
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 1 de 76	

**GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR EL DISEÑO SISTEMAS DE PUESTA A
TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA
TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL.**

Versión No. 1

10/10/2023

	ELABORÓ		REVISÓ	
NOMBRE:	María Franklin	Johan Carreño	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre
CARGO:	Estudiante Ing. Eléctrica	Estudiante Ing. Eléctrica	Director	Codirector


	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 2 de 76	

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
1. OBJETO	6
2. ALCANCE	6
3. DEFINICIONES	7
4. MARCO NORMATIVO EXTERNO	9
5. ALINEACIÓN REGULATORIA	9
5.1. INTERVENCIÓN DE PERSONAS CON LAS COMPETENCIAS PROFESIONALES.....	9
5.2. RESPONSABILIDAD DE LOS DISEÑADORES.....	10
5.3. RESPONSABILIDAD DE LOS CONSTRUCTORES.....	10
5.4. PRODUCTOS USADOS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS.....	11
5.5. PARÁMETROS PARA EL SISTEMA DE MEDIA TENSIÓN 34.5KV Y 13.8 KV	15
6. CRITERIOS DE DISEÑO	16
6.1. PARÁMETROS CRÍTICOS	16
6.1.1. Análisis de corriente máxima a disipar por la malla de tierra.....	16
6.1.2. Análisis de la Corriente simétrica de falla a tierra.....	17
6.1.3. Análisis de factor de decremento y crecimiento.....	18
6.2. ANÁLISIS DEL CÁLCULO DEL FACTOR DE DIVISIÓN DE CORRIENTE.....	18
6.3. DURACIÓN DE LA FALLA Y DURACIÓN DEL CHOQUE	21
6.4. ANÁLISIS DE LA RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL.....	21
6.5. ESTRUCTURA DEL SUELO.....	22
6.6. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD	23

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 3 de 76	

6.7.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO	25
6.8.	MODELO DE SUELO MULTICAPAS	27
6.9.	ELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL CONDUCTOR.....	28
7.	EVALUACIÓN Y COMPROBACIÓN DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA.....	32
7.1.	CRITERIO DE TENSIONES DE PASO Y DE TOQUE TOLERABLES	32
7.2.	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA.....	34
7.3.	CÁLCULOS SIMPLIFICADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	35
7.4.	ECUACIONES PARA SUELO HOMOGÉNEO.....	36
7.5.	ECUACIONES PARA TERRENO DE 2 CAPAS.....	37
7.6.	CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÁXIMA DE MALLA.....	38
7.7.	CÁLCULO DE LA TENSIÓN REAL DE PASO (EP).....	41
7.8.	REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR.	41
8.	METODOLOGÍA DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.....	44
8.1.	CONEXIONES A LA MALLA	44
8.2.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.	45
9.	APANTALLAMIENTO.....	46
9.1.	INTRODUCCIÓN	46
9.2.	MODELO ELECTRO-GEOMÉTRICO.....	46
9.2.1.	Distancia de descarga crítica	46
9.2.2.	Corriente Crítica.....	47
9.2.3.	Impedancia Característica.....	47
9.2.4.	Altura Promedio.....	48

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 4 de 76	

9.2.5.	Radio Corona.....	48
9.2.6.	Apantallamiento por cables de guarda.....	49
9.2.7.	Altura efectiva del cable de guarda	49
9.2.8.	Mástiles.....	51
9.2.9.	Procedimientos para el diseño.....	54
10.	RECOMENDACIONES.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Áreas típicas reconocidas para terrenos de las UC	14
Tabla 2	Parámetros para sistemas de media tensión	16
Tabla 3	Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (alimentadores).....	19
Tabla 4	Rango de resistividad del suelo	23
Tabla 5	Constantes del material.....	30
Tabla 6	Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra	31
Tabla 7	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra	35

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 5 de 76	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ejemplo de una subestación convencional de media tensión 15

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 6 de 76	

Figura 2 Factor de división de corriente.	21
Figura 3 Método de los cuatro electrodos o de Wenner	24
Figura 4 Curvas de Sunde	27
Figura 5 Tensión de toque.....	33
Figura 6 Tensión de paso	34
Figura 7 Diseño preliminar de la malla	42
Figura 8 Diagrama de flujo para el diseño de la malla de tierra	45
Figura 9 Apantallamiento con cable de guarda cada campo o cada dos campos.....	50
Figura 10 Apantallamiento con cable de guarda vista superior.....	51
Figura 11 Área protegida por un mástil	52
Figura 12 Protección con cuatro mástiles vista frontal y vista superior.....	53
Figura 13 Esfera rodante	55
Figura 14 Procedimiento de apantallamiento en subestación	56

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 7 de 76

INTRODUCCIÓN

En este documento se explican los principios esenciales para orientar el diseño del sistema de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones de media tensión de tipo convencional; sistemas cuyo objetivo es actuar como mecanismo de protección contra fallas internas y descargas eléctricas atmosféricas.

1. OBJETO

Desarrollar una guía metodológica para el diseño del sistema de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión utilizadas por un operador de red con el fin de preservar la seguridad tanto de las personas como de los equipos existentes en la subestación.

2. 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 de los elementos y procedimientos que permitan orientar el diseño del sistema de puesta a tierra y apantallamiento para una subestación convencional, de media tensión.

El alcance abarca los siguientes aspectos:

- **Definición de los requisitos y normas aplicables:** Requisitos técnicos, normas y regulaciones que deben ser considerados en el diseño del sistema de puesta a tierra y apantallamiento de subestaciones convencionales de media tensión.
- **Selección de materiales:** Orientar la 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.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 8 de 76	

- **Diseño del sistema de puesta a tierra:** Orientar el 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:** Orientar el proceso de diseño del sistema de apantallamiento, que incluye la selección de los materiales de apantallamiento, el cálculo de las corrientes de cortocircuito, 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.


3. DEFINICIONES

CAPACIDAD DE CORRIENTE: Corriente máxima que puede transportar continuamente un conductor o equipo en las condiciones de uso, sin superar la temperatura nominal de servicio.

CONDUCTOR NEUTRO: Conductor activo conectado intencionalmente al punto neutro de un transformador o instalación y que contribuye a cerrar un circuito de corriente.

CONDUCTOR A TIERRA: También llamado conductor del electrodo de puesta a tierra es aquel que conecta un sistema o circuito eléctrico intencionalmente a una puesta a tierra.

CONTACTO DIRECTO: Es el contacto de personas o animales con conductores activos o partes energizadas de una instalación eléctrica.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 9 de 76	

CONTACTO ELÉCTRICO: Acción de unión de dos elementos con el fin de cerrar un circuito. Puede ser de frotamiento, de rodillo, líquido o de presión.

CONTACTO INDIRECTO: Es el contacto de personas o animales con elementos o partes conductoras que normalmente no se encuentran energizadas. Pero en condiciones de falla de los aislamientos se puedan energizar.

FALLA: Degradación de componentes. Alteración intencional o fortuita de la capacidad de un sistema, componente o persona, para cumplir una función requerida.

OPERADOR DE RED: Empresa de Servicios Públicos encargada de la planeación, de la expansión y de las inversiones, operación y mantenimiento de todo o parte de un Sistema de Transmisión Regional o un Sistema de Distribución Local.

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT): Conjunto de elementos conductores continuos de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Comprende la puesta a tierra y la red equipotencial de cables que normalmente no conducen corriente.

SUBESTACIÓN: Conjunto único de instalaciones, equipos eléctricos y obras complementarias, destinado a la transferencia de energía eléctrica, mediante la transformación de potencia.

RED DE TIERRA O CUADRÍCULA DE TIERRA: Un sistema de electrodos de tierra interconectado arreglado en un patrón sobre un área específica y enterrado por debajo de la superficie del suelo.

TENSIÓN A TIERRA: Para circuitos puestos a tierra, la tensión entre un conductor dado y el conductor del circuito puesto a tierra o a la puesta a tierra; para circuitos no puestos a tierra, la mayor tensión entre un conductor dado y algún otro conductor del circuito.

TENSIÓN DE CONTACTO: Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 10 de 76

TENSIÓN DE PASO: Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso (aproximadamente un metro).

TENSIÓN NOMINAL: Valor convencional de la tensión con el cual se designa un sistema, instalación o equipo y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento. Para el caso de sistemas trifásicos, se considera como tal la tensión entre fases.

TIERRA (Ground o earth): Para sistemas eléctricos, es una expresión que generaliza todo lo referente a conexiones con tierra. En temas eléctricos se asocia a suelo, terreno, tierra, masa, chasis, carcasa, armazón, estructura o tubería de agua. El término “masa” sólo debe utilizarse para aquellos casos en que no es el suelo, como en los aviones, los barcos y los carros.

ALTURA EFECTIVA DEL APANTALLAMIENTO: altura sobre la parte superior del pórtico que sostiene los conductores de fases más elevados de la subestación, a la cual debe instalarse el cable de guarda para un apantallamiento efectivo.

