12 = 44m$$

$$Rg = \rho \left[ \frac{1}{LT} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] = 95,8 \left[ \frac{1}{44} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 67,94}} \left( 1 + \frac{1}{1 + 0,5 \cdot \sqrt{\frac{20}{67,94}}} \right) \right] = 6,82 \Omega$$

$$10 \Omega > 6,82 \Omega \text{ (Diseño Correcto)}$$

## Puesta a tierra con SISTEMA COMBINADO

### Caso 1: Línea de 138kV Loreto - Oso

**Nivel de voltaje:** 138 Kv

**Apertura de las patas de la estructura**

**Msnm:** 900

**(Ape):** 5m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 65,5  $\Omega m$

**Longitud del conductor Pata – Varilla**

**(Lpv):** 3m

**Tipo de terreno:** Roca y terreno duro

**Radio del conductor (rc):** 0,00703m

**Elegir contrapeso:** Primer Contrapeso

**Profundidad de enterramiento (h):** 0,5m

**Numero de varillas (Nr):** 4

**Longitud Primer Contrapeso (L1c):** 5m

**Longitud de las varillas (Lr):** 3m

$$S = Ape + 1 = 5 + 1 = 6m$$

$$P = S \cdot 4 = 6 \cdot 4 = 24m$$

$$Ltc = P + [(Lpv + L1c) \cdot Nr] = 24 + [(3 + 5) \cdot 4] = 56m$$

$$Ltv = Nr \cdot Lr = 4 \cdot 3 = 12m$$

$$Atm = (Ape + \sqrt{2} \cdot (Lpv + L1c))^2 = (5 + \sqrt{2} \cdot (3 + 5))^2 = 266,137m^2$$

$$An = \sqrt{Atm} = \sqrt{266,137} = 16,314m$$

$$La = An + 2(L2c + Lca) = 16,314 + 2(0 + 0) = 16,314m$$

$$A = Atm + (La - An) \cdot An = 266,137 + (16,314 - 16,314) \cdot 16,314 = 266,314m$$

$$k1 = 1,2 - 0,05 \left( \frac{La}{An} \right) = 1,2 - 0,05 \left( \frac{16,314}{16,314} \right) = 1,15$$

$$k2 = 0,1 \left( \frac{La}{An} \right) + 4,68 = 0,1 \left( \frac{16,314}{16,314} \right) + 4,68 = 4,78$$



$$R_c = \frac{\rho}{\pi Ltc} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2Ltc}{\sqrt{2hr c}} \right) + k1 \left( \frac{Ltc}{\sqrt{A}} \right) - k2 \right]$$

$$R_c = \frac{65,5}{\pi(56)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(56)}{\sqrt{2(0,5)(0,00703)}} \right) + 1,15 \left( \frac{56}{\sqrt{266,314}} \right) - 4,78 \right] = 2,369 \Omega$$

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi Ltv} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8Lr}{d} \right) - 1 + \frac{2k1Lr}{\sqrt{A}} (\sqrt{nr} - 1)^2 \right]$$

$$R_v = \frac{65,5}{2\pi(12)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8(3)}{0,0191} \right) - 1 + \frac{2(1,15)(3)}{\sqrt{266,314}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right] = 5,698 \Omega$$

$$R_m = \frac{\rho}{\pi Ltc} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2Ltc}{Lr} \right) + k1 \left( \frac{Ltc}{\sqrt{A}} \right) - k2 + 1 \right]$$

$$R_m = \frac{65,5}{\pi(56)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(56)}{3} \right) + 1,15 \left( \frac{56}{\sqrt{266,314}} \right) - 4,78 + 1 \right] = 1,4096 \Omega$$

$$R = \frac{R_c R_v - R_m^2}{R_c + R_v - 2R_m} = \frac{(2,369)(5,698) - (1,4096)^2}{2,369 + 5,698 - 2(1,4096)} = 2,1936 \Omega$$

10  $\Omega$  > 2,1936  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

### Caso 2: Línea 3 de 138kV

**Nivel de voltaje:** 138 Kv

**Apertura patas de la estructura (Ape):**

**Msnm:** 900

4m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 1  $\Omega$ m

**Longitud conductor Pata-Var (Lpv):** 3m

**Tipo de terreno:** Terreno Blando

**Radio del conductor (rc):** 0,00703m

**Elegir contrapeso:** Segundo Contrapeso

**Profundidad de enterramiento (h):** 0,8m

**Numero de varillas (Nr):** 4

**Longitud Primer Contrapeso (L1c):** 5m

**Longitud de las varillas (Lr):** 3m

**Longitud Primer Contrapeso (L2c):** 30m

$$S = Ape + 1 = 4 + 1 = 5m$$

$$P = S \cdot 4 = 5 \cdot 4 = 20m$$

$$Ltc = P + [(Lpv + L1c + L2c) \cdot Nr] = 20 + [(3 + 5 + 30) \cdot 4] = 172m$$

$$Ltv = Nr \cdot Lr = 4 \cdot 3 = 12m$$

$$Atm = (Ape + \sqrt{2} \cdot (Lpv + L1c))^2 = (4 + \sqrt{2} \cdot (3 + 5))^2 = 234,509m^2$$

