



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**Facultad de Electrotecnia y Computación**

**Trabajo Monográfico para optar el Título de Ingeniero Eléctrico.**

**Título:** Manual para el Diseño de Sistema de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión en Nicaragua.

**Elaborado por:**

 Br. Edman Josué Dumas Caldera. **Carné: 2017-0152U**

 Br. Kiara Alejandra Córdoba Cerna. **Carné: 2017-1298U**

**Tutor**

Msc. Pedro Joaquín Pérez Orozco

Managua, 25 de noviembre del 2022

## **Agradecimiento**

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida, a mi familia por estar siempre presentes en cada etapa de mi vida, a Alicia Ayerdis por su apoyo y a mi compañera monográfica Kiara Alejandra Córdoba Cerna.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento Msc. Pedro Joaquín Pérez Orozco por su tutoría durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

### **Edman Dumas**

A mi familia, gracias por su apoyo y fortaleza en el desarrollo y transcurso de este proceso, siendo un pilar importante al concluirlo satisfactoriamente.

A mi compañero de monografía, Edman Dumas.

A mi tutor Msc. Pedro Joaquín Pérez, a quien quiero darle agradecimiento por su tutoría y ayuda, en la cual brindo todo su apoyo y sabiduría la cual ha sido de suma importancia durante todo este proceso académico.

### **Kiara Córdoba**

## **Dedicatoria**

Este trabajo monográfico está dedicado a, Alicia Cristina Ayerdis Gómez quién me animó e inspiró a estudiar en este campo de estudio. La fuerza y el amor de Alicia durante todo el tiempo que ha estado conmigo me dio una nueva apreciación del significado y la importancia de la vida. Su ejemplo y su presencia me mantuvo en pie cuando quise rendirme en algunas ocasiones.

### **Edman Dumas**

A mi familia, incluyendo a Kay Cerna, por haberme forjado como la persona que soy hoy en día, y quienes me han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores los cuales me han ayudado a seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mis compañeros, amigos y amor, quienes han sido personas importantes en mi vida, quienes me animaron en los momentos más duros de este tiempo para no darme por vencida.

### **Kiara Córdoba.**

## **Resumen**

En el presente trabajo monográfico se trata de elaborar un manual para diseñar un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua, abarcará los procedimientos de la aplicación de sistema de puesta a tierra estándar y sucesivamente se desarrollará un modelo específico para líneas de transmisión, basados en diferentes normas, libros, investigaciones, etc. Además, se utilizará el software matemático CYMgrid que se complementará con lo anterior dicho para la elaboración de un diseño estricto, complejo y completo para puesta a tierra en líneas de transmisión.

Las normas serán utilizadas para indicar bajo que procedimientos se debe ejecutar un diseño de puesta a tierra que garantice la protección y seguridad tanto de los equipos eléctricos como de la vida humana, estando implementada para frecuencia de 50 y 60 Hertz, y partiendo de es que se llevará a cabo la implementación del software matemático CYMgrid, ya que el diseño del manual de puesta a tierra será implementando en líneas de transmisión, las cuales están sometidas a efectos de alta frecuencia,, así que el software el que completará la parte de alta frecuencia, sin embargo, este también presenta un límite, ya que no se cuenta con parámetros estandarizados de una inductancia en la puesta a tierra.

## Índice

Agradecimiento.....	2
Dedicatoria.....	3
Resumen.....	4
Introducción.....	6
Antecedentes.....	8
Objetivos.....	9
Justificación.....	10
Marco Teórico.....	11
Diseño Metodológico.....	22
Capítulo 1.....	24
“Criterios empleados para el diseño de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión.”.....	24
Capítulo 2.....	46
“Manual de Diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua”.....	46
Capítulo 3.....	60
“Comparación técnica de los diseños de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión según los criterios internacionales y los métodos implementados en los diseños actuales en Nicaragua”.....	60
Capítulo 4.....	68
“Simulación de diseño de sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua mediante el programa CYMGRD”.....	68
Conclusión.....	81
Bibliografía.....	83

## Introducción

La principal importancia de un diseño de sistema de puesta a tierra eficiente radica en que muchas instalaciones eléctricas están propensas al riesgo de daños y perjuicios a la eficiencia del sistema tales como el impacto de descargas atmosféricas y también que los electrodos de puesta a tierra fabricados con un material uniforme pueden verse amenazados por la corrosión proveniente de los suelos corrosivos y la formación de celdas de concentración, este riesgo de corrosión del material depende del tipo y de la composición del suelo (Reyna, 2020), por lo tanto se requiere de arreglos especiales para reducir los riesgos involucrados en las instalaciones eléctricas.

El sistema de puesta a tierra se usa también como un medio para obtener condiciones seguras de trabajo durante algunas faenas de mantenimiento o construcción. Antes de iniciar cualquier trabajo, las plantas, instalaciones o líneas de transmisión que estaban energizadas tienen que ser desconectadas y sus componentes previamente activos tienen que ser conectados a tierra. Esto permite que cualquier energía almacenada sea descargada en forma segura a tierra y ayuda a prevenir la aparición de voltajes peligrosos en el equipo en que se está trabajando (esto podría ocurrir de otra manera debido a inducción, error o falla en el sistema de potencia) (Procobre, 2014).

Según el libro de William D. Stevenson, “Análisis de sistemas eléctricos de potencia” (Stevenson, 1962) afirma que un sistema eléctrico de potencia está formado por tres áreas con funciones bien definidas, que son: generación, transmisión y finalmente distribución que en conjunto tiene la finalidad de entregar energía eléctrica a los consumidores. Dentro de este sistema la parte más vulnerable es la línea de transmisión, debido a que están sometidos a diversos fenómenos (contingencias) que producen distintos tipos de fallas (perturbaciones) eléctricas, las cuales muchas de ellas pueden ser amortiguadas por un sistema de puesta a tierra óptimo y eficiente.

Sin embargo, Nicaragua no cuenta con un protocolo, normativa o procedimiento a seguir para el diseño de sistemas de puesta a tierra, lo cual ha llevado a que dichos diseños de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua sean realizados todos bajo los mismos criterios sin importar las condiciones de terreno, niveles de tensión, magnitudes,

parámetros, etc. (Enatrel, Obras civiles y eléctricas para construcción de Líneas de transmisión eléctrica, 2016), por lo cual se concluye que un diseño deficiente de sistemas de puesta a tierra en línea de transmisión según palabras del libro de John J. Grainger, “Análisis de sistemas de potencia” (Grainger, 1996) crea una pérdida de capacidad de trasegar corrientes peligrosas, y también perdería la capacidad de limitación de los voltajes causados por los diferentes tipos de fallas generando un peligro a la seguridad humana y el aumento en el riesgo de daños en los diferentes equipos de las subestaciones eléctricas, así también generando interrupciones de servicio, esto implicaría que las líneas de transmisión pierdan continuidad en el suministro, reflejándose en la disminución de confiabilidad y disponibilidad del sistema.

Por tanto, se crea la necesidad de establecer un manual adecuado para el diseño de sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua, este será basado en las normativas internacionales.

El presente documento está compuesto por: una introducción que nos induce a la problemática existente relacionada a los diseños de sistemas de puesta a tierra en Nicaragua, en específico en el área de transmisión, posteriormente, los antecedentes que nos indican a que no hay normas y criterios relacionados a este tema en Nicaragua, luego, una justificación del porque es necesario realizar el manual propuesto en esta monografía, consecutivamente, el marco teórico que nos da el fundamento teórico y las bases para cumplir con los objetivos propuestos, sucesivamente, el diseño metodológico que plantea el tipo y diseño que la investigación desarrollará para llegar a los resultados esperados, seguidamente, un cronograma que estipula el tiempo que llevará desarrollar la investigación y finalmente la referencias bibliográficas extraído de diversas fuentes.

## **Antecedentes**

No se encontraron registros de algún tipo de manual, protocolo o normativa dada por ninguna de las instituciones en Nicaragua, entre ellas se mencionan; El transporte del sistema eléctrico de Nicaragua (SNT), la Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica (ENATREL), Instituto Nicaragüense de energía (INE), el Ministerio de Energía y Minas (MEM), la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

En el ámbito internacional, hay estudios empleados para el diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión, en el caso de mediciones a tierra se obtiene a través de la normativa empleada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers). En ella se encuentra los criterios a utilizar de:

- a) Sistemas de Puesta a Tierra. ANSI/IEEE Std. 81: 2012, Guía para la medición de Resistencias de Tierra, Impedancias de Tierra y Potenciales de Superficie de Tierra en Sistemas de Aterramiento (Energy, 2012).
- b) Sistemas de Puesta a Tierra. ANSI / IEEE Std. 80: 2013, Guía IEEE para la seguridad en subestaciones de CA de puesta a tierra.
- c) EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition. Chapter 6: Lightning and Grounding (Chisholm, 2005)
- d) Earth conduction effects in transmission systems (SUNDE) (Sunde, 1968).
- e) Design of Counterpoise Grounding Electrodes Encased with Low Resistivity Material for Transmission Towers (Sirachansawang, 2019).
- f) A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models (Batista, 2019).

## Objetivos

### Objetivo General.

Proponer un manual de diseño de sistemas de puesta a tierra para la protección de las líneas de transmisión en Nicaragua.

### Objetivos Específicos.

- ✚ Comprender los criterios empleados para el diseño de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión mediante investigaciones, estudios, libros y normas estandarizadas internacionalmente.
- ✚ Realizar una comparación técnica de los diseños de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión según los criterios internacionales y los métodos implementados en los diseños actuales en Nicaragua con el propósito de demostrar que la situación de los diseños en Nicaragua no cumple con los principios de las normativas internacionales.
- ✚ Simular un diseño de sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión en Nicaragua mediante el programa CYMGRD, cuyos datos estarán basados según el manual con el fin de complementar los datos del diseño elaborado.
- ✚ Elaborar el manual de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua en referencia al procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de puesta a tierra basado en los diagramas de flujo de la normativa IEEE-80.

## **Justificación**

Actualmente en Nicaragua se cuenta con poca información referente al diseño de sistemas de puesta a tierra de líneas de transmisión para limitar fallas, garantizar la seguridad eléctrica en labores de mantenimiento, contribuir a la compatibilidad electromagnética, eliminando peligros para mantener el correcto funcionamiento del sistema eléctrico, esto es debido a que los sistemas actuales se rigen todos bajo una misma norma referente a tres electrodos conectados con una varilla tipo Cooperweld sin importar las condiciones del terreno, etc. (Enatrel, Líneas de transmisión, 2017).

Esto ha incrementado nuestra comprensión del tema, al mismo tiempo que el diseño de sistemas de puesta a tierra ha llegado a ser significativamente más difícil ya que las nuevas normas internacionales están requiriendo un diseño seguro y más detallado, surge así una oportunidad para explicar más claramente la importancia de un manual de diseños de sistemas de puesta a tierra con las normativas internacionales debido a que el sistema de puesta a tierra de las líneas de transmisión a diseñar necesita cumplir funciones de seguridad tanto para las vidas humanas y dispositivos eléctricos, donde se obtenga una vía de descarga para aislar las fallas y también como vía de protección de las descargas atmosféricas así también mejorar su confiabilidad en el sistema eléctrico de potencia.

## **Marco Teórico.**

Según el libro de William D. Stevenson, “Análisis de sistemas eléctricos de potencia” (Stevenson, 1962) afirma que un sistema eléctrico de potencia está formado por tres áreas con funciones bien definidas, que son: generación, transmisión y finalmente distribución que en conjunto tiene la finalidad de entregar energía eléctrica a los consumidores. Dentro de este sistema la parte más vulnerable es la línea de transmisión, debido a que están sometidos a diversos fenómenos (contingencias) que producen distintos tipos de fallas (perturbaciones) eléctricas, las cuales muchas de ellas pueden ser amortiguadas por un sistema de puesta a tierra óptimo y eficiente.

### **1. Líneas de transmisión**

#### **1.1. Definición**

Las líneas de transmisión son el medio por el cual se transporta la energía eléctrica desde la fuente de generación hasta los lugares de uso. Las distancias involucradas pueden ser muy largas y las líneas pueden atravesar una variedad de entornos. Las líneas deben poder operar de manera confiable en todas las condiciones ambientales que experimentan y deben tener el menor impacto posible en estos entornos (Lings, 2005).

#### **1.2. Clasificación**

La clasificación de éstas, según su longitud, está basada en las aproximaciones admitidas al operar con los parámetros de la línea. La resistencia, inductancia y capacidad están uniformemente repartidas a lo largo de la línea y en el cálculo exacto de líneas largas hay que considerarlo así. En las líneas de longitud media se considera, sin embargo, que la mitad de la capacidad está agrupada en cada extremo de la línea, sin que por ello se cometa un error apreciable al calcular la tensión y la intensidad en los terminales. Por último, en las líneas cortas es tan pequeña la susceptancia capacitiva total, que puede despreciarse. (Stevenson, 1962)

En lo que se refiere a los cálculos en que interviene la capacidad, se consideran cortas las líneas aéreas, a 60 Hz, de menos de 50 millas. Líneas de longitud media son aquellas

comprendidas entre 50 y 150 millas, aproximadamente. En el cálculo de las líneas de más de 150 millas, es preciso considerar las constantes distribuidas si se necesita gran precisión, aunque, en ciertos casos, puede aplicarse a líneas de hasta 200 millas (Stevenson, 1962).

### 1.3. Características

En todo el mundo, los principios subyacentes que rigen el funcionamiento de los sistemas de transmisión son generalmente similares. De un país a otro, las diferencias radican en las especificaciones de diseño y los márgenes de operación. (Lings, 2005)

Además, existen diferencias en la frecuencia y los voltajes estándar. En cuanto a la frecuencia, se utilizan dos tipos básicos de sistemas de energía en todo el mundo. Por conveniencia, pueden denominarse sistemas de tipo norteamericano y sistemas de tipo europeo. Los sistemas norteamericanos se caracterizan por 60 Hz como frecuencia fundamental, mientras que los sistemas europeos se caracterizan por 50 Hz. (Lings, 2005). Los voltajes estándar se pueden apreciar en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1: Voltaje Estandarizados de líneas de transmisión norteamericana y líneas de transmisión europea. Fuente: (Lings, 2005).

<b>Transmisión de América del Norte (kV)</b>	<b>Transmisión europea (kV)</b>
69	60
115	110
138	132
161	220
230	275
345	400
500	
735–765	765
	1100 (no de uso general)

Según Enatrel en, Nicaragua opera con 3 diferentes niveles de tensiones (Enatrel, Líneas de transmisión, 2017), los cuales son:

## **230 kV**

Las líneas de transmisión de 230 kV se ubican en la zona del Pacífico de Nicaragua, siendo utilizadas para conectarnos con Centroamérica, uniéndonos al sur con Costa Rica y al norte con Honduras. Igualmente, en este mismo nivel de voltaje se enlazan a las Plantas Nicaragua y Amayo. El resto del sistema lo hacen a través de una red de 138 kV interconectándose por medio de los auto transformadores de 230/138 kV existentes en las Subestaciones Eléctricas León I, Los Brasiles, Ticuantepe II y Masaya.

## **138 kV**

Con estas líneas se conforman dos anillos y tres en combinación con las líneas de 230 kV. Uno de los anillos de 138 kV es el de Managua, integrado por 9 subestaciones que abastecen la demanda de la capital, equivalente al 53.3 % del consumo a nivel nacional. El segundo anillo se ubica en la parte Nor-Occidental del país, al cual se unen 6 subestaciones, que dan respuesta a los requerimientos energéticos del 6.4 % del país. El resto de las líneas son radiales (Enatrel, Líneas de transmisión, 2017).

## **69 kV**

Son las líneas más antiguas del Sistema Nacional de Transmisión (SNT), de tipo radial y ubicadas a nivel nacional, conectando a 21 subestaciones que representan el 20.5% de la demanda nacional.

## **2. Sistemas de puesta a tierra.**

### **2.1. Definición**

La unión eléctrica, con la tierra, de una parte, de un circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo, se efectúa mediante una instalación de puesta a tierra que, según puede leerse en la ITC MIE RAT 01, Terminología, es "el conjunto formado por electrodos y líneas de tierra de una instalación eléctrica" (Fidalgo, 2017).

## **2.2.Función**

La función de la puesta a tierra de una instalación eléctrica es la de forzar la derivación, al terreno, de las intensidades de corriente, de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya se trate de corrientes de defecto, bajo frecuencia industrial, o debidas a descargas atmosféricas, de carácter impulsiones. (Lings, 2005)

Con ello, se logra:

- ❖ Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra.
- ❖ Posibilitar la detección de defectos a tierra y asegurar la actuación y coordinación de las protecciones, eliminando o disminuyendo, así, el riesgo que supone una avería para el material utilizado y las personas.
- ❖ Limitar las sobretensiones internas (de maniobra -transitorias- y temporales) que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones de explotación.
- ❖ Evitar que las tensiones de frente escarpado que originan las descargas de los rayos provoquen "cebados inversos", en el caso de instalaciones de exterior y, particularmente, en líneas aéreas.

## **2.3.Métodos de Diseño de Sistema Puesta a tierra de Línea de transmisión.**

- **Método de los elementos finitos.**

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos, la variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones

constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema sean conocidas de antemano. (Kamal, 2020).

Entre los principales programas que contiene el método de elementos finitos se encuentran: ETAP, IP2WIN y CYMgrd.

- **Método Estandarizado por Normativas Internacionales.**

Es un método basado en la linealización de Ecuaciones diferenciales, basándose en algunas asunciones para las cuales el método fue probado en la práctica. (Kamal, 2020).

Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones propias del método:

- ❖ El terreno presenta resistividad uniforme
- ❖ La distribución de corriente es uniforme

#### **2.4.¿Por qué se necesita un sistema de puesta a tierra en las líneas de transmisión?**

El Ing. Kamal Arreaza, Gerente de Ingeniería y Construcción plantea las siguientes necesidades de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión (Kamal, 2020):

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para drenar las corrientes de tierra, ya sean debidas a una falla de aislamiento o a la operación de un descargador de sobretensión.
- Evitar que, durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación, que puedan ser peligrosas para el personal.
- Facilitar mediante sistemas de protecciones la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.
- Dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.

## 2.5. Resistividad del Suelo

La resistividad de los suelos varía con la profundidad de la superficie, el tipo y la concentración de productos químicos solubles en el suelo, el contenido de humedad y la temperatura del suelo. En otras palabras, la resistividad es la del electrolito en el suelo. La presencia de agua superficial no indica necesariamente baja resistividad. (Michaels, 2007).