ALTURA MÍNIMA: altura la cual debe ubicarse el cable de guarda por encima de las partes energizadas, de tal forma que, si se ubica a una altura menor, se producirá una zona de no apantallamiento en algunos puntos, que deberían ser apantallados por dicho cable.

NIVEL CERÁUNICO: número promedio de días por año durante los cuales se escuchan truenos en un sitio específico.

RIESGO DE FALLA DEL APANTALLAMIENTO: número esperado de años antes de que el apantallamiento de la subestación permita incidir un rayo en las partes energizadas, de tal forma que se produzca flameo en el aislamiento.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 11 de 76

4. MARCO NORMATIVO EXTERNO


Los sistemas de puesta a tierra y apantallamiento se encuentran estrictamente regidos por una serie de normativas y estándares internacionales que garantizan la eficiencia, confiabilidad y seguridad de dichos sistemas. A continuación, se presenta una recopilación exhaustiva de las normas utilizadas en este ámbito:

- IEEE 80 - 2013 Guide for safety in AC substation grounding (Guía para la seguridad en el aterrizado de subestaciones en AC).
- 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).
- NTC 6307. 2018 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Sistemas de puesta a tierra (SPT).
- NTC 4552. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas(rayos)
- RETIE. 2013 REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS. RETIE. Bogotá: UPME.

5. ALINEACIÓN REGULATORIA

5.1. INTERVENCIÓN DE PERSONAS CON LAS COMPETENCIAS PROFESIONALES

La construcción, ampliación o remodelación de toda instalación eléctrica objeto del RETIE, debe ser dirigida, supervisada y ejecutada directamente por personas calificadas competentes, con matrícula profesional vigente, que según la ley les faculte para cada tipo de actividad y deben cumplir con todos los requisitos del presente Reglamento que le apliquen.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 12 de 76

Conforme a la legislación vigente, la competencia para realizar bajo su responsabilidad directa actividades de, construcción, modificaciones, reparaciones, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas corresponderá a las siguientes personas calificadas, quienes responderán por los efectos resultantes de su participación en la instalación:

- a. Ingenieros electricistas, electromecánicos, de distribución y redes eléctricas, de acuerdo con la Ley 51 de 1986 por la cual se reglamenta el ejercicio profesional de la Ingeniería Eléctrica, Mecánica y Profesiones Afines y la Ley 842 de 2003 por la cual se reglamenta el ejercicio profesional de la ingeniería y de las profesiones afines y auxiliares. Los ingenieros electrónicos en los temas específicos de electrónica de potencia, control o compatibilidad electromagnética, asociados a la instalación eléctrica.
- b. Tecnólogos en electricidad o en electromecánica, de acuerdo con la Ley 392 de 1997, en el alcance que determine su formación.
- c. Técnicos electricistas conforme a las leyes 19 de 1990 y 1264 de 2008, en el alcance que establezca su matrícula profesional para el ejercicio de la profesión a nivel medio.

5.2. RESPONSABILIDAD DE LOS DISEÑADORES.

Los diseños de las instalaciones eléctricas deben propiciar que en la construcción de la instalación se cumplan todos los requerimientos del RETIE que le apliquen. Tanto las memorias de cálculo como los planos o diagramas deben contemplar en forma legible el nombre, apellidos y matrícula profesional de la persona o personas que actuaron en el diseño, quienes firmarán tales documentos y serán responsables de los efectos derivados de la aplicación del diseño. El diseñador debe atender las inquietudes del constructor e interventor y si se requieren cambios hacer los ajustes pertinentes.

El diseñador, previamente a la elaboración del diseño, debe cerciorarse en el terreno que las distancias mínimas de seguridad y franjas de servidumbre se pueden cumplir y debe dejar las evidencias de esta condición en las memorias de cálculo y planos de construcción.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 13 de 76

5.3. RESPONSABILIDAD DE LOS CONSTRUCTORES.


Los responsables de la construcción, ampliación o remodelación donde estén involucrada cualquier tipo de instalación eléctrica objeto del RETIE, deben:

- a. Asegurarse de contratar las personas calificadas, técnica y legalmente competentes para ejecutar dichas actividades.
- b. El responsable de la construcción de la instalación eléctrica debe verificar y validar el diseño y si está acorde con el RETIE debe aplicarlo. Si por razones debidamente justificadas considera que no es apropiado, debe solicitar al diseñador que realice los ajustes y dejar registro de la solicitud. Si no es posible que el diseñador realice las correcciones, el constructor las hará y dejará constancia de ellas, en ningún caso se permitirá que las correcciones se aparten del cumplimiento del RETIE. Todos los planos y memorias de cálculo se dejarán conforme a la instalación construida.
- c. Tanto el constructor de la obra donde esté involucrada la instalación como el responsable de la dirección o construcción directa de la instalación eléctrica, deben asegurar que la instalación cumple con todos los requisitos del presente reglamento que le apliquen y demostrarlo mediante el diligenciamiento y suscripción del documento denominado Declaración de Cumplimiento con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, en los términos y el formato establecido en el presente Anexo. La persona calificada que suscriba la declaración será responsable de los efectos que se deriven de la construcción, ampliación o remodelación de la instalación, durante la operación de la misma.


5.4. PRODUCTOS USADOS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS.

La selección de los productos o materiales eléctricos y su instalación debe estar en función de la seguridad, su utilización e influencia del entorno, por lo que se deben tener en cuenta entre otros los siguientes criterios básicos, además los exigidos en el Artículo 20:

- a. Certificado de Conformidad de Producto conforme al RETIE
- b. Compatibilidad de materiales: No deben causar deterioro en otros materiales, en el medio ambiente ni en las instalaciones eléctricas adyacentes.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 14 de 76

- c. Corriente de cortocircuito: Los equipos deben soportar las corrientes de cortocircuito previstas.
- d. Corriente y Tensión de trabajo: Asegurar que la corriente y tensión de operación no exceda la normal del equipo.
- e. Espacios disponibles para la operación y mantenimiento de la instalación y de los equipos.
- f. Frecuencia: Se debe tomar en cuenta la frecuencia de servicio cuando influya en las características de los materiales.
- g. Influencias externas (medio ambiente, condiciones climáticas, corrosión, altitud, etc.)
- h. Otros parámetros eléctricos o mecánicos que puedan influir en el comportamiento del producto, tales como el factor de potencia, tipo de corriente, conductividad eléctrica y térmica etc.)
- i. Posibilidades de sujeción mecánica y refrigeración de los equipos.
- j. Potencia: Que no supere la potencia de servicio.
- k. Temperaturas normales y extremas de operación.
- l. Tensión de ensayo dieléctrico: Tensión asignada mayor o igual a las sobretensiones previstas.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 15 de 76	

Activos de conexión para un SDL y un STR

Las buenas conexiones al Sistema de Transmisión Regional (STR) o al Sistema de Distribución Local (SDL) se refieren a los recursos necesarios del operador de la Red para establecer una conexión física con el STR o SDL operado por otro OR. Adicionalmente, las conexiones de mercancías también son aquellas que son para uso exclusivo del usuario final para conectar los niveles de tensión 4, 3, 2 o 1. La elección del nivel de tensión de conexión del usuario final depende de la ubicación de cada instrumento de medida.


Niveles de Tensión

Los niveles de tensión se utilizarán para categorizar los sistemas de transmisión regional y/o distribución local en función de su voltaje operativo nominal. Estos niveles se definen de la siguiente manera:

- Nivel 4: Incluye sistemas con tensión nominal igual o superior a 57,5 kV pero inferior a 220 kV.
- Nivel 3: Incluye sistemas con tensión nominal igual o superior a 30 kV pero inferior a 57,5 kV.
- Nivel 2: Incluye sistemas con tensión nominal igual o superior a 1 kV pero inferior a 30 kV.
- Nivel 1: Se refiere a sistemas con tensión nominal inferior a 1 kV

Sistema de distribución local (SDL)

El sistema de distribución local (SDL) está compuesto por una infraestructura eléctrica, las líneas de transmisión, estaciones transformadoras y los componentes correspondientes.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 16 de 76

Está diseñado para operar en los niveles de tensión 3, 2 y 1 y debe ofrecer servicios eléctricos en el mercado específico.


Subestaciones Convencionales

Las subestaciones de este tipo estarán equipadas con un transformador de potencia que operará con tensiones de transformación de 34.5/13.8 kV. Además, se aplicarán medidas de protección tanto en el lado de alta como en el lado de baja del transformador, siguiendo las directrices establecidas en este documento para cada caso específico. Estas subestaciones contarán con un edificio y podrán ser automatizadas en casos en los que solo se requiera supervisión ocasional o ser operadas localmente cuando se necesite la presencia constante de un operador y/o vigilante.