$$An = \sqrt{Atm} = \sqrt{234,509} = 15,314m$$

$$La = An + 2(L2c + Lca) = 15,314 + 2(30 + 0) = 75,314m$$

$$A = Atm + (La - An) \cdot An = 234,509 + (75,314 - 15,314) \cdot 15,314 = 1153,349m$$

$$k1 = 1,2 - 0,05 \left( \frac{La}{An} \right) = 1,2 - 0,05 \left( \frac{75,314}{15,314} \right) = 0,954$$

$$k2 = 0,1 \left( \frac{La}{An} \right) + 4,68 = 0,1 \left( \frac{75,314}{15,314} \right) + 4,68 = 5,172$$

$$Rc = \frac{\rho}{\pi Ltc} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2Ltc}{\sqrt{2hrc}} \right) + k1 \left( \frac{Ltc}{\sqrt{A}} \right) - k2 \right]$$

$$Rc = \frac{1}{\pi(172)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(172)}{\sqrt{2(0,8)(0,00703)}} \right) + 0,954 \left( \frac{172}{\sqrt{1153,349}} \right) - 5,172 \right] = 0,0143 \Omega$$

$$Rv = \frac{\rho}{2\pi Ltv} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8Lr}{d} \right) - 1 + \frac{2k1Lr}{\sqrt{A}} (\sqrt{nr} - 1)^2 \right]$$

$$Rv = \frac{1}{2\pi(12)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8(3)}{0,0159} \right) - 1 + \frac{2(0,954)(3)}{\sqrt{1153,349}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right] = 0,0861 \Omega$$

$$Rm = \frac{\rho}{\pi Ltc} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2Ltc}{Lr} \right) + k1 \left( \frac{Ltc}{\sqrt{A}} \right) - k2 + 1 \right]$$

$$Rm = \frac{1}{\pi(172)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(172)}{3} \right) + 0,954 \left( \frac{172}{\sqrt{1153,349}} \right) - 5,172 + 1 \right] = 0,0099 \Omega$$

$$R = \frac{RcRv - Rm^2}{Rc + Rv - 2Rm} = \frac{(0,0143)(0,0861) - (0,0099)^2}{0,0143 + 0,0861 - 2(0,0099)} = 0,0141 \Omega$$

10  $\Omega$  > 0,0141  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

### Caso 3: Línea 3 de 138kV

**Nivel de voltaje:** 138 Kv

**Apertura patas de la estructura (Ape):**

**Msnm:** 900

5m

**Resistividad del terreno ( $\rho$ ):** 360  $\Omega$ m

**Longitud conductor Pata-Var (Lpv):** 3m

**Tipo de terreno:** Roca y terreno duro

**Radio del conductor (rc):** 0,00703m

**Elegir contrapeso:** Contrapeso Adicional

**Profundidad de enterramiento (h):** 0,8m

**Numero de varillas (Nr):** 4

**Longitud Primer Contrapeso (L1c):** 5m

**Longitud de las varillas (Lr):** 6m

**Longitud Primer Contrapeso (L2c):** 10m

**Long Contrapeso Adicional (Lca):** 25m

$$S = A_{pe} + 1 = 5 + 1 = 6m$$

$$P = S \cdot 4 = 6 \cdot 4 = 24m$$

$$Ltc = P + [(Lpv + L1c + L2c + Lca) \cdot Nr] = 24 + [(3 + 5 + 10 + 25) \cdot 4] = 196m$$

$$Ltv = Nr \cdot Lr = 4 \cdot 6 = 24m$$

$$Atm = (A_{pe} + \sqrt{2} \cdot (Lpv + L1c))^2 = (5 + \sqrt{2} \cdot (3 + 5))^2 = 266,137m^2$$

$$An = \sqrt{Atm} = \sqrt{266,137} = 16,314m$$

$$La = An + 2(L2c + Lca) = 16,314 + 2(10 + 25) = 86,314m$$

$$A = Atm + (La - An) \cdot An = 266,137 + (86,314 - 16,314) \cdot 16,314 = 1408,117m$$

$$k1 = 1,2 - 0,05 \left( \frac{La}{An} \right) = 1,2 - 0,05 \left( \frac{86,314}{16,314} \right) = 0,935$$

$$k2 = 0,1 \left( \frac{La}{An} \right) + 4,68 = 0,1 \left( \frac{86,314}{16,314} \right) + 4,68 = 5,209$$

