

Guía metodológica para el diseño de sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión de un Sistema de Distribución Local – SDL.

María Alejandra Franklin Niño y Johan Sebastián Carreño Meneses

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieros Electricistas

Director

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Doctor en ciencias con énfasis en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Oscar Iván Aguirre Varela

Especialista en Gerencia de Recursos Energéticos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios quien ha sido mi guía en cada paso de este camino, a mis padres y mi nona cuyo amor y sacrificio han sido la base de mi éxito, a mi hermana, compañera de vida gracias por tu apoyo constante y por estar siempre a mi lado en los momentos buenos y difíciles. La constante confianza que me brindan me ha impulsado a alcanzar esta meta.

Que este trabajo de grado sea un pequeño reflejo de mi profundo agradecimiento y amor hacia ustedes.

María Alejandra Franklin Niño

Dedico este logro en primer lugar a Dios, por llenarme de fortaleza y de perseverancia para poder cumplir mis sueños.

A mis padres, Juan de Jesús y Ana Victoria por su amor incondicional, apoyo constante y paciencia interminable.

A mis hermanos, cuyas enseñanzas de vida me han guiado en la búsqueda de mis metas, ayudándome a superar cada desafío en el camino.

Y a cada una de las personas que me alentaron en el proceso, por guiarme tanto en mi vida personal como profesional y hacer de mí una mejor persona.

Este trabajo es el resultado de la contribución de muchos, y quiero expresar mi profunda gratitud a todos los que han formado parte de este viaje.

Johan Sebastián Carreño Meneses

Agradecimientos

Agradecemos a Dios y a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización de este trabajo. Sus apoyos, consejos y contribuciones fueron fundamentales para su éxito.

Queremos agradecer a nuestro director Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga y a nuestro codirector Oscar Iván Aguirre Varela, por su orientación experta, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. Sus consejos y sugerencias fueron invaluable y ayudaron a dar forma a este trabajo de la mejor manera posible.

También queremos expresar gratitud a nuestras familias por su constante apoyo y ánimo. Su amor y apoyo incondicional fueron nuestra fuente de inspiración y motivación a lo largo de esta travesía académica.

Por último, pero no menos importante, agradecemos a todas las fuentes, bibliotecas y a la Universidad Industrial de Santander que proporcionaron recursos esenciales para este trabajo y para nuestra formación a nivel profesional.

Este proyecto no habría sido posible sin su apoyo y colaboración. A todos ustedes, ¡muchas gracias!

Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 12 |
| 1. Problema por resolver | 14 |
| 1.1. Alcance | 15 |
| 2. Objetivos | 17 |
| 2.1. Objetivo General | 17 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 17 |
| 3. Justificación | 18 |
| 4. Marco normativo | 20 |
| 5. Generalidades de un sistema de puesta a tierra y un sistema de apantallamiento | 23 |
| 5.1. Objetivos de un sistema de puesta a tierra | 23 |
| 5.2. Elementos que conforman un sistema de puesta a tierra | 24 |
| 5.3. Requerimientos de un sistema de puesta a tierra | 25 |
| 5.4. Objetivos de un sistema de apantallamiento | 28 |
| 5.5. Elementos de un sistema de apantallamiento | 28 |
| 6. Metodología de la guía para el diseño del sistema de puesta a tierra. | 30 |
| 6.1. Identificación de la información | 30 |
| 6.2. Clasificación de la información | 30 |
| 6.3. Análisis de la información | 30 |
| 6.4. Elaboración del contenido | 31 |
| 6.4.1. Público objetivo | 32 |
| 6.4.2. Objetivos de la guía | 32 |
| 6.5. Desarrollo simplificado del contenido | 33 |

| | |
|---|----|
| 6.6. Estructura del suelo..... | 34 |
| 6.7. Elección del conductor..... | 36 |
| 6.8. Criterio de tensiones de paso y de toque tolerables | 38 |
| 6.9. Resistencia de la malla de tierra..... | 40 |
| 6.10. Elevación del potencial de tierra..... | 41 |
| 6.11. Metodología de la malla de puesta a tierra | 42 |
| 6.11.1. Conexiones a la malla | 42 |
| 6.11.2. Procedimiento de diseño. | 43 |
| 7. Metodología de la guía para el diseño del sistema de apantallamiento | 44 |
| 7.1. Estudio previo de descargas atmosféricas | 44 |
| 7.2. Análisis de Información..... | 45 |
| 7.3. Nivel cerámico | 46 |
| 7.4. Densidad de rayos a tierra..... | 47 |
| 7.5. Métodos de Diseño Empírico..... | 48 |
| 7.6. Modelo electrogeométrico | 48 |
| 7.7. Procedimiento de diseño | 50 |
| 8. Conclusiones..... | 51 |
| 9. Recomendaciones | 53 |
| Referencias..... | 54 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| <i>Figura 1 Sistemas con puestas a tierra dedicadas e interconectadas</i> | 27 |
| <i>Figura 2 Diagrama de flujo del diseño de la guía metodológica.....</i> | 34 |
| <i>Figura 3 Método de los cuatro electrodos o de Wenner</i> | 35 |
| <i>Figura 4 Tensión de toque</i> | 39 |
| <i>Figura 5 Tensión de paso</i> | 40 |
| <i>Figura 6 Diagrama de flujo para el diseño de la malla de tierra</i> | 43 |
| <i>Figura 7 Diagrama de flujo del diseño de la guía metodológica.....</i> | 46 |
| <i>Figura 8 Mapa cerámico de Colombia</i> | 47 |
| <i>Figura 9 Ilustración del concepto de la esfera de radio igual a la distancia de descarga</i> | 49 |
| <i>Figura 10 Procedimiento de apantallamiento en subestación</i> | 50 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| <i>Tabla 1 Constantes de los materiales</i> | 37 |
| <i>Tabla 2 Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra.....</i> | 38 |
| <i>Tabla 3 Valores máximos de resistencia de puesta a tierra</i> | 41 |

Lista de Apéndices

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A. Guía metodológica para el diseño de sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión de un sistema de distribución local (SDL).

Apéndice B. Memoria de cálculo de la malla de puesta a tierra

Apéndice C. Modelo de la malla de tierra subestación de media tensión

Apéndice D. Modelo de apantallamiento subestación de media tensión

Glosario de términos

SPT: Sistemas de puesta a tierra

SIPRA: Sistema integral de protección contra rayos y sobretensiones.

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas

TCAP: Capacidad térmica del material por unidad de volumen

RETIE: Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

DPS: Dispositivo de Protección contra Sobretensiones

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

NTC: Norma Técnica Colombiana

AC: Corriente Alterna

DC: Corriente continúa

SDL: Sistema de distribución local

Resumen

Título: Guía metodológica para el diseño de sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión de un Sistema de Distribución Local – SDL

Autor: María Alejandra Franklin Niño y Johan Sebastián Carreño Meneses

Palabras Clave: Sistemas de puesta a tierra, Apantallamiento, subestaciones de media tensión convencionales, RETIE, operador de red, CREG, Sistema de Distribución Local, SDL.

Descripción: Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una guía metodológica que oriente el diseño de Sistemas de Puesta a Tierra y Apantallamiento, elementos esenciales en la construcción de subestaciones eléctricas. La guía permitirá definir criterios fundamentales que se ajusten a las normativas y necesidades del sistema, agilizando los procesos de formulación y diseño, y promoviendo la estandarización en la construcción de subestaciones.

Además de proporcionar una herramienta práctica, este proyecto busca fomentar la interacción con Operadores de Red y empresas desarrolladoras de infraestructura eléctrica. Se pretende fortalecer las habilidades en diseño de sistemas eléctricos y contribuir al desarrollo de Sistemas de Distribución Local, mejorando la calidad del servicio eléctrico.

Abstract

Title: Methodological Guide for the Design of Grounding and Shielding Systems for Conventional Medium Voltage Substations in a Local Distribution System – LDS

Author(s): María Alejandra Franklin Niño y Johan Sebastián Carreño Meneses

Key Words: Design of grounding systems, Shielding, conventional medium voltage substations, RETIE, network operator, CREG, Local Distribution System, SDL.

Description: This project looks for the develop of a methodological guide that guides the design of Grounding and Shielding Systems, essential elements in the construction of electrical substations. The guide will allow defining fundamental criteria that adjust to the regulations and needs of the system, streamlining the formulation and design processes, and promoting standardization in the construction of substations.

In addition to providing a practical tool, this project seeks to promote interaction with Network Operators and electrical infrastructure development companies. The aim is to strengthen skills in electrical system design and contribute to the development of Local Distribution Systems, improving the quality of electrical service.