En cuanto a la disposición física de los equipos en el patio de la subestación, se considerará la instalación de dos módulos de transformación, de preferencia con capacidades iguales. Si inicialmente se instala solo un módulo de transformación, se dejará espacio para una posible ampliación en el futuro.

Las capacidades estándar de los transformadores de potencia serán de 10 MVA, 12.5 MVA, 15 MVA, 20 MVA y 26.6 MVA, y se aplicarán consideraciones generales para la configuración de subestaciones con capacidades de 10 y 12.5 MVA:

- Los transformadores de potencia de estas capacidades deberán estar equipados con cambiadores automáticos bajo carga.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 17 de 76	

- Los transformadores de 10 y 12.5 MVA deben contar con protecciones, como protección diferencial, protección Buchholz, entre otras.

- La configuración en 34.5 kV no incluirá una bahía de entrada de línea cuando la fuente cuente con al menos un interruptor o celda, a menos que se cumplan ciertas condiciones, como la existencia de generación conectada entre la fuente y la subestación o la posibilidad de flujo bidireccional entre la subestación y la fuente, en cuyo caso se deberá instalar la bahía de llegada de línea.

- Estas subestaciones incluirán un edificio que albergará el control y los servicios auxiliares de corriente alterna y continua de los equipos tanto en el patio como en el interior de la subestación.


Lado de primario 34.5 kV: La conexión de estas subestaciones podrá realizarse de dos maneras, la primera de las cuales implica la apertura de la línea para ingresar al barraje de la subestación, desde donde se distribuirá la energía.

Unidades Constructivas para un SDL

En subestaciones con Nivel de Tensión 3, se establecen cuatro Unidades de Control (UC) de Módulo Común de acuerdo a las siguientes categorías: Módulo Común tipo 1 para subestaciones con 1 a 2 bahías, Módulo Común tipo 2 para subestaciones con 3 a 4 bahías, Módulo Común tipo 3 para subestaciones con más de 4 bahías y Módulo Común Tipo 4 para subestaciones que cuentan con celdas en el lado de alta tensión y no tienen bahías.

En subestaciones de Nivel de Tensión 3, las Unidades de Control (UC) del Módulo de Barraje se asignan en función del número de bahías presentes en la subestación, siguiendo estas categorías: Módulo de Barraje Tipo 1 para subestaciones con 1 a 2 bahías, Módulo de Barraje Tipo 2 para subestaciones con 3 a 4 bahías, y Módulo de Barraje Tipo 3 para subestaciones con más de 4 bahías.

En subestaciones de Nivel de Tensión 2, las Unidades de Control (UC) del Módulo de Barraje se relacionan con el número de bahías o módulos de Nivel de Tensión 2 en la subestación, siguiendo estas categorías: Módulo de Barraje Tipo 1 para subestaciones con

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 18 de 76	

1 a 2 bahías, Módulo de Barraje Tipo 2 para subestaciones con 3 a 4 bahías, y Módulo de Barraje Tipo 3 para subestaciones con más de 4 bahías.

Áreas Típicas reconocidas para terrenos de las UC

FUENTE: Esta tabla es tomada de Resolución CREG 097 de 2008

Tabla 1 Áreas típicas reconocidas para terrenos de las UC

Subestaciones convencionales nivel de tensión 3						
configuración	Bahía de línea (m ²)	Bahía transformador (m ²)	Bahía acople, seccionamiento, transferencia (m ²)	Modulo común tipo 1 (m ²)	Modulo común tipo 2 (m ²)	Modulo común tipo 3 (m ²)
Todas las configuraciones	100	120	100	670	1330	1990
Subestaciones convencionales reducidas nivel de tensión 3						
configuración	Bahía de línea (m ²)	Bahía transformador (m ²)	Modulo común tipo (m ²)			
Todas las configuraciones	40	60	160			
Subestaciones convencionales reducidas nivel de tensión 2						
configuración	Bahía de línea (m ²)	Bahía transformador (m ²)				
Todas las configuraciones	40	60				


	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	Página 19 de 76
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	



Figura 1 Ejemplo de una subestación convencional de media tensión

FUENTE: Figura tomada de Google Earth Pro

5.5. PARÁMETROS PARA EL SISTEMA DE MEDIA TENSIÓN 34.5kV Y 13.8 kV


En la siguiente tabla 2 se presentan los parámetros del sistema que serán tenidos en cuenta para el desarrollo de un diseño a modo de ejemplo. Estos parámetros fueron tomados de la norma IEC 60071-1, sin embargo, son valores que pueden variar dependiendo del estudio del proyecto.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 20 de 76

Tabla 2 Parámetros para sistemas de media tensión

PARÁMETRO	NIVEL 34.5 kV	NIVEL 13.8 kV
Tensión nominal fase-fase	34.5 kV	13.8 kV
Máxima tensión de servicio fase-fase	36 kV	17.5kV
Tensión asignada al impulso tipo rayo a la altura de la instalación	170kV	95kV
Tensión asignada soportada de corta duración a frecuencia industrial	70 kV	38 kV
Frecuencia asignada	60 Hz	60 Hz
Corriente de cortocircuito para equipos y conductores	31.5 kA	25 kA
Duración de la corriente de cortocircuito	1 s	1 s
Tiempo máximo de despeje de falla asumido	0.5 s	0.5 s
Distancia de fuga mínima	34.7 mm / kV	34.7 mm / kV
Tensión de corriente alterna trifásica 4 hilos	208 Vca	208 Vca
Tensión de corriente alterna monofásica 2 hilos	120 Vca	120 Vca
Tensión de corriente continua	125 Vcc	125 Vcc

6. CRITERIOS DE DISEÑO

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 21 de 76

6.1. PARÁMETROS CRÍTICOS

Cualquier sistema eléctrico sometido a las regulaciones del RETIE debe poseer una planificación elaborada por individuos que estén debidamente capacitados y autorizados para llevar a cabo esta tarea. El diseño pormenorizado tiene que cumplir con los requisitos establecidos en el proceso de cálculo de una malla de puesta a tierra, siguiendo las directrices definidas en la normativa IEEE Std 80-2013.

6.1.1. Análisis de corriente máxima a disipar por la malla de tierra.

El valor máximo para la corriente de falla anticipada que circula hacia el suelo y pasa a través de la red del sistema de puesta a tierra de la subestación se encuentra definido a través de la siguiente ecuación, tal como se especifica en la normativa IEEE Std 80-2013:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (1)$$

Donde:

$I_F \rightarrow 3I_0$ Corriente simétrica de falla a tierra en A

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.


$S_f \rightarrow$ Factor de División de corriente.

$C_p \rightarrow$ Factor de crecimiento de la subestacion, considera el incremento futuro de la corriente de falla

6.1.2. Análisis de la Corriente simétrica de falla a tierra.

- a) En el caso de una falla en la configuración línea-línea-tierra, sin considerar la resistencia de la falla ni la resistencia de la puesta a tierra de la subestación, se calcula utilizando la siguiente fórmula, conforme a las indicaciones de la normativa IEEE Std 80-2013:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3 \cdot E \cdot Z_2}{Z_1 \cdot (Z_0 + Z_2) + Z_2 \cdot Z_0} \quad (2)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 22 de 76	

- b) Para el caso de una falla en la configuración línea-tierra, sin tener en cuenta la resistencia de la falla ni la resistencia de puesta a tierra de la subestación, se calcula utilizando la siguiente expresión de acuerdo con las directrices establecidas en la normativa IEEE Std 80-2013:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3 \cdot I_0 = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3)$$

Donde:

I_0 → Valor RMS de secuencia cero de la corriente simétrica de falla en A.

E → Tensión fase – neutro RMS en V.

Z_1 → Impedancia equivalente de secuencia (+) del sistema en el punto de falla.


Z_2 → Impedancia equivalente de secuencia (–) del sistema en el punto de falla.

Z_0 → Impedancia equivalente de secuencia (0) del sistema en el punto de falla.

En una ubicación específica, una falla sencilla en la configuración línea-tierra será considerada la peor opción cuando se cumple la condición $Z_1 * Z_0 > (Z_2)^2$ en el punto de la falla. Por otro lado, una falla línea-línea-tierra será la peor opción cuando se satisface la condición $Z_1 * Z_0 < (Z_2)^2$. Es importante mencionar que, en algunos sistemas, es frecuente que Z_1 sea igual a Z_2 .

6.1.3. Análisis de factor de decremento y crecimiento.

Cuando se está diseñando la disposición de la puesta a tierra, es esencial considerar la corriente asimétrica de falla. Para calcular esta corriente, se multiplica la corriente

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 23 de 76	

asimétrica de falla por un factor de reducción, cuyo valor se determina a través de la fórmula establecida en la normativa IEEE Std 80-2013.

Dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{Ta}{t_f} (1 - e^{-\frac{2t_f}{Ta}})} \quad (4)$$

Donde:

t_f → Duración de la falla en segundos.