$$Rc = \frac{\rho}{\pi Ltc} \left[ \ln \left( \frac{2Ltc}{\sqrt{2}hrc} \right) + k1 \left( \frac{Ltc}{\sqrt{A}} \right) - k2 \right]$$

$$Rc = \frac{360}{\pi(196)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(196)}{\sqrt{2}(0,8)(0,00703)} \right) + 0,935 \left( \frac{196}{\sqrt{1408,117}} \right) - 5,209 \right] = 4,6127 \Omega$$

$$Rv = \frac{\rho}{2\pi Ltv} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8Lr}{d} \right) - 1 + \frac{2k1Lr}{\sqrt{A}} (\sqrt{nr} - 1)^2 \right]$$

$$Rv = \frac{360}{2\pi(24)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{8(6)}{0,0191} \right) - 1 + \frac{2(0,935)(6)}{\sqrt{1408,117}} (\sqrt{4} - 1)^2 \right] = 17,0175 \Omega$$

$$Rm = \frac{\rho}{\pi Ltc} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2Ltc}{Lr} \right) + k1 \left( \frac{Ltc}{\sqrt{A}} \right) - k2 + 1 \right]$$

$$Rm = \frac{360}{\pi(196)} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2(196)}{6} \right) + 0,935 \left( \frac{196}{\sqrt{1408,117}} \right) - 5,209 + 1 \right] = 2,838 \Omega$$

$$R = \frac{RcRv - Rm^2}{Rc + Rv - 2Rm} = \frac{(4,6127)(17,0175) - (2,838)^2}{4,6127 + 17,0175 - 2(2,838)} = 4,416 \Omega$$

10  $\Omega$  > 4,42  $\Omega$  (**Diseño Correcto**)

## Anexo X.2. Ejercicios Norma Mexicana

### Caso 1: Cimentación en acero

Resistividad del terreno: ( $\rho$ ) = 100  $\Omega m$

Longitud del electrodo: ( $L$ ) = 3 m

Radio del electrodo: ( $r$ ) = 0.10m

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

$$R = \frac{100}{2\pi * 3} * \left[ \left( \ln \frac{4 * 3}{0.10} \right) - 1 \right] = 20.1 \Omega$$

La resistencia total es de R=20.1  $\Omega$ ; y la resistencia para cada pata es:

$$R = \frac{20.1}{4} = 5 \Omega$$

**Conclusión:** Este caso no requiere de electrodos adicionales ya que su resistencia es adecuada, cabe recalcar que para la cimentación en acero las patas de las torres actúan como un electrodo por cada pata.

**Caso 2:** Cimentación en acero

Resistividad del terreno: ( $\rho$ ) = 500  $\Omega m$

Radio del electrodo: ( $r$ ) = 0.10m

Longitud del electrodo: ( $L$ ) = 3 m

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

$$R = \frac{500}{2\pi * 3} * \left[ \left( \ln \frac{4 * 3}{0.10} \right) - 1 \right] = 100.46 \Omega$$

La resistencia total es de R=100.46  $\Omega$ ; pero la resistencia para cada pata es:

$$R = \frac{100.46}{4} = 25.11 \Omega$$

La resistencia es mucho mayor a lo recomendado R<10  $\Omega$  por lo tanto se debe ingresar electrodos y contrapesos adicionales.

$$R = 25.11 \Omega < 10 \Omega \rightarrow \text{No cumple}$$

Según la CFE recomienda para este nivel de resistividad lo siguiente:

Para cimentaciones de acero: 2 contra-antenas de 6m en cada pata y 2 electrodos verticales instalados cada 6m distanciados de la pata de la torre. Entonces:

$$R_{equiv} = \frac{\rho}{3} = \frac{500}{3} = 166.67 \Omega$$

$$L_{t_{CONTRA-ANTENA}} = N_{contra-antena} * L_{contra-antena \text{ por pata}} * 4 = 2 * 6 * 4 = 48 m$$

$$R_{\text{contra-antena}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{\frac{Lt_{\text{CONTRA-ANTENA}}}{L_{\text{contra-antena}}}} = \frac{166.67}{\frac{48}{6}} = 20.83 \Omega$$

$$N_{\text{electrodos verticales}} = 2 * 4 = 8 \text{ electrodos}$$

$$R_{\text{electrodos verticales}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{N_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{166.67}{8} = 20.83 \Omega$$

$$R_{\text{TOTAL}} = \frac{R_{\text{contra-antena}} * R_{\text{electrodos verticales}}}{R_{\text{contra-antena}} + R_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{20.83 * 20.83}{20.83 + 20.83} = 10.41 \Omega$$

Se ha incrementado los electrodos adicionales recomendados por la norma, pero se puede ver que el resultado no es adecuado por lo que es cimentación en acero, para darle solución al sistema de puesta a tierra se tiene varias opciones como: cambiar el tipo de cimentación, incrementar más electrodos y contra-antenas, colocar electrodos más largos o mejorar la resistividad del suelo.