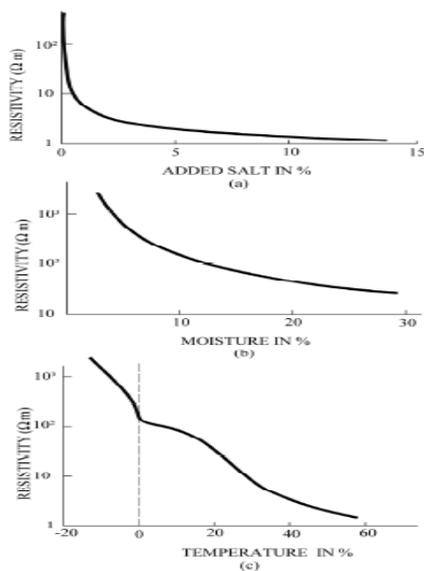


Figura 1. Variaciones de resistividad de la Tierra: (a) sal, (b) humedad y (c) temperatura

Fuente: (Committee of the IEEE Power Engineering Society, 2012)

## 2.6. Mediciones de resistividad

Se deben realizar pruebas para determinar si hay variaciones importantes de resistividad con la profundidad. El número de tales lecturas tomadas debe ser mayor cuando las variaciones son grandes, especialmente si algunas lecturas son tan altas que sugieren un posible problema de seguridad. (Keil, 2013). **Método de Cuatro-punto. Método Wenner.**

## 2.7. Valores recomendados para sistemas de puesta a tierra.

Un buen diseño de puesta a tierra debe garantizar el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas. En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial, pueden tomarse como referencia los valores máximos de la Tabla siguiente, adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4-442, ANSI/IEEE 80. IEEE 142. EPRI. Rus bulletin 1724e-300. El cumplimiento de estos valores no exonera al diseñador y constructor de garantizar que las tensiones de paso, contacto y transferidas aplicadas al ser humano en caso de una falla a tierra no superen las máximas permitidas. (Kamal, 2020)

Tabla 2: Valores máximos de resistencia de puesta a tierra. Fuente: (Kamal, 2020)

APLICACIÓN	VALORES MÁXIMOS DE RESISTENCIA
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda	20 $\Omega$
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1 $\Omega$
Subestaciones de media tensión.	5 $\Omega$
Protecciones contra rayos.	10 $\Omega$
Punto neutro de acometida en baja tensión	25 $\Omega$
Redes para equipos electrónicos o sensibles	10 $\Omega$

## 3. Fallas en líneas de transmisión

### 3.1. Fallas asimétricas

Según el libro de William D. Stevenson, “Análisis de sistemas eléctricos de potencia” (Stevenson, 1962), la mayoría de las fallas que ocurren en los sistemas de potencia, son fallas asimétricas, que consisten en cortocircuitos asimétricos, fallas asimétricas a través de impedancia o conductores abiertos. Las fallas asimétricas que pueden ocurrir son: fallas monofásicas a tierra o línea a tierra, fallas líneas a línea y fallas línea a línea y a tierra o doble línea a tierra.

### 3.2.Fallas por descargas atmosféricas

#### 3.2.1. Tormenta eléctrica

Según del glosario de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), Una tormenta eléctrica es una tormenta local producida por una nube cumulonimbos y que está acompañada por relámpagos y truenos. Las tormentas eléctricas ocurren en cualquier parte del mundo, siempre y cuando existan condiciones de calor y humedad (NOAA, 1970).

El número de tormentas eléctricas en la zona del pacifico de Nicaragua alcanza las 336 tormentas/año, provocando de esta manera un inminente peligro por descargas atmosféricas en esta región (Blanco, 2018).

#### 3.2.2. Valores de una descarga atmosféricas

Los valores que se pueden llegar a obtener de una descarga se pueden observar en la Figura 2, donde se muestra la representación de la corriente en función del tiempo en gráficas y tablas.

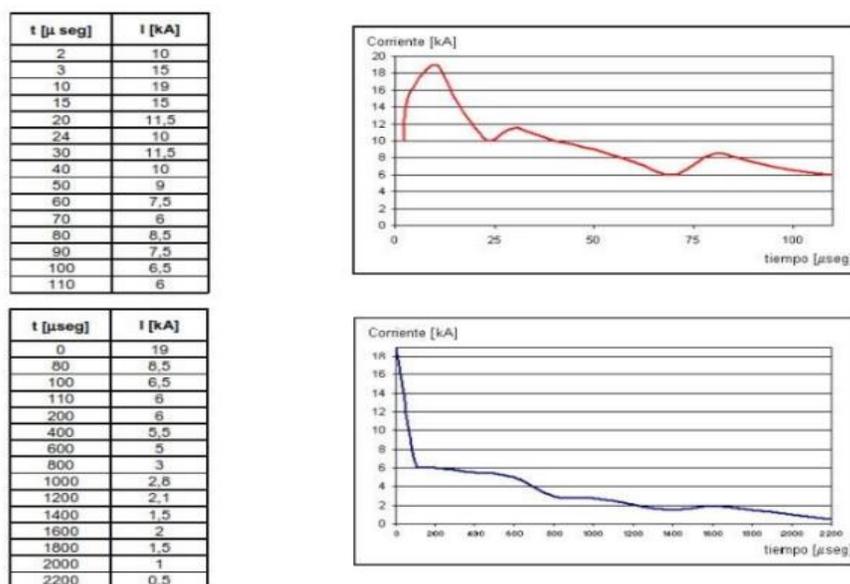


Figura 2. Primer impulso de una descarga atmosférica.

Fuente: (Herrera, 2014).

Es bastante frecuente que el impulso no sea único, sino que aparezcan varios impulsos posteriores, de menor valor máximo, llamados arcos subsiguientes. Pueden llegar a contabilizarse, con poca probabilidad de que ocurran, hasta diez impulsos en un solo rayo.

### **3.2.3. Tipos de fallas por descargas atmosféricas en líneas de transmisión**

Los siguientes términos se han definido para fomentar una descripción coherente de los fenómenos del rayo entre ingenieros e investigadores. (Lings, 2005)

#### **3.2.3.1. Flashover**

- **Flashover:** Una descarga eléctrica completada desde un conductor energizado a un soporte conectado a tierra. Puede limpiarse por sí solo sin disparar un disyuntor.
- **Backflashover:** Una descarga eléctrica completada desde un soporte conectado a tierra hasta un conductor energizado. Puede limpiarse por sí solo sin disparar un disyuntor (Pool, 2012).
- **Tripout:** Un Flashover o Backflashover de una línea que no se limpia por sí sola. Debe despejarse mediante la operación momentánea de un disyuntor, eliminando la alimentación de CA el tiempo suficiente para que se extinga el arco de descarga disruptiva.

#### **3.2.3.2. Shielding Failures**

Falla de apantallamiento, también conocido como falla de blindaje es cuando un rayo cae en la cercanía de la línea, y no impacta en el cable de guarda ni en las torres, sino que cae principalmente en las fases

### 3.2.3.3. Induced

El inducido, el rayo cae en árbol o estructura que está cercana a las torres de transmisión y esa sobretensión va por tierra hasta llegar a torre, en donde afecta a los aisladores. Estas son más peligrosas en media tensión, sin embargo, no son tan peligrosas en transmisión.

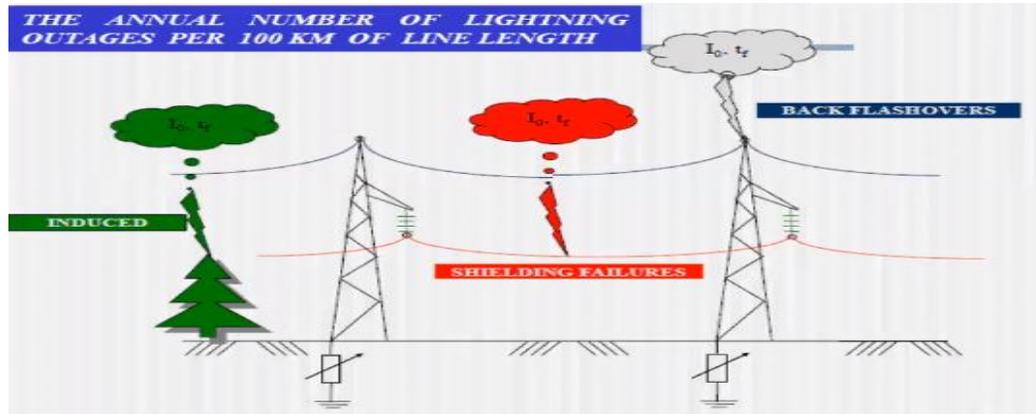


Figura 3. Fallas atmosféricas más comunes en líneas de transmisión

Fuente: (Inel, 2021).

## 4. Nivel isoceraunico

Se llama con este nombre la cantidad de tormentas eléctricas (en las que se escuchan truenos) que hay en un año. El número de tormentas eléctricas tiene indudable relación con el número de descargas que ocurren por unidad de superficie y unidad de tiempo.

Es más representativo el número de descargas eléctricas por unidad de superficie (km. cuadrado) y por año, que mide la probabilidad que tiene un punto del terreno de ser alcanzado por una descarga atmosférica.

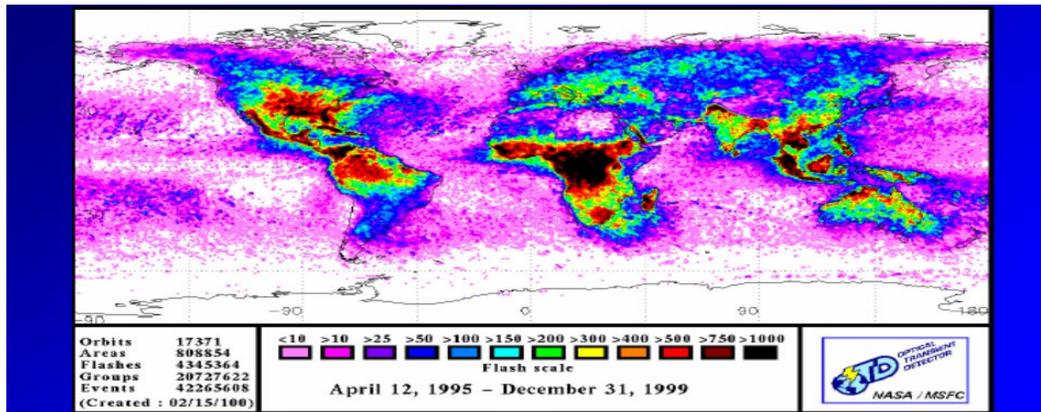


Figura 4. Descargas anuales por km<sup>2</sup> según el satélite LIS, periodo abril 1995 – febrero 2003. Fuente: (NASA, 2003)

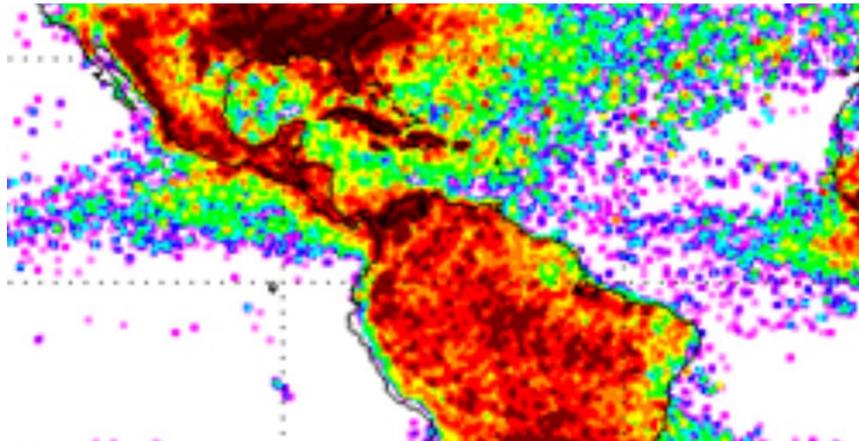


Figura 5. Descargas anuales por km<sup>2</sup> en Nicaragua según el satélite LIS, periodo abril 1995 – febrero 2003. Fuente: (NASA, 2003).

## **Diseño Metodológico**

### Tipo de Investigación

El tipo de Investigación que se pretende desarrollar es el método deductivo con enfoque mixto debido a que se necesitará una forma de razonar y explicar la realidad de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión (Raffino, 2021), partiendo de los criterios internacionales además se necesitará comprender los diseños de sistemas de puesta a tierra en Nicaragua a través de la recolección de datos narrativos como la de profesionales que han trabajado en esa área del sistema eléctrico de potencia y también la recolección de datos numéricos como lo es las mediciones de resistividad de suelo que se llegará a realizar en las líneas de transmisión.

### Objetivos Específicos.

- ✚ Comprender los criterios empleados para el diseño de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión mediante investigaciones, estudios, libros y normas estandarizadas internacionalmente.

Se procederá al método bibliográfico para recopilar la información referente a los sistemas de puesta tierra utilizando los criterios internacionales, y los parámetros que deben ser tomados en cuenta según estos criterios, siendo estos la resistividad del suelo, el nivel de tensión GPR, tipo de estructura, etc. (Energy, 2012), para esto se llevará a cabo el método cualitativo, puesto que solo se necesita de un estudio de literatura.

- ✚ Realizar una comparación técnica de los diseños de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión según los criterios internacionales y los métodos implementados en los diseños actuales en Nicaragua con el propósito de demostrar que la situación de los diseños en Nicaragua no cumple con los principios de las normativas internacionales.

Para recopilar información se utilizará el método mixto, específicamente se dará un enfoque en este punto al cualitativo ya que el instrumento metodológico será la normativa de Resolución Ministerial No. 001-03-2013 “Aprobación de la Normativa de Operación”

(minas, 2013) y la página Web de Enatrel, además entrevistas a profesionales que conocen el diseño de sistemas de puestas a tierra en LT de Nicaragua y el análisis de un proyecto real de Enatrel de un diseño de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua y realizar la comparación con un método bibliográfico con los instrumentos metodológicos del libro EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition, Capítulo 6, Libro Earth conduction effects in transmission systems (SUNDE) (Sunde, 1968), Paper Design of Counterpoise Grounding Electrodes Encased with Low Resistivity Material for Transmission Towers (Sirachansawang, 2019), Paper A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models (Batista, 2019).

- ✚ Simular un diseño de sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión en Nicaragua mediante el programa CYMGRD, cuyos datos estarán basados según el manual con el fin de complementar los datos del diseño elaborado.

Para recopilar información se utilizará el método mixto, enfocándose en el cuantitativo; el instrumento metodológico será una visita de campo a una línea de transmisión de Nicaragua y obtener datos numéricos por medio de mediciones de tierra, los métodos matemáticos, la simulación por medio del programa CYMGRD y realizar los pasos para el diseño que plantea el manual.

- ✚ Elaborar el manual de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua en referencia al procedimiento para el diseño de sistemas prácticos de puesta a tierra basado en el diagrama de flujo de la normativa IEEE-80.

Para recopilar información se utilizará un método mixto, el instrumento metodológico será la normativa IEEE 80 y el curso de sistemas de puesta a tierra impartido una empresa de capacitaciones en ingeniería llamada Inel.

La definición del contenido propuesto, el cual está dado por los parámetros a tomar en cuenta para la construcción de puesta a tierra en líneas de transmisión, la recopilación de información, la realización de pruebas de validación con entrevistas de expertos de Enatrel encargados en el área de líneas de transmisión eléctrica y puesta a tierra (Gutierrez, 2014).

## **Capítulo 1**

### **“Criterios empleados para el diseño de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión.”**

#### **Resumen del capítulo**

En este capítulo se abarcarán los criterios empleados para el diseño de un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión, mediante la normativa IEEE 80, el estudio “Diseño de electrodos de puesta a tierra de contrapeso revestidos con material de baja resistividad para torres de transmisión” (Sirachansawang, 2019), el estudio “Un estudio de arreglos de puesta a tierra compuestos por electrodos verticales para dos modelos de suelo estratificado en capas” (Batista, 2019).

Se abordarán los temas referentes al diseño de electrodos de contrapeso revestidos con compuestos que mejoran la puesta a tierra o puesta a tierra más eficaz (MEG) para torres de transmisión. El enfoque se basa en un análisis electromagnético de onda completa. Para el análisis de contrapeso, se utiliza el circuito equivalente de elemento parcial (PEEC).

Y mediante el artículo: “Un estudio de arreglos de puesta a tierra compuestos por electrodos verticales para dos modelos de suelo estratificado en capas”, se presenta un estudio de un arreglo de puesta a tierra propuesto para torres de línea de transmisión (LT), particularmente para condiciones de suelo estratificado donde la resistividad eléctrica de la primera capa es mayor que la del segundo medio. Se presentan técnicas basadas en la teoría LT para estimar la impedancia armónica de puesta a tierra de tales configuraciones y se comparan con la solución obtenida con un método electromagnético (EM) riguroso.

## **Criterios de la normativa “IEEE 80”**

### **Alcance**

Esta guía se ocupa principalmente de las prácticas seguras de conexión a tierra para frecuencias eléctricas en el rango de 50 Hz a 60 Hz.

### **Criterios de voltaje tolerable**

#### **Criterios de definiciones de voltaje tolerable**

*Aumento de potencial de tierra (GPR):* El potencial eléctrico máximo que puede alcanzar una red de tierra de una subestación. en relación con un punto de conexión a tierra distante que se supone que está al potencial de una tierra remota. Este voltaje, GPR, es igual a la corriente máxima de la red multiplicada por la resistencia de la red.

*Voltaje de malla:* El voltaje de contacto máximo dentro de una malla de una rejilla de tierra.

*Voltaje de paso:* La diferencia en el potencial de superficie experimentado por una persona que cruza una distancia de 1 m con los pies sin tocar ningún otro objeto conectado a tierra.

*Voltaje de contacto:* La diferencia de potencial entre el aumento de potencial de tierra (GPR) y el potencial de superficie en el punto donde una persona está parada mientras al mismo tiempo tiene una mano en contacto con una estructura. Las mediciones de voltaje de contacto pueden ser de "circuito abierto" (sin la resistencia corporal equivalente incluido en el circuito de medición) o "circuito cerrado" (con la resistencia equivalente del cuerpo incluida en el circuito de medición).

### **Principales consideraciones de diseño**

- Se debe instalar un sistema de puesta a tierra de manera que limite el efecto de los gradientes de potencial de tierra a tales niveles de voltaje y corriente que no pongan en peligro la seguridad de las personas o el equipo en condiciones normales y condiciones de falla.

- El sistema también debería ayudar a garantizar la continuidad del servicio. En la discusión que sigue, se supone que el sistema de electrodos de tierra tiene la forma de una cuadrícula de conductores enterrados horizontalmente, complementados por una serie de varillas de tierra verticales conectadas a la red.

**Razones para utilizar el sistema combinado de varillas verticales y conductores horizontales son las siguientes:**

- ✚ Un solo electrodo es, por sí mismo, inadecuado para proporcionar un sistema de puesta a tierra seguro. Sin embargo, las varillas de tierra tienen un valor particular, como se explica en el punto 2, a continuación.
- ✚ Si la magnitud de la corriente disipada en la tierra es alta, rara vez es posible instalar una red con una resistencia tan baja como para asegurar que el aumento de un potencial de tierra no generará superficie gradientes inseguros para el contacto humano. Entonces, el peligro sólo puede eliminarse mediante el control de las potenciales a través de toda el área. Un sistema que combina una cuadrícula horizontal y una serie de varillas de tierra verticales que penetran en suelos más bajos tienen las siguientes ventajas:
  1. Si bien los conductores horizontales (rejilla) son más efectivos para reducir el peligro de escalones altos y tensiones de contacto en la superficie de la tierra, siempre que la red se instale a poca profundidad (generalmente de 0,3 m a 0,5 m [12 a 18 pulgadas] por debajo del nivel del suelo, las varillas de tierra suficientemente largas estabilizan el rendimiento de dicho sistema combinado.
  2. Las varillas que penetran en el suelo de menor resistividad son mucho más efectivas para disipar las corrientes de falla siempre que se encuentre un suelo de dos o múltiples capas y la capa superior del suelo tenga una mayor resistividad que las capas inferiores.