Ta → Constante de tiempo de la componente en DC.


$$Ta = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (5)$$

X, R → Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación $\frac{X}{R}$

Si la estructura de la malla a tierra se planifica teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación y no se consideran aumentos potenciales en la carga o en los alimentadores en el futuro, en ese caso, el factor de crecimiento "CP" tendrá un valor de 1. Esto significa que no se anticipan incrementos en la capacidad y se diseña la malla de puesta a tierra con la capacidad actual de la subestación.

6.2. ANÁLISIS DEL CÁLCULO DEL FACTOR DE DIVISIÓN DE CORRIENTE.

El proceso de cálculo involucra la obtención de una representación equivalente para los cables de protección, los neutros y otros elementos similares. En otras palabras, estos componentes se integran con la malla de conexión a tierra en la subestación. Posteriormente, se resuelve esta representación equivalente con el fin de determinar cómo

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 24 de 76

se distribuye la corriente total de falla entre la malla de tierra y el suelo circundante, así como la proporción que se desplaza a través de los cables de protección o neutrales hacia las áreas terrestres ubicadas en los puntos de entrada y salida de las líneas que conectan con la subestación.

La tabla 3 presenta las impedancias equivalentes de los cables de protección de líneas de transmisión y los neutros de alimentadores de distribución. Estas impedancias se han calculado considerando una contribución remota del 100% y se muestran para dos conjuntos de valores: en la primera columna, se utilizan resistencias de electrodos de puesta a tierra de líneas de transmisión (R_{tg}) de 15Ω y resistencias de electrodos de puesta a tierra de alimentadores de distribución (R_{dg}) de 25Ω . En la segunda columna de impedancias equivalentes, se emplean valores de R_{tg} de 100Ω y R_{dg} de 200Ω .

El factor de división de corriente será entonces la siguiente expresión tomada de la IEEE Std 80-2013:

$$(S)_{\frac{x}{y}} = \left| \frac{(Z_{eq})_{\frac{x}{y}}}{R_g + (Z_{eq})_{\frac{x}{y}}} \right| \quad (6)$$

Donde:

$(Z_{eq})_{\frac{x}{y}} \rightarrow$ impedancia equivalente de X cables de guarda de líneas de transmisión y

Y neutros de alimentadores de distribución.

$R_g \rightarrow$ resistencia del sistema de puesta a tierra de la subestación.

FUENTE: Tabla tomada de Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF. Universidad nacional de Colombia.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 25 de 76

Tabla 3 Impedancias equivalentes aproximadas de cables de guarda de líneas de transmisión y neutros de distribución (alimentadores)

Número de líneas de transmisión	Número de neutros de distribución	Zeq (ohms)	
		Rtg=15, Rdg=25	Rtg=100, Rdg=200
1	1	0.91 + J0.485	3.27 + J0.652
1	2	0.54 + J0.33	2.18 + J0.412
1	4	0.295 + J0.20	1.32 + J0.244
1	8	0.15 + J0.11	0.732 + J0.133
1	12	0.10 + J0.076	0.507 + J0.091
1	16	0.079 + J0.057	0.387 + J0.069
2	1	0.685 + J0.302	2.18 + J0.442
2	2	0.455 + J0.241	1.63 + J0.324
2	4	0.27 + J0.165	1.09 + J0.208
2	8	0.15 + J0.10	0.685 + J0.122
2	12	0.10 + J0.07	0.47 + J0.087
2	16	0.08 + J0.055	0.66 + J0.067
4	1	0.45 + J0.16	1.30 + J0.273
4	2	0.34 + J0.15	1.09 + J0.22
4	4	0.23 + J0.12	0.817 + J0.16
4	8	0.134 + J0.083	0.546+J0.103
4	12	0.095 + J0.061	0.41+J0.077
4	16	0.073 + J0.05	0.329+J0.06
8	1	0.27 + J0.08	0.72+J0.152
8	2	0.23 + J0.08	0.65+J0.134
8	4	0.17 + J0.076	0.543+J0.11

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 26 de 76	

8	8	0.114 + J0.061	0.408+J0.079
8	12	0.085 + J0.049	0.327+J0.064
8	16	0.067 + J0.041	0.273+J0.052

Dada la complejidad inherente al cálculo del factor de división de corriente, se opta por emplear un enfoque gráfico según lo detallado en el Anexo C de la normativa IEEE 80-2013, utilizando la Figura C.15. Esto se aplica particularmente en casos que presenten una fuerte similitud con subestaciones de media tensión de tipo convencional, como las de 34,5/13,8 kV. El procedimiento gráfico se ilustra en la Figura 2.

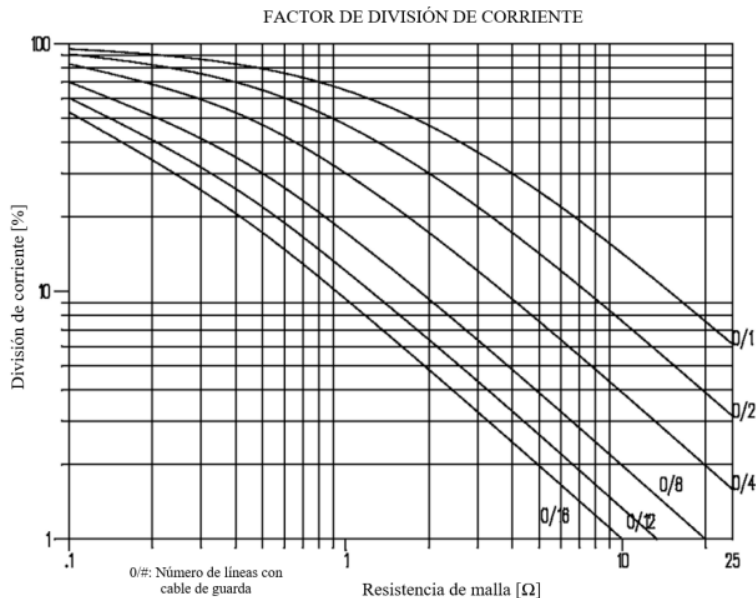



Figura 2 Factor de división de corriente.

FUENTE: IEEE Std 80-2013

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 27 de 76	

6.3. DURACIÓN DE LA FALLA Y DURACIÓN DEL CHOQUE


Usualmente, se asume que la duración de la falla es igual a la duración del impacto, a menos que la duración de la falla sea el resultado de múltiples impactos sucesivos, como los generados por los cierres automáticos en los dispositivos de recierre (reclosers). La elección de "tf" puede implicar considerar períodos más largos, especialmente en el contexto de subestaciones de distribución. La elección de los valores de "tf" y "ts" puede resultar en la combinación más adversa de factores que afectan la disminución de la corriente de falla y las corrientes permitidas para el cuerpo humano. En subestaciones de media tensión, los valores típicos para "tf" y "ts" suelen variar entre 0.25 segundos y 1 segundo.

6.4. ANÁLISIS DE LA RESISTIVIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL.

Una cubierta superficial con una alta resistividad cumple una función esencial al limitar la corriente que podría atravesar el cuerpo humano. Esta capa agrega resistencia a la ya existente en el cuerpo. Al emplear un material de alta resistividad, como grava o roca volcánica triturada, que se coloca sobre la superficie y encima de la malla de conexión a tierra, se incrementa la resistencia de contacto entre el suelo y los pies de las personas dentro de la subestación. Esto resulta en una reducción significativa de la corriente que podría fluir a través del cuerpo. La disminución exacta depende de las diferencias en la resistividad entre el suelo en contacto con la malla y la capa superficial, así como del grosor y la naturaleza del material que constituye la capa superficial.

Una capa superficial con una resistividad que oscila entre 2000 Ω -m y 5000 Ω -m se encuentra en la gama típica. Una capa de grosor comprendido entre 0.1 metros y 0.15 metros puede reducir el factor de riesgo, que es la relación entre la corriente que atraviesa el cuerpo y la corriente de cortocircuito, hasta una proporción de 10:1 en comparación con las condiciones de humedad natural del suelo.

Aquí se introduce el factor de disminución de la capa superficial (CS), una expresión tomada de acuerdo con la normativa IEEE Std 80-2013. Este factor puede ser visto como una

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 28 de 76	

corrección que se aplica para calcular la resistencia efectiva del pie de una persona cuando se encuentra sobre un material superficial de espesor limitado.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} \quad (7)$$

Donde:

C_s → Factor de disminución de la capa superficial.

ρ → Resistividad del terreno ($\Omega - m$).

ρ_s → Resistividad de la capa superficial ($\Omega - m$).

h_s → Espesor de la capa superficial.