Introducción

La energía eléctrica es uno de los principales motores del país ya que nos brinda la atención a la demanda industrial, comercial y residencial, el acceso a esta es un derecho humano fundamental y esencial para el desarrollo sostenible, por ende, ha hecho que los desarrolladores de proyectos de infraestructura eléctrica continuamente deban enfrentarse a la ampliación, expansión, modernización, construcción y reposición de sus activos, para poder atender el crecimiento de la demanda de manera oportuna y eficiente, bajo la atenta mirada de los entes reguladores que cada vez son más exigentes a fin de cumplir con todo lo correspondiente al marco legal; lo cual implica que en muchas ocasiones se presenten situaciones donde los plazos para la formulación, planeación y ejecución de dichos proyectos se vean afectados de manera relevante. Dado esto se hace necesario que se generen lineamientos y/o criterios mínimos que faciliten la formulación de proyectos de expansión, modernización y construcción en el área de las subestaciones eléctricas de media tensión del tipo convencional, que puedan requerirse en el marco de la planeación para un Sistema de Distribución Local – SDL. Lo anterior, en consideración a que las subestaciones eléctricas de media tensión del tipo convencional, son uno de los elementos clave para la atención del mercado eléctrico y permanente expansión de un SDL, y dentro de los componentes principales que constituyen y/o impactan la subestaciones eléctricas, se contemplan temas como: la selección del lote, los estudios y obras civiles, el componente electromecánico, servicios auxiliares, sistema de protecciones, sistema de puesta a tierra, sistema de comunicaciones y control, entre otros. Por lo tanto, con este proyecto se pretende desarrollar una guía metodológica que permita orientar el diseño de este tipo de Sistemas de Puesta a Tierra y Apantallamiento, lo cual constituye uno de los principales ejes del diseño y la construcción de una subestación eléctrica; de manera que se posibilite la definición de criterios base en concordancia con lo requerido por el sistema y que se

ajuste a las normas aplicables, facilitando de esta forma que se reduzcan los tiempos de formulación y diseño, así como lograr una mayor estandarización en su construcción. Así las cosas, con el desarrollo de este trabajo de grado, se tendrá también la posibilidad de motivar la interacción con los Operadores de Red y empresas desarrolladoras de diseños y/o constructoras de infraestructura eléctrica de este tipo, y fortalecer las habilidades de diseño de sistemas eléctricos, logrando una mayor apropiación de los conocimientos alrededor de las subestaciones eléctricas y por ende, hacer una significativa contribución al potencial desarrollo de los Sistemas de Distribución Local y elevar la calidad del servicio eléctrico, especialmente en relación con aquellas interrupciones que provienen de las descargas atmosféricas lo cual se traduce en una contribución a la calidad de vida de las personas, de la industria y en los impactos económicos para el país.

1. Problema por resolver

Se busca generar una metodología que oriente el diseño y selección de los Sistemas de Puesta a Tierra y de Apantallamiento para las subestaciones eléctricas de tipo convencional en media tensión, a fin de facilitar una reducción del tiempo en el marco de la formulación y diseño; logrando además una mayor estandarización en la construcción de este tipo de subestaciones.

Se quiere atender este problema debido al constante aumento en la población, que ha hecho que los Sistemas de Distribución Local se vean inmersos en cambios a fin de poder distribuir la energía de forma eficaz a los usuarios finales. Para esto los directos implicados en llevar a cabo esta labor son los Operadores de Red, los cuales se ven en la necesidad de implementar toda clase de proyectos que pueden involucrar acciones como; la modernización, ampliación, expansión y/o reposición de activos, de manera que se pueda atender la creciente demanda. Por ende, las subestaciones eléctricas entran en escena, pues juegan un papel fundamental dentro de un Sistema de Distribución Local, ya que son uno de los componentes principales que permite atender el mercado, expansión y correcto funcionamiento de un SDL.

Las subestaciones convencionales de media tensión deberán disponer de una protección y/o Sistemas de Puesta a Tierra y de Apantallamiento, por lo tanto es importante que este proyecto permita llegar a una metodología condensada en una guía, logrando garantizar que se tengan en cuenta los requisitos mínimos, fundamentos, normas y en general, aspectos relevantes que se deban considerar para el diseño de unos sistemas confiables, brindando una serie de información importante que debe incluirse en las subestaciones, para protegerla no solo de corrientes y

tensiones elevadas sino también de eventuales descargas atmosféricas; teniendo en cuenta el objetivo fundamental de disminuir cualquier tipo de riesgo que pueda perjudicar a los seres vivos circundantes en la zona a proteger y también a los equipos, componentes o elementos que se encuentren allí.

1.1. Alcance

El alcance de esta guía metodológica se centra en el desarrollo de un documento donde se fijen y proporcionen directrices y criterios base para la selección, dimensionamiento y configuración adecuada para orientar el Diseño de sistemas de puesta a tierra y apantallamiento.

El alcance del trabajo abarca los siguientes aspectos:

Definición de los requisitos y normas aplicables: Requisitos técnicos, normas y regulaciones que deben ser considerados en el diseño de los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión.

Selección de materiales: Selección de los materiales adecuados para el diseño de los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión, considerando la eficiencia y el costo.

Diseño del sistema de puesta a tierra: Proceso de diseño del sistema de puesta a tierra, que incluye el análisis de la resistividad del terreno, la selección de los electrodos de puesta a tierra, el diseño de la malla de puesta a tierra y la medición de la resistencia de puesta a tierra.

Diseño del sistema de apantallamiento: Diseño del sistema de apantallamiento, que incluye la selección de los materiales de apantallamiento, el cálculo de las corrientes que ocasionan sobretensiones, el diseño de los conductores de apantallamiento y la selección de los dispositivos de protección.

Es importante destacar que el alcance del trabajo se centra específicamente en la guía metodológica para el Sistema de puesta a tierra y apantallamiento. Otros aspectos relacionados con el diseño de subestaciones eléctricas no serán abordados en este trabajo, aunque se reconoce su interrelación y se promoverá la colaboración con otros proyectos de diseño en el mismo ámbito.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Desarrollar una guía metodológica documentada que permita orientar el diseño de los Sistemas de Puesta a Tierra y de Apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión de las utilizadas para un Sistema de Distribución Local – SDL.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar los elementos utilizados actualmente para el diseño y construcción de los Sistemas de Puesta a Tierra y de Apantallamiento para una subestación convencional de media tensión.
- Determinar los requisitos básicos con base en las definiciones, los fundamentos teóricos, las normas aplicables y las buenas prácticas de ingeniería utilizadas actualmente para el diseño de los Sistemas de Puesta a Tierra y de Apantallamiento para una subestación convencional de media tensión.
- Determinar el procedimiento que se debe llevar a cabo para orientar el diseño de los Sistemas de Puesta a Tierra y de apantallamiento de una subestación de media tensión convencional, de manera que se garantice la seguridad para las personas y la protección de las instalaciones o equipos.
- Desarrollar los elementos de la guía metodológica acorde con los requisitos establecidos en la regulación y normas aplicables

3. Justificación

Los cambios en las condiciones climáticas actuales, así como la ejecución de proyectos de gran envergadura, como las centrales hidroeléctricas que involucran grandes masas de agua o las plantas fotovoltaicas de escala masiva con una gran cantidad de paneles solares, están generando transformaciones significativas en los microclimas regionales. Estos cambios, en algunos casos, son radicales y plantean un desafío importante en lo que respecta al diseño de sistemas necesarios para la protección y funcionamiento confiable de infraestructuras críticas en la cadena de suministro de energía, particularmente las subestaciones eléctricas de un Sistema de Distribución de Energía (SDL).

Simultáneamente, las empresas operadoras de redes eléctricas se encuentran constantemente en la necesidad de expandir, modernizar y, en ocasiones, reemplazar sus subestaciones. Esto se debe a la creciente demanda de energía y a la creación de normativas regulatorias cada vez más rigurosas que deben cumplir. Este escenario a menudo impone restricciones de tiempo más ajustadas en la planificación, formulación y ejecución de proyectos relacionados.

Por lo tanto, el propósito principal de este trabajo de grado es desarrollar una guía que proporcione orientación específica sobre cómo calcular y diseñar sistemas de puesta a tierra y apantallamiento en subestaciones de media tensión. Esta guía se creará de manera integral, teniendo en cuenta los requisitos específicos, la planificación y el contexto asociados a un Sistema de Distribución de Energía determinado.

Además de su utilidad práctica, este trabajo de grado también fomentará una mayor colaboración entre los estudiantes involucrados y las empresas operadoras de redes eléctricas. Se espera que los resultados obtenidos se conviertan en una herramienta valiosa en la formulación de proyectos relacionados con la creación de nuevas subestaciones dentro de un Sistema de Distribución de Energía, contribuyendo así a la mejora y eficiencia de la infraestructura eléctrica en el sector energético.

4. Marco normativo

Los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento están rigurosamente regidos por un conjunto de regulaciones y estándares a nivel mundial. Estas normativas aseguran la efectividad, fiabilidad y seguridad de dichos sistemas. A continuación, se presenta una recopilación detallada de las normas utilizadas en este campo:

IEEE 80 - 2013 Guide for safety in AC substation grounding (Guía para la seguridad en el aterrizado de subestaciones en AC).

Este estándar ofrece detalles sobre prácticas seguras en la planificación y desarrollo de sistemas de puesta a tierra. Se enfoca en criterios particulares de diseño, acciones a tomar y enfoques analíticos para evaluar posibles consecuencias en caso de fallos. El propósito principal es establecer un método apropiado para llevar a cabo la instalación de estos sistemas, destacando la importancia de crear un diseño que sea seguro y de confianza para las subestaciones eléctricas.

IEEE 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. (Guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de la tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra.)

El principal enfoque de este estándar se concentra en desarrollar métodos que permitan la precisa medición y análisis de la resistencia y la impedancia del sistema de tierra. Además, aborda todas las propiedades relacionadas con el paso y el contacto eléctrico. También, se enfoca en comprender cómo se dispersa la corriente eléctrica en el suelo en situaciones de fallo. Este estándar

incluye la evaluación de la resistencia característica del sistema de puesta a tierra y proporciona recomendaciones para precauciones durante la realización de pruebas que puedan provocar fallas.

IEEE Std 998 - 2012 Guide for direct lightning stroke shielding of substations (Guía para el blindaje directo de subestaciones por impacto de rayo).