Para este caso se va a incrementar 1 contra-antena de 6m por pata y un electrodo:

Ahora son 3 contra-antenas de 6m y 3 electrodos verticales por pata.

$$Lt_{\text{CONTRA-ANTENA}} = N_{\text{contra-antena}} * L_{\text{contra-antena por pata}} * 4 = 3 * 6 * 4 = 72 \text{ m}$$

$$R_{\text{contra-antena}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{\frac{Lt_{\text{CONTRA-ANTENA}}}{L_{\text{contra-antena}}}} = \frac{166.67}{\frac{72}{6}} = 13.89 \Omega$$

$$N_{\text{electrodos verticales}} = 3 * 4 = 12 \text{ electrodos}$$

$$R_{\text{electrodos verticales}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{N_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{166.67}{12} = 13.89 \Omega$$

$$R_{\text{TOTAL}} = \frac{R_{\text{contra-antena}} * R_{\text{electrodos verticales}}}{R_{\text{contra-antena}} + R_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{13.89 * 13.89}{13.89 + 13.89} = 6.95 \Omega$$

Ahora se ha llegado a satisfacer el valor de la resistencia, por lo que se puede decir que es un valor de diseño correcto.

$$R = 6.95 \Omega < 10 \Omega$$

### Caso 3: Cimentación en acero

Resistividad del terreno: ( $\rho$ ) = 1200  $\Omega m$

Radio del electrodo: ( $r$ ) = 0.10m

Longitud del electrodo: ( $L$ ) = 3 m

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

$$R = \frac{1200}{2\pi * 3} * \left[ \left( \ln \frac{4 * 3}{0.10} \right) - 1 \right] = 241 \Omega$$

La resistencia total es de  $R=241 \Omega$ ; pero la resistencia para cada pata es:

$$R = \frac{241}{4} = 60.27 \Omega$$

A este sistema se le añadirá 5 contra-antenas de 6m y 5 electrodos verticales colocados a 6 m de distancia en la contra-antena

$$R_{\text{equiv}} = \frac{\rho}{3} = \frac{1200}{3} = 400 \Omega$$

$$L_{\text{CONTRA-ANTENA}} = N_{\text{contra-antena}} * L_{\text{contra-antena por pata}} * 4 = 5 * 6 * 4 = 120 \text{ m}$$

$$R_{\text{contra-antena}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{\frac{L_{\text{CONTRA-ANTENA}}}{L_{\text{contra-antena}}}} = \frac{400}{\frac{120}{3}} = 10 \Omega$$

$$N_{\text{electrodos verticales}} = 5 * 4 = 20 \text{ electrodos}$$

$$R_{\text{electrodos verticales}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{N_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{400}{20} = 20 \Omega$$

$$R_{\text{TOTAL}} = \frac{R_{\text{contra-antena}} * R_{\text{electrodos verticales}}}{R_{\text{contra-antena}} + R_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{10 * 20}{10 + 20} = 6.67 \Omega$$

El diseño es correcto.

$$R = 6.67 \Omega < 10 \Omega$$

#### Caso 4: Cimentación en concreto

Resistividad del terreno: ( $\rho$ ) = 300  $\Omega m$

Diámetro envolvente del concreto:  $D = 0.7m$

Resistividad del concreto: ( $\rho_c$ ) = 100  $\Omega m$

Diámetro del conductor:  $d = 0.2$

Longitud del electrodo: ( $L$ ) = 3 m

$$R = \frac{1}{2\pi L} * \left[ \left( \rho_c \left( \ln \frac{D}{d} \right) \right) + \rho \left( \left( \ln \frac{8L}{D} \right) - 1 \right) \right]$$

$$R = \frac{1}{2\pi * 3} * \left[ \left( 100 \left( \ln \frac{0.7}{0.2} \right) \right) + 300 \left( \left( \ln \frac{8 * 3}{0.7} \right) - 1 \right) \right] = 46.99 \Omega$$

La resistencia total es de  $R=46.99 \Omega$ ; y la resistencia para cada pata es:

$$R = \frac{46.99}{4} = 11.75 \Omega$$

Para cimentación en concreto, en este nivel de resistividad se considera 1 contra-antena de 6m y 2 electrodos verticales instalados a 6m empezando desde la pata de la torre.

$$R_{\text{equiv}} = \frac{\rho}{3} = \frac{300}{3} = 100 \Omega$$

$$L_{\text{CONTRA-ANTENA}} = N_{\text{contra-antena}} * L_{\text{contra-antena por pata}} * 4 = 1 * 6 * 4 = 24 \text{ m}$$

$$R_{\text{contra-antena}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{\frac{L_{\text{CONTRA-ANTENA}}}{L_{\text{contra-antena}}}} = \frac{100}{\frac{24}{6}} = 25. \Omega$$

$$N_{\text{electrodos verticales}} = 2 * 4 = 8 \text{ electrodos}$$

$$R_{\text{electrodos verticales}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{N_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{100}{8} = 12.5 \Omega$$

$$R_{\text{TOTAL}} = \frac{R_{\text{contra-antena}} * R_{\text{electrodos verticales}}}{R_{\text{contra-antena}} + R_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{25 * 12.5}{25 + 12.5} = 8.33 \Omega$$