La norma también establece la definición del factor de reflexión, que se utiliza para describir la relación entre las resistividades de materiales distintos.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (8)$$

6.5. ESTRUCTURA DEL SUELO

La investigación de la resistividad del suelo en una subestación es un aspecto crítico para comprender la composición general del terreno y evaluar su uniformidad. El análisis de muestras obtenidas a través de excavaciones, perforaciones y otros métodos geológicos proporciona información valiosa sobre la presencia de diversas capas y la naturaleza del suelo. Estos datos ofrecen una visión de los rangos de resistividad presentes en la ubicación. En la siguiente Tabla 4 se presenta la variedad de resistividades en diferentes tipos de suelos.


	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 29 de 76

Tabla 4 Rango de resistividad del suelo


TIPO DE SUELO	RANGO DE RESISTIVIDAD (Ω -m)
Lama	5 - 100
Humus	10 - 150
Limo	20 -100
Arcillas	80 - 330
Tierra de jardín	140 - 480
Caliza fisurada	500 - 1000
Caliza compacta	1000 - 5000
Granito	1500 - 10000
Arena común	3000 - 9000
Basalto	10000 - 20000

6.6. MEDIDAS DE RESISTIVIDAD

La estimación basada en la clasificación del suelo brinda una aproximación a la resistividad, pero es crucial llevar a cabo pruebas en múltiples puntos dentro del área de la subestación. Es poco frecuente encontrar áreas en la subestación donde la resistividad sea uniforme en toda su extensión y a profundidades considerables. En la mayoría de los casos, nos encontramos con varias capas, cada una con su propia resistividad característica. Las variaciones laterales son un fenómeno común y, en comparación con las variaciones verticales, suelen ser más notables y pueden influir de manera significativa.

Es necesario aumentar el número de mediciones en áreas donde se observan variaciones más significativas, especialmente si algunas lecturas indican posibles preocupaciones de seguridad. Si la resistividad varía considerablemente con la profundidad, es aconsejable utilizar una variedad más amplia de espaciados de prueba para obtener estimaciones de resistividad en las capas más profundas.

El método de Wenner es ampliamente recomendado debido a su alta aplicabilidad y su status como una de las técnicas más utilizadas. Es versátil y puede adaptarse a una amplia

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 30 de 76	

gama de tipos de suelos y condiciones geológicas, lo que lo convierte en una elección sólida para su implementación en diversas ubicaciones.

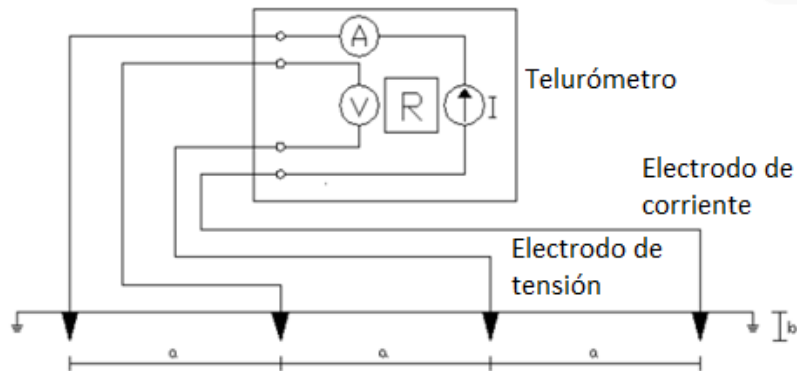


Figura 3 Método de los cuatro electrodos o de Wenner


FUENTE: Figura tomada de la IEEE80 2013.

Se instalan cuatro electrodos en el suelo en una disposición en línea a una profundidad "b" y separados por una distancia "a". Después, se registra la tensión entre los dos electrodos internos (o terminales de potencial) y se divide por la corriente que fluye entre los dos electrodos externos (o terminales de corriente) para calcular el valor de la resistencia R, que se visualiza en el telurómetro. Posteriormente, se aplica la siguiente fórmula conforme a las directrices de la norma IEEE Std 80-2013:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (9)$$

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente del suelo ($\Omega - m$).

$R \rightarrow$ Resistencia medida en Ω .

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 31 de 76

$a \rightarrow$ Distancia entre electrodos adyacentes en m.

$b \rightarrow$ Profundidad de los electrodos en m.

si $b \ll a$, como es el caso más común:

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (10)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden usar para determinar la resistividad aparente ρ_a a una profundidad a .

6.7. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS MEDIDAS DE RESISTIVIDAD DEL SUELO


El propósito fundamental de las mediciones es encontrar un modelo del suelo que se aproxime de manera efectiva a las condiciones reales del terreno. La resistividad del suelo experimenta cambios laterales y en términos de profundidad, los cuales dependen de la estratificación del terreno. Además, las condiciones climáticas pueden tener un impacto en las mediciones de resistividad, por lo tanto, es preferible realizar estas pruebas durante un período de verano prolongado para obtener valores de resistividad más altos y representativos de las peores condiciones posibles.

Los modelos típicamente empleados para describir la resistividad del suelo son:

Modelo de suelo uniforme:

Este método se emplea en situaciones en las que la variación de la resistividad aparente es moderada. En raras ocasiones, en la realidad, se encuentra un suelo completamente uniforme. No obstante, en casos excepcionales de suelos verdaderamente homogéneos, este modelo puede proporcionar resultados bastante precisos.

Cuando las diferencias entre las resistividades de las diversas capas son relativamente pequeñas, es factible utilizar un valor promedio de la resistividad del suelo. Este enfoque

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 32 de 76

se utiliza como un punto de partida inicial o como una referencia general. Para obtener una estimación aproximada de la resistividad en un suelo uniforme, se puede calcular el promedio aritmético de las resistividades aparentes medidas en diferentes puntos y direcciones dentro del área en cuestión, como se describe a continuación:

$$\rho_{a \text{ prom}} = \frac{(\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an})}{n} \quad (11)$$

Donde:

$\rho_{a1} + \rho_{a2} + \rho_{a3} + \dots + \rho_{an} \rightarrow$ Resistividades aparentes medidas a diferentes espaciamentos siguiendo el método de Wenner.

$n \rightarrow$ Número total de medidas tomadas.

Modelo de suelo de dos capas:

Este método ofrece una representación altamente precisa de las condiciones reales del suelo. Implica la consideración de una capa superior con una profundidad definida y una resistividad diferente a la capa inferior, que se supone tener un grosor infinito.


Un modelo que considera dos capas de suelo implica la presencia de una capa superficial con profundidad limitada que yace sobre una capa inferior de profundidad prácticamente infinita. La alteración súbita en la resistividad cerca de cada una de estas capas puede ser expresada mediante el factor de reflexión K , como se detalló anteriormente en la ecuación (8).

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$$

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega - m$.


$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa inferior en $\Omega - m$.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 33 de 76

El proceso de obtención de los parámetros ρ_1 y ρ_2 , así como la profundidad H utilizando el método de Sunde, se lleva a cabo de la siguiente manera:

- a) Se crea un gráfico con p_a en el eje vertical (Y) y "a" en el eje horizontal (X).
- b) Utilizando el gráfico anterior, se estiman los valores de ρ_1 y ρ_2 extendiendo la gráfica en ambos extremos en caso de que los datos de campo sean limitados.
- c) Se calcula la relación ρ_2/ρ_1 y se selecciona una curva del gráfico proporcionado en la figura siguiente. También es posible realizar una interpolación para trazar una nueva curva en el gráfico.
- d) Se elige el valor de p_a/ρ_1 en el eje Y, dentro de la región con la pendiente de la curva apropiada ρ_2/ρ_1 .
- e) Se identifica el valor correspondiente a/h en el eje X.
- f) Se calcula p_a multiplicando el valor seleccionado de p_a/ρ_1 por ρ_1 .
- g) Se lee el espaciamiento de prueba relacionado en el gráfico de p_a versus a .
- h) Finalmente, se calcula la profundidad del nivel superior H utilizando la separación de prueba adecuada, "a".