Este estándar detalla el diseño de sistemas de protección contra descargas directas de rayos, con un enfoque específico en subestaciones eléctricas. Presenta una serie de métodos que se han empleado durante muchos años para diseñar sistemas de protección contra rayos. Además, introduce modelos no convencionales más recientes que aún están en fase de investigación y que podrían encontrar aplicación en el campo de la ingeniería. El objetivo principal es proporcionar una amplia cantidad de información que permita establecer criterios de diseño sólidos para la protección contra rayos en diferentes casos de estudio.

NTC 6307. 2018 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Sistemas de puesta a tierra (SPT).

Esta norma define las especificaciones y condiciones necesarias para el diseño, construcción, medición y mantenimiento de sistemas de conexión a tierra. Su objetivo principal es garantizar la seguridad de las personas y la protección de los equipos en instalaciones eléctricas. Esta norma se aplica a sistemas de tierra permanentes utilizados en diversas tensiones de corriente alterna, que incluyen, entre otros, redes de uso final, subestaciones, líneas de transmisión, circuitos de distribución y plantas de generación.

NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas(rayos)

Esta norma proporciona una serie de pautas esenciales que deben considerarse en ubicaciones específicas para proteger varias estructuras y servicios que podrían ser susceptibles a posibles rayos o descargas atmosféricas. El objetivo principal es mitigar cualquier riesgo que pueda poner en peligro la seguridad de las personas y la vida en la zona que se pretende proteger.

RETIE. 2013 REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

RETIE. Bogotá: UPME.

Esta norma se enfoca en establecer medidas que aseguren la seguridad de las personas, así como la preservación de la vida animal y vegetal y la protección del medio ambiente. Su objetivo es prevenir, minimizar o eliminar los riesgos relacionados con la electricidad que podrían afectar a estos aspectos.

5. Generalidades de un sistema de puesta a tierra y un sistema de apantallamiento

Un sistema de puesta a tierra se describe como el conjunto de procedimientos necesarios para establecer una conexión eléctrica entre un equipo conductor y la tierra. De acuerdo con la regulación IEEE Std 81-2012, un sistema de conexión a tierra, o Grounding System, está compuesto por una serie de elementos conductores que forman parte de un sistema eléctrico específico. Estos componentes no presentan interrupciones ni dispositivos fusibles y se emplean para establecer una conexión entre los dispositivos eléctricos y el suelo o terreno. Este conjunto abarca tanto la acción de conectar a tierra como todos los elementos que se encuentran vinculados a este proceso.

5.1. Objetivos de un sistema de puesta a tierra

La finalidad de llevar a cabo la conexión a tierra en una subestación eléctrica es asegurar que las corrientes, independientemente de su origen, como corrientes de defecto, de frecuencia industrial o causadas por descargas atmosféricas, sean desviadas hacia el suelo de manera segura. El principal objetivo es la protección de las personas, que es de máxima preocupación y relevancia. No obstante, esto no descarta la importancia de salvaguardar los equipos utilizados en la subestación eléctrica.¹

Con un sistema de puesta a tierra se logra:

- Limitar la diferencia de potencial que, en un momento dado, puede presentarse entre estructuras metálicas y tierra.

¹Márquez, R. G. (1999). *La puesta a tierra de instalaciones eléctricas*. Alfaomega.

- la identificación de fallos de aislamiento hacia la tierra y garantizar el funcionamiento adecuado y la coordinación de las protecciones. Esto se hace con el propósito de eliminar o reducir el riesgo que representa una avería tanto para los equipos utilizados como para la seguridad de las personas involucradas.

- Limitar sobretensiones internas que puedan aparecer en la red eléctrica, en determinadas condiciones.

- Evitar que las tensiones de frente escarpado que originan las descargas de los rayos provoquen que un rayo caiga a tierra o a la línea de guarda, suba por la torre y pase a los conductores.

5.2. Elementos que conforman un sistema de puesta a tierra

- **Electrodos de puesta a tierra:** Estos componentes pueden adoptar diversas formas, como varillas, tubos, placas, flejes, cables desnudos o alambres. Sin embargo, es importante destacar que el aluminio no está autorizado para ser utilizado en los electrodos del sistema de puesta a tierra. Por lo general, se prefieren materiales como el cobre. La función principal de estos electrodos es mejorar la equipotencialidad del potencial eléctrico del suelo, evitando la formación de gradientes de tensión significativamente elevados.

-**Conductor del electrodo de la puesta a tierra:** Se utilizan para establecer la conexión entre el electrodo de puesta a tierra y el conductor de puesta a tierra del equipo. Los conductores pueden tener formas circulares o rectangulares y se entierran a una profundidad de aproximadamente 50 centímetros. Es recomendable utilizar cables con un número reducido de hilos. Siempre se debe asegurar la protección contra la corrosión a lo largo de la vida útil del

sistema de puesta a tierra, incluso si se opta por otros materiales conductores o aleaciones en lugar del cobre.

-Conductor de puesta a tierra del equipo: El conductor de puesta a tierra del equipo debe elegirse de manera que su temperatura no exceda la del aislamiento de los conductores activos que se encuentren en la misma canalización. Este conductor se utiliza para conectar las partes metálicas no conductoras de corriente eléctrica de los equipos al conductor del sistema de puesta a tierra. Su tamaño debe ser adecuado para soportar la corriente de falla del sistema sin problemas. Esto garantiza que el conductor de puesta a tierra funcione de manera segura y eficiente, sin sobrecalentarse y sin poner en riesgo el aislamiento de otros conductores cercanos.

-Puente de unión principal: Se emplea con el fin de garantizar la continuidad eléctrica entre partes metálicas que necesitan estar conectadas en un mismo potencial eléctrico. Esto incluye la conexión entre el conductor de puesta a tierra y la barra de equipotencialización de tierra.

5.3. Requerimientos de un sistema de puesta a tierra

RETIE (2013) establece que todas las subestaciones deben cumplir los requisitos de puesta a tierra establecidos en el Art. 15 de RETIE².

El sistema de puesta a tierra debe cumplir los siguientes requisitos:

² Ministerio de Minas y Energía, Santa fe de Bogotá D.C., (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

- Los componentes metálicos que no están destinados a formar parte de las instalaciones eléctricas no deben ser considerados como parte de los conductores del sistema de puesta a tierra. Sin embargo, esto no significa que no deban ser conectados a tierra por separado en muchas situaciones.
- Las conexiones que se encuentran por debajo del nivel del suelo, como parte del sistema de puesta a tierra, deben ser realizadas utilizando soldadura exotérmica o conectores que estén certificados para su uso directamente en enterramientos. Estos conectores deben cumplir con las normas específicas, como la norma IEEE 837 o la norma NTC 2206, para garantizar que sean seguros y adecuados para su aplicación en un entorno subterráneo.
- Para asegurarse de que las características del electrodo de puesta a tierra y su conexión con la red equipotencial cumplan con las regulaciones actuales, es necesario proporcionar puntos de conexión que sean accesibles e inspeccionables al momento de realizar las mediciones. En casos en los que se construyan cajas de inspección con este propósito, las dimensiones internas de estas cajas deben ser de al menos 30 cm x 30 cm si son cuadradas o rectangulares, o tener un diámetro de al menos 30 cm si son circulares. Además, la tapa de estas cajas debe ser removible para permitir el acceso. Es importante señalar que esta normativa no se aplica a los electrodos utilizados en líneas de transporte.
- Los electrodos que se instalen bajo tierra deben ser materiales que conduzcan la electricidad de manera eficiente y que tengan la capacidad de resistir la corrosión mientras estén en contacto con el suelo. También deben ser lo suficientemente resistentes para soportar el desgaste mecánico y proporcionar una superficie de contacto adecuada con el

suelo. Esto asegura que la resistencia a través del camino a través del suelo esté dentro de los límites requeridos para un funcionamiento eficaz del sistema de puesta a tierra.

- Cuando por requerimientos de un edificio existan varias puestas a tierra, todas ellas deben estar interconectadas eléctricamente, según criterio adoptado de IEC-61000-5-2, tal como aparece en la Figura 1.

Fuente: RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Artículo 15.

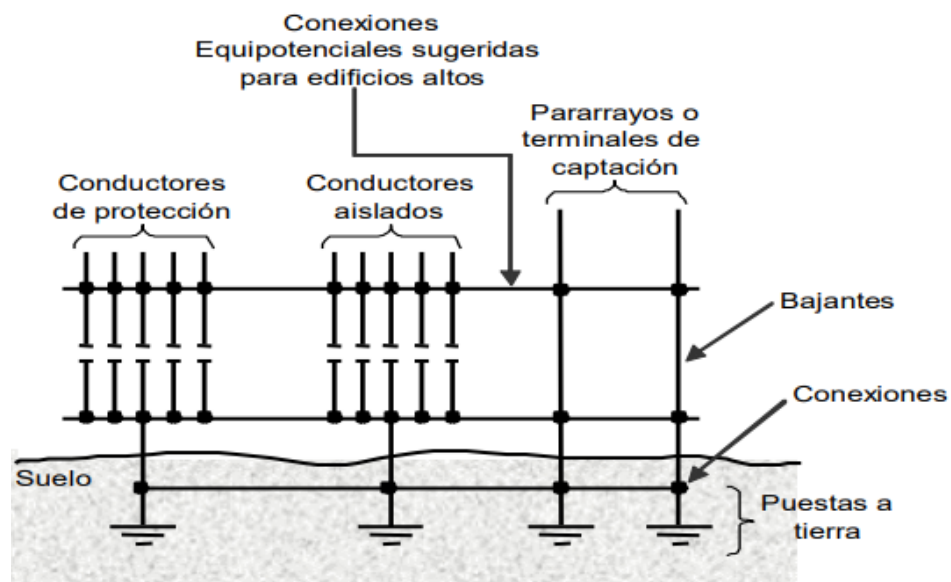


Figura 1 Sistemas con puestas a tierra dedicadas e interconectadas

El sistema de apantallamiento de una subestación se puede definir como un conjunto de dispositivos y estructuras diseñados para reducir o eliminar la interferencia electromagnética y proteger a los equipos y circuitos dentro de la subestación de descargas no deseadas.