El diseño es correcto.

$$R = 8.33 \Omega < 10 \Omega$$

**Conclusión:** Su resistencia es adecuada, cabe recalcar que para la cimentación en concreto resulta mejor ya que la resistividad del concreto se considera relativamente baja y se sabe que la resistencia total calculada se compone considerando ambas resistividades la del terreno y la del concreto.

#### Caso 5: Cimentación en concreto

Resistividad del terreno: ( $\rho$ ) = 750  $\Omega m$

Diámetro envolvente del concreto:  $D =$

Resistividad del concreto: ( $\rho_c$ ) = 100  $\Omega m$

0.7m

Longitud del electrodo: ( $L$ ) = 3 m

Diámetro del conductor:  $d = 0.2$

$$R = \frac{1}{2\pi L} * \left[ \left( \rho_c \left( \ln \frac{D}{d} \right) \right) + \rho \left( \left( \ln \frac{8L}{D} \right) - 1 \right) \right]$$

$$R = \frac{1}{2\pi * 3} * \left[ \left( 100 \left( \ln \frac{0.7}{0.2} \right) \right) + 750 \left( \left( \ln \frac{8 * 3}{0.7} \right) - 1 \right) \right] = 107.5 \Omega$$

La resistencia total es de  $R=107.5 \Omega$ ; y la resistencia para cada pata es:

$$R = \frac{107.5}{4} = 26.88 \Omega$$

La norma considera configurar 4 contra-antena de 6m y 5 electrodos verticales instalados a 6m empezando desde la pata de la torre.

$$R_{\text{equiv}} = \frac{\rho}{3} = \frac{750}{3} = 250 \Omega$$

$$L_{\text{CONTRA-ANTENA}} = N_{\text{contra-antena}} * L_{\text{contra-antena por pata}} * 4 = 4 * 6 * 4 = 96 \text{ m}$$

$$R_{\text{contra-antena}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{\frac{L_{\text{CONTRA-ANTENA}}}{L_{\text{contra-antena}}}} = \frac{250}{\frac{96}{6}} = 15.63 \Omega$$

$$N_{\text{electrodos verticales}} = 5 * 4 = 20 \text{ electrodos}$$

$$R_{\text{electrodos verticales}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{N_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{250}{20} = 12.5 \Omega$$

$$R_{\text{TOTAL}} = \frac{R_{\text{contra-antena}} * R_{\text{electrodos verticales}}}{R_{\text{contra-antena}} + R_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{15.63 * 12.5}{15.63 + 12.5} = 6.94 \Omega$$

El diseño es correcto.

$$R = 6.94 \Omega < 10 \Omega$$

#### Caso 6: Cimentación en concreto

Resistividad del terreno: ( $\rho$ ) = 1000  $\Omega m$       Diámetro envolvente del concreto:  $D =$

Resistividad del concreto: ( $\rho_c$ ) = 100  $\Omega m$

0.7m

Longitud del electrodo: ( $L$ ) = 3 m

Diámetro del conductor:  $d = 0.2$

$$R = \frac{1}{2\pi L} * \left[ \left( \rho_c \left( \ln \frac{D}{d} \right) \right) + \rho \left( \left( \ln \frac{8L}{D} \right) - 1 \right) \right]$$

$$R = \frac{1}{2\pi * 3} * \left[ \left( 100 \left( \ln \frac{0.7}{0.2} \right) \right) + 1000 \left( \left( \ln \frac{8 * 3}{0.7} \right) - 1 \right) \right] = 141.12 \Omega$$

La resistencia total es de  $R=141.12 \Omega$ ; y la resistencia para cada pata es:

$$R = \frac{141.12}{4} = 35.28 \Omega$$

La norma considera configurar 5 contra-antena de 6m y 6 electrodos verticales instalados a 6m empezando desde la pata de la torre.

$$R_{\text{equiv}} = \frac{\rho}{3} = \frac{1000}{3} = 333.33 \Omega$$

$$L_{\text{CONTRA-ANTENA}} = N_{\text{contra-antena}} * L_{\text{contra-antena por pata}} * 4 = 5 * 6 * 4 = 120 \text{ m}$$



$$R_{\text{contra-antena}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{\frac{L_{\text{CONTRA-ANTENA}}}{L_{\text{contra-antena}}}} = \frac{333.33}{\frac{120}{6}} = 16.67 \Omega$$

$$N_{\text{electrodos verticales}} = 6 * 4 = 24 \text{ electrodos}$$

$$R_{\text{electrodos verticales}} = \frac{R_{\text{equiv}}}{N_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{333.33}{24} = 13.89 \Omega$$

$$R_{\text{TOTAL}} = \frac{R_{\text{contra-antena}} * R_{\text{electrodos verticales}}}{R_{\text{contra-antena}} + R_{\text{electrodos verticales}}} = \frac{16.67 * 13.89}{16.67 + 13.89} = 7.58 \Omega$$