Este método permite estimar los parámetros y profundidades relevantes basándose en mediciones de resistividad y su representación gráfica.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 34 de 76

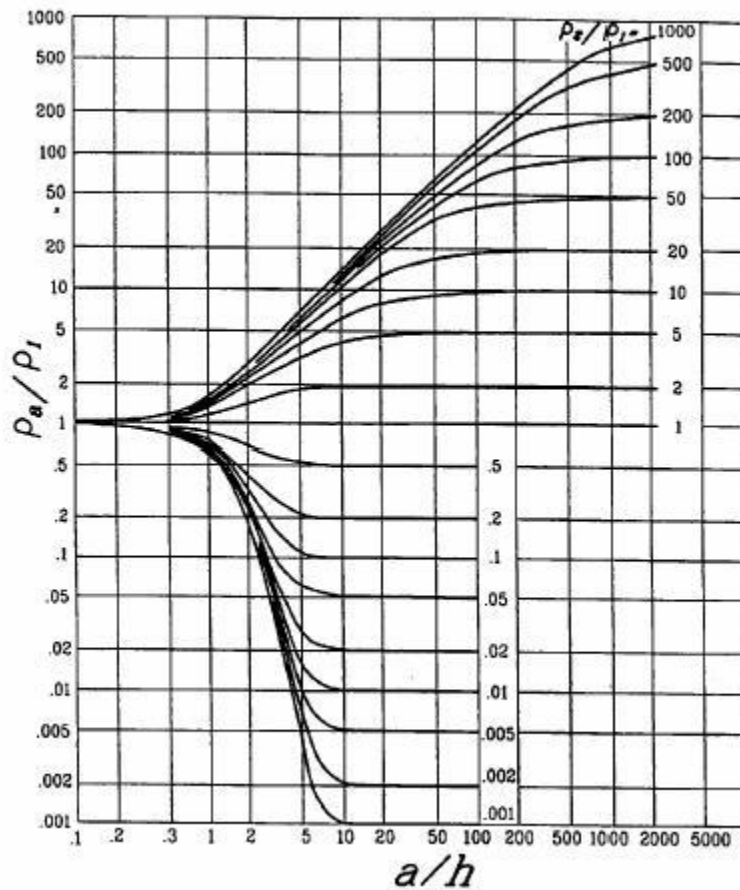



Figura 4 Curvas de Sunde

Fuente: Figura tomada de la IEEE80 2013.

Modelo de suelo multicapa:

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 35 de 76	

Este enfoque se utiliza cuando las condiciones del suelo son más intrincadas y de naturaleza compleja.

6.8. MODELO DE SUELO MULTICAPAS

En ciertas situaciones, nos encontramos con suelos que carecen notablemente de uniformidad, lo que hace necesario emplear técnicas de modelado que involucren múltiples capas. Esto se vuelve esencial cuando no es práctico utilizar un modelo de suelo de dos capas. Un modelo que incorpora múltiples capas puede ser diseñado con disposiciones tanto horizontales como verticales.

Para interpretar las variaciones en las resistividades del suelo en casos de no uniformidad significativa, es necesario recurrir al método de los elementos finitos. En este proceso de interpretación, es fundamental tener en cuenta las propiedades anisotrópicas del tensor de conductividad para resolver la ecuación de manera adecuada.


6.9. ELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL CONDUCTOR

La ecuación (12) se utiliza para calcular el incremento de temperatura en un conductor de tierra o para determinar el tamaño necesario del conductor en función de la corriente de falla que circula a través de él. Esta ecuación se encuentra especificada en la normativa IEEE Std 80-2013.

$$A_{MCM} = I_F \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \cdot a_t \cdot \rho_r}\right) * \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (12)$$

Donde:

$I_F \rightarrow$ Corriente asimétrica de falla RMS en KA, se usa la más elevada encontrada.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 36 de 76	

$A_{MCM} \rightarrow$ Area del conductor en MCM

$T_m \rightarrow$ Máxima temperatura disponible o temperatura de fusión en $^{\circ}C$. T

$T_a \rightarrow$ Temperatura ambiente en $^{\circ}C$.

$T_r \rightarrow$ Temperatura de referencia para las constantes del material en $^{\circ}C$.

$a_0 \rightarrow$ Coeficiente térmico de resistividad a $0^{\circ}C$ en $17^{\circ}C$.

$a_r \rightarrow$ Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T , $1/^{\circ}C$.

$\rho_r \rightarrow$ Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia T , $\mu \Omega - cm$.

$K_0 \rightarrow \frac{1}{a_0} \left[\left(\frac{1}{a_0} \right) - T_r \right]$ en $^{\circ}C$.

$T_c \rightarrow$ Duración de la corriente en seg.

$TCAP \rightarrow$ Capacidad termica por unidad de volumen en $J/(cm^3 * ^{\circ}C)$.

La Tabla 3 proporciona los datos para las constantes a_r , K_0 , T_m , ρ_r y $TCAP$.

La formula simplificada da una aproximación muy buena:

$$A_{MCM} = I_F * K_f * \sqrt{t_c} \quad (13)$$

Donde:

$K_f \rightarrow$ Constante para el material, usando una $T_a = 40^{\circ}C$.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 37 de 76

El tamaño del conductor seleccionado generalmente es mayor que el que se determinaría únicamente en función de la capacidad de fusión. Esto se debe a diversos factores, que incluyen:

- a) El conductor debe ser lo suficientemente robusto para resistir los esfuerzos mecánicos previstos y la corrosión a lo largo de la vida útil de la instalación.
- b) El conductor debe tener una alta conductividad para evitar caídas de tensión peligrosas durante una falla.
- c) Es necesario limitar la temperatura del conductor para evitar sobrecalentamientos.
- d) Debe aplicarse un factor de seguridad tanto a la instalación de puesta a tierra como a los demás componentes eléctricos.

Es común utilizar un conductor de calibre mínimo de N° 2/0 AWG de cobre de 7 hilos en muchas aplicaciones, pero en el caso de subestaciones, se recomienda el uso de un conductor de cobre de N° 4/0 AWG. Esto se hace con el propósito de mejorar la resistencia mecánica de la malla de tierra y para que pueda resistir la corrosión de manera efectiva. La Tabla 6 proporciona las dimensiones típicas de los conductores utilizados en el sistema de puesta a tierra.

FUENTE: Tabla tomada IEEE Std 80-2013.


	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 38 de 76	

Tabla 5 Constantes del material

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


	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 39 de 76	

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 $J/(cm^3 * °C)$
Acero inoxidable 304	2,4	0,0013	749	1400	72	4

FUENTE: Tabla tomada IEEE Std 80-2013.

Tabla 6 Dimensiones típicas de los conductores de puesta a tierra

CALIBRE DEL CONDUCTOR		ÁREA NOMINAL mm^2	DIÁMETRO 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

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 40 de 76	

7. EVALUACIÓN Y COMPROBACIÓN DE SISTEMAS DE PUESTAS A TIERRA.

7.1. CRITERIO DE TENSIONES DE PASO Y DE TOQUE TOLERABLES

La protección de las personas está estrechamente relacionada con la prevención de que el cuerpo humano absorba niveles críticos de energía de choque eléctrico antes de que se resuelva la falla y el sistema quede sin energía. Para determinar las tensiones de paso y de contacto en el contexto de la seguridad eléctrica, se utilizan modelos de referencia que consideran el cuerpo humano como un conductor eléctrico. Estos modelos emplean valores estándar de 50 kg y 70 kg para representar las masas típicas de un adulto promedio y un adulto grande, respectivamente. Estos valores se han establecido como estándares en numerosos países y se utilizan para evaluar los riesgos de choque eléctrico y diseñar sistemas eléctricos seguros. Cumplir con estos estándares y regulaciones es esencial para garantizar la seguridad en entornos eléctricos.

Las ecuaciones siguientes, tomadas de la normativa IEEE Std 80-2013, establecen las tensiones máximas que un cuerpo humano de 50 y 70 kg de peso corporal puede tolerar:

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


$$Ep_{50} = (1000 + 6C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (14)$$

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

$$Et_{50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) * \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (15)$$

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

$$Ep_{70} = (1000 + 6C_s \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (16)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 41 de 76

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

$$Et_{50} = (1000 + 1.5C_s \rho_s) * \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (17)$$

Donde:

$R_B = 1000 \Omega \rightarrow$ Resistencia promedio del cuerpo humano.

$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \rightarrow$ Corriente tolerable en función del tiempo por el cuerpo (A).

$T_s \rightarrow$ Duración del choque (s).

$6C_s \rho_s = 2R_f \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies separados 1 metro en serie sobre la capa superficial.

$1.5C_s \rho_s = \frac{R_f}{2} \rightarrow$ Resistencia a tierra de los 2 pies juntos en serie sobre la capa superficial.

$R_B = \frac{\rho}{4b} \rightarrow$ Resistencia a tierra de un disco metálico de radio b ($b = 0.08m$)

Sobre la superficie de una malla de resistividad ρ .

$C_s \rightarrow$ Factor de disminución de la capa superficial.

$\rho_s \rightarrow$ Resistividad del material de la capa superficial en $\Omega - m$.

Es esencial que las tensiones de paso y de contacto reales estén por debajo de los límites máximos permisibles (o tolerables) correspondientes para garantizar la seguridad en el entorno eléctrico.