## **Electrodos de tierra primarios y auxiliares**

En general, la mayoría de los sistemas de puesta a tierra utilizan dos grupos de electrodos de tierra. Los electrodos de tierra primarios son diseñados específicamente para propósitos de puesta a tierra. Los electrodos de tierra auxiliares son electrodos que comprenden varias estructuras metálicas subterráneas instaladas con fines distintos a la puesta a tierra primaria típica.

Los electrodos incluyen elementos tales como rejillas de tierra, conductores de contrapeso, varillas de tierra y pozos de tierra.

## **Aspectos básicos del diseño de cuadrículas**

- Un bucle conductor continuo debe rodear el perímetro para encerrar tanta área como sea posible. Esta medida ayuda a evitar una alta concentración de corriente y, por tanto, altos gradientes tanto en la red área y cerca de los extremos del cable que sobresalen. Incluir más área también reduce la resistencia de la rejilla de tierra.
- Dentro del bucle, los conductores se colocan típicamente en líneas paralelas y cuando sea práctico, a lo largo de las estructuras para proporcionar conexiones a tierra cortas.
- Un sistema de rejilla típico puede incluir conductores de cobre desnudo 4/0 enterrados a 0.3 m a 0,5 m (12 pulgadas a 18 pulgadas.) Por debajo del nivel, espaciados de 3 m a 7 m (10 pies a 20 pies), en un patrón de cuadrícula.

Las varillas de tierra pueden estar en las esquinas de la cuadrícula y en los puntos de unión a lo largo del perímetro. En suelos multicapa o de alta resistividad, puede ser útil utilizar varillas más largas o varillas instaladas en puntos de unión adicionales.

- La proporción de los lados de las mallas de la cuadrícula suele ser de 1:1 a 1:3, a menos que sea preciso (computador)El análisis asistido justifica valores más extremos.

## Selección de conductores y conexiones

### *Requisitos básicos*

En la evaluación de qué material conductor y qué tamaño de conductor o qué límite de temperatura máxima permitida necesita aplicarse en situaciones de diseño individual son:

- Tener suficiente conductividad, de modo que no contribuya sustancialmente a las diferencias de voltaje locales.
- Resista la fusión y el deterioro mecánico bajo la combinación más adversa de una falla magnitud y duración.
- Sea mecánicamente confiable y robusto en un alto grado.
- Ser capaz de mantener su función incluso cuando se expone a la corrosión o al abuso físico.

### *Elección del material para conductores y problemas de corrosión relacionados*

- Cobre

El cobre es un material común que se utiliza para los sistemas de puesta a tierra. Conductores de cobre, además de su alta conductividad, tienen la ventaja de ser resistentes a la mayoría de la corrosión subterránea porque el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que probablemente estén enterrados en las proximidades.

- Acero revestido de cobre y chapado en cobre

El acero revestido de cobre y chapado en cobre son materiales comunes que se utilizan para los sistemas de puesta a tierra, especialmente donde el robo es un problema.

- Aluminio.

El aluminio rara vez se ha utilizado para rejillas de tierra. Existen las siguientes desventajas a considerar:

a) El propio aluminio puede corroerse en ciertos suelos. La capa de material de aluminio corroído no es conductiva para todos los propósitos prácticos de puesta a tierra.

b) El aluminio es anódico a muchos otros metales, incluido el acero y, si está interconectado a uno de estos metales en la presencia de un electrolito, el aluminio se sacrificará para proteger al otro metal.

- Acero.

Los conductores de acero o acero inoxidable y las varillas de tierra se pueden usar en aplicaciones donde las condiciones del suelo pueden ser perjudicial para el cobre. Por supuesto, tal diseño requiere que se preste atención a la corrosión del acero o acero inoxidable.

El uso de acero recubierto de zinc o acero inoxidable, en combinación con protección catódica, es típico de los sistemas de puesta a tierra de acero.

### **Factores de dimensionamiento del conductor**

- Se debe examinar cuidadosamente la posible exposición a un ambiente corrosivo. Incluso cuando el correcto el tamaño del conductor y el método de unión (conexión) seleccionado han satisfecho todas las pruebas IEEE Std 837.
- Puede ser prudente elegir un tamaño de conductor más grande para compensar alguna reducción gradual en la sección transversal del conductor durante la vida útil de diseño de la instalación donde el entorno del suelo tiende a promover la corrosión.
- Los cables de bajada del equipo a la red pueden estar sujetos a la corriente de falla total en la red, mientras que la rejilla divide esta corriente de modo que cada segmento de conductor en la rejilla sólo esté sujeto a una fracción de la corriente de falla total. Por lo tanto, los cables de bajada pueden tener que ser más grandes que los conductores de la red para tener suficiente ampacidad para la corriente de falla total.
- Los conductores de tierra que conducen la corriente del rayo rara vez requieren mayor consideración. El tamaño del conductor, que se selecciona de acuerdo con sus requisitos de corriente de falla, generalmente también es adecuado para llevar sobretensiones de corta duración causadas por rayos.

## Características del suelo

El comportamiento de un electrodo de tierra enterrado en el suelo se puede analizar mediante el circuito de la Figura 6. Como se muestra, la mayoría de los suelos se comportan como conductor de resistencia y como dieléctrico. Excepto para alta frecuencia que penetran en un material de suelo muy resistivo, la corriente de carga es insignificante en comparación con la corriente de fuga, y la tierra se puede representar por una resistencia pura.

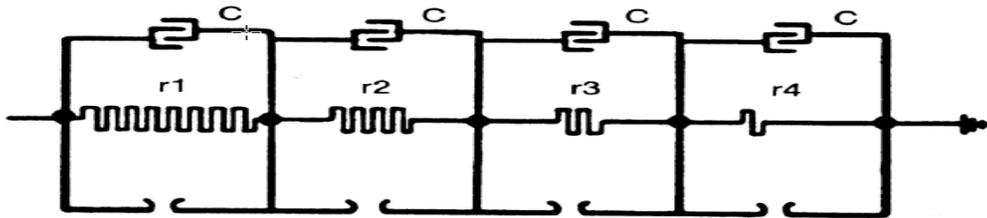


Figura 6. Modelo de Suelo

Fuente: (society, 2013).

## Medidas de resistividad

Se deben realizar pruebas para determinar si hay variaciones importantes de resistividad con la profundidad. El método de cuatro pines de Wenner, que se muestra en la Figura 7, es la técnica más utilizada. En resumen, cuatro sondas se introducen en la tierra. a lo largo de una línea recta, a distancias iguales  $a$ , conducidas a una profundidad  $b$ . El voltaje entre los dos electrodos internos externos (de potencial) se miden y se dividen por la corriente entre los dos electrodos (de corriente). todos para dar un valor de la resistencia  $R$ .

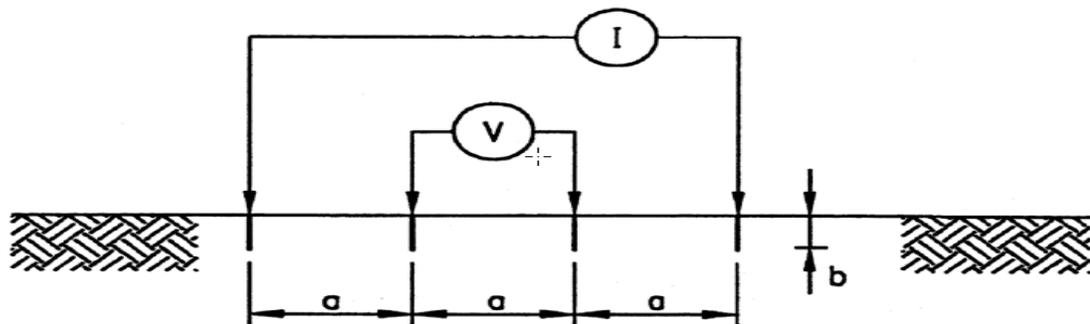


Figura 7. El método de cuatro clavijas de Wenner.

Fuente: (society, 2013).

El método de cuatro clavijas de Wenner es el método más utilizado. Hay un número de razones para esta popularidad. El método de cuatro pines obtiene los datos de resistividad del suelo para capas más profundas sin realizar las pruebas a esas capas. No se necesita equipo pesado para realizar la prueba de cuatro pines. Los resultados no son muy afectados por la resistencia de las clavijas de prueba o los agujeros creados al clavar las clavijas de prueba en el suelo.

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

Dónde

$\rho_a$  es la resistividad aparente del suelo en  $\Omega \cdot m$

$R$  es la resistencia medida en  $\Omega$

$a$  es la distancia entre electrodos adyacentes en m

$b$  es la profundidad de los electrodos en m

Si  $b$  es pequeño en comparación con  $a$ , como es el caso de las sondas que penetran en el suelo solo una distancia corta, la ecuación se puede reducir a:

$$\rho_a = 2\pi a R$$

### **Interpretación de las mediciones de resistividad del suelo.**

El objetivo básico es derivar un modelo de suelo que sea una buena aproximación del suelo real.

La resistividad del suelo varía lateralmente y con respecto a la profundidad, dependiendo de la estratificación del suelo. Los modelos de resistividad del suelo más utilizados son el modelo de suelo uniforme y el modelo de suelo de dos capas.

Los modelos de suelo de dos capas suelen ser una buena aproximación de muchas estructuras de suelo, mientras que los modelos de suelo de múltiples capas se pueden utilizar para condiciones de suelo más complejas.

## **Diseño del sistema de puesta a tierra.**

### **Criterios de diseño.**

Para redes de tierra igualmente espaciadas, el voltaje de la malla aumentará a lo largo de las mallas desde el centro hasta la esquina de la cuadrícula. La tasa de este aumento dependerá del tamaño de la cuadrícula, el número y la ubicación del terreno, varillas, espaciamiento de conductores paralelos, diámetro y profundidad de los conductores, y el perfil de resistividad de tierra.

- Se describe algunas de las limitaciones encontradas en la instalación de una rejilla. Por ejemplo, la excavación de zanjas en las que se coloca el material conductor se limita el espacio entre conductores a aproximadamente 2 m o más.
- Los espaciamientos típicos de los conductores varían de 3 m a 15 m, mientras que las profundidades típicas de la cuadrícula oscilan entre 0,5 m a 1,5 m.
- Para los conductores típicos que van desde 2/0AWG (67 milímetros<sup>2</sup>) hasta 500 kcmil (253 mm<sup>2</sup>), el diámetro del conductor tiene un efecto insignificante sobre el voltaje de la malla.
- El área del sistema de puesta a tierra es el factor geométrico más importante para determinar la resistencia de la rejilla. Cuanto mayor sea el área conectada a tierra, menor será la resistencia de la rejilla y, por lo tanto, menor será la GPR.

### **Duración de la falla ( $t_f$ ) y duración de la descarga ( $t_s$ ).**

Normalmente se supone que la duración de la falla y la duración de la descarga son iguales, a menos que la duración de la falla sea la suma de choque sucesivo, como los de reconexiones. La selección de  $t_f$  debe reflejar un tiempo de limpieza rápido para líneas de transmisión. Las opciones  $t_f$  y  $t_s$  debe resultar en la combinación más pesimista de factor de disminución de corriente de falla y permisible corriente corporal. Valores típicos para  $t_f$  y  $t_s$  rango de 0.25 s a 1.0 s.

### **Resistividad del suelo ( $\rho$ ).**

La resistencia de la red y los gradientes de voltaje dentro de una subestación dependen directamente de la resistividad del suelo. Debido a que en realidad la resistividad del suelo variará tanto horizontal como verticalmente.

### **Resistividad de la capa superficial ( $\rho_s$ ).**

Una capa de material de superficie ayuda a limitar la corriente del cuerpo al agregar resistencia al cuerpo equivalente.

### **Refinamiento del diseño preliminar.**

Si los cálculos basados en el diseño preliminar indican que pueden existir diferencias de potencial peligrosas, se deben estudiar y aplicar las siguientes posibles soluciones cuando sea apropiado:

- Disminuir la resistencia total de la red: una disminución en la resistencia total de la red disminuirá el GPR máximo y, por tanto, el voltaje máximo transferido. La forma más efectiva de disminuir la cuadrícula del suelo. La resistencia es aumentando el área ocupada por la rejilla. Se pueden usar varillas o pozos de perforación profunda si el área disponible es limitada y las varillas penetran en capas de resistividad más baja.
- Espaciamientos de rejilla más estrechos: al emplear un espaciamiento más estrecho de los conductores de rejilla, la condición de la placa continua se puede acercar más. Los potenciales peligrosos pueden, por lo tanto, eliminarse a un costo. El problema en el perímetro puede ser más difícil, especialmente en una pequeña área donde la resistividad es alta. Sin embargo, normalmente es posible enterrar la rejilla conductora de tierra fuera de la línea de la cerca, para asegurar que las pendientes más pronunciadas inmediatamente fuera este perímetro de la cuadrícula no contribuye a los contactos táctiles más peligrosos. Otro eficaz y Una forma económica de controlar las pendientes es aumentar la densidad de las varillas de tierra en el perímetro. Esto la densidad puede disminuir hacia el centro de la cuadrícula. Otro enfoque para controlar el perímetro gradientes y potenciales de paso es enterrar dos o más conductores paralelos alrededor del perímetro en

sucesivamente mayor profundidad a medida que aumenta la distancia desde la subestación. Otro enfoque es variar el espaciado de los conductores de la red con conductores más cercanos cerca del perímetro de la red

- Desviar una mayor parte de la corriente de falla a otras rutas: conectando cables de tierra aéreos de las líneas de transmisión o disminuyendo las resistencias de la zapata de la torre en las proximidades de la subestación, parte de la corriente de falla se desviará de la red.
- Aumente los voltajes tolerables de toque y paso: los voltajes tolerables de toque y paso pueden ser aumentado al reducir el tiempo de eliminación de fallas, use un material de superficie con una resistividad más alta o aumentar el grosor del material de la superficie.

### **Uso de análisis por computadora en el diseño de sistemas de puesta tierra**

Se describen algoritmos informáticos para modelar sistemas de puesta a tierra. En general, estos algoritmos se basan en:

- Modelado de los componentes individuales que componen el sistema de puesta a tierra (conductores de rejilla, varillas, etc.).
- Formar un conjunto de ecuaciones que describan la interacción de estos componentes.
- Resolver la corriente de falla a tierra que fluye desde cada componente hacia la tierra.
- Calcular el potencial en cualquier punto de superficie deseado debido a todos los componentes individuales.
- La precisión del algoritmo informático depende de qué tan bien el modelo de suelo y el diseño refleja las condiciones reales del campo.

Hay varias razones que justifican el uso de algoritmos informáticos más precisos en el diseño de sistema de puesta a tierra. Estas razones incluyen:

- Los parámetros superan las limitaciones de las ecuaciones.
- Se prefiere un modelo de suelo de dos o múltiples capas debido a variaciones significativas en la resistividad del suelo.

- Los espaciamentos desiguales entre conductores de rejilla o varillas de tierra no se pueden analizar utilizando los métodos aproximados de 16,5.
- Se puede desear más flexibilidad para determinar los puntos de peligro locales.
- Presencia de estructuras metálicas enterradas o conductor no conectado al sistema de puesta a tierra, que introduce complejidad al sistema.

### **Construcción de un sistema de puesta a tierra**

El método de construcción, o la combinación de métodos elegidos, dependerá de varios factores, tales como tamaño de una rejilla, tipo de suelo, tamaño del conductor, profundidad del entierro, disponibilidad de equipo, costo de mano de obra y cualquier restricción física o de seguridad debido a estructuras existentes cercanas o equipos energizados.

Hay dos métodos comúnmente empleados para instalar la rejilla de tierra. Estos son el método de trinchera y el método de arado de cables. Ambos métodos emplean máquinas.

## **Criterio “Diseño de electrodos de puesta a tierra de contrapeso revestidos con material de baja resistividad para torres de transmisión”.**

### **Palabras claves**

Puesta a tierra más eficaz (MEG), circuito equivalente de elemento parcial (PEEC), aumentos de potencial de tierra (GPR), electrodos de contrapeso, compuestos potenciadores de la puesta a tierra, impedancia de puesta a tierra, impulso de rayo, sistemas de transmisión.

### **Introducción.**

Normalmente, el sistema de protección contra rayos de la estructura y el sistema de energía tienen un electrodo de tierra como parte importante. Funciona para disipar la corriente a tierra. Está diseñado para dispositivos eléctricos y de seguridad personal. El sistema de puesta a tierra para la línea de transmisión debe tener una caída de voltaje baja cuando hay un rayo. La mejora del sistema de puesta a tierra debe centrarse en lograr una baja impedancia de puesta a tierra debido a la reducción de la tasa de descarga disruptiva. Por lo tanto, la impedancia de conexión a tierra adecuada debe cumplirse al menos en las normas y reglamentos especificados. Ahora, la medición de la impedancia de conexión a tierra se puede realizar con el instrumento de prueba.

El aumento de cables de tierra enterrados hace que la impedancia sea baja cuando la resistividad de tierra es alta. Esta es una práctica básica para mejorar la puesta a tierra de la línea de transmisión. En la Figura 8 se muestra el sistema de puesta a tierra de la torre de transmisión. El ancho (D) de la línea de transmisión debe aumentarse al valor apropiado. Para 115 kV es de 24 metros y para sistemas de 230 kV es de 40 metros

En las áreas con problemas, que es una alta resistividad del suelo de más de 1000 ohmios-metro, las configuraciones apropiadas para el contrapeso son las configuraciones de electrodo de tierra de cuatro y ocho brazos. Además, en el área de resistividad de tierra muy alta (más de 3000 ohm-metro) los materiales de baja resistividad, es decir, los compuestos que mejoran la puesta a tierra se proponen que el material de puesta a tierra (MEG) más eficaz se encierre con el electrodo de tierra para reducir impedancia de puesta a tierra,

porque el electrodo de ocho patas no puede proporcionar el requisito de impedancia de impulso baja.

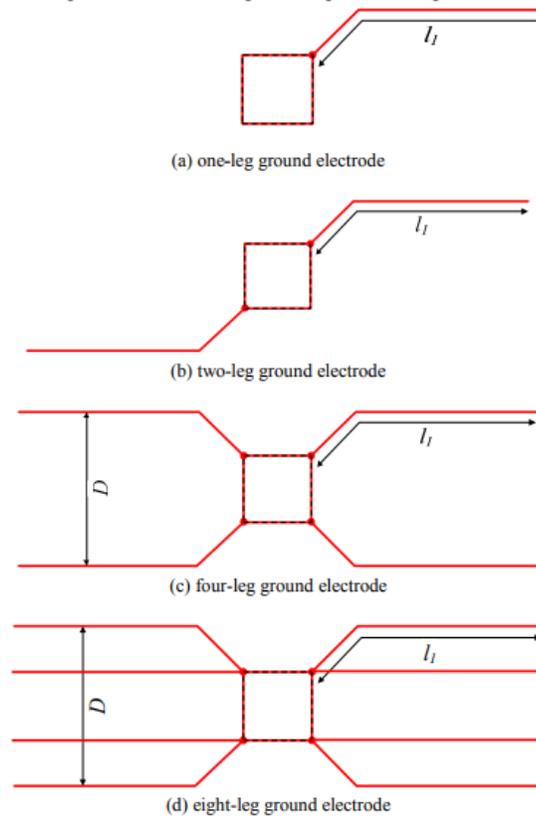


Figura 8. Sistemas de tierra utilizado para torres de transmisión.