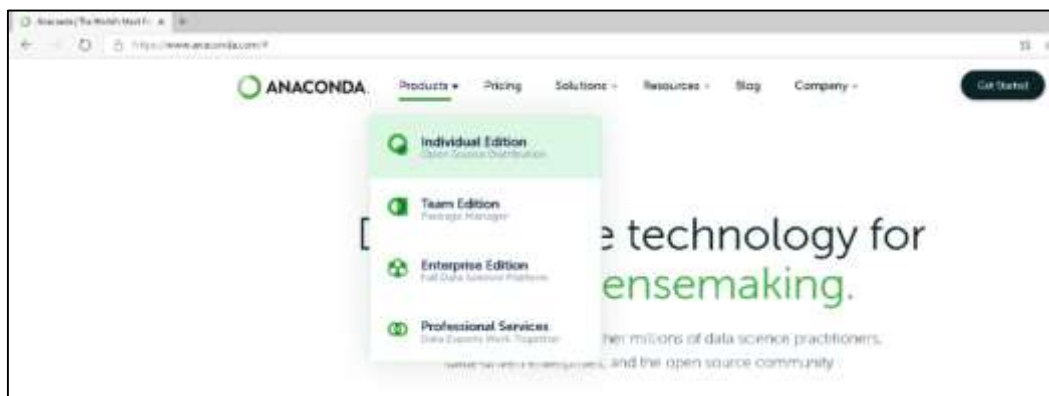
El diseño es correcto.

$$R = 7.58 \Omega < 10 \Omega$$

## Anexo XI. Manual de instalación del programa

### 1. Instalar ANACONDA con Spyder para PHYTON 3.7

Se recomienda descargar directamente de <https://www.anaconda.com/> página web oficial de ANACONDA, seleccionar en **Products**, opción **Individual Edition**, como se muestra en la figura:



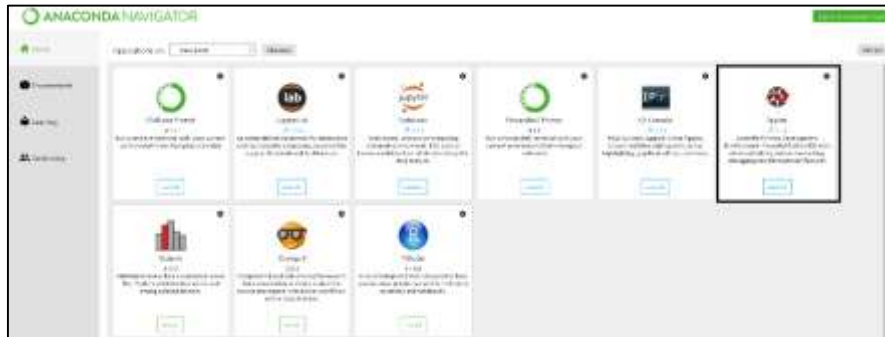
Luego debe dirigirse al final de la página web, seleccionar Phyton 3.7 y dar clic en de 64-Bit Graphical installer (466 MB), para comenzar la descarga.



2. Para instalar ANACONDA se debe seguir los siguientes pasos:



- Una vez instalado el programa, dirigirse a la ventana de búsqueda del computador y escribir “Anaconda Navigator”, para instalar el Spyder 3.3.6 dar clic en la opción Install como se muestra en la figura:



- Después de haber instalado el Spyder dar clic en “Launch” para ejecutar el programa.
- Una vez ejecutado el programa se procede a instalar algunas librerías que no están disponibles por defecto del Python, para eso se debe realizar lo siguiente:

En la ventana de búsqueda del computador escribir “**Anaconda Prompt (Anaconda3)**” al ejecutar la aplicación aparecerá la siguiente ventana.

```

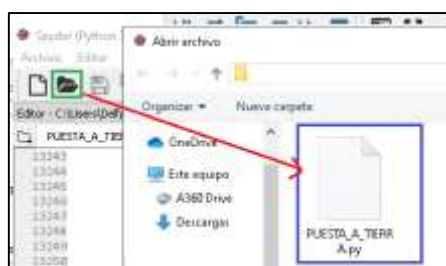
Anaconda Prompt (Anaconda3)
(base) C:\Users\Dell> pip install xlutils
Requirement already satisfied: xlutils in c:\users\dell\anaconda3\lib\site-packages (2.0.0)
Requirement already satisfied: xlwt>=0.7.4 in c:\users\dell\anaconda3\lib\site-packages (from xlutils) (1.3.0)
Requirement already satisfied: xlrd>=0.7.2 in c:\users\dell\anaconda3\lib\site-packages (from xlutils) (1.2.0)
  