La Figura 5 ilustra la corriente de falla que se descarga a tierra a través del sistema de puesta a tierra de la subestación, así como una persona que toca una estructura metálica conectada a tierra. Esta representación visualiza el potencial riesgo de choque eléctrico y subraya la importancia de mantener las tensiones dentro de los límites de seguridad establecidos por las regulaciones.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	

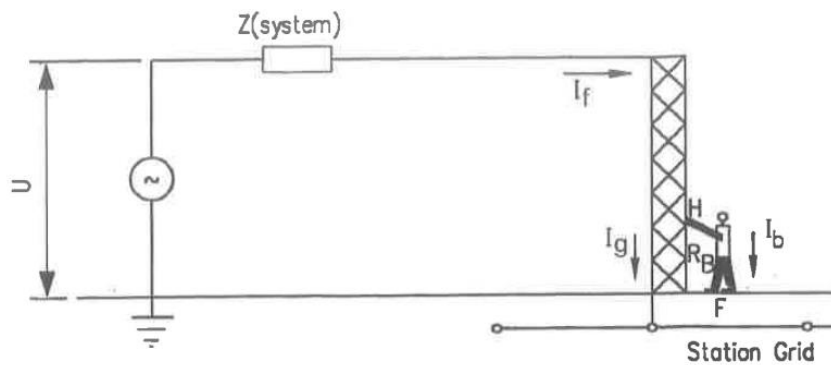


Figura 5 Tensión de toque

FUENTE: Figura tomada de la IEEE Std 80-2013

La Figura 6 representa la corriente de falla que se descarga a tierra a través del sistema de puesta a tierra de la subestación. En esta figura, la corriente I_b fluye desde un pie, atraviesa el cuerpo de la persona y sale por el otro pie. Ambos pies están en contacto con la superficie de la tierra. Esta representación visualiza cómo la corriente eléctrica puede circular a través del cuerpo de una persona cuando está en contacto con la tierra y resalta la importancia de tomar medidas para garantizar la seguridad eléctrica en tales situaciones.

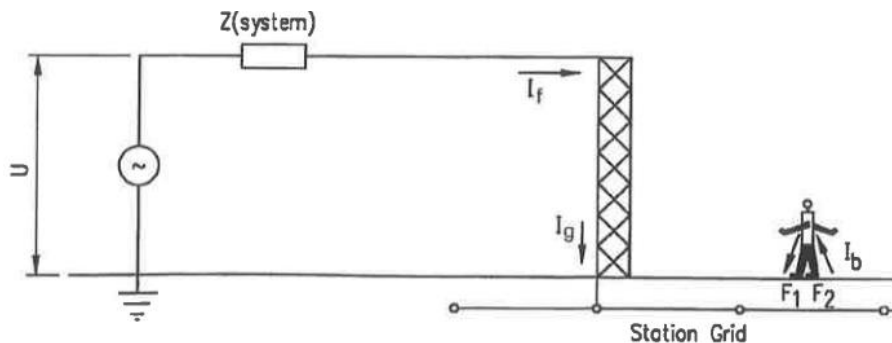



Figura 6 Tensión de paso

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 43 de 76	

FUENTE: Figura tomada de la IEEE Std 80-2013

7.2. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Un sistema de puesta a tierra eficaz se asegura de que haya una resistencia reducida hacia una ubicación distante en el suelo, con el objetivo de minimizar la elevación del potencial de tierra (GPR, por sus siglas en inglés). Esto se describe mediante la ecuación (18), que se encuentra en la normativa IEEE Std 80-2013. La reducción de la resistencia en el sistema de conexión a tierra contribuye a mantener un potencial de tierra seguro en caso de una falla eléctrica.


$$GPR = I_g * R_g \quad (18)$$

I_g → Corriente de rejilla simétrica.

R_g → Resistencia de la puesta a tierra.

El propósito principal de los sistemas de puesta a tierra es garantizar la seguridad de las personas. Este aspecto es de suma importancia durante la fase de diseño y requiere la definición de una resistencia objetivo. Por lo tanto, los valores proporcionados en la Tabla 5 se derivan de la experiencia acumulada en el campo, sin necesidad de estar necesariamente vinculados a una regulación específica. En el caso de una subestación de media tensión, el valor máximo de resistencia recomendado es de 10 ohmios. Mantener una resistencia dentro de estos límites contribuye a garantizar un entorno eléctrico seguro para las personas.

Tabla 7 Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 44 de 76	

Utilizada para	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra Ω
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de media tensión de uso exterior	10
Subestaciones de media tensión de uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

7.3. CÁLCULOS SIMPLIFICADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA


La resistencia de una malla de puesta a tierra se calcula utilizando la expresión proporcionada en la normativa IEEE Std 80-2013, que se detalla en la referencia correspondiente. Este cálculo es fundamental para determinar la eficacia de la malla de puesta a tierra y garantizar que cumpla con los estándares de seguridad eléctrica.

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (19)$$

Donde:

$L_T \rightarrow$ Longitud total de conductores enterrados en m.

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno en $\Omega - m$.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 45 de 76

$A \rightarrow$ Área ocupada por la malla de tierra m^2 .

$H \rightarrow$ Profundidad de la malla en m .

7.4. ECUACIONES PARA SUELO HOMOGÉNEO

Las ecuaciones utilizadas para calcular la resistencia de un sistema de conexión a tierra en un suelo uniforme, compuesto por una malla horizontal con electrodos verticales (varillas), son de gran importancia para determinar la resistencia total de conexión a tierra, que se denota como R_g . Estas ecuaciones se basan en la normativa IEEE Std 80-2013 y tienen en cuenta la resistencia de la malla, las varillas y la resistencia mutua entre los componentes del sistema. Calcular la resistencia total de conexión a tierra es esencial para asegurar que el sistema cumple con los estándares de seguridad eléctrica.

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (20)$$

Donde:


$R_1 \rightarrow$ Resistencia de tierra de los conductores de la malla en Ω .

$R_2 \rightarrow$ Resistencia de tierra de todas las varillas de tierra en Ω .

$R_m \rightarrow$ Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la malla R_1 y el grupo de varillas de tierra R_2 en Ω .

La resistencia de tierra de la malla está dada por:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{\sqrt{d_c h}} \right) - \frac{K_1 L_c}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (21)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 46 de 76	

$$K_1 = -0.05 \frac{L_x}{L_y} + 1.2 \quad (22)$$

$$K_2 = 0.1 \frac{L_x}{L_y} + 4.68 \quad (23)$$

Donde:

$\rho \rightarrow$ Resistividad del terreno $\Omega - m$.

$L_C \rightarrow$ Longitud total de todos los conductores de la malla en m .

$h \rightarrow$ Profundidad de los conductores de la malla en m .

$d_c \rightarrow$ Diámetro del conductor de la malla en m .

$A \rightarrow$ Área cubierta por los conductores de la malla de tierra en m^2 .

$L_x, L_y \rightarrow$ Largo, ancho de la malla en m .

La resistencia de las varillas de tierra está dada por:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_r} \right) - 1 + \frac{2K_1 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (24)$$

Donde:


$n_r \rightarrow$ Número de varillas de tierra.

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla en m .

$d_c \rightarrow$ Diámetro de la varilla en m .

La resistencia de tierra mutua entre la malla y las varillas está dada por:

$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (25)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 47 de 76	

7.5. ECUACIONES PARA TERRENO DE 2 CAPAS


En situaciones prácticas, es común enterrar las varillas de conexión a tierra a profundidades mayores con el fin de acceder a suelos que tengan una resistividad más baja. Las ecuaciones que se han proporcionado se han ajustado para tener en cuenta esta configuración específica, lo que permite calcular las resistencias R_1 , R_2 y R_m de manera precisa para reflejar esta disposición en la que las varillas están enterradas a profundidades considerables. Esto es importante para obtener cálculos precisos de la resistencia total de conexión a tierra y asegurar un sistema de puesta a tierra efectivo en condiciones prácticas.

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{\sqrt{d_c h}} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (26)$$

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{8L_r}{d_2} \right) - 1 + \frac{2K_2 L_r}{\sqrt{A}} - (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \quad (27)$$

$$R_m = \frac{\rho_a}{\pi L_C} \left[\ln \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{K_1 L_C}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (28)$$

$$\rho_a = \frac{L_r \rho_1 \rho_2}{\rho_2 (H - h) + \rho_1 (L_r + h - H)} \quad (29)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 48 de 76	

Donde:

$\rho_1 \rightarrow$ Resistividad de la capa superior en $\Omega - m$.

$\rho_2 \rightarrow$ Resistividad de la capa profunda en $\Omega - m$.

$H \rightarrow$ Espesor de la capa superior (valor encontrado por método de Sunde).

$h \rightarrow$ Profundidad de la malla en m .

$L_r \rightarrow$ Longitud de las varillas (c/u).

$\rho_a \rightarrow$ Resistividad aparente en $\Omega - m$.

Si $\rho_2 \leq 0.2 \rho_1$ y $H \geq 0.1 L_x$, Las anteriores ecuaciones son razonablemente exactas para la mayor parte de los cálculos prácticos.