Fuente: (Sirachansawang, 2019)

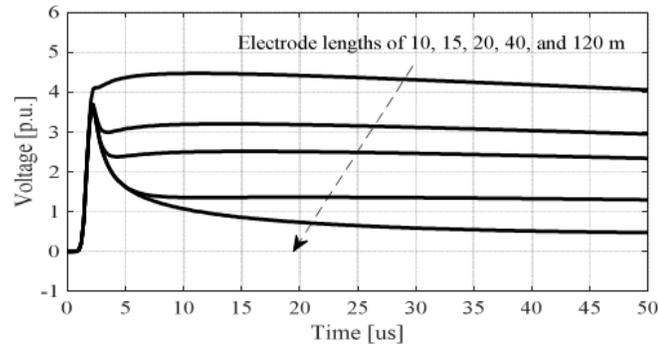
El análisis electromagnético numérico se utiliza para el electrodo de contrapeso. Estimar con el método PEEC para GPR (aumentos de potencial de tierra) del contrapeso de tierra para el éxito de la impedancia indicada en caso de alta resistividad de tierra. Se investigan los resultados del revestimiento de MEG con electrodo de tierra.

### **Característica transitoria del contrapeso de aterrizaje.**

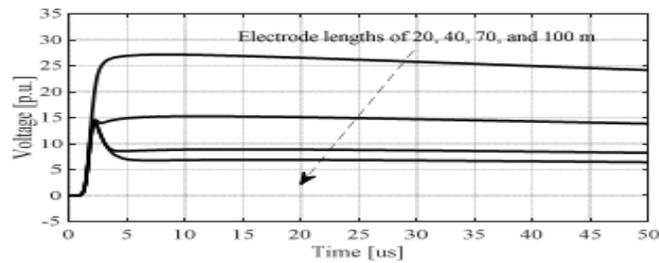
#### **Longitud efectiva.**

La longitud efectiva se establece como la longitud mínima si la longitud del electrodo de tierra aumenta más que este valor. El GPR no se reduce.

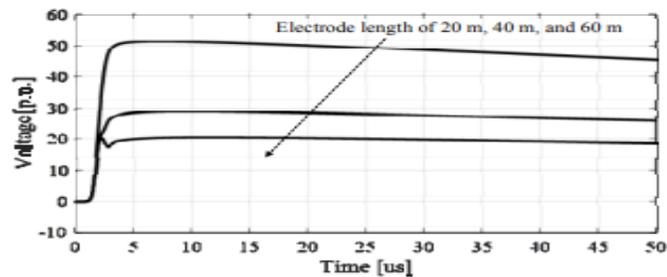
De la simulación por computadora en el electrodo de 4 patas, al variar las resistividades de tierra y las longitudes de los electrodos, el radio del electrodo de 3,27 milímetros y considerando la corriente de rayo negativa normalizada. Cuando se alcanza la longitud efectiva, aumentar la longitud no es el punto principal, porque el GPR de tierra no se reduce como se ilustra en la Figuras 9 y 10. Se observa que la alta resistividad del terreno hace que la longitud efectiva sea alta.



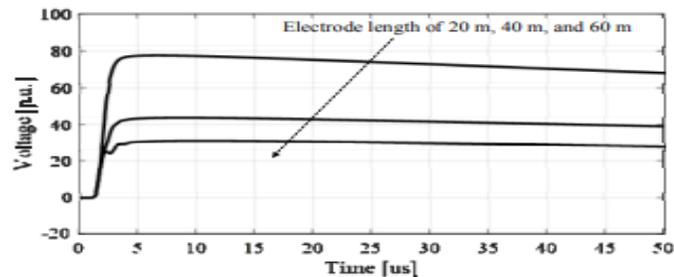
(a) Ground resistivity of 100 ohm-meter



(b) Ground resistivity of 1000 ohm-meter



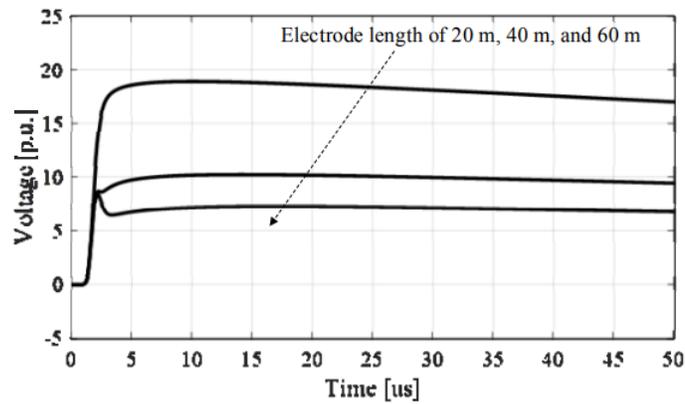
(c) Ground resistivity of 2000 ohm-meter



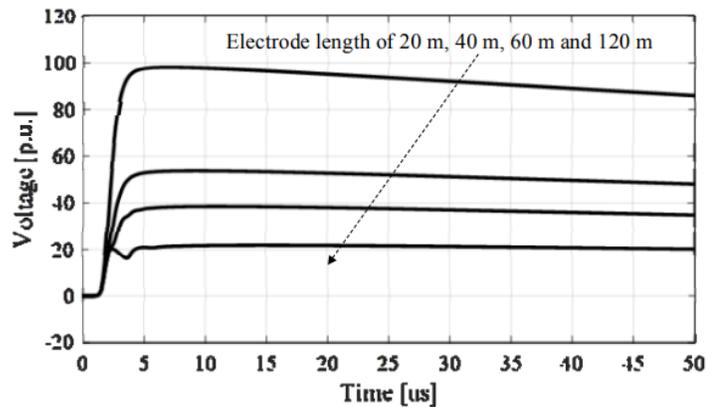
(d) Ground resistivity of 3000 ohm-meter

Figura 9. GPR de contrapeso de cuatro patas con longitudes y la primera inyección de impulso negativo.

Fuente: (Sirachansawang, 2019)



(a) Ground resistivity of one thousand ohm-meter



(b) Ground resistivity of five thousand ohm-meter

Figura 10. GPR de contrapeso de ocho patas con longitudes y la primera inyección de impulso negativo.

Fuente: (Sirachansawang, 2019)

## **Criterio “Un estudio de arreglos de puesta a tierra compuestos por electrodos verticales para dos modelos de suelo estratificado en capas”.**

### **Palabras claves.**

Línea de transmisión (LT), modelo electromagnético (EM), toma de tierra, respuesta en el dominio del tiempo, enfoque de línea de transmisión, suelo de dos capas, varilla vertical.

### **Introducción.**

Disminuir la impedancia de conexión a tierra es una opción adecuada para aumentar el rendimiento de un LT contra rayos. Para regiones con alta actividad de rayos y suelos de alta resistividad, hay que asegurar que un LT tenga un desempeño adecuado y una tasa de parada esperada por debajo de los valores límite estándar puede ser un verdadero desafío. Para obtener una vista previa de la respuesta de las soluciones propuestas, es común utilizar rutinas numéricas para estimar los parámetros de puesta a tierra asociados al problema.

El uso de conductores horizontales para las disposiciones de puesta a tierra de las torres LT es una práctica muy común, pero puede dar lugar a aspectos indeseables para situaciones de suelos de alta resistividad. Algunos trabajos proponen métodos alternativos para superar estos problemas, y el uso de varillas verticales en tales técnicas es algo inusual. Uno de los principales obstáculos para la elección de electrodos verticales para componer la disposición de puesta a tierra de las torres LT es el requisito de una perforación del suelo. Sin embargo, las técnicas de perforación avanzaron de muchas maneras en los últimos años y ahora se puede considerar la implementación de varillas verticales profundas, de 20 m de profundidad, a un costo relativamente bajo. En particular, donde la capa más profunda tiene una resistividad eléctrica más baja en comparación con la parte superior, el uso de varillas verticales profundas puede conducir a valores bajos de impedancia de puesta a tierra a un costo factible para su implementación.

Para comprender las características de dicha configuración, en este trabajo se presenta un análisis computacional. Se basa en simulaciones numéricas, procedimientos derivados de la teoría LT para estimar la impedancia de puesta a tierra de electrodos verticales en un modelo de suelo de dos capas, que se comparan con un programa comercial que considera la forma completa de las ecuaciones de Maxwell, es decir, una técnica EM rigurosa.

Además, se proporciona un estudio práctico, basado en mediciones de resistividad del suelo realizadas en una torre LT de 230 kV.

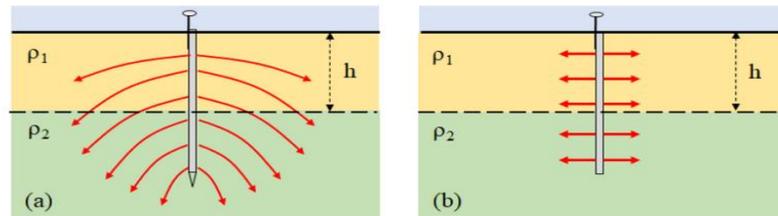


Figura 11. Densidad de corriente a través de la extensión de la varilla en un suelo de dos capas: (a) una situación más realista y (b) la condición simplificada donde se omite la influencia de una capa sobre otra.

Fuente: (Batista, 2019).

### **Modelo LT para la estimación de impedancia armónica de puesta a tierra de electrodos horizontales y verticales en un suelo de dos capas**

- Formulación para un electrodo vertical único y múltiple.

Un procedimiento LT para calcular la impedancia de puesta a tierra de una varilla vertical se puede derivar de una metodología simplificada propuesta por CJ Blattner. En muchas situaciones prácticas, es posible suponer que la distribución de corriente en los alrededores de un electrodo vertical es homogénea, como se ilustra en Figura 11. Este procedimiento considera que se puede despreciar la influencia de las partes conductoras enterradas en cada capa, lo que lleva a una conclusión conveniente señalada por EJ Rogers: dos resistencias, que representan cada parcela del conductor sumergido en cada capa del suelo, conectadas en paralelo derivan en una resistencia de puesta a tierra equivalente con la misma resistividad eléctrica equivalente ( $\rho_{eq}$ ) propuesta por Blattner, como se ilustra en Figura 12.

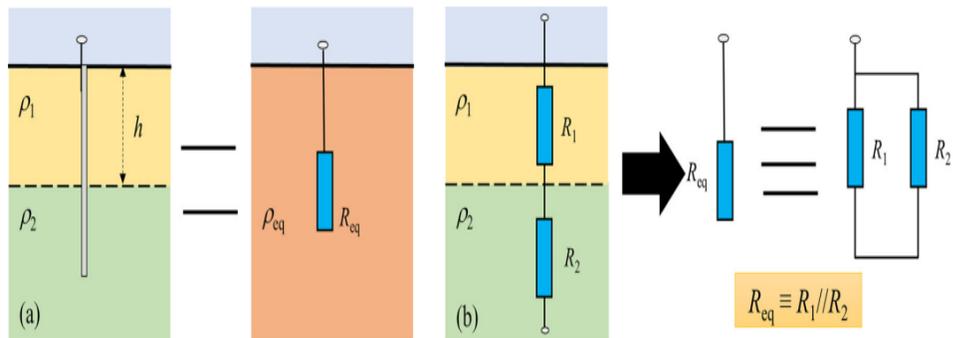


Figura 12. Consecuencias de ignorar la influencia entre las capas: (a) la posibilidad de representar el problema como un resistor equivalente único sumergido en un suelo de resistividad equivalente y (b) calcular su valor por el paralelo de dos resistencias, cada una representando una capa del suelo.

Fuente: (Batista, 2019).

Para transitorios rápidos, como los relacionados con los rayos, el comportamiento de conexión a tierra se representa mejor mediante una impedancia. Si asumimos la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) con los mismos valores para cada medio, la capacitancia e inductancia correspondientes para cada capa son las mismas para este modelo LT. En consecuencia, la impedancia de tierra se puede modelar como dos circuitos LT en serie. Esta situación se ilustra en Figura 13, que evidencia los parámetros eléctricos del suelo y la representación final del circuito.

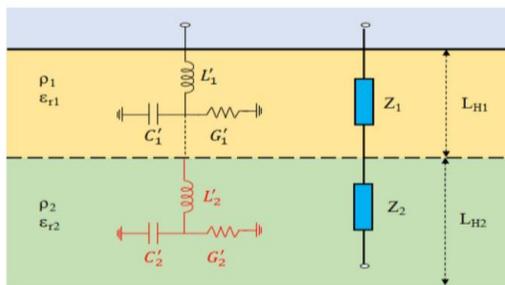


Figura 13. Varilla vertical modelada como dos circuitos TL en serie para una situación de suelo de dos capas.

Fuente: (Batista, 2019).

**Diseño de electrodos verticales y horizontales para el sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión.**

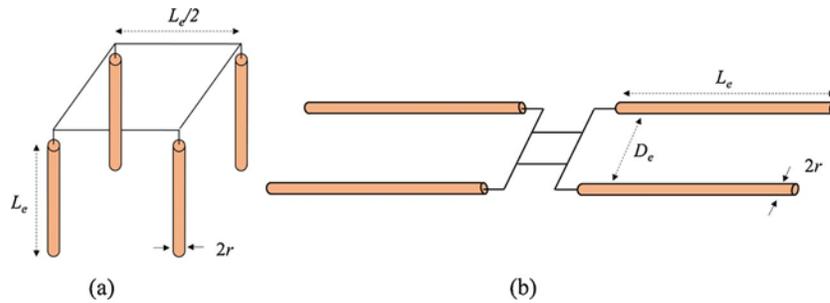


Figura 14. Disposiciones de puesta a tierra en líneas de transmisión compuestas por (a) cuatro electrodos verticales y (b) cuatro conductores horizontales.

Fuente: (Batista, 2019).

- **Formulación sin electrodo horizontal y configuraciones compuestas sin alambres de contrapeso.**

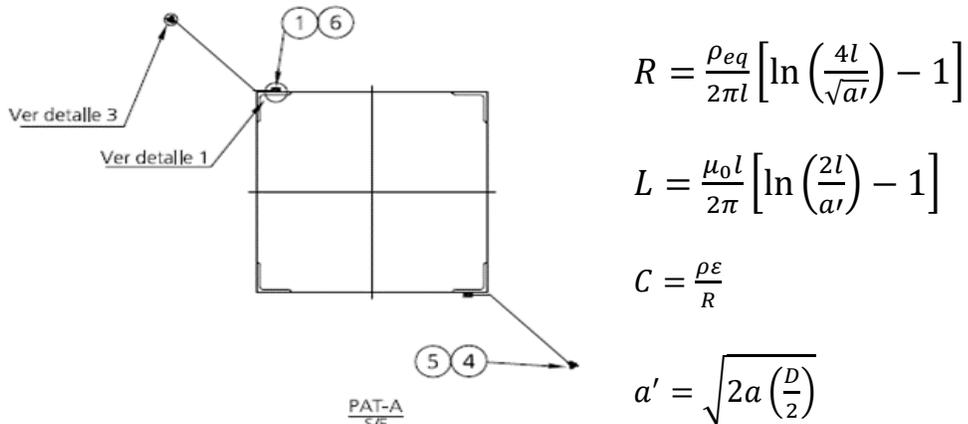


Figura 15. Configuración tipo PAT-A (sin contrapeso)

Fuente: (Kamal, 2020)

Donde:

$\rho$  = resistividad del terreno

$\epsilon$  = permitividad del terreno

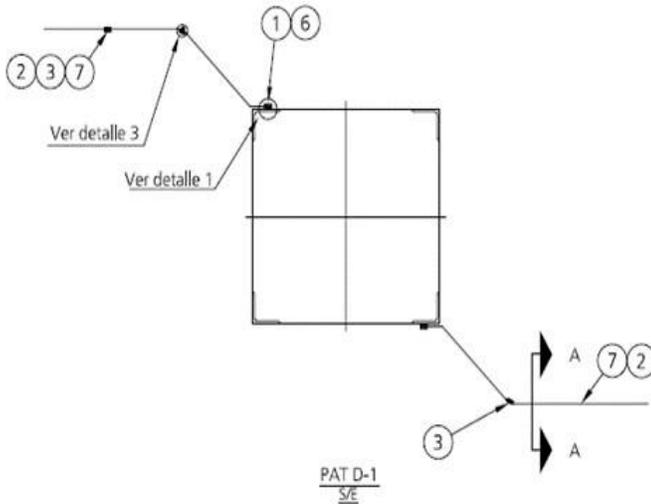
$\mu$  = permeabilidad del terreno

$l$  = longitud del electrodo

**a** = radio del electrodo

**D** = distancia entre los electrodos

- **Formulación para dos electrodos horizontales y configuraciones compuestas por dos alambres de contrapeso.**



$$R = \frac{\rho_{eq}}{\pi l} \left[ \ln \left( \frac{4l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right]$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{a} \right) - 1 \right]$$

$$C = \frac{\rho \varepsilon}{R}$$

Figura 16. Configuración tipo PAT- D1 (contrapeso simple, de 2 brazos)

Fuente: (Kamal, 2020)

Ambos contrapesos de acuerdo a la teoría de circuito se encuentran en paralelo. Los parámetros resultantes de la configuración se hallarían de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$R' = \frac{R}{2}$$

$$L' = \frac{L}{2}$$

$$C' = 2C$$

Donde:

$\rho$  = resistividad del terreno

**l** = longitud del electrodo

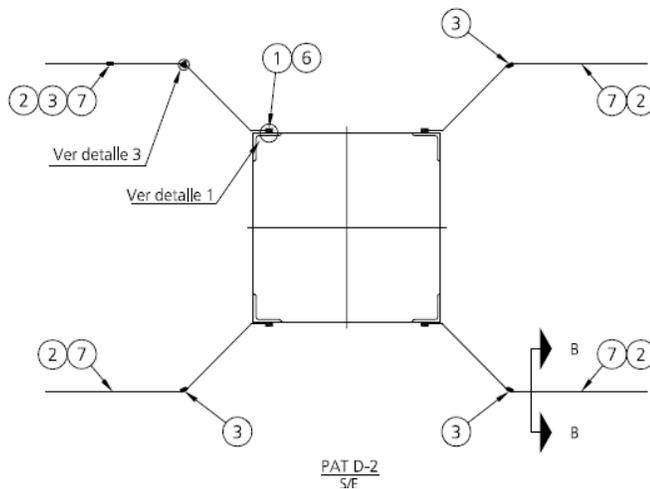
$\mu$  = permeabilidad del terreno

**a** = radio del electrodo

$\varepsilon$  = permitividad del terreno

**D** = distancia entre los electrodos

**Formulación para cuatro electrodos horizontales y configuraciones compuestas por cuatro alambres de contrapeso.**



$$R = \frac{\rho_{eq}}{\pi l} \left[ \ln \left( \frac{4l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right]$$

Ec.45.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{a'} \right) - 1 \right]$$

Ec.46.