5.4. Objetivos de un sistema de apantallamiento

El propósito fundamental de un sistema de apantallamiento es garantizar la seguridad de una instalación eléctrica contra los efectos de las descargas atmosféricas o rayos, así como prevenir daños físicos y lesiones a las personas. Este sistema se implementa con el fin de proteger las subestaciones que están expuestas a condiciones climáticas adversas, minimizar el riesgo de sobretensiones peligrosas, interceptar y disipar la corriente eléctrica generada por una descarga atmosférica, alejarla de los conductores activos y del equipo en general, y asegurar la seguridad de las personas, equipos, materiales e instalaciones que podrían estar expuestos a daños en caso de un impacto directo de un rayo.

Todas las consideraciones para la implementación del sistema de protección contra rayos, tales como las especificaciones, materiales y ubicación deben ser tenidas en cuenta, preferiblemente en la etapa de diseño de la estructura a construir. Ello implica un consenso entre los diseñadores, constructores e instaladores. Solo así será más benéfico y menos costoso llegar a conciliar las exigencias técnicas con la parte estética. La implementación del sistema parte de la base que los cableados de la instalación a proteger están de acuerdo con lo establecido en la NTC 2050³.

5.5. Elementos de un sistema de apantallamiento

- **Cables de guarda:** Estos cables se colocan sobre el equipo que necesita protección y se conectan a tierra a través de los pórticos de la subestación. Tienen ciertas características que los

³ Código Eléctrico Colombiano, C. E. NTC 2050. *Bogotá DC: el Instituto.*

hacen efectivos, como su capacidad para proporcionar protección a lo largo de todo el cable. Estos cables son relativamente livianos, lo que significa que no es necesario tener estructuras extremadamente robustas para soportar su peso. Además, permiten que las corrientes generadas por los rayos circulen en ambas direcciones a lo largo del cable, lo que reduce la cantidad de corriente que cada estructura debe disipar y, en última instancia, mejora la protección del equipo y las personas en la subestación.

- **Mástiles:** Requieren una estructura independiente, lo que los hace relativamente más costosos en comparación con los cables de guarda y las puntas. Su uso se limita a situaciones especiales en las que sea necesario proteger equipos aislados que no tienen acceso cercano a un pódico para su conexión. Aunque son efectivos en ciertos escenarios, su costo y complejidad hacen que se utilicen con menos frecuencia en comparación con otras soluciones de protección contra descargas.

6. Metodología de la guía para el diseño del sistema de puesta a tierra.

6.1. Identificación de la información

En esta fase, se ha determinado la información pertinente necesaria para la investigación. Esta acción se llevó a cabo mediante la exploración de fuentes de literatura académica, incluyendo el uso de bases de datos académicas ofrecidas por la Universidad Industrial de Santander y otros medios disponibles.

6.2. Clasificación de la información

La información que se revisó para la Guía metodológica fue en base a los siguientes factores:

- Tipo de normativa: Legal, vigente, internación y nacional.
- Relevancia: La información tiene una conexión directa, significativa y útil.
- Actualización: La información debe ser reciente y al día.

6.3. Análisis de la información

La creación de esta metodología se basa en el proceso de un sistema de puesta a tierra con información sobre cada uno de los pasos de este proceso que se obtuvieron mediante la inspección visual y la revisión de la documentación proporcionada. Además, se aplicaron las directrices

establecidas por la norma colombiana RETIE y el código eléctrico colombiano NTC 2050 a los procedimientos.

Se inicia siguiendo las directrices establecidas en el estándar IEEE 80-2013, conforme a las recomendaciones de las normativas colombianas RETIE y el código eléctrico colombiano NTC 2050. Estas regulaciones ofrecen una evaluación detallada de las distintas configuraciones geométricas que involucran electrodos verticales utilizados en subestaciones. Esto garantiza que el proyecto cumple plenamente con las normativas vigentes y se ajusta a las regulaciones aplicables en Colombia.

El estándar IEEE 80-2013⁴ presenta una metodología de cálculo que se utiliza para determinar el diseño final del sistema de puesta a tierra. Esta metodología se basa en mediciones normalizadas de la resistividad del terreno y en la interpretación de datos relacionados con la corriente de cortocircuito y las fallas en el sistema, las cuales generalmente son proporcionados por el operador de la red eléctrica. Estos datos se utilizan para calcular el tamaño del conductor de los electrodos que se instalarán. En el marco de este proyecto, se ha estudiado y aplicado lo establecido en el estándar con el propósito de crear un procedimiento específico y realizar cálculos que se introducirán en una plantilla de Excel diseñada con el fin de agilizar el proceso.

6.4. Elaboración del contenido

En la Guía metodológica se planteó un contenido de acuerdo con las normativas y estándares vigentes en la industria, y ha sido enriquecida por la contribución de expertos, personal capacitado y Operador de Red. Esto garantiza que los datos y análisis proporcionados sean

⁴ IEEE 80 - 2013 Guide for safety in AC substation grounding

confiables y precisos, respaldados tanto por las mejores prácticas de la industria como por la experiencia de profesionales altamente calificados en el tema.

6.4.1. Público objetivo

Ingenieros Eléctricos y Electrónicos: Estos profesionales están involucrados en el diseño, la construcción y el mantenimiento de subestaciones eléctricas. La guía les proporcionaría pautas detalladas sobre cómo implementar sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de manera efectiva y segura.

Técnicos y Operadores de Subestaciones: Las personas que trabajan en la operación diaria de subestaciones eléctricas necesitan comprender y seguir procedimientos específicos relacionados con la seguridad eléctrica, incluyendo la puesta a tierra y el apantallamiento.

Estudiantes de Ingeniería Eléctrica: Estudiantes y académicos que están estudiando ingeniería eléctrica pueden utilizar la guía como recurso educativo para comprender los principios y las prácticas relacionadas con la puesta a tierra y el apantallamiento en subestaciones eléctricas.

6.4.2. Objetivos de la guía

Proporcionar orientación detallada: El objetivo principal de la guía es proporcionar una orientación detallada y completa sobre los principios, procesos y procedimientos relacionados con los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento en subestaciones eléctricas.

Garantizar la seguridad eléctrica: Asegurar que los lectores comprendan cómo implementar sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de manera que se maximice la seguridad de las personas y los equipos en subestaciones eléctricas.

Cumplimiento normativo: Ayudar a los profesionales a cumplir con las regulaciones y estándares de seguridad eléctrica aplicables a nivel nacional e internacional.

Prevención de problemas técnicos: Guiar a los usuarios a comprender y prevenir problemas técnicos relacionados con la puesta a tierra, como interferencias electromagnéticas y problemas de seguridad.

Mejora de las habilidades técnicas: Mejorar las habilidades técnicas de quienes trabajan en subestaciones eléctricas, permitiéndoles diseñar, implementar y mantener sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de manera efectiva.

Promoción de mejores prácticas: Fomentar la adopción de mejores prácticas en el campo de la seguridad eléctrica y la gestión de subestaciones eléctricas puede ser un objetivo importante.

6.5. Desarrollo simplificado del contenido

A continuación, se presenta un diagrama de flujo utilizando el programa Microsoft Visio con el procedimiento que se realizó para diseñar la guía metodológica y de forma resumida se presenta el contenido de estudio para el diseño del sistema de puesta a tierra.