```

En esta pantalla se debe instalar las librerías mediante el comando “**pip install**”, las librerías a instalar son las siguientes:

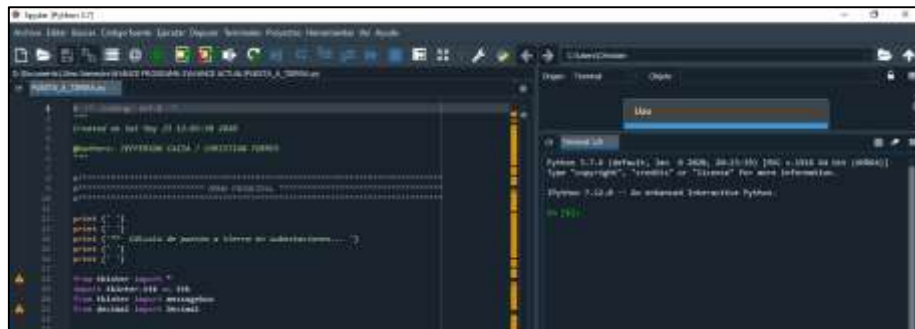
- pip install xlutils
- pip install mpld3
- pip install keras

NOTA: En el caso de no instalar las librerías el programa no funcionará de manera adecuada y en la venta de coman window, saldrán las librerías que toca instalar como errores.

- Con la instalación correcta del Spyder, se procederá a descomprimir y abrir la carpeta SPT\_SUBESTACIONES\_LINEAS DE TRASMISION y se seleccionará el archivo “PUESTA\_A\_TIERRA.py”.



Al momento de seleccionar el archivo automáticamente se abre toda la programación en una pantalla en el Spyder, como se puede observar en la siguiente figura:



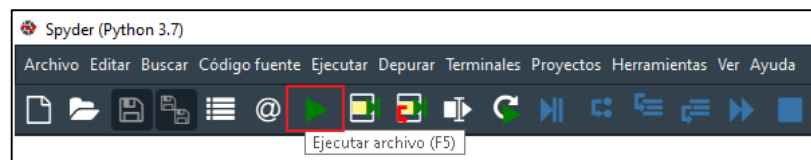
7. Antes de mandar a ejecutar el programa, se debe ajustar las configuraciones de ventana para que el programa tenga una mejor resolución de vista y salgan las gráficas en 3D.



## Anexo XII. Manual de uso del programa

A continuación, se indica la guía para que el usuario tenga conocimiento de uso y manipulación de cualquiera de los 4 módulos generales que se pueden utilizar para el diseño de puesta a tierra en subestaciones o líneas de transmisión.

1. El programa se iniciará, dando clic en el botón ejecutar archivo o presionando la tecla F5 como se muestra en la figura.



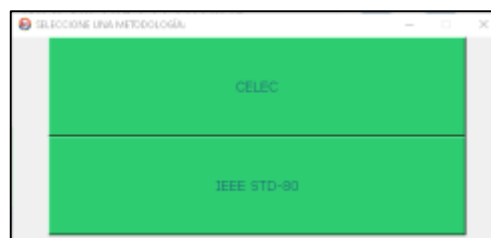
Al ejecutarse el programa se desplegará una pantalla solicitando que ingrese el usuario y contraseña que en este caso será “IEEE2020”, luego se presionará ENTER para poder acceder al programa como se muestra en la figura:



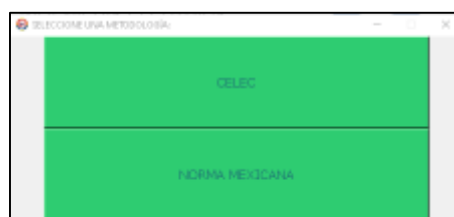
2. El programa muestra una pantalla principal como se observa en la siguiente figura, en donde permite seleccionar entre el módulo de subestaciones o líneas de transmisión, para realizar el cálculo de puesta a tierra.



En el caso de escoger la opción **SUBESTACIONES** se desplegará una sub pantalla para seleccionar la metodología que se va utilizar, el programa tiene datos ingresados por default que pueden ser borrados y modificados de acuerdo al diseñador.

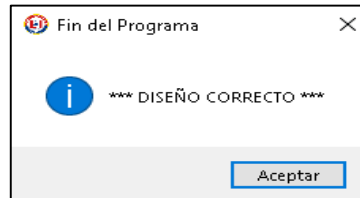


En el caso de escoger **LINEAS DE TRANSMISIÓN** se desplegará otra sub pantalla, en la cual se podrá seleccionar que metodología quiera utilizar para halla el diseño de puesta a tierra. Los datos serán ingresados de acuerdo al diseñador.