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R} \quad \text{Ec.47.}$$

$$a' = \sqrt{2a \left( \frac{D}{2} \right)} \quad \text{Ec.48.}$$

Figura 17. Configuración tipo PAT- D2 (contrapeso simple, de 4 brazos)

Fuente: (Kamal, 2020)

Ambos contrapesos de acuerdo a la teoría de circuito se encuentran en paralelo. Los parámetros resultantes de la configuración se hallarían de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$R' = \frac{R}{2}$$

$$L' = \frac{L}{2}$$

$$C' = 2C$$

Donde:

$\rho$  = resistividad del terreno

$a$  = radio del conductor

$\mu$  = permeabilidad del terreno

$d$  = profundidad del contrapeso

$\epsilon$  = permitividad del terreno

$D$  = distancia entre los electrodos

$l$  = longitud del contrapeso

## **Capítulo 2**

### **“Manual de Diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua”**

#### **Resumen del capítulo**

Este capítulo trata de elaborar un manual para diseñar un sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua, se comienza de una base por medio de la normativa IEEE 80 que tiene establecido un diagrama de flujo donde representa una serie de pasos para diseñar el sistema de puesta a tierra en las subestaciones, dicho diagrama de flujo enumera en orden los pasos y el procedimiento a seguir para completar estrictamente el diseño, el procedimiento del capítulo luego de haber reflejado y obtenido un ejemplo para diseñar sistemas de puesta a tierra se adquiere ese ejemplo para poder diseñar un diagrama de flujo para el diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua donde se modificaran algunos parámetros y procedimientos según los efectos y criterios que están sometidos las líneas de transmisión.

## Diagrama de flujo para el diseño de puesta a tierra en subestaciones normativa IEEE 80

### Procedimiento de diseño

El diagrama de flujo de la Figura 18 ilustra las secuencias de pasos para diseñar la cuadrícula de tierra. Los parámetros que se muestran en el diagrama de bloques se identifican en el índice presentado en la Tabla 3.

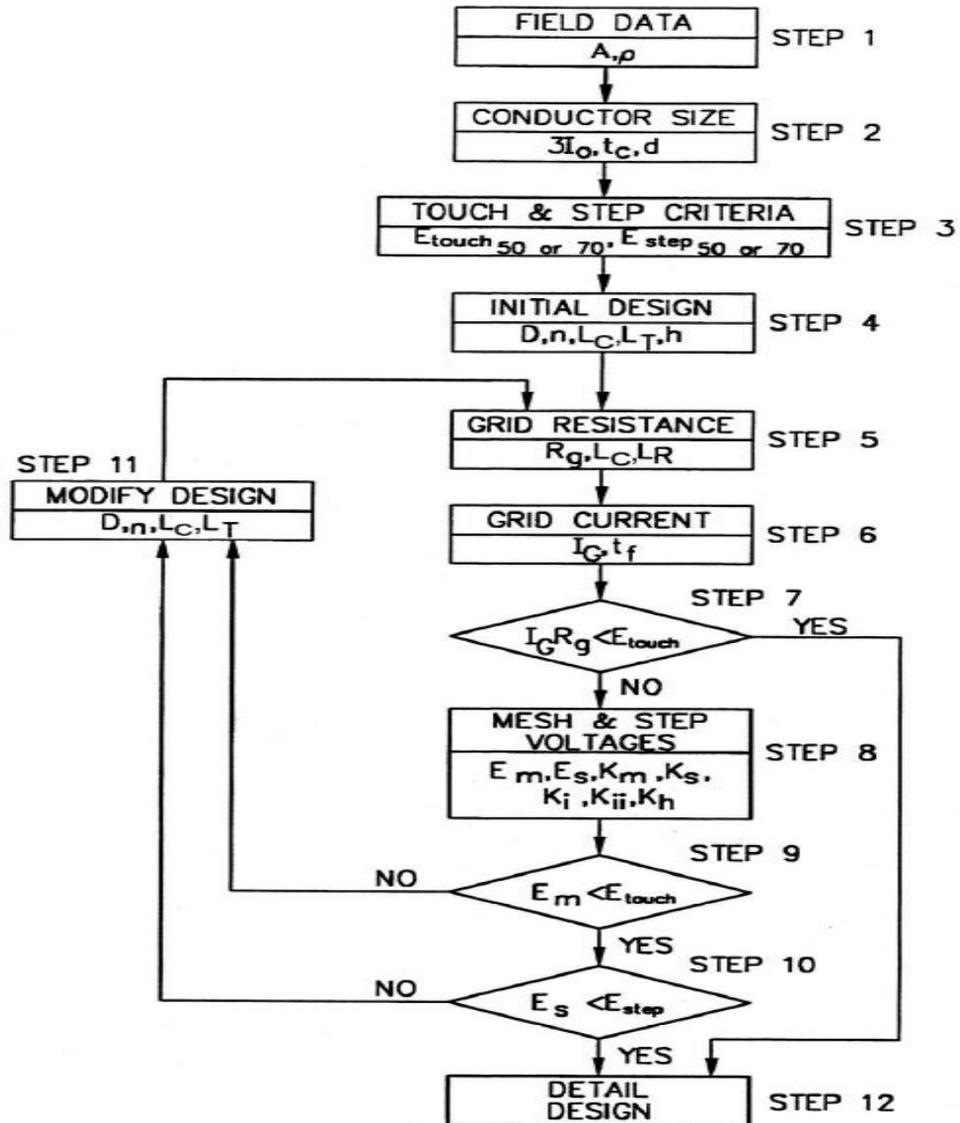


Figura 18. Diagrama de bloques del procedimiento del diseño.

Fuente: (society, 2013)

Tabla 3. Índice de los parámetros de diseño.

Fuente: (society, 2013).

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Numero Cap</b>
<b>P</b>	Resistencia del suelo, $\Omega$ -m	13
<b>Ps</b>	Resistividad de la capa superficial, $\Omega$ -m	7,4,12.5
<b>3I<sub>0</sub></b>	Corriente de falla simétrica en subestación para dimensionamiento de conductores, A	15.3
<b>A</b>	Superficie total delimitada por rejilla de tierra, m <sup>2</sup>	14.2
<b>C<sub>s</sub></b>	Factor de reducción de la capa superficial	7.4
<b>D</b>	Diámetro del conductor de rejilla, m	16.5
<b>D</b>	Espacio entre conductores paralelos, m	16.5
<b>Df</b>	Factor de disminución para determinar IG	15.1,15.10
<b>D<sub>m</sub></b>	Distancia máxima entre dos puntos cualesquiera de la cuadrícula, m	16.5
<b>E<sub>m</sub></b>	Voltaje de malla en el centro de la malla de esquina para el método simplificado, V	16.5
<b>E<sub>s</sub></b>	Paso de voltaje entre un punto por encima de la esquina exterior de la cuadrícula y un punto de 1 m diagonalmente fuera de la cuadrícula para el método simplificado, V	16.5
<b>E<sub>step50</sub></b>	Voltaje de paso tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal, V	8.3
<b>E<sub>step70</sub></b>	Voltaje de paso tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal, V	8.3
<b>E<sub>touch50</sub></b>	Voltaje de contacto tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal, V	8.3
<b>E<sub>touch70</sub></b>	Voltaje de contacto tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal, V	8.3
<b>E<sub>mm-touch50</sub></b>	Voltaje de contacto metal-metal tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal, V	8.4
<b>E<sub>mm-touch70</sub></b>	Voltaje de contacto metal-metal tolerable para humanos con 70 kg de peso corporal, V	8.4
<b>H</b>	Profundidad de los conductores de la rejilla de tierra, m	14.2
<b>h<sub>s</sub></b>	Espesor de la capa superficial, m	7.4
<b>I<sub>G</sub></b>	Corriente de red máxima que fluye entre la red de tierra y la tierra circundante Corriente de red máxima que fluye entre la red de tierra y la tierra circundante	15.1
<b>I<sub>g</sub></b>	Corriente de red simétrica, A	15.1
<b>K</b>	Factor de reflexión entre diferentes resistividades	7.4
<b>K<sub>h</sub></b>	Factor de ponderación correctivo que enfatiza los efectos de la profundidad de la cuadrícula, método simplificado	16.5

<b>K<sub>i</sub></b>	Factor de corrección para geometría de cuadrícula, método simplificado	16.5
<b>K<sub>ii</sub></b>	Factor de ponderación correctivo que se ajusta a los efectos de los conductores internos en la esquina malla, método simplificado	16.5
<b>K<sub>m</sub></b>	Factor de espaciamiento para voltaje de malla, método simplificado	16.5
<b>K<sub>s</sub></b>	Factor de separación para voltaje escalonado, método simplificado	16.5
<b>L<sub>c</sub></b>	Longitud total del conductor de red, m	14.3
<b>L<sub>M</sub></b>	Longitud efectiva de L <sub>c</sub> + L <sub>R</sub> Para voltaje de malla, m	16.5
<b>L<sub>R</sub></b>	Longitud total de las varillas de tierra, m	16.5
<b>L<sub>r</sub></b>	Longitud de la varilla de tierra en cada ubicación, m	14.3,16.5
<b>L<sub>S</sub></b>	Longitud efectiva de L <sub>c</sub> + L <sub>R</sub> Para voltaje de escalonado, m	16.5
<b>L<sub>T</sub></b>	Longitud efectiva total del conductor del sistema de puesta a tierra, incluida la rejilla y las varillas de puesta a tierra, m	14.2
<b>L<sub>x</sub></b>	Longitud máxima del conductor de rejilla en la dirección x, m	16.5
<b>L<sub>y</sub></b>	Longitud máxima de los conductores de la red en la dirección y, m	16.5
<b>N</b>	Factor geométrico compuesto por factores n <sub>a</sub> , n <sub>b</sub> , n <sub>c</sub> y n <sub>d</sub>	16.5
<b>n<sub>R</sub></b>	Número de varillas colocadas en el área, A	14.3
<b>R<sub>g</sub></b>	Resistencia del sistema de puesta a tierra, Ω	14.1 a 14.4
<b>S<sub>f</sub></b>	Factor de división de corriente de falla (factor de división) (ver: factor de división de corriente de falla)	15.1
<b>t<sub>c</sub></b>	Duración de la corriente de falla para dimensionar el conductor de tierra, s	11.3
<b>t<sub>r</sub></b>	Duración de la corriente de falla para determinar el factor de disminución, s	15.10
<b>t<sub>s</sub></b>	Duración de la descarga para determinar la corriente corporal permitida, s	5.2 a 6.3

## Diagrama de flujo para el Diseño de Puesta a Tierra en Líneas de Trasmisión.

### Procedimiento de diseño

El diagrama de flujo siguiente las secuencias de pasos para diseñar la cuadrícula de tierra en líneas de transmisión. Los parámetros que se muestran en el diagrama de flujo se identifican en el índice presentado en la Tabla 4.

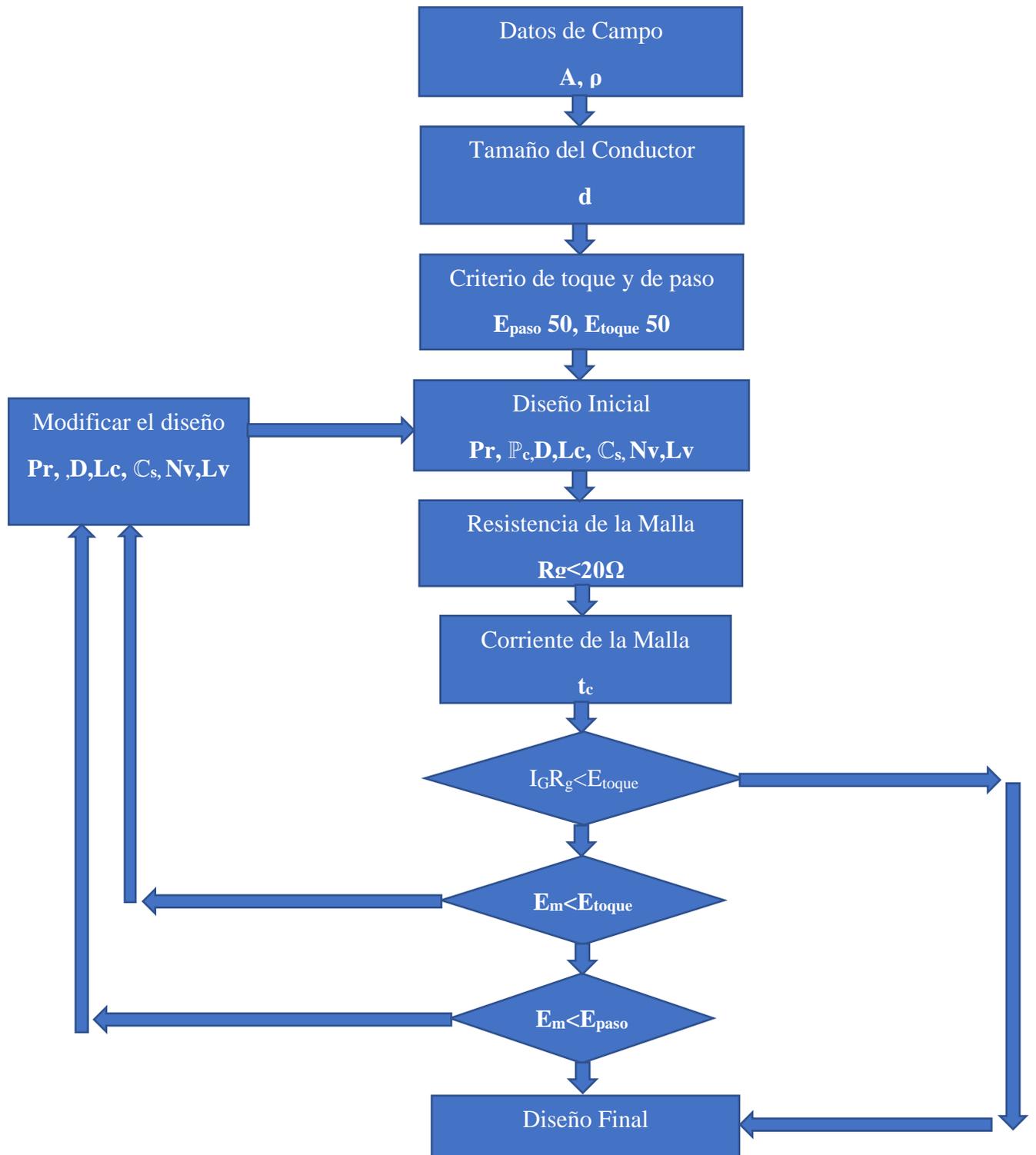


Tabla 4. Índice de los parámetros de diseño de líneas de transmisión.

Fuente: (society, 2013).

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
<b>P</b>	Resistencia del suelo, $\Omega$ -m
<b><math>\rho_s</math></b>	Resistividad de la capa superficial, $\Omega$ -m
<b>A</b>	Área de la cuadrícula, $m^2$
<b>d</b>	Dimensionamiento de conductores
<b>D</b>	Espacio entre conductores de contrapeso paralelos, m
<b>E<sub>step50</sub></b>	Voltaje de paso tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal, V
<b>E<sub>touch50</sub></b>	Voltaje de toque tolerable para humanos con 50 kg de peso corporal, V
<b>H</b>	Profundidad de la primera capa de suelo, m
<b>P<sub>r</sub></b>	Profundidad de la cuadrícula, m
<b>P<sub>c</sub></b>	Proporción de los lados de la cuadrícula
<b>L<sub>C</sub></b>	Longitud de contrapesos, m
<b>C<sub>s</sub></b>	Capa de material de la superficie, m
<b>L<sub>v</sub></b>	Longitud de conductores verticales, m
<b>N<sub>v</sub></b>	Numero de Varillas verticales
<b>R<sub>g</sub></b>	Resistencia del sistema de puesta a tierra, $\Omega$
<b>t<sub>c</sub></b>	Duración de la corriente de falla para dimensionar el conductor de tierra, s
<b>t<sub>r</sub></b>	Duración de la corriente de falla para determinar el factor de disminución, s

### Paso 1: Área de la cuadrícula (A)

El área del sistema de puesta a tierra es el factor geométrico más importante para determinar la resistencia de la cuadrícula. Cuanto mayor sea el área conectada a tierra, menor será la resistencia de la rejilla y, por lo tanto, menor será la GPR.

El problema del diseño del perímetro de la cuadrícula puede ser más difícil, especialmente en una pequeña área donde la resistividad es alta. Sin embargo, normalmente es posible enterrar la cuadrícula conductora de tierra con un perímetro que encierre el área de las patas de estructura de las torres de transmisión.

De manera que la cuadrícula dependerá del tipo de estructura de la torre de transmisión, en el caso de que la torre de transmisión cuente con una o dos patas de estructura entonces la cuadrícula encerrará la estructura, mientras que en el caso de que la torre de transmisión que cuente con 4 patas de estructura entonces los vértices de la cuadrícula se formará en donde este la posición de las 4 patas de estructura para el diseño inicial, cabe destacar que el perímetro de la cuadrícula podrá ser mayor si se necesita disminuir la resistencia.

### **Resistividad ( $\rho$ )**

Una prueba de resistividad del suelo determinará el perfil de resistividad, el método empleado para medir la resistividad del suelo será método de cuatro puntos: Wenner “sondas de prueba igualmente espaciadas” o Schlumberger “sondas de prueba desigualmente espaciadas”.

Se utiliza un telurómetro para obtener los datos de resistividad de suelo y los cálculos serán empleados por el programa IPI2win que está diseñado para la interpretación 1D de las curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil de tierra de múltiples capas, el modelamiento del suelo que se utilizará en IPI2win será un modelo de 2 capas.

Para el procedimiento de la medición de resistividad del suelo para líneas de transmisión se medirá en 3 ejes como lo muestra la figura, inicialmente el parámetro de la longitud de los electrodos “a” será espaciados a 1 m, se llevará en aumento la longitud de los electrodos en 1 m hasta llegar a un máximo de 15 m.

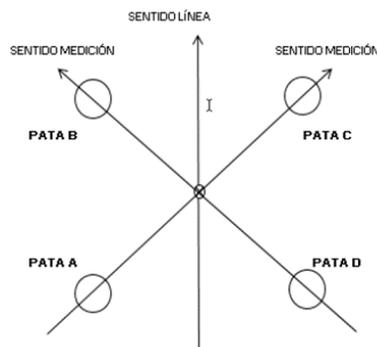
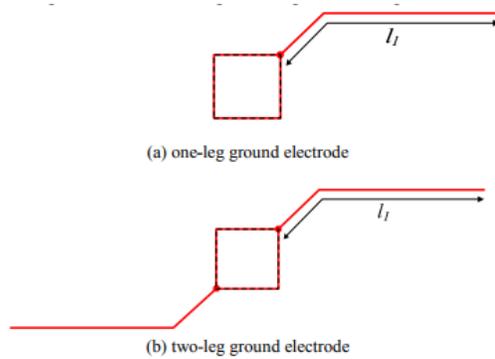


Figura 19. Ejes de medición de resistividad del suelo

Fuente: (Kamal, 2020)

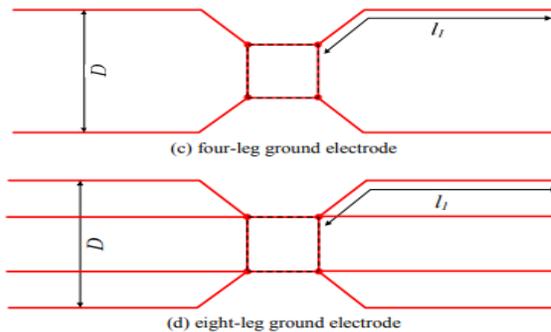
### Condiciones de diseño inicial (A) y ( $\rho$ )



- Para terrenos de resistividades menores de  $1000 \Omega/m$ , el diseño del sistema de puesta a tierra será de un brazo o 2 brazos de contrapeso.