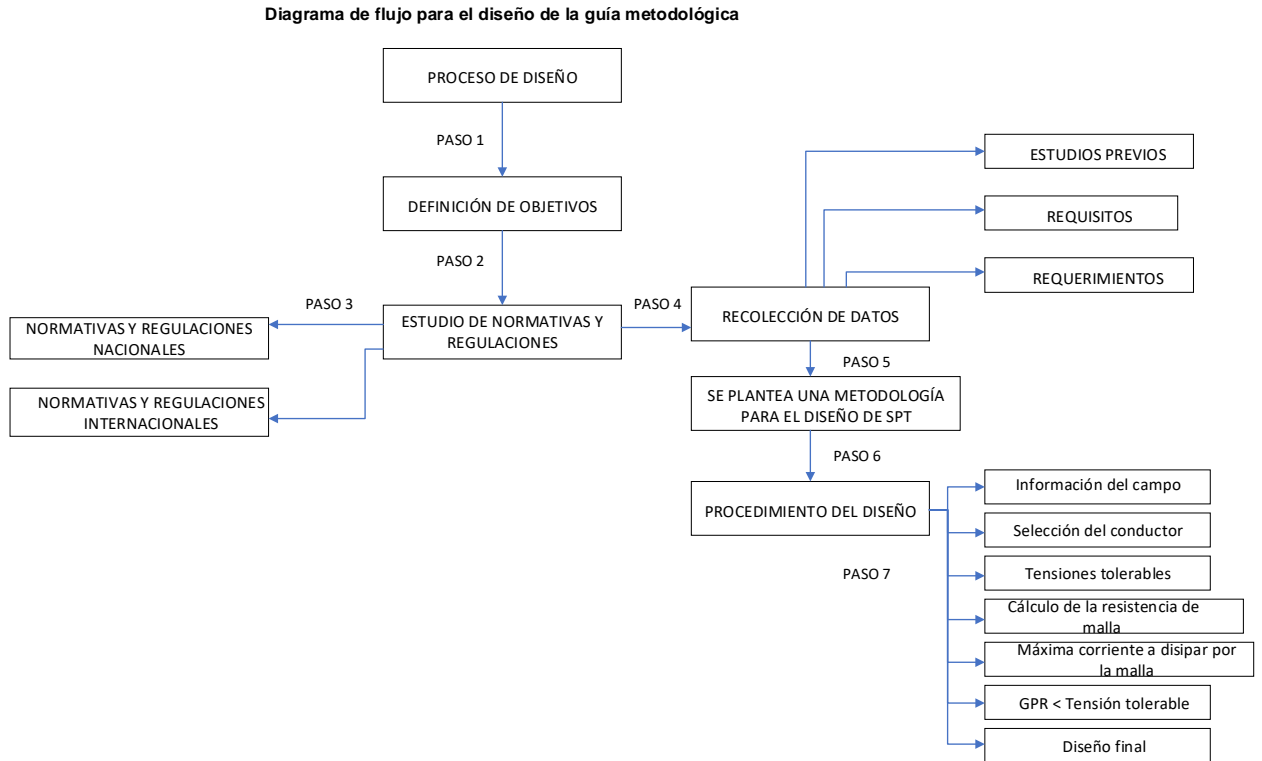


Figura 2 Diagrama de flujo del diseño de la guía metodológica

6.6. Estructura del suelo

Como un primer estudio el llevar a cabo investigaciones relacionadas con la resistividad del suelo en una subestación eléctrica es un elemento fundamental para determinar la composición general del suelo y evaluar su nivel de uniformidad. El análisis de muestras obtenidas a través de excavaciones, perforaciones y otros estudios geológicos ofrece información valiosa sobre la presencia de diferentes capas y las características del suelo.

Medidas de resistividad

Las estimaciones basadas en la clasificación del suelo ofrecen solo una aproximación de la resistividad, por lo tanto, resulta esencial llevar a cabo pruebas reales. Estas pruebas deben realizarse en varios puntos dentro de la zona de la subestación. Es inusual encontrar áreas en la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda la extensión y a diferentes profundidades. En su lugar, suele haber múltiples capas, cada una con su propia resistividad. Las variaciones horizontales son comunes y, en comparación con las variaciones verticales, a menudo son más notables. Las pruebas de resistividad del suelo son esenciales para determinar si existen cambios significativos en la resistividad en función de la profundidad.

La cantidad de mediciones tomadas debe ser mayor en áreas donde las variaciones son más pronunciadas, especialmente si algunas lecturas indican niveles de resistividad lo suficientemente altos como para plantear preocupaciones de seguridad. Si la resistividad varía considerablemente con la profundidad, se recomienda utilizar una gama más amplia de distancias entre puntos de prueba para obtener estimaciones precisas de la resistividad en las capas más profundas.

En este caso, se utilizará el método de Wenner, ya que es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para llevar a cabo estas mediciones.

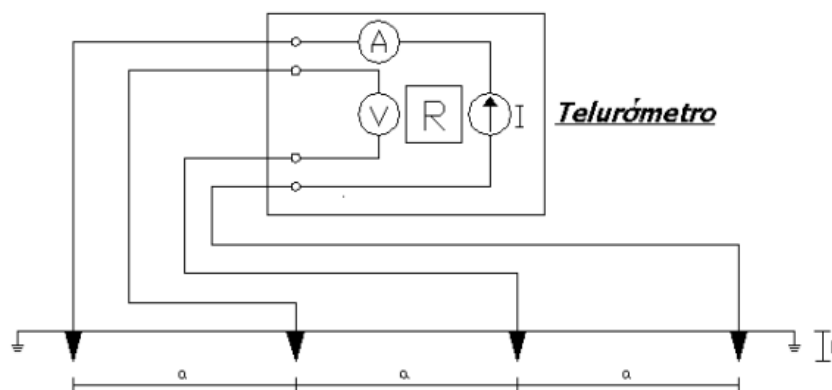


Figura 3 Método de los cuatro electrodos o de Wenner

FUENTE: Figura tomada de la IEEE Std 80-2013

Se insertan cuatro electrodos en el suelo en una disposición lineal a una profundidad "b" y separados por una distancia "a". Después, se mide y divide la tensión entre los dos terminales internos (o de potencial) por la corriente que fluye entre los dos terminales externos (o de corriente) para obtener el valor de la resistencia R, que se muestra en el telurómetro.

6.7. Elección del conductor

La elección del conductor necesario para la implementación de la malla de tierra depende de varias variables, como el número de conductores principales, el número de conductores de unión y las longitudes tanto horizontales como verticales de la malla.

El tamaño del conductor seleccionado deberá cumplir con varios factores como:

- a) Debe ser capaz de resistir los esfuerzos mecánicos anticipados y resistir la corrosión a lo largo de la vida útil de la instalación.
- b) Debe tener una alta conductancia para evitar caídas de tensión peligrosas durante una falla, lo que garantiza un flujo eficiente de corriente de falla hacia la tierra.
- c) La necesidad de limitar la temperatura del conductor.
- d) Se debe aplicar un factor de seguridad en la instalación de puesta a tierra y en todos los componentes eléctricos asociados para garantizar un funcionamiento seguro y confiable en todas las condiciones.

Debido a las restricciones el calibre mínimo es N° 2/0 AWG de cobre de 7 hilos, sin embargo, se recomienda usar el conductor de cobre N° 4/0 AWG con el fin de mejorar la rigidez

mecánica de la malla y soportar la corrosión. La Tabla 1 muestra las constantes de los materiales y la Tabla 2 muestra las dimensiones típicas de los conductores empleados para el sistema de puesta a tierra.

Tabla 1 Constantes de los materiales

| Descripción | Conductividad del material (% IACS) | Factor α_r a 20° C(1/°C) | K_0 en °C (0°C) | Temperatura de fusión T_m (°C) | Resistividad a 20 °C ρ_r $\mu\Omega - cm$ | Capacidad térmica TCAP $J/(cm^3 * °C)$ |
|---|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------------|--|--|
| Cobre comercial duro | 97 | 0.00381 | 242 | 1084 | 1,78 | 3,4 |
| Cable de acero recubierto de cobre | 40 | 0,00378 | 245 | 1084 | 4,4 | 3,8 |
| Cable de acero recubierto de cobre | 30 | 0,00378 | 245 | 1084 | 5,86 | 3,8 |
| Varilla de acero recubierta de cobre | 17 | 0,00378 | 245 | 1084 | 10,1 | 3,8 |
| Cable de acero recubierto de aluminio | 20,3 | 0,0036 | 258 | 657 | 8,48 | 3,561 |
| Acero 1020 | 10,8 | 0,00377 | 245 | 1510 | 15,9 | 3,8 |
| Varilla de acero recubierta de acero inoxidable | 9,8 | 0.00377 | 245 | 1400 | 17,5 | 4,4 |
| Varilla de acero recubierta de zinc | 8,6 | 0.0032 | 293 | 419 | 20,1 | 3,9 |
| Acero inoxidable 304 | 2,4 | 0,0013 | 749 | 1400 | 72 | 4 |

Tabla 2 Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra

| CALIBRE DEL CONDUCTOR | | AREA NOMINAL <i>mm²</i> | DIAMETRO m |
|-----------------------|-----|--|---------------|
| MCM | AWG | | |
| 350 | | 177.35 | 0.015 |
| 300 | | 152.01 | 0.0139 |
| 250 | | 126.68 | 0.0127 |
| 211.6 | 4/0 | 107.22 | 0.0117 |
| 167.8 | 3/0 | 85.03 | 0.0104 |
| 133.1 | 2/0 | 67.44 | 0.0093 |

6.8. Criterio de tensiones de paso y de toque tolerables

La seguridad de una persona se relaciona a la prevención de que el cuerpo humano absorba cantidades peligrosas de energía de choque antes de que se solucione la falla y el sistema quede sin energía.

La tensión de paso se presenta entre los pies de una persona dentro del perímetro de influencia de la malla de puesta a tierra, en un paso normal. La tensión de toque es la que puede ser puenteadada por la persona a través de un circuito que va de mano a mano o de mano a pie. Los niveles máximos de tensión que un individuo con un peso corporal de 50 kg y de 70kg puede tolerar no deben exceder los siguientes límites:

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

$$Ep_{50} = (1000 + 6C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (1)$$

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

$$Et_{50} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2)$$

-Tensión de paso límite tolerable por un cuerpo de 70 kg. de peso corporal:

$$Ep_{70} = (1000 + 6C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

-Tensión de toque límite tolerable por un cuerpo de 70 kg. de peso corporal:

$$Et_{70} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

Para garantizar la seguridad, es necesario que las tensiones de paso y de toque reales se mantengan por debajo de los límites máximos permitidos (o aceptables) correspondientes.