3. Al finalizar todo el proceso del cálculo de puesta a tierra, por cualquiera de las 4 opciones se mostrará un mensaje mencionando si el diseño es correcto o incorrecto.

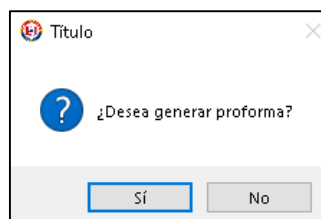
En el caso del diseño ser correcto se mostrará la siguiente pantalla:



En el caso de ser diseño incorrecto se mostrará un mensaje en una pantalla y el programa no finalizará hasta que se realicen las respectivas modificaciones.



4. Cuando el diseño es correcto y cumple con los parámetros establecidos procederá a mostrar la ventana de generar proforma.



En el caso de seleccionar **SI** se abrirá una nueva pantalla, en donde pedirá que ingrese los datos de la persona que desea la proforma de materiales.

El programa generará de manera automática un archivo EXCEL, que será ubicado en la carpeta general del programa, donde estarán ubicadas las cantidades de material que utiliza el diseño y además realiza el costo total mostrando una proforma total de materiales.

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Cable aluminio rígido 350 MCM	m	312	27,86	8699,92
2	Varilla Cospewald 254 micras 5/8 3m	v	0	20	0
3	Mango de unión en cruz 350	v	125	32,76	4095
4	Mango de unión "T" (1 Plaza) 350	v	44	27,48	1209,12
5	Mango de unión "T" (2 Plaza) 350	v	0	27,48	0
Subtotal				13934,04	
IVA 12%				1672,08	
TOTAL				15606,12	

Además, el programa también genera una hoja de EXCEL independiente para los resultados obtenidos por el programa para el caso de subestaciones o líneas de transmisión. Tendrá el siguiente modelo para para subestaciones:

Item	Descripción	Unidad	Valor
1	Horario		04:46:53 PM
2	Fecha		17/09/20
3	Normativa aplicada		CELEC
4	Tipo de malla		CUADRADA
5	Resistividad del Terreno	$\rho$	123,0576 Ohm
6	Longitud de los conductores	LT	312 m
7	Corriente de diseño	ID	37 A
8	Conductor		Cable Aluminio Rígido
9	Sección del Conductor Normalizada	Sc	350 MCM
10	Sección del Conductor	Sc	177,348 mm <sup>2</sup>
11	Diametro del Conductor	d	15,05 mm
12	Tensión de Paso	Eg	3029,17428 V
13	Tensión de Topo	Et	823,817159 V
14	Resistencia de la Malla	Rg	4,6215 Ohm
15	Corriente de falla Máxima	IG	1554,2 A
16	Elevación de Potencial de Tierra	GPI	7239,95013 V
17	Valor Geométrico	W	0,27795813
18	Factor de Irregularidad	Ks	2,568
19	Valor Geométrico	Wx	0,84867094
20	Tensión Máxima de la Malla	Em	598,950179 V
21	Tensión Real de Paso	Egr	1793,18452 V
22	Egr		1793,18452 V
23	Eg		3029,17428 V
24	Et		823,817159 V
25	Rg		4,6215 Ohm
26	*** DEBENO CORRECTO ***		

La hoja de resultados en líneas de transmisión tendrá el siguiente modelo:

Item	Descripción	Unidad	Valor
1	Horario		04:46:36 PM
2	Fecha		17/09/20
3	Normativa aplicada		CELEC
4	Nivel de Voltaje	V	250 kV
5	Resistividad del Terreno	$\rho$	1200 Ohm
6	Altura de la instalación	H	> 1000 m
7	Resistencia	F	10 Ohm
8	Configuración de PuT		Sistema Combinado
9	Tipo de Terreno		Roca y Terreno Duro
10	RMS		No Aplica
11	Distancia Entre Varillas	S	No Aplica m
12	Largo de las Varillas	L	No Aplica m
13	Ubicación del Contrapeso		No Aplica
14	Largo del Conductor	Lc	No Aplica m
15	Radio del Conductor	r	0,4 m
16	Probabilidad de Entrenamiento	h	0,5 m
17	Número de Varillas	Nv	4
18	Longitud de las Varillas	Lv	3 m
19	Apertura de Pata Estructura	Ape	7 m
20	Long. del Conductor Pata-Varilla	Lpv	4 m
21	Tipo de Contrapeso		Contrapeso Adicional
22	Long. Primer Contrapeso	L1c	5 m
23	Long. Segundo Contrapeso	L2c	5 m
24	Long. Contrapeso Adicional	L3c	5 m
25	R = $\frac{D^2 \ln \left( \frac{D}{r} \right)}{16 \cdot 0,84146 \cdot \rho}$		
26	R		10 Ohm