Figura 20. Diseño de puesta a tierra con un y dos brazos de contrapeso

Fuente: (Sirachansawang, 2019)



- Para terrenos de resistividades de  $1000 \Omega/m$  a mayores, el diseño del sistema de puesta a tierra será de 4 brazo o 8 brazos de contrapeso.

Figura 21. Diseño de puesta a tierra con cuatro y ocho brazos de contrapeso

Fuente: (Sirachansawang, 2019)

### Paso 2: Dimensionamiento del conductor (d)

Para los conductores típicos de puesta a tierra van desde 2/0AWG ( $67 \text{ mm}^2$ ) hasta 500 kcmil ( $253 \text{ mm}^2$ ), el diámetro del conductor tiene un efecto insignificante sobre el voltaje de la malla.

### Tiempo duración de la falla ( $t_c$ )

Normalmente se supone que la duración de la falla asimétrica en líneas de transmisión dependerá del disparo de las protecciones, los valores típicos según el Ing. Kamal para  $t_c$  está en un rango de 0.1 s a 0.4 s.

El tipo de conductor será cobre o acero revestido de cobre y chapado en cobre, esto es debido a que el cobre es un material común que se utiliza para los sistemas de puesta a tierra, además de su alta conductividad, tienen la ventaja de ser resistentes a la mayoría de la corrosión subterránea porque el cobre es catódico con respecto a la mayoría de los otros metales que probablemente estén enterrados en las proximidades.

### **Paso 3: $E_{\text{paso}}$ 50, $E_{\text{toque}}$ 50**

Los voltajes tolerables de toque y paso se determinan mediante el programa CYMGrd, en la configuración del programa se seleccionará 50 kg, este valor yace debido a que es el peso corporal más común en América central.

**Paso 4:** El diseño preliminar se inicia habiendo dibujado en AutoCAD el diseño de puesta a tierra de líneas de transmisión según la resistividad del suelo y exportado el formato .dwg a el programa CYMGrd, además de haber obtenido los valores de dimensionamiento de conductor de varillas verticales y horizontales, los siguientes criterios para el diseño preliminar son:

### **Profundidad de la Cuadrícula ( $P_r$ )**

Un sistema de rejilla típico puede incluir conductores de cobre desnudo 4/0 enterrados a 0.3 m a 0,5 m (12 pulgadas a 18 pulgadas.)

### **Proporción de lados de la cuadrícula ( $P_c$ )**

La proporción de los lados de la cuadrícula suele ser de 1:1 a 1:3, a menos que sea preciso (computador).

### **Espacio entre conductores en paralelo de contrapeso (D)**

No existirá espacios de conductores de contrapeso cuando el diseño de puesta a tierra de la línea de transmisión sea con un o dos brazos de contrapeso.



Figura 22. Espacio entre conductores en paralelo de 1 y 2 brazos.

Fuente: (Sirachansawang, 2019)

Existirá espacios de conductores de contrapeso cuando el diseño de puesta a tierra de la línea de transmisión sea con cuatro u ocho brazos. El ancho (D) debe aumentarse al valor apropiado, para 115 kV es de 24 metros y para sistemas de 230 kV es de 40 metros



Figura 23. Espacio entre conductores en paralelo de 4 y 8 brazos.

Fuente: (Sirachansawang, 2019)

Debido que no hay un valor estipulado para líneas de transmisión de 138 kV, se interpolara los datos anteriores para obtener un valor específico:

Tabla 5. Interpolación de espaciamento de conductores en paralelo de contrapeso

Fuente: Elaboración propia

Voltaje LT (kV)	115 (x1)	138 (x)	230 (x0)
Espaciamento D (m)	24 (y1)	(y)	40 (y0)

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \text{ Ec.63.}$$

Donde:

y = Espacio entre conductores en paralelo de contrapeso deseado

y0 = Espacio entre conductores en paralelo de contrapeso de 230 kV

y1 = Espacio entre conductores en paralelo de contrapeso de 115 kV

x0 = Voltaje de línea de transmisión 230 kV

x1= Voltaje de línea de transmisión 115 kV

x= Voltaje de línea de transmisión 138 kV

**Se calcula:**

$$y = 40 + \frac{24 - 40}{115 - 230} (138 - 230)$$

$$y = 27.2 \text{ m}$$

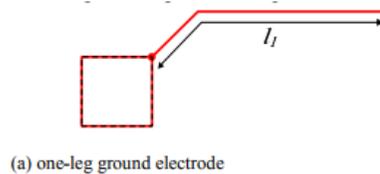
### **Longitud de conductores de contrapeso (L<sub>C</sub>)**

La longitud de los conductores de contrapeso para el diseño inicial es de 10 m hasta un máximo de longitud de 50 m debido que es el rango aceptable para la mantener la impedancia de la malla debido a cualquier falla atmosférica que genere altas frecuencias en el sistema de puesta a tierra.

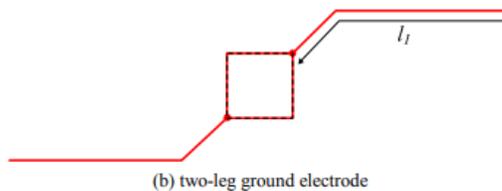
### **Capa de material de la superficie (C<sub>s</sub>)**

Los recubrimientos de grava o material de superficie, generalmente de aproximadamente 0,08 m a 0,15 m (3 a 6 pulgadas) de profundidad.

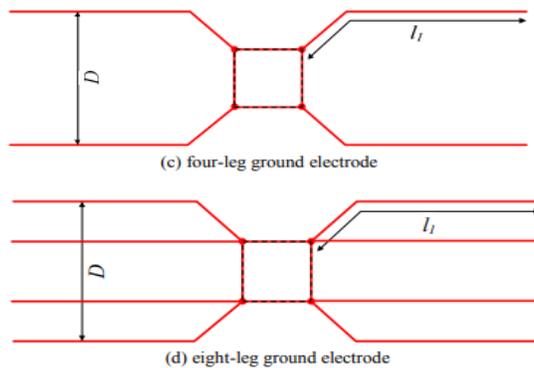
### **Numero de varillas verticales (N<sub>v</sub>)**



El número de varillas verticales para el diseño inicial de solo brazo de contrapeso es 1.



El número de varillas verticales para el diseño inicial de dos brazos de contrapeso es 2.



El número de varillas verticales para el diseño inicial de cuatro y ocho brazos de contrapeso es 4.

Figura 24. Numero de varillas verticales.

Fuente: (Sirachansawang, 2019)

### **Longitud de conductores verticales ( $L_v$ )**

La longitud de la varilla vertical dependerá del valor “h” que otorga el programa IPI2win, el modelamiento del suelo de dos capas establece el análisis de resistividad de suelo ascendente o resistividad de suelo descendente, con este análisis del software se arregla la longitud del electrodo en la capa con menos resistividad.

### **Paso 5: Resistencia del sistema de puesta a tierra ( $R_g$ )**

Se realizará estimaciones de la resistencia preliminar del sistema de puesta a tierra en suelo por medio del software CYMgrid, Para el diseño final, las estimaciones de la resistencia de puesta a tierra deben de ser menor a 20  $\Omega$ .

### **Paso 6: Corriente de la cuadrícula simétrica ( $I_G$ )**

Para el diseño del sistema de puesta a tierra, por medio del software CYMgrid no existirá el factor de división de corriente ( $S_f$ ), esto quiere decir que se simulará el sistema de puesta a tierra en la condición más desfavorables donde toda la corriente de falla asimétrica  $3I_0$  fluirá por la cuadrícula a través de la red, entonces  $I_G=3I_0$ .

### **Factor de disminución ( $D_f$ ) es la duración de la falla ( $t_f$ )**

La elección de tiempo ( $t_f$ ) debe ser igual al tiempo de duración de descarga ( $t_s$ ) en un rango de 0.25 s a 1.0 s.

### **Paso 7: Aumento de potencial de tierra (GPR)**

Si el GPR del diseño preliminar del software CYMgrid está por debajo del voltaje de contacto tolerable, los análisis posteriores no son necesario y se prosigue al diseño final.

### **Paso 8: Voltaje de toque ( $E_{toque}$ 50)**

Si el GPR calculado por el software CYMgrid está por debajo del voltaje de toque tolerable, el paso puede ser completado y se consulta el paso 9. Si el voltaje de malla calculado es mayor que el voltaje de contacto tolerable el diseño de preliminar debe revisarse y configurarse por medio del paso 10.

### **Paso 9: Voltaje de paso ( $E_{paso}$ 50)**

Si los voltajes de paso y de toque calculados por CYMgrid están por debajo de los voltajes tolerables, el diseño solo necesita los refinamientos necesarios para proporcionar un buen diseño de puesta a tierra. Si no, el diseño preliminar debe ser revisado para configurarse por medio del paso 10.

### **Paso 10: Modificaciones del diseño**

Si se exceden los límites del GPR y los voltajes tolerables de paso o de toque, se debe revisar y configurar el diseño de la cuadrícula por medio de estos refinamientos:

Para disminuir la resistencia total de la red es aumentando el área ocupada por la rejilla además se debe adicionar varillas verticales en el perímetro de los brazos del contrapeso y aumentar la longitud de los brazos de contrapeso para satisfacer los límites de voltaje de paso y toque.

Para aumentar los valores de los límites de voltajes tolerables de toque y paso se reduce el tiempo de eliminación de fallas, también se puede usar un material de superficie con una resistividad más alta o aumentar el grosor del material de la superficie, además de lo anterior se puede agregar material de revestimiento en los brazos de contrapeso y en las varillas verticales.

### **Paso 11: Diseño final**

Después de satisfacer los requisitos según el software CYMgrid de voltaje de paso y toque, y la resistencia de cuadrícula se finaliza el diseño de puesta a tierra de líneas de transmisión.

## **Capítulo 3**

### **“Comparación técnica de los diseños de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión según los criterios internacionales y los métodos implementados en los diseños actuales en Nicaragua”**

#### **Resumen del capítulo**

En este capítulo trata de comparar los criterios de diseños de puesta a tierra en líneas de transmisión que se implementan en Enatrel – Nicaragua, con respecto, a los criterios de diseños elaborado en esta tesis a base de las normativas internacionales; En el cual, se tomar como referencia las respuestas de la entrevista estructurada que se le solicitó al Ingeniero Marco Muñoz, jefe de departamento de diseño de líneas de transmisión de Enatrel.

**1. ¿De qué manera diseñan los sistemas de puesta a tierra en líneas transmisión en Nicaragua? ¿Se rigen de alguna normativa internacional o nacional?**

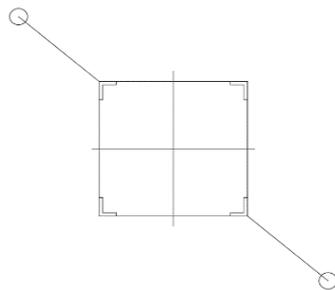
Enatrel: El sistema de puesta a tierra en Líneas de Transmisión en Nicaragua se diseña en base a la mejora en que se tiene que desempeñar la Línea de Transmisión contra los rayos. La norma que utilizamos es **1243-1997 – IEEE**

Tesis: El sistema de puesta a tierra en Líneas de Transmisión se diseñan en base a los criterios de las siguientes estudios, normativas y libros: ANSI/IEEE Std. 81: 2012, ANSI / IEEE Std. 80: 2013, EPRI AC Transmission Line Reference Book, SUNDE, Design of Counterpoise Grounding Electrodes Encased with Low Resistivity Material for Transmission Towers, A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models.

**2- ¿Cuentan con criterios, fórmulas matemáticas, tipo de mediciones de resistividad específicos en los cálculos eléctricos para la puesta a tierra en línea de transmisión en Nicaragua? ¿Cuáles son? ¿Tiene diferentes criterios, fórmulas matemáticas, tipo de medición de resistividad para cada tipo de línea de transmisión en Nicaragua (230 kV,138 kV, 69kV)?**

Enatrel: El primer paso que debe realizar el Contratista es la instalación de la configuración básica, mostrada en la Figura 1. **Configuración tipo PAT-A (sin contrapeso) en este modelo se tienen dos electrodos Verticales.**

Los parámetros R, L y C de este modelo de configuración básica se calculan de acuerdo a las siguientes formulas:



$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln \left( \frac{4l}{a'} \right) - 1 \right]$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{a'} \right) - 1 \right]$$

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R}$$

$$a' = \sqrt{2a \left( \frac{D}{2} \right)}$$

Figura 25. Configuración tipo PAT-A (sin contrapeso) en este modelo se tienen dos electrodos Verticales. Fuente: (Muñoz, 2022)

Donde:

$\rho$ : resistividad del terreno

$l$ : longitud del electrodo

$\mu$ : permeabilidad del terreno

$a$ : radio del electrodo.

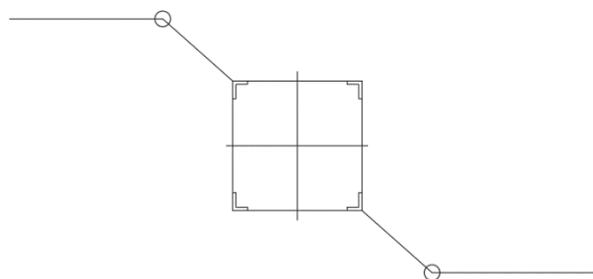
$\epsilon$ : permitividad del terreno

$D$ : distancia entre los electrodos

### Configuración tipo PAT – D1 (contrapeso simple, de 2 brazos)

En este modelo se tiene dos electrodos verticales y dos contrapesos.

Los parámetros R, L y C de este modelo se calculan de acuerdo con las siguientes formulas:



$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left[ \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right]$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{a} \right) - 1 \right]$$

$$C = \frac{\rho \epsilon}{R}$$

Figura 26. Configuración tipo PAT – D1 (contrapeso simple, de 2 brazos)

Fuente: (Muñoz, 2022)

$\rho$ : resistividad del terreno

$l$ : longitud del electrodo

$\mu$ : permeabilidad del terreno

$a$ : radio del electrodo.

$\epsilon$ : permitividad del terreno

$d$ : profundidad del contrapeso

Ambos contrapesos de acuerdo a la teoría de circuito se encuentran en paralelo. Los parámetros resultantes de la configuración se hallarían de acuerdo a la siguiente formula:

$$R' = \frac{R}{2}$$

$$L' = \frac{L}{2}$$

$$C' = 2C$$

Tesis: Según la información precedente de este documento, en el capítulo 2, paso 1, se encuentran los tipos de diseño de puesta a tierra, los cuales son:

- Configuración tipo PAT-A (sin contrapeso)
- Configuración tipo PAT- D1 (contrapeso simple, de 2 brazos)
- Configuración tipo PAT- D2 (contrapeso simple, de 4 brazos)
- Configuración tipo (contrapeso simple, 8 brazos).

Los primeros dos tipos de configuración de puesta a tierra (PAT-1, PAT-D1), según el ingeniero Muñoz, son utilizados para el diseño de puesta a tierra LT en Nicaragua, mientras que las últimas dos configuraciones (PAT-D2, Contrapeso simple, 8 brazos), no las consideran en los diseños de puesta a tierra LT en Nicaragua.

### **3. ¿Utilizan algún método computacional (Software Matemático) para diseñar los sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua? ¿Cuáles son?**

ENATREL: A partir del año 2020 se utiliza la metodología descrita en el software ATP (Alternative Transient Program).

Tesis: Los softwares matemáticos que se utilizan en los sistemas de puesta tierra en líneas de transmisión son: Programa de análisis de redes eléctricas (CYMGRD) y el programa de Interpretación 1D del perfil VES (IPI2Win).

### **4 ¿Estructuran memoria de cálculos eléctricos (medición de resistividad, medición de capa de suelo, sección transversal del conductor, sección transversal de la varilla de puesta a tierra, cálculo de corto circuito, longitud de enterramiento de la varilla, longitud de cable de contrapeso, Números de varilla de puesta a tierra, cálculo de GPR, Calculo de corriente falla asimétrica,**

**cálculo de corriente de falla atmosférica) para los sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua? ¿Cuáles es el orden del procedimiento de elaboración?**

ENATREL: Realizan la medición de resistividad de tierra ya que es uno de los aspectos más importantes porque se requiere manipular la dirección de una corriente, que en este caso es la corriente de falla.

La resistividad del terreno se mide por medio de diferentes procedimientos, cada uno de ellos presenta diferentes particularidades y tendrá como herramientas diferentes aparatos para un mismo fin, que será conocer el valor de resistencia eléctrica que presente el terreno de prueba.

Recomendamos realizar las pruebas en temporadas de verano, es decir, las condiciones más críticas, esto nos permitirá conocer los valores extremos a los que se encontrará trabajando el sistema, por ejemplo, si se presentara humedad en el terreno, el valor de resistencia sería menor al que tendríamos en un día soleado y sin presencia de lluvia, debemos recordar que en el diseño es importante considerar los valores críticos de operación a los que estará expuesto nuestro sistema, por ello, debemos obtener los datos de resistencia en días donde el terreno presente su resistencia máxima tal como sucede en los días de verano.

Una vez determinada la posición de las estructuras y por consecuencia lógica las cimentaciones de estas, se procede a ejecutar la medición de la resistividad del suelo.

**Aparatos y Equipo:**

○ **Método Wenner o de los Cuatro Electrodo**

- ✓ Telurómetros (Megger de tierra).
- ✓ Electrodo: Normalmente son cuatro varillas Copperweld de 15.9 mm de diámetro y con una longitud que puede variar desde los 1.5 m hasta los 3 m.
- ✓ El diámetro de las varillas debe ser menor cuando el suelo sea suave o cuando se requiera medir la resistividad superficial con una pequeña separación entre varillas.
- ✓ Cables: Los cables deberán ser de cobre con un aislamiento para 600 V calibre 14 AWG o mayor. La longitud estará en función de la separación máxima que exista entre los electrodos.
- ✓ 4 conectores mecánicos de grapa.

- ✓ Cinta métrica.

Tesis:

### **Aparatos y Equipo**

- ✓ Telurómetro
- ✓ Electrodo: Varillas de Puesta a tierra de 5/8 x 4" el parámetro de la longitud de los electrodos "a" será espaciados a 1 m, se llevará en aumento la longitud de los electrodos en 1 m hasta llegar a un máximo de 15 m.
- ✓ IPI2win: Para obtener los datos de resistividad de suelo y los cálculos serán empleados un modelo de 2 capas.
- ✓ Cinta métrica.