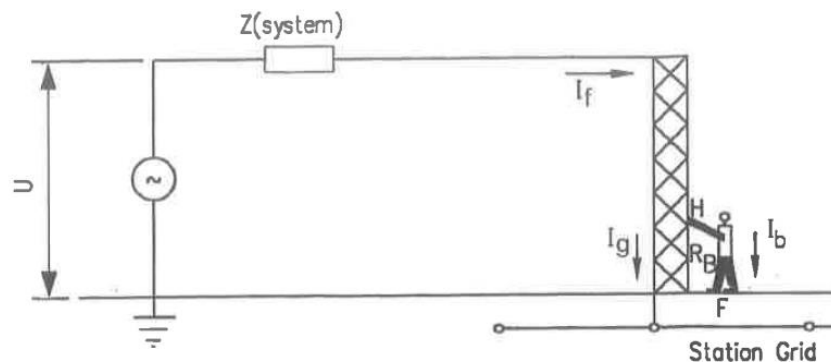


Figura 4 Tensión de toque

FUENTE: Figura tomada de la IEEE Std 80-2013

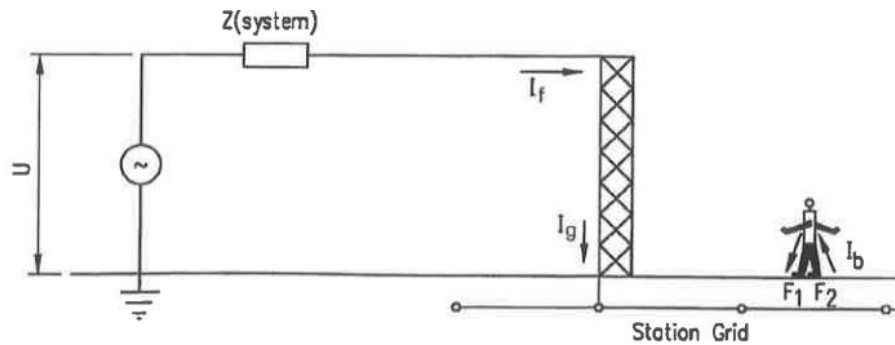


Figura 5 Tensión de paso

FUENTE: Figura tomada de la IEEE Std 80-2013

6.9. Resistencia de la malla de tierra

Un buen sistema de puesta a tierra proporciona una baja resistencia a tierra remota para minimizar el GPR.

La resistencia depende principalmente del área que ocupará el sistema de puesta a tierra, que generalmente se conoce en la etapa inicial de diseño. Para la mayoría de las subestaciones de media tensión, el rango normalmente aceptable es de 10Ω , dependiendo de las condiciones locales. El RETI Art. 15 recomienda algunos valores máximos de resistencia de la malla, sin embargo, lo que determina el diseño seguro de la malla no es la resistencia sino la garantía de que las tensiones de paso y de toque estén por debajo sin superar los máximos tolerables por el ser humano.

6.10. Elevación del potencial de tierra

Un sistema de conexión a tierra eficaz asegura que la resistencia hacia una ubicación distante en el suelo sea baja, con el fin de reducir la elevación del potencial de tierra GPR, tal como se describe a través de:

$$GPR = I_g * R_g \quad (5)$$

El objetivo primordial de los sistemas de conexión a tierra reside en garantizar la seguridad de las personas. Esta consideración es fundamental en la fase de diseño y conlleva la definición de una resistencia deseada como meta. Por lo tanto, los valores proporcionados en la tabla 3 se basan en la experiencia acumulada y no están necesariamente vinculados a una regulación específica.

Tabla 3 Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

| Utilizada para | Valor máximo de resistencia de puesta a tierra Ω |
|--|---|
| Subestaciones de media tensión de uso exterior | 10 |
| Subestaciones de media tensión de uso interior | 10 |
| Protección contra rayos | 4 |

Para garantizar la seguridad, la elevación del potencial de tierra debe mantenerse por debajo de la tensión de toque tolerable. Esto se logra mediante un diseño adecuado del sistema de puesta a tierra y la implementación de medidas de seguridad apropiadas.

6.11. Metodología de la malla de puesta a tierra

6.11.1. Conexiones a la malla

es necesario utilizar conductores que posean la capacidad eléctrica adecuada y la resistencia mecánica suficiente para establecer vínculos entre los siguientes elementos:

a) Todos los elementos de conexión a tierra, como las redes de puesta a tierra, las varillas y los pozos de tierra, así como en lugares donde se empleen componentes metálicos, como tuberías de agua o gas, cajas de pozos de agua, entre otros

b) Cualquier componente conductor que pudiera energizarse de forma accidental, como estructuras metálicas, marcos de maquinaria, envolturas de equipos de interruptores, tanto convencionales como aislados en gas, tanques de transformadores, cables de protección, entre otros.

c) Todas las fuentes de corriente, como sistemas de protección contra sobretensiones, bancos de capacitores o capacitores de acoplamiento, transformadores y los neutros de máquinas y circuitos de potencia.

d) esencial conectar a tierra elementos como el acero de refuerzo en construcciones civiles, rieles empleados para desplazar transformadores, tuberías de agua potable y bandejas para cables, incorporándolos al sistema de puesta a tierra.

e) Es importante realizar conexiones a tierra en elementos como ventanas, puertas, pasamanos, tableros, etc. Generalmente, se emplean cables de cobre para llevar a cabo estas conexiones.

6.11.2. Procedimiento de diseño.

Fuente: IEEE 80, 2013 página 92

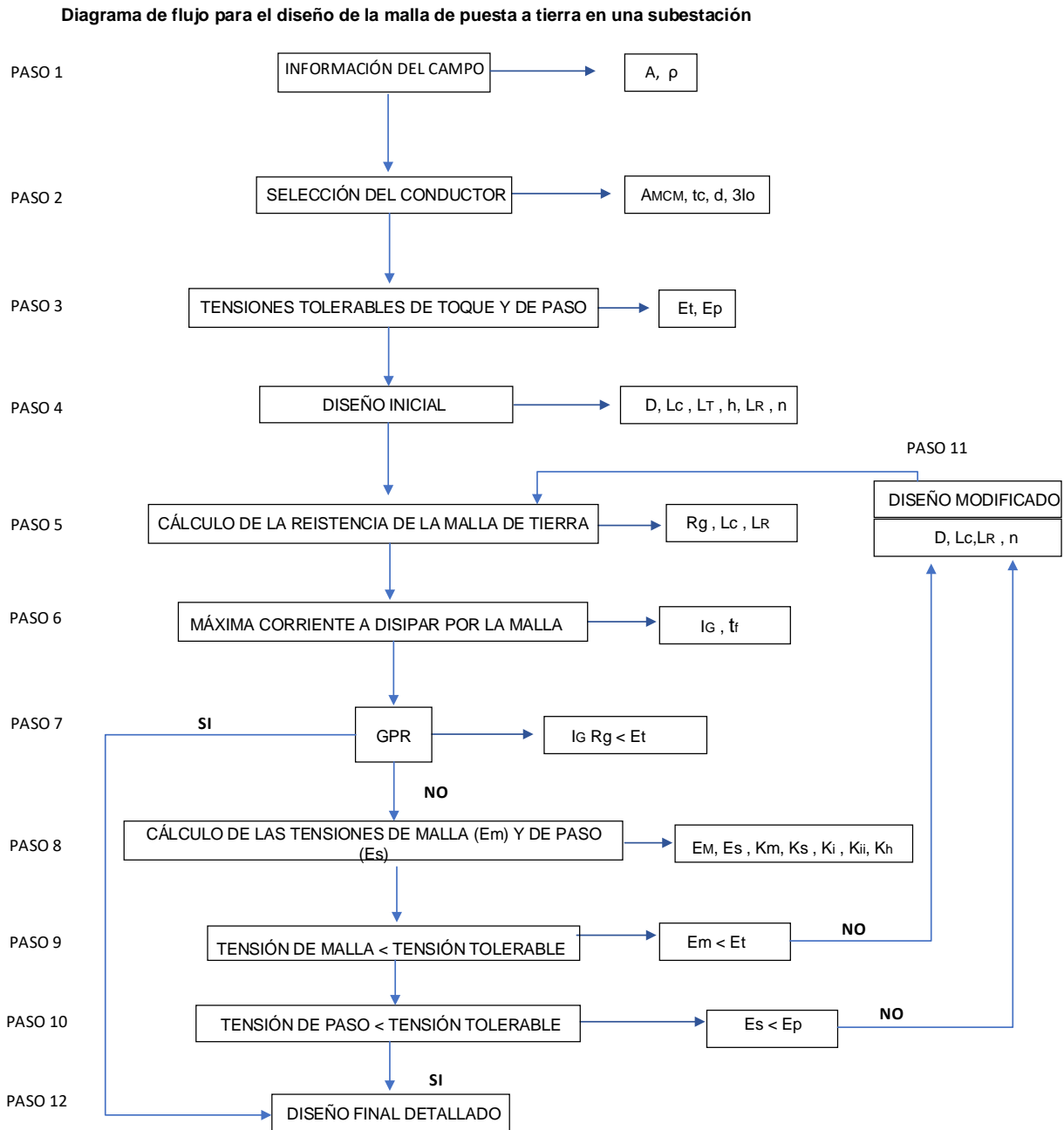


Figura 6 Diagrama de flujo para el diseño de la malla de tierra

7. Metodología de la guía para el diseño del sistema de apantallamiento

7.1. Estudio previo de descargas atmosféricas

Desde la época de Benjamín Franklin, se ha tenido conocimiento de que un objeto elevado y conectado a la tierra puede brindar protección contra las descargas atmosféricas directas a objetos situados debajo de él. A pesar de esto, aún se debaten los detalles acerca de la forma y la extensión exacta de la zona de seguridad proporcionada⁵.

Entender cómo se originan las descargas eléctricas es esencial para comprender cómo diversos elementos, como cables de guarda y mástiles, pueden proporcionar protección contra estas descargas.

El proceso de formación de un rayo comienza en una nube que puede estar cargada positiva o negativamente. Este rayo avanza en etapas que tienen longitudes variables, generalmente entre 10 y 80 metros, y cada etapa dura aproximadamente 50 microsegundos. La longitud más común de estas etapas es de 50 metros, y la dirección de cada etapa cambia en función de las condiciones atmosféricas.

El rayo solo avanza hacia un objeto cuando la parte delantera del rayo alcanza una distancia conocida como "distancia de descarga" desde un objeto con polaridad opuesta. En ese momento, se genera una pequeña descarga eléctrica desde el objeto hacia la trayectoria del rayo, estableciendo una conexión con los dispositivos de captación, los bajantes y el sistema de puesta a tierra.

⁵Mejia Villegas S.A. Colombia, (2003). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión

7.2. Análisis de Información

La guía tiene como objetivo realizar una metodología para mitigar los efectos de las descargas atmosféricas dando una solución parcial logrando la protección eficaz contra todos los efectos atmosféricos que se producen en una subestación. En el RETIE artículo 18 se establece que se debe proteger de acuerdo a la serie de normas IEC 62305 o NTC 4552 en las cuales se recomienda el uso del sistema integral de protección contra rayos (SIPRA).

Las normas NTC 4552⁶, son la adaptación de las IEC 62305⁷ teniendo en cuenta ajustes de algunos parámetros regionales. También usamos como base los criterios presentados en el estándar IEEE 998-2012 y el estudio del nivel cerámico del país. Colombia se encuentra en la zona de interconfluencia tropical, la cual presenta rayos con corrientes de impulso pico de mayor intensidad que otras zonas del planeta.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo utilizando el programa Microsoft Visio con el procedimiento que se realizó para diseñar la guía metodológica y de forma resumida se presenta el contenido de estudio para el diseño del sistema de apantallamiento.

⁶ NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas(rayos)

⁷ IEC 62305 Protection against lightning

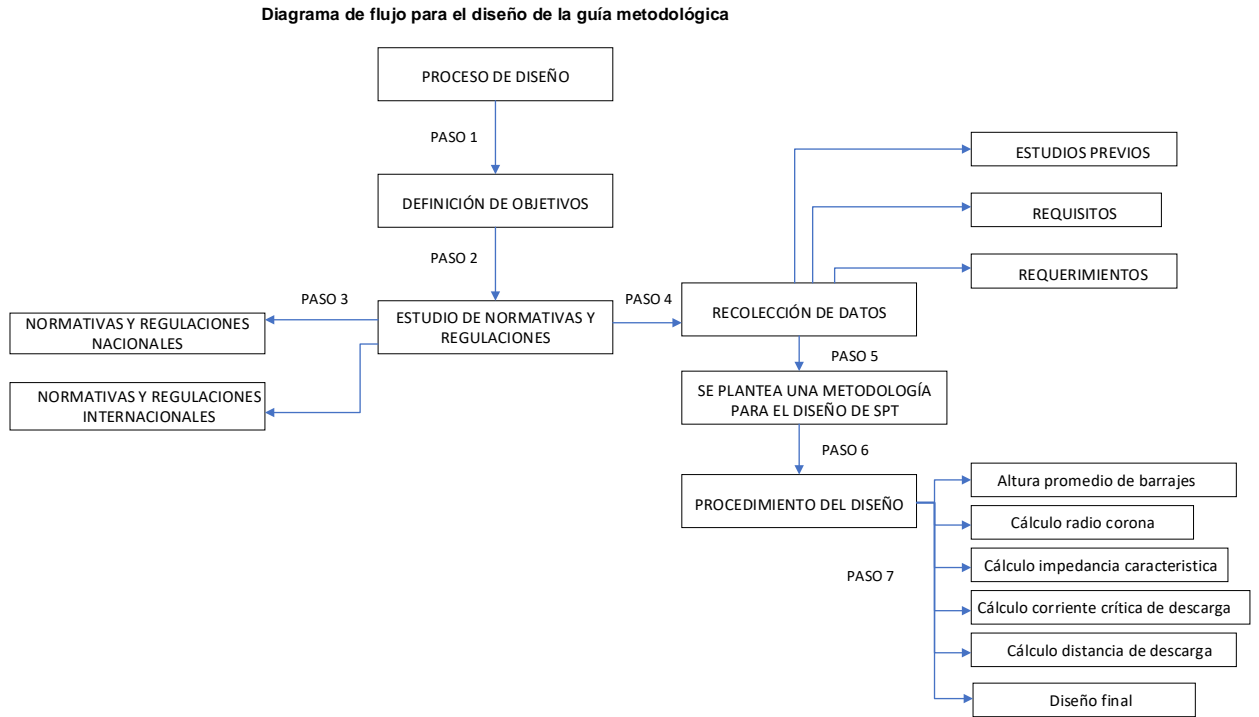


Figura 7 Diagrama de flujo del diseño de la guía metodológica

7.3. Nivel cerámico

El nivel cerámico se refiere a la frecuencia de actividad de rayos o descargas eléctricas atmosféricas en un área o región específica durante un período de tiempo determinado. Este nivel se emplea para indicar la cantidad de tormentas eléctricas que tienen lugar en una zona y se expresa generalmente en términos de la cantidad de eventos de rayos por año o por kilómetro cuadrado.

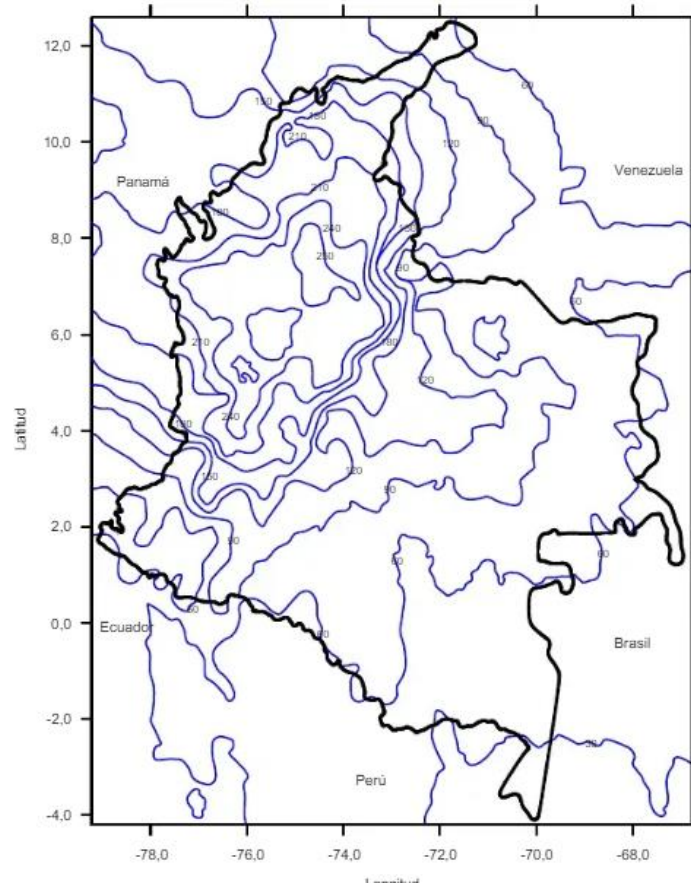


Figura 8 Mapa cerámico de Colombia

7.4. Densidad de rayos a tierra

La densidad de rayos a tierra se define como la cantidad promedio de descargas eléctricas que ocurren en un área de un kilómetro cuadrado durante un período de un año. Esta medida está vinculada al nivel cerámico mediante la siguiente ecuación:

$$GFD = 0.12N_i \quad (6)$$

Donde:

GFD: Densidad de rayos a tierra

N_i: Nivel cerámico

7.5. Métodos de Diseño Empírico

Existen dos enfoques tradicionales y ampliamente empleados en la actualidad para salvaguardar las subestaciones eléctricas contra impactos directos de rayos. Estos enfoques también se conocen como métodos geométricos y se denominan el método de ángulos fijos y el método de curvas empíricas. Estos métodos suelen proporcionar un nivel satisfactorio de protección, sin embargo, en este proyecto se estudió el método electrogeométrico recomendado en la IEEE Std 998-2012 que pretende que todos los objetos a ser protegidos sean menos atractivos a los rayos que los elementos de protección, determinando una distancia de descarga.

7.6. Modelo electrogeométrico

Este método posibilita elegir la altura efectiva del sistema de protección una vez que las dimensiones de las estructuras y las alturas de los espacios y conductores en la subestación ya han sido determinadas.

El concepto de este modelo es un mástil o un cable de guarda que está visto de frente y establece una semiesfera con el radio en la punta de mástil o cable de guarda, esta semiesfera tiene un radio que depende de una corriente crítica (corriente máxima que el equipo puede soportar sin sufrir daño), básicamente lo que sucede es que cualquier rayo que caiga en la zona de la esfera será atraído por el conductor, la idea es que la esfera cubra las zonas de los equipos y todos los elementos metálicos.

La distancia S en la esfera es la distancia que tienen los cuerpos al rayo se calcula en función a la corriente crítica y esta esfera se hace rodar sobre todas las estructuras metálicas de la subestación, por tanto, todo lo que está ahí abajo se considera apantallamiento y está protegido ante una eventual descarga atmosférica.