ENATREL:

- **Medición de la Resistividad del Suelo y Resistencia Eléctrica en Líneas Aéreas en Construcción**

Una vez determinada la posición de las estructuras y por consecuencia las cimentaciones de las mismas, si se procede a ejecutar la medición de la resistividad del suelo se deberá seguir el Método de los cuatro electrodos.

Tesis: El método empleado para medir la resistividad del suelo será método de cuatro puntos: Wenner "sondas de prueba igualmente espaciadas" o Schlumberger "sondas de prueba desigualmente espaciadas".

ENATREL:

- **Método de Caída de Potencial**

El método de la Caída de Potencial se basa en la inyección de una corriente de prueba en el electrodo bajo análisis, es decir, la propia red de tierra. Se toman mediciones de la tensión a diferentes distancias entre el electrodo bajo análisis y el electrodo auxiliar de potencial, llamados E y P respectivamente para efectos de entendimiento. El valor representativo de la resistencia se tendrá cuando la diferencia entre dos o tres mediciones sea despreciable.

Tesis: Para el procedimiento de la medición de resistividad del suelo para líneas de transmisión se medirá en 3 ejes, y el resultado de la resistividad de cada eje, será la media de los tres resultados medidos.

## ENATREL:

### ○ **Medición de la Resistividad del Suelo y Resistencia Eléctrica en Líneas Aéreas en Operación**

Para medir la resistividad del suelo se utiliza el Método Wenner a como lo describimos con anterioridad.

Tendremos que medir la resistencia del suelo colocando el instrumento en el centro de la estructura y los electrodos verticales se deben de colocar paralelos al sentido de la línea de transmisión con una separación de 1.6 m para la primera medición y 3.2 m para la segunda.

Tesis: En el manual propuesto será espaciados a 1 m, se llevará en aumento la longitud de los electrodos en 1 m hasta llegar a un máximo de 15 m.

## ENATREL:

### ○ **Reducción de Valores de Resistencia de Conexión a Tierra en Torres de Transmisión**

Debido a que el valor de resistencia de conexión a tierra se ve afectado por las características del terreno, arreglos de las varillas de tierra y las conexiones entre ellas, los métodos de mejoramiento de los valores de resistencias de conexión a tierra en torres de transmisión hacen uso de los puntos mencionados con anterioridad. Para las características del terreno se usan métodos para disminuir la resistividad del terreno por medio de sales o productos químicos.

Con los arreglos de varillas a tierra se recomiendan tanto número como disposición de éstas para disminuir la resistencia de conexión para ciertas resistividades de terreno. Y, por último, se recomiendan tipos de uniones para asegurar que las conexiones no pierdan sus características.

Tesis:

- Configuración tipo PAT-A (sin contrapeso) – El número de varillas verticales para el diseño inicial sin contrapeso es **1**.
- Configuración tipo PAT- D1 (contrapeso simple, de 2 brazos) - El número de varillas verticales para el diseño inicial dos brazos de contrapeso es **2**.
- Configuración tipo PAT- D2 (contrapeso simple, de 4 brazos) - El número de varillas verticales para el diseño inicial de cuatro brazos de contrapeso es **4**.

- Configuración tipo (contrapeso simple, 8 brazos) - El número de varillas verticales para el diseño inicial de ocho brazos de contrapeso es **4**.

**ENATREL:**

Los cálculos de las variables asociadas son parte del proceso descrito en la Norma 1243-1997 – IEEE y son parte activa en los datos base al usar el software ATP.

Tesis:

Los cálculos de las variables de GPR y Voltajes de toque y de paso y los criterios finales son parte del proceso descrito por la Norma IEEE 81-2012 y son parte activa en los datos al usar el software CYMGrid

**5. ¿Tiene algún conocimiento acerca de la alta impedancia que genera las descargas atmosféricas en el sistema de puesta a tierra de líneas de transmisión?**

ENATREL: Al darse la alta impedancia generada por las descargas atmosférica se exceden por amplio margen el BIL de la línea ocasionando la probabilidad de que haya flameo entre el conductor y la cruceta o entre dos fases adyacentes y se presente una posterior salida de la línea, es muy cercana al 100% si falla el apantallamiento.

Manual: La alta impedancia generada por las descargas atmosféricas como los relacionados con los rayos, el comportamiento de conexión a tierra se representa como una impedancia debido a que el conductor se someterse a alta frecuencia.

## **Capítulo 4**

### **“Simulación de diseño de sistema de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua mediante el programa CYMGRD”**

#### **Resumen del capítulo**

En este capítulo se desarrollará una simulación propuesta para un diseño de sistema de puesta a tierra en una línea de transmisión existente ubicada en el departamento de Rivas, Popoyapa enfrente a la subestación Rivas por medio del manual elaborado en el capítulo 2 y los softwares IPI2WIN y CYMGRD, cuyos datos estarán basados en una medición de Wenner de 4 Puntos con el fin de comparar los datos del diseño de puesta a tierra existente.

## 1) Medición de Resistencia de Tierra en el terreno.

### Datos Generales

Ubicación: Rivas-Popoyalpa

Coordenadas: (11°27'19.8"N 85°50'07.8"W)

Coordenadas Google Maps: (F547+5RR Popoyapa)

Tipo Poste: PMA 60 DEG30

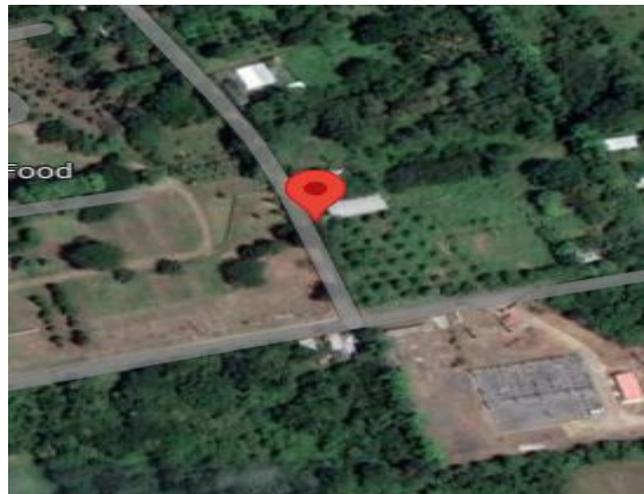
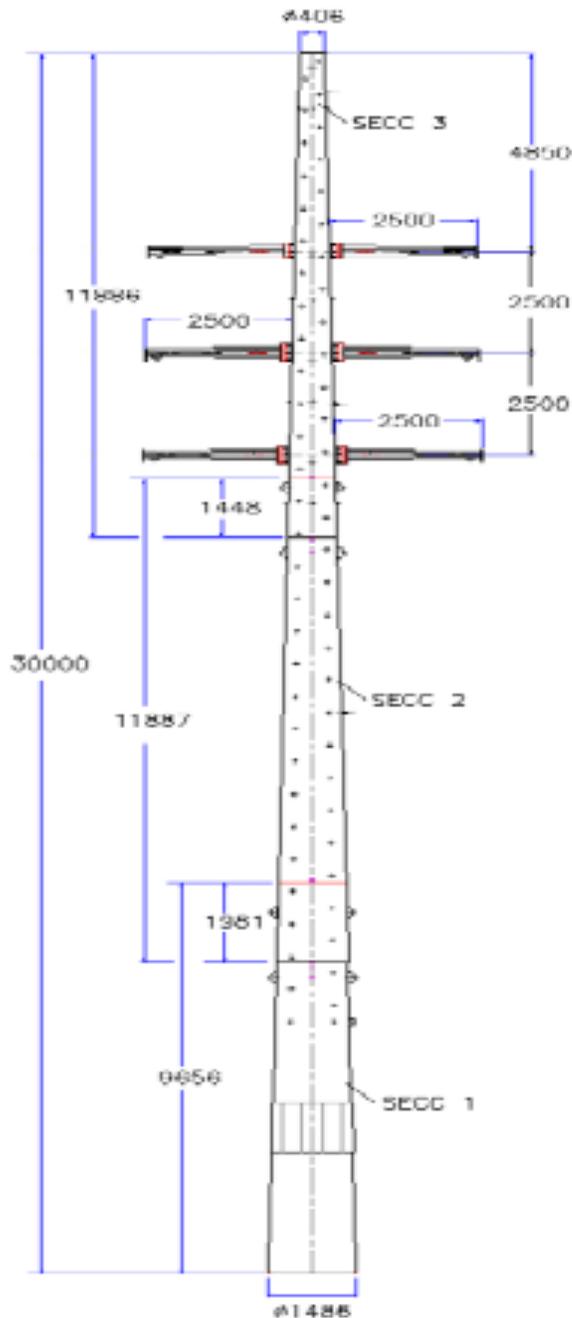


Figura 27. Torre de Línea de Transmisión Rivas.

## Especificaciones Técnicas



	REQUERIDO EN mm	OBTENIDO	
		POSTE N° 1	
ALTURA TOTAL	30000	29865	
LONG SECC 3	11886	11885	
LONG. SECC 2	11887	11889	
LONG. SECC 1	9656	9656	
EMPOT 1 CON 2	1981	2050	
EMPOT 2 CON 3	1448	1515	
DIST ELECTRICA	4850	4860	
DIST ELECTRICA	2500	2505	
DIST ELECTRICA	2500	2508	
BRAZO CONDUCTOR	2500	2508	
ESCALON	800	800	
ESCALON	400	400	
DIAM PUNTA SECC 3	406	407	
DIAM BASE SECC 3	852	853	
DIAM PUNTA SECC 2	780	782	
DIAM BASE SECC 2	1226	1228	
DIAM PUNTA SECC 1	1124	1124	
DIAM BASE SECC 1	1486	1488	

LAS REVISION DIMENSIONAL FUE REALIZADA CON FLUXOMETROS N° CM03 Y CM05

Figura 28. Especificaciones Técnicas de Torre de Transmisión

Fuentes: (METAPOL, 2016)

**Tabla 6. Materiales necesarios para la medición de Wenner de 4 puntos**

<b>Materiales</b>	<b>U/M</b>	<b>Cantidad</b>
Varillas de cobre polo a tierra 5/8 x 4"	Unidad	4
Telurómetro Fluke 1625-2	Unidad	1
Carrete con cable Rojo	Metros	25
Carrete con cable Azul	Metros	25
Carrete con cable Verde	Metros	25
Carrete con cable Negro	Metros	35
Picas de prueba	Unidad	4
Cable de prueba negro	Unidad	1
Cable de prueba Rojo	Unidad	1
Machete	Unidad	1
Martillo	Unidad	1

**Desarrollo de medición de Wenner de 4 puntos y Datos Obtenidos**

- 1- Para iniciar la medición en la torre de transmisión las 4 varilla de 5/8 se entierra a una profundidad "b" de 0.6 m luego las picas de puesta a tierra reemplazan a las varillas y se colocan en el terreno en línea recta y separadas a distancias iguales "a" entre sí, la cual variara de 1m a 7m, para determinar el comportamiento de la resistencia entre las capas del terreno.
- 2- Los siguiente es girar el selector giratorio del medidor hasta la posición "RE 4 polos". El cableado del instrumento se configuro de manera tal que la terminal H/C2 a la sonda que se conecta hacia a la pica ubicada a mayor distancia del telurómetro, la terminal S/P2 a la sonda que se conecta a la pica antecede a la conexión de la terminal H/C2, a terminal ES/P1 a la sonda que se conecta a la pica que antecede a la conexión a la terminal S/P2, y finalmente la terminal E/C1 a la sonda que se conecta a la pica que antecede a la conexión a la terminal ES/P1.

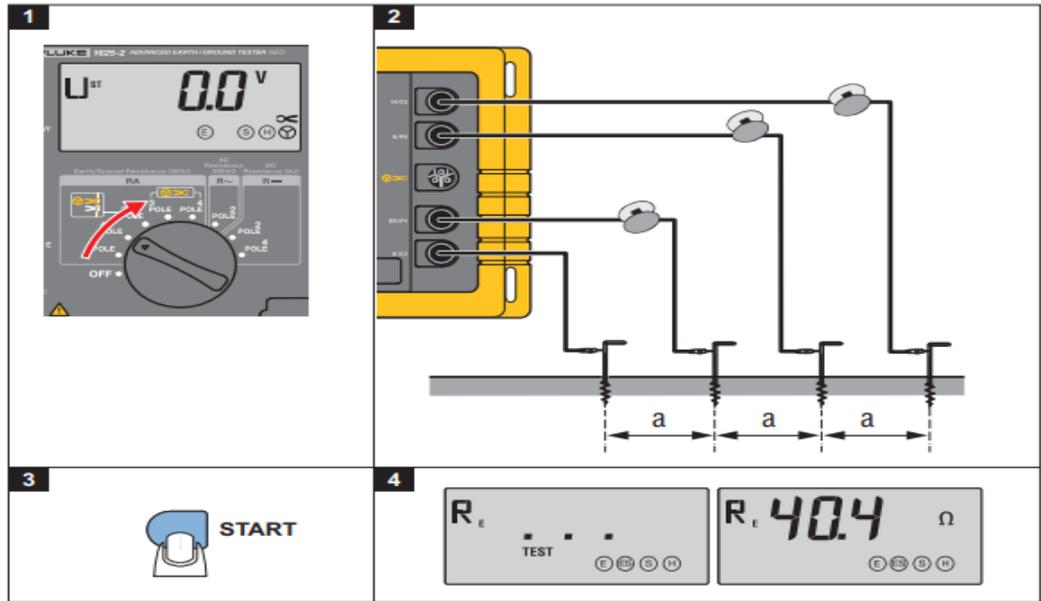


Figura 29. Método de medición del terreno.

Fuentes: (corporation, 2014)

- 3- Se realiza la medición para la distancia “a” de 1 metros de diferencia entre las cuatro picas, a un eje de referencia del centro del poste de Sur a Norte, del Oeste al Este, y finalmente Norte a Sur. Luego se aumenta "a", para medir y comprobar la homogeneidad de estratos más profundos a 7 metros a los mismos ejes de referencia que se midió en “a” en 1 metro.



Figura 30. Coordenadas de poste de línea de transmisión.

Fuentes: Google maps.

No	Timestamp	Measuring mode	Measuring Voltage Um	Measuring Frequency Fm	Earth Ground Resistance Re	Probe Resistance Rs	Auxillary Resistance Rh	Compensation Resistance Rk
S-N	9/9/2022 13:13	4 POLE TEST	48 V	111 Hz	0.30 Ohm	2165.7 Ohm	376.4 Ohm	0.000 ohm
S-N	9/9/2022 13:25	4 POLE TEST	48 V	111 Hz	4.97 Ohm	300.3 Ohm	213.7 Ohm	0.000 ohm
O-E	9/9/2022 13:53	4 POLE TEST	48 V	111 Hz	0.30 Ohm	690.4 Ohm	402.8 Ohm	0.000 ohm
O-E	9/9/2022 14:28	4 POLE TEST	48 V	111 Hz	4.75 Ohm	437.5 Ohm	404.7 Ohm	0.000 ohm
N-S	9/9/2022 14:26	4 POLE TEST	48 V	111 Hz	0.29 Ohm	427.8 Ohm	361.1 Ohm	0.000 ohm
N-S	9/9/2022 14:09	4 POLE TEST	48 V	111 Hz	3.32 Ohm	432.4 Ohm	458.5 Oh m	0.0 m

Tabla 7. Datos de Medición del Telurómetro Fluke 1625-2

- 4- Para finalizar se obtuvieron los datos de medición del telurómetro por medio de un cable USB tipo B y obtuvimos los datos en formato. xlsx donde se muestra los resultados en la siguiente tabla 7:

**2) Recopilación de información y cálculos IP2WIN.**

Tabla 8. Datos de medición del Telurómetro Fluke 1625-2

Medición Sur-Norte		
Separación "a"	Separación "b"	
1m	0.6	4.97
7m	0.6	0.29
Medición Oeste-Este		
1m	0.6	4.75
7m	0.6	0.3
medición Norte-Sur		
1m	0.6	3.32
7m	0.6	0.28

Estos datos nos indican que en el terreno las capas poseen diferentes resistencias, pues a medida que la separación aumentaba la resistencia igualmente disminuía, además podemos determinar que se realizó con éxito la medición al percatarnos que los datos obtenidos de las tres mediciones estuvieron en el rango de diferencia aceptable.

Procedemos a sacarle la media de ambos puntos medidos, los cuales nos dan como resultado los siguientes incisos.

Tabla 9. Media de la medición en los tres ejes.

Media 3 Ejes	
1m	4.35
7m	0.29

Ya con los datos de la media obtenidas de los tres ejes en los dos puntos medidos, nos disponemos a obtener la resistividad mencionada en el capítulo uno, la cual será reflejada a continuación.

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}; \rho_a = 2\pi a R$$

Al sacarla nos dan los siguientes resultados.

Tabla 10. Valores de resistividad.

a(m)	b(m)	R	$\rho_a$	$\rho_a$
1	0.6	4.35	38.4177659	27.3318561
7	0.6	0.29	12.9169882	12.7548662

Para finalizar digitamos los datos de resistencia obtenidos en el programa IP2WIN, dándonos como resultado la siguiente grafica descendente, la cual coincide con los valores obtenidos en las mediciones, a mayor distancia de la capa, menor será la resistencia del terreno con respecto a la torre de transmisión.

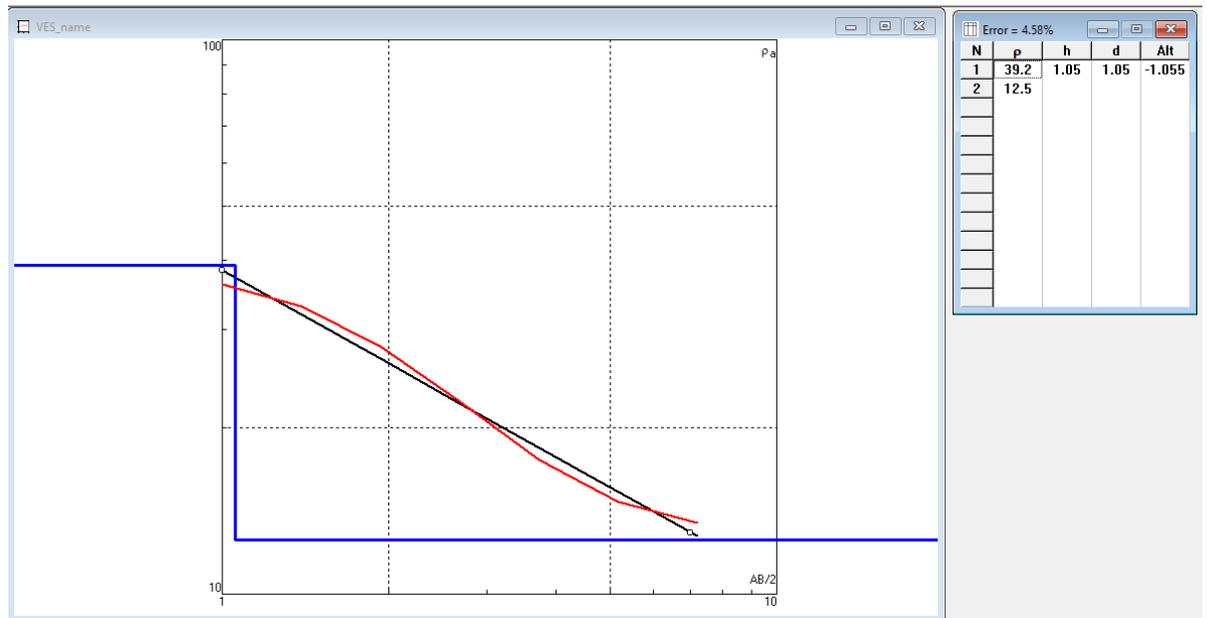


Figura 31. Simulación descendente de la resistividad de la primera y segunda capa del terreno.