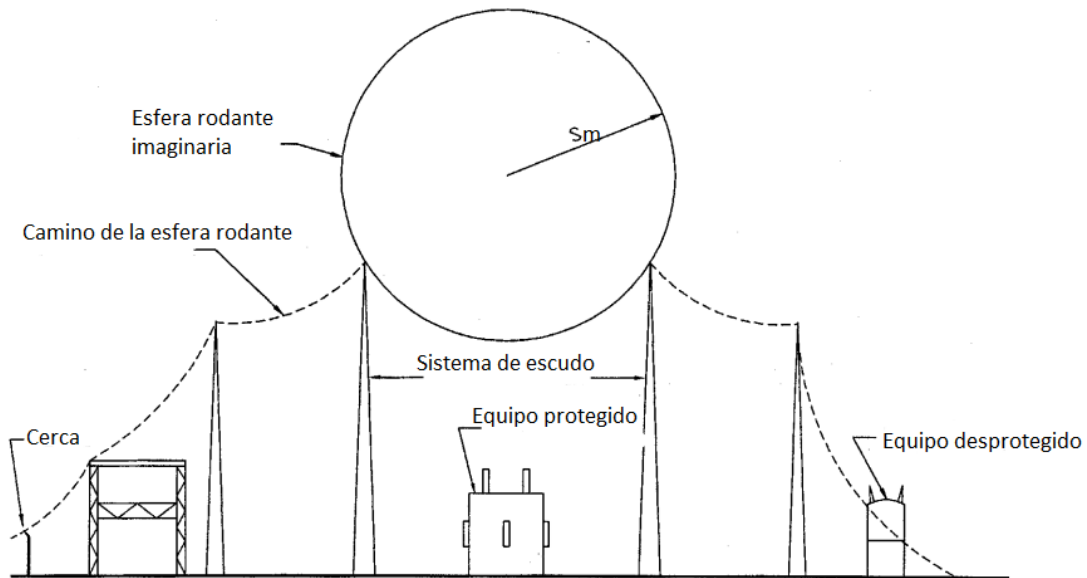


Figura 9 Ilustración del concepto de la esfera de radio igual a la distancia de descarga

FUENTE: Figura tomada de Mejia Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. página 131.

7.7. Procedimiento de diseño

El proceso para calcular el apantallamiento se sigue tanto para los cables de guarda como para los mástiles y se muestra en el siguiente diagrama:

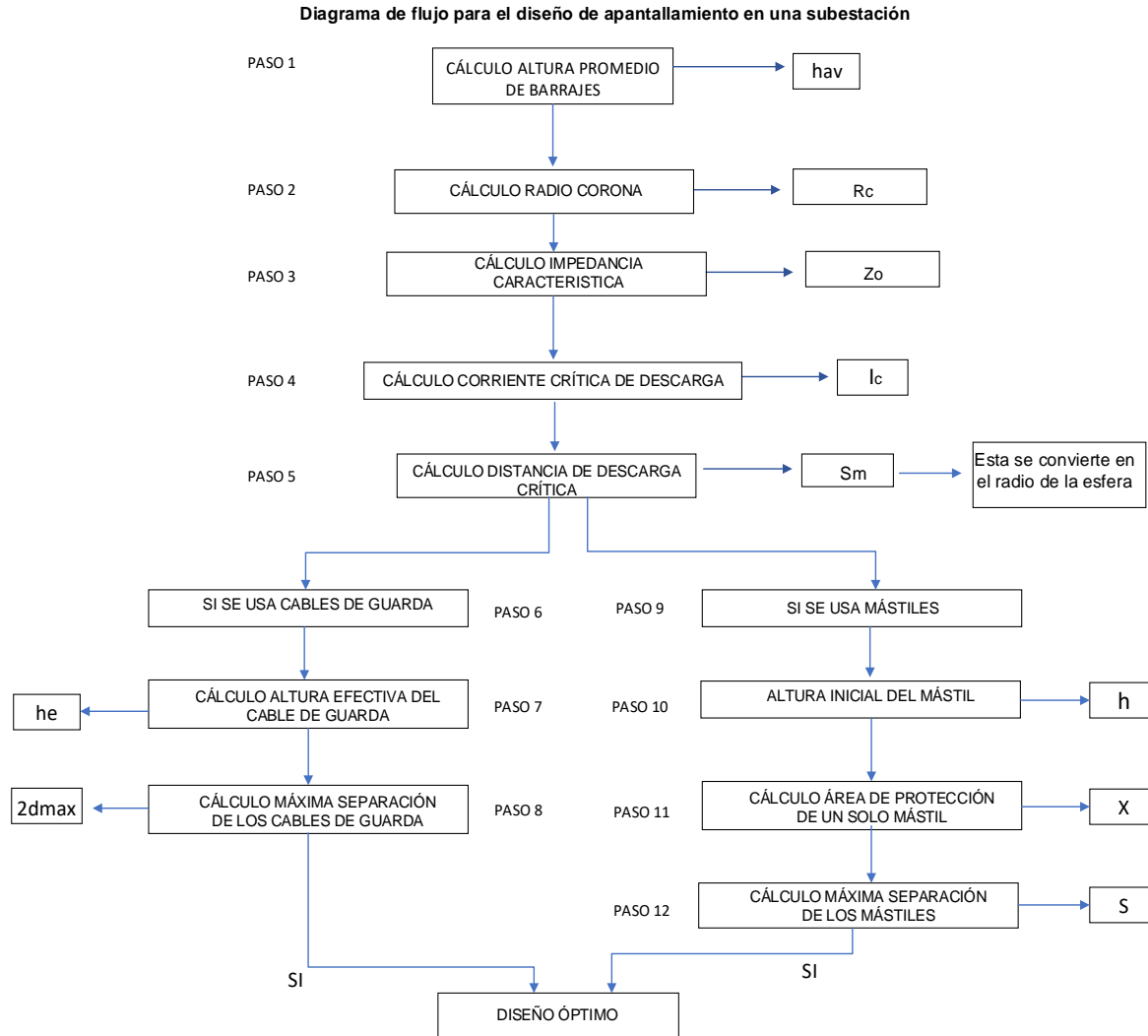


Figura 10 Procedimiento de apantallamiento en subestación

FUENTE: Mejia Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión

8. Conclusiones

Se realizó una investigación general de las normativas y estándares nacionales e internacionales en referencia al diseño de un sistema de puesta a tierra y apantallamiento en subestaciones de media tensión con el fin de desarrollar una guía metodológica que permita orientar el proceso para el diseño de estos sistemas, garantizando el cumplimiento de las regulaciones y normativas permitiendo la seguridad de las personas, los equipos y la instalación, conforme a la necesidad de la modernización, ampliación y reposición de activos en las subestaciones.

Los factores esenciales que influyen en el inadecuado desarrollo del diseño de un sistema de puesta a tierra y apantallamiento son comúnmente la incorrecta interpretación de las normativas, los estándares, el desconocimiento de los requerimientos básicos, los elementos utilizados actualmente para el diseño y construcción, el desinterés por verificar lo establecido y la falta de mantenimiento de los mismos, logrando impedir el objetivo de estos sistemas en una subestación.

La realización de la guía nos permite comprender la importancia de los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones de media tensión convencionales haciendo uso de las buenas prácticas de formación profesional como lo son la planeación, el diseño y la investigación, adquiriendo habilidades de propuesta y planteamiento para la solución de problemáticas que involucren factores como la fiabilidad, seguridad y rendimiento de subestaciones eléctricas.

Del estudio de la corriente de falla se puede deducir que es un parámetro determinante de la resistencia de tierra. En subestaciones de media tensión que deben derivar a tierra corrientes

altas es necesario procurar una resistencia de máximo 10 ohmios, para reducir tensiones peligrosas y el diámetro del conductor debe ser calculado de acuerdo a la magnitud de la corriente de falla y al tiempo de duración.

Se realizó el estudio del sistema de puesta a tierra, analizando los principales parámetros que influyen en su dimensionamiento, como lo son la corriente máxima de falla, la resistividad del terreno, la selección del conductor, las tensiones tolerables y la resistencia de puesta a tierra, lo que permitió realizar un ejemplo en una plantilla de Excel. Ver apéndice(B)

9. Recomendaciones

El seguimiento de la metodología presentada en este documento permite la obtención de sistemas de puesta a tierra y apantallamiento más confiables, seguros y completos para las subestaciones convencionales de media tensión.

Se recomienda complementar este documento con la aplicación de diferentes softwares que den muestra del procedimiento, ejecutando la metodología presentada con la finalidad de simplificar los parámetros y así lograr obtener un diseño de puesta a tierra y apantallamiento más exacto.

Es importante que los sistemas de puesta a tierra permanezcan atentos a los avances tecnológicos y se adhieran a las normativas actualizadas con el fin de optimizar su operatividad y eficiencia. La puesta a tierra desempeña un papel crítico en la protección contra eventos eléctricos no deseados en las instalaciones, y su efectividad puede ser mejorada significativamente mediante la incorporación de tecnologías de vanguardia y la alineación con las regulaciones más actuales en el campo eléctrico.

Referencias

ANSI/IEEE 80 - 2013 Guide for safety in AC substation grounding (Guía para la seguridad en el aterrizado de subestaciones en AC).

ANSI/IEEE 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. (Guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de la tierra y los potenciales de la superficie de la tierra de un sistema de puesta a tierra.)

IEEE Std 998 - 2012 Guide for direct lightning stroke shielding of substations (Guía para el blindaje directo de subestaciones por impacto de rayo).

International Electrotechnical Commission IEC 60071 – 2-2018: Insulation coordination – Part2: Application guide. Ginebra, Suiza.

International Electrotechnical Commission IEC 62305-2 Protection against lightning – Part 2: Risk management, 2010.

Márquez, R. G. (1999). La puesta a tierra de instalaciones eléctricas. Alfaomega.

Ministerio de Minas y Energía, Santa fe de Bogotá D.C., (2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

Mejia Villegas S.A. Ingenieros Consultores, Medellín-Colombia, (2003). Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión Segunda Edición.

Santa fe de Bogotá, D.C., (1998). Instituto Técnico de Normas Técnicas y Certificación, Código Eléctrico Colombiano, Norma técnica colombiana NTC 2050.

Hernández, O. C., & Herrera, J. A. (2003). CÁLCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA DE UNA SUBESTACIÓN.

GIRALDO CARDONA, HUMBERTO (1978). Estudio sobre diseño de mallas de puesta a tierra en subestaciones de alta tensión. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Tesis (pregrado).