Con esta simulación también obtenemos los datos requeridos para el siguiente paso, los cuales sería tener la resistividad de la primera y segunda capa, así como la altura de estas para poder simularlos en CYMgrd.

#### 1- Realización del diseño final mediante AutoCAD y el programa CYMgrd.

Ya teniendo los valores de la resistividad de las dos capas del terreno, e igualmente teniendo el valor de la altura, podemos proceder a simular el modelo de puesta a tierra propuesto para la línea de transmisión donde se realizó las mediciones, para comprobar que dicho diseño es fiable.

Nos disponemos a insertar los datos elementales en el programa CYMGRUM, los cuales serían principalmente los datos obtenidos en la simulación en IP2WIN, como los datos en la ficha técnica de las varillas y conductores a tierra, y para finalizar tomaremos otros valores estándar.

Primeramente, diseñamos el prototipo de línea de transmisión, en el cual se diseñará con respecto al capítulo 2: “Manual de Diseño de sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua”. El tamaño del conductor será 4/0, mientras que las varillas seleccionadas serán 5/8 x 12”, teniendo un diámetro de conductor 0.01341 m, mientras que el de la varilla polo a tierra será de 0.016 m.

En este diseño se basará en una malla de 4x4 m, la cual constará de 2 contrapesos en cada extremo de la malla, los cuales tendrán una distancia de 15 m cada uno; así mismo, en cada contrapeso constará con 4 varillas adicionales para que el diseño de puesta a tierra pueda disipar con mayor eficiencia la corriente en ambas direcciones del contrapeso.

En la Fig. 30 podemos observar el modelo propuesto que se muestra ya montado en el programa CYMgrd.

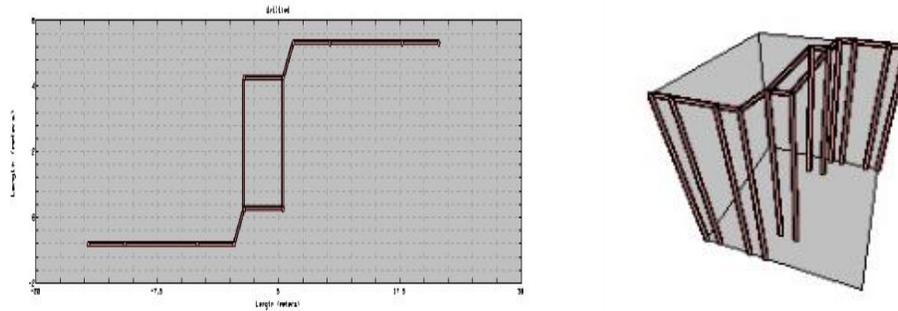


Figura 32. Modelando el diseño de puesta a tierra en CYMgrid.

Ya partiendo del primer diseño terminamos de completar los datos requeridos, siendo estos los siguientes.

1.  $Z_1$  (Altura de enterramiento): 0.8 m.
2.  $Z_2$  (Altura de enterramiento): 0.8 m.
3. Longitud de la varilla de polo a tierra: 2.44 m.
4. Resistividad de la primera capa: 39.2 m
5. Resistividad de la segunda capa: 12.5 m.
6. Grosor de la capa superior: 1.05 m.
7. Temperatura ambiente: 40 °C.
8.  $E_{step50}$  (Voltaje de paso tolerable para humanos): con 50 kg de peso corporal.
9.  $T_f$  (Duración de la corriente de falla para determinar el factor de disminución): 0.12 s

Dejamos la función partiendo de  $z$  infinito como parámetro de la corriente de falla.

Ya insertando todos los datos el programa nos devuelve los resultados en una tabla gráfica, en la cual nos muestra tres parámetros, el voltaje de paso y toque máximo permisible, como la carga superficial, y así mismo en la fig. 31 podemos apreciar que el diseño cumple con los requisitos establecidos para protección en una línea de transmisión.

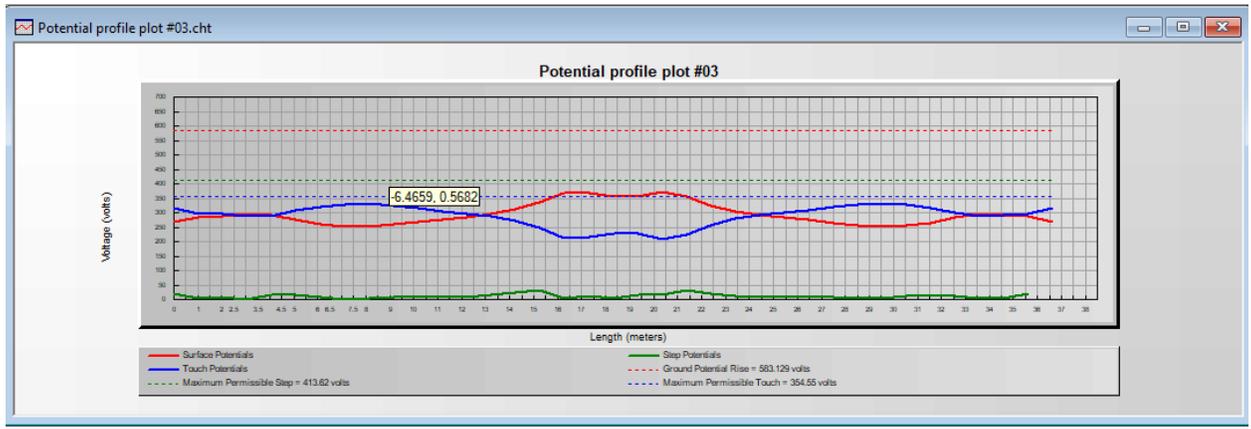


Figura 33. Resultados de la simulación en CYMgrid.

E igualmente nos proporciona los siguientes resultados.

- Resistencia equivalente: 0.5277 Ohms.
- Impedancia equivalente: 0.5277 Ohms.

En adición simulamos el modelo de puesta a tierra utilizado en las líneas de transmisión actuales, el cual cuenta de 2 conductores conectados al poste de la línea de transmisión, cada uno a una distancia de 3 m entre sí, sin contrapeso, y cada varilla enterrada a una profundidad diferente, siendo un enterramiento de 0.5 m de profundidad, mientras que el otro de 0.3 metros; y utilizando un conductor N° 2. La varilla de polo a tierra no varía, al igual de los valores de resistividad tomados, dichos datos se pueden apreciar en la figura 32.

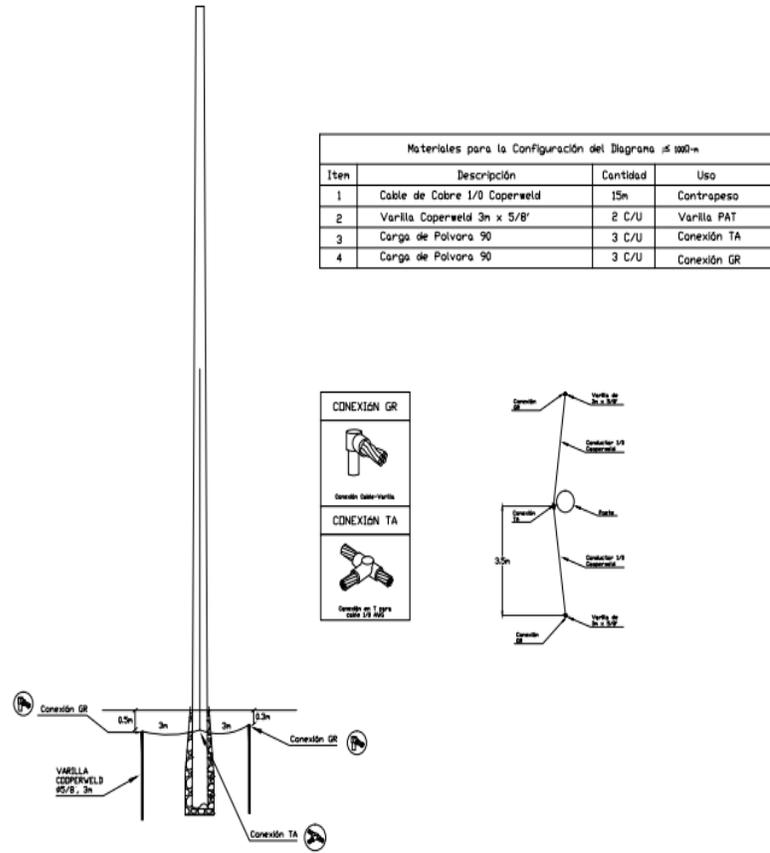


Figura 34. Diseños actuales de puesta a tierra en líneas de transmisión.

Fuente: (Enatrel, Líneas de transmisión, 2017)

Simulando en el CYMGRD y AutoCAD, nos proporciona el siguiente modelo.

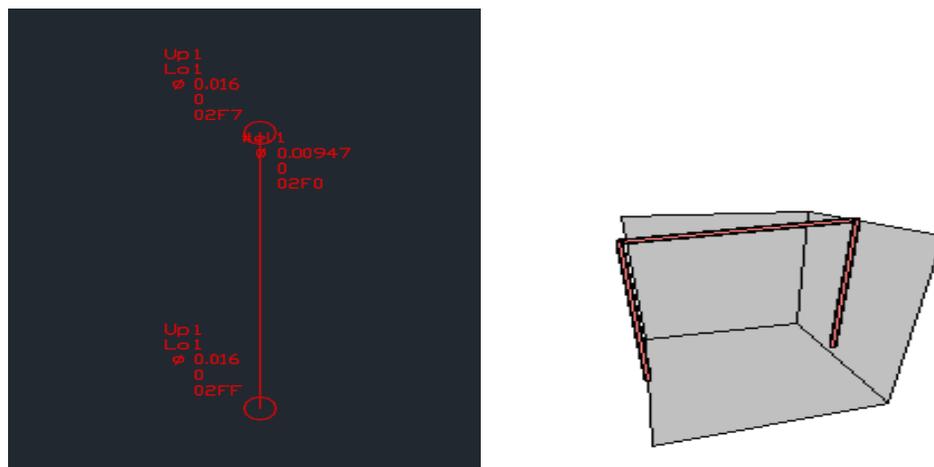


Figura 35. Modelando el diseño de puesta a tierra actuales en Nicaragua en CYMGrd.

Y en la representación gráfica se muestra que, a pesar de cumplir con los parámetros de voltaje de paso y carga superficial permisible, sobrepasa los parámetros máximos permitidos del voltaje de paso, siendo esto un peligro para la vida humana dado el caso de una descarga atmosférica, por lo cual no sería un modelo completamente fiable.

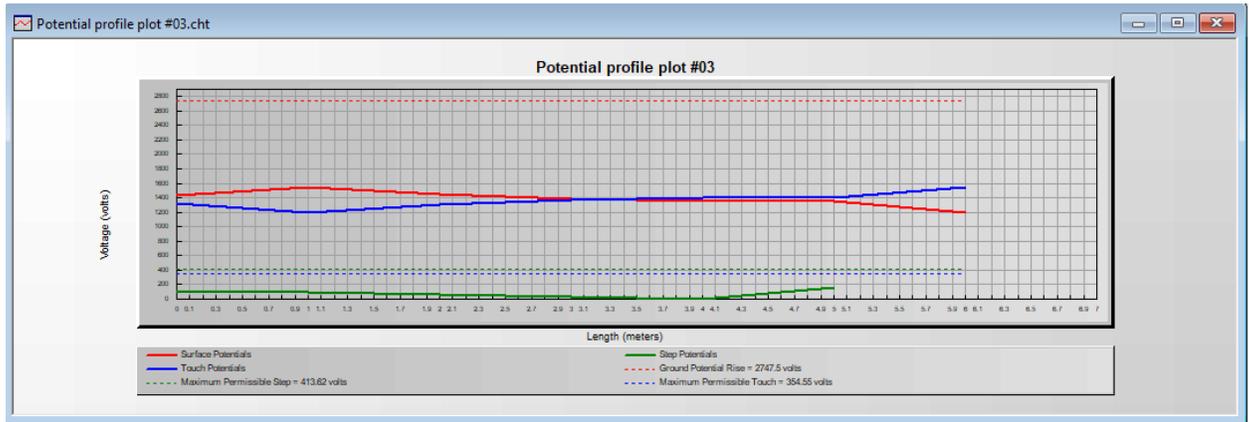


Figura 36. Modelando el diseño de puesta a tierra actuales en Nicaragua en CYMGRD.

## **Conclusión.**

Se han revisado las bases teóricas requerida para poder obtener un sistema de puesta a tierra apropiado en líneas de transmisión mediante las principales fuentes bibliográficas de: la Sistemas de Puesta a Tierra. ANSI/IEEE Std. 81: 2012, Sistema de Puesta a Tierra. ANSI / IEEE Std. 80: 2013, EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, SUNDE, Design of Counterpoise Grounding Electrodes Encased with Low Resistivity Material for Transmission Towers y finalmente a study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models.

Mediante los criterios analizados mediante investigaciones estudios, libros y normas estandarizas, se ha examinado el procedimiento requerido para el diseño práctico de puesta a tierra diseñado en un diagrama de flujo basado en la normativa IEEE-80, el cual ha sido modificado para un uso más sintetizado y automatizado mediante la utilización de los programas IP2WIN y CYMGRD, los cuales son de vital importancia al momento de calcular valores requeridos para un diseño óptimo y funcional; partiendo de ese diagrama se ha logrado elaborar el manual de puesta a tierra en líneas de transmisión en Nicaragua.

Por medio del estudio y el manual anteriormente realizados, se llevó a cabo una comparación de los criterios de diseños de puesta a tierra en líneas de transmisión que se emplean en Enatrel – Nicaragua, con respecto, a los criterios de diseños elaborado en esta tesis a base de las normativas internacionales; En el cual se tomó como referencia las respuestas de la entrevista estructurada hacia el jefe de departamento de diseño de líneas de transmisión de Enatrel., el Ingeniero Marco Muñoz, llegando a la conclusión de que no realizan todos los pasos detallados en la normativa IEEE-80, para el diseño de dichos sistemas.

Finalmente se desarrolló una simulación propuesta para un diseño de sistema de puesta a tierra en una línea de transmisión, de la cual se tomaron los datos requeridos para el estudio de un poste de una línea de transmisión existente, mediante una medición de Wenner de 4 Puntos, y que sucesivamente se llevara se llevó a cabo el diseño propuesto mediante el manual elaborado en esta monografía, y utilizando los softwares IPI2WIN y CYMGRD.

Dicha simulación logró cumplir con los objetivos propuestos, siendo apta para la protección de dicha línea de transmisión.

## Bibliografía.

- Batista, R. (2019). *A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for twolayered*. Brasil: Electric Power Systems Research.
- Blanco, J. (2018). *Diseño de Protección Contra Descargas Atmosféricas en el edificio Denis Martinez*. Nicaragua.
- Chisholm, W. A. (2005). Lightning and Grounding. En R. Lings, *EPRI AC Transmission Line* (pág. 351). California.
- Committee of the IEEE Power Engineering Society. (1987). IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems Part 1-Introduction. *Means of Grounding*, 11.
- Committee of the IEEE Power Engineering Society. (2012). Earth resistivity. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*, 10.
- corporation, F. (2014). *1625-2 Earth/Ground Tester, Manual de uso*. Estados Unidos.
- DeCosta, D. (2012). Methods of measuring earth resistivity. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*, 11-13.
- Enatrel. (04 de 2016 ). Obras civiles y electricas para contruccion de Lineas de transmision electrica. *Detalle de red de tierra de los postes metalicos y de concreto*.
- Enatrel. (Julio de 2017). Lineas de transmisión. *Niveles de tencion en lineas de transmision Nicaragua*.
- Energy, I. P. (2012). IEEE guide for measuring earth resistivity, group impedance, and earth surface potentials of a grounding system. *IEEE std 81*, 86.
- Fidalgo, S. L. (2017). *ITC MIE-RAT. 01."TERMINOLOGÍA"*. Obtenido de Playerdoc: <https://docplayer.es/46510161-Itc-mie-rat-01-terminologia.html>
- Grainger, J. J. (1996). *Sistemas de potencia*. Inglaterra: Camara Nacional de la industria.
- Gutierrez, T. (31 de 03 de 2014). *AltoNivel*. Obtenido de <https://www.altonivel.com.mx/liderazgo/management/41737-manual-de-procedimiento-el-exito-de-las-empresas/>
- Herrera, M. (2014). *Sistema de protección contra descargas atmosfericas en edificios*. Mexico. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/354126545/tesis-sistema-de-pararrayos-pdf>

- Kamal, A. (11 de December de 2020). *INEL Engineering Education*. Obtenido de INEL Engineering Education: <https://inelinc.com/ver-curso/diseno-de-sistemas-de-puesta-a-tierra-zz29j/1536>
- Keil, R. P. (2013). Resistivity measurements. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, 56-57.
- Lings, R. (2005). *EPRI AC Transmission Line*. New york: Editorial Committee.
- METAPOL. (23 de Agosto de 2016). REGISTRO DE INSPECCION DIMENSIONAL. RIVAS, NICARAGUA.
- Michaels, K. (2007). Resistivity of soils. *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, 164.
- Muñoz, M. (15 de 08 de 2022). Diseños de puesta a tierra en líneas de transmisión que se implementan en Enatrel.
- NASA. (02 de 2003). *Global Hydrology Resource Center (GHRC)*. Obtenido de Lightning & Atmospheric: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/index.html>
- NOAA. (1970). *La Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica*. Estados Unidos.
- Pool, P. E. (2012). Determination of the worst-fault type. *IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault*, 17.
- Procobre. (2014). *Sistemas de puesta a tierra*. Chile: PROCOBRE.
- Raffino, M. E. (04 de Junio de 2021). *Concepto de* . Obtenido de <https://concepto.de/metodo-deductivo/>
- Reyna, A. (Septiembre de 2020). *Editores*. Obtenido de Corrosion de electrodos a tierra: [https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/330/angel\\_reyna\\_electrodos](https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/330/angel_reyna_electrodos)
- Sirachansawang, P. (2019). *Design of Counterpoise Grounding Electrodes Encased with Low Resistivity*. Thailand: Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
- Stevenson, W. D. (1962). *Analisis de sistemas eléctricos de potencia*. Carolina del norte: Universidad estatal de Carolina del norte.
- Sunde, E. D. (1968). *Earth conduction effects in transmission systems*. New york: Dove publications, INC.