7.6. CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÁXIMA DE MALLA


La determinación de la tensión efectiva en la malla se realiza a través de la siguiente fórmula, tal como se presenta en la normativa IEEE Std 80-2013:

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} \quad (30)$$

Donde:

$K_m \rightarrow$ Valor geométrico de espaciamento de la malla, calculado así:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16hd_c} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd_c} - \frac{h}{4d_c} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (31)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 49 de 76

Cuando una malla de tierra incluye varillas de tierra a lo largo del perímetro, varias varillas de tierra en las esquinas, o una combinación de ambas, el factor de corrección K_{ii} se establece en 1. Este factor se utiliza para ajustar los efectos de los conductores sobre las esquinas de la malla, y en este caso específico, se considera que no hay un efecto de corrección necesario, lo que simplifica los cálculos relacionados con la malla de tierra.


En el caso de mallas de tierra que no incluyen varillas de tierra, ni en las esquinas ni a lo largo del perímetro, no se requiere ningún factor de corrección K_{ii} . En esta situación, los cálculos pueden realizarse sin la necesidad de ajustar los efectos de los conductores en las esquinas de la malla, lo que simplifica aún más el proceso de diseño y cálculo de la malla de tierra.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (32)$$

El factor de corrección K_h tiene en cuenta los efectos de la profundidad de la malla de tierra. La fórmula para calcular este factor de corrección se especifica en la normativa o estándar relevante que se esté utilizando. Por lo general, K_h se utiliza para ajustar los cálculos de resistencia de la malla de tierra en función de la profundidad a la que se encuentren enterrados los electrodos o varillas de tierra. El factor K_h es importante para garantizar que los cálculos reflejen con precisión las condiciones reales del sistema de puesta a tierra.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \text{ con } h_0 = 1m \quad (33)$$

n representa el número de conductores paralelos de una malla rectangular equivalente, y está dado por:

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 50 de 76	

$$n = n_a n_b n_c n_d \quad (34)$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_p}; n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}}; n_c = \left[\frac{L_X L_Y}{A} \right]^{0.7A}; n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \quad (35)$$

Para mallas cuadradas: $n = n_a$ ya que $n_b = n_c = n_d = 1$

Para mallas rectangulares: $n = n_a n_b$ ya que $n_c = n_d = 1$

Para mallas en forma de L: $n = n_a n_b n_c$ ya que $n_d = 1$

Donde:

L_C → Longitud total de los conductores de la malla horizontal en m.

L_p → Longitud del perímetro de la malla en m.

L_x → Longitud máxima de la malla en dirección X en m.

L_y → Longitud máxima de la malla en dirección Y en m.


D → Distancia máxima entre 2 puntos cualquiera de la malla en m.

K_i Es el factor de irregularidad y se define como:

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (36)$$

En el caso de mallas sin varillas de tierra o con solo unas pocas varillas dispersas por la malla, pero sin varillas en las esquinas o a lo largo del perímetro, la longitud efectiva enterrada (L_M) se calcula de la siguiente manera:

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

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 51 de 76	

Donde:

$L_R = n_r L_r \rightarrow$ Longitud total de todas las varillas.

$n_r \rightarrow$ Número de varillas.

$L_r \rightarrow$ Longitud de cada varilla.

Para mallas con muchas varillas de tierra en las esquinas, la longitud efectiva enterrada (L_M) es:

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


7.7. CÁLCULO DE LA TENSIÓN REAL DE PASO (EP).

La determinación del valor de tensión real de paso se realiza utilizando la expresión especificada en la normativa IEEE Std 80-2013.

$$E_p = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S} \quad (39)$$

para mallas con o sin varillas de tierra, la longitud efectiva del conductor enterrado L_S es:

$$L_S = 0.75 L_C + 0.85 L_R \quad (40)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	

Se considera que el EP máximo tiene lugar a una distancia de 1 metro desde el conductor perimetral en la dirección que atraviesa el ángulo que divide en dos partes iguales la esquina más alejada de la malla. La determinación de K_S se efectúa si se cumplen las siguientes condiciones:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (41)$$

Esta ecuación es válida para profundidades de enterramiento de $0.25\text{m} < h < 2.5\text{m}$

7.8. REFINAMIENTO DEL DISEÑO PRELIMINAR.

A partir del diseño preliminar representado en la Figura 7, los cálculos señalan la posible presencia de diferencias de potencial peligrosas dentro de la subestación. Por lo tanto, se están evaluando diversas alternativas de selección para abordar esta situación.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 53 de 76	

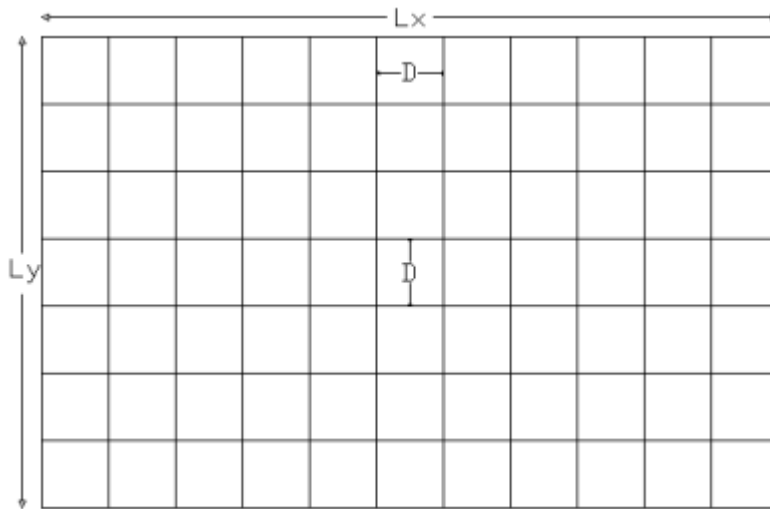


Figura 7 Diseño preliminar de la malla

FUENTE: Figura tomada de Diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF. Universidad nacional de Colombia

Donde:


$N \rightarrow$ Número de conductores de longitud L_x .

$M \rightarrow$ Número de conductores de longitud L_y .

Posibles ajustes o alternativas de solución:

1. Reducir la resistencia total de la malla:

Al reducir el valor de R_g , se logra disminuir el Ground Potential Rise (GPR), lo que a su vez reduce el voltaje máximo transferido. Para alcanzar este objetivo, es posible aumentar el área total de la malla, insertar varillas de conexión a tierra que penetren en capas de menor resistividad del suelo.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 54 de 76

2. Ajustar o reducir los espacios entre los conductores de la malla:

Además de disminuir la separación entre los conductores, se puede considerar la opción de extender el conductor de la malla fuera de la cerca, incrementar la cantidad de varillas perimetrales, enterrar dos o más conductores paralelos a lo largo del perímetro, aumentar la profundidad de la malla y reducir la separación cerca del perímetro de la malla.

3. Desviar una mayor proporción de la corriente de falla hacia otras rutas:


Esto puede lograrse mediante la disminución de la resistencia de puesta a tierra de las torres cercanas a la subestación.

4. Limitar la corriente total de falla.

5. Instalar barreras para restringir el acceso a ciertas áreas.

6. Implementar mallas equipotenciales:

Estas mallas se instalan debajo de una capa de roca triturada y se conectan tanto a la malla principal como a la estructura metálica del equipo situado justo encima de ellas. Las mallas equipotenciales se construyen generalmente con cables de cobre N° 6 AWG y se colocan a intervalos de 0.6 metros.



	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 55 de 76


8. METODOLOGÍA DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA

8.1. CONEXIONES A LA MALLA

Se necesita emplear conductores que tengan la capacidad eléctrica adecuada y la resistencia mecánica suficiente para establecer enlaces entre los elementos siguientes:

- a) En todos los componentes de conexión a tierra, incluyendo mallas de puesta a tierra, varillas, pozos de tierra, así como en áreas donde se utilicen elementos metálicos como tuberías de agua o gas, cajas de pozos de agua, entre otros.
- b) Cualquier parte conductora que, de forma no intencionada, pueda cargar electricidad, como estructuras metálicas, armazones de maquinaria, carcasas de equipos de desconexión convencionales o aislados en gas, tanques de transformadores, cables de protección, y similares. También abarca las piezas metálicas que puedan presentar diferencias de potencial relativo con respecto a otras piezas metálicas y que necesiten estar enlazadas con la malla de tierra.
- c) Cualquier fuente de corriente eléctrica, como sistemas de pararrayos, bancos de capacitores o capacitores de acoplamiento, transformadores y, en circunstancias apropiadas, los neutros de máquinas y circuitos de potencia.
- d) Es fundamental establecer la conexión del acero de refuerzo en construcciones civiles, rieles empleados para desplazar transformadores, conductos de agua potable y bandejas portacables con la malla de tierra.
- e) Además, es imprescindible enlazar con la malla de tierra elementos como ventanas, puertas, pasamanos, tableros, entre otros, ubicados en el edificio de control, así como las instalaciones de baja tensión. Por lo general, se utilizan cables o correas de cobre para llevar a cabo estas conexiones. En ocasiones, los tanques de transformadores se emplean como parte del camino de tierra para los sistemas de pararrayos. Del mismo modo, muchas estructuras de acero y aluminio también se utilizan como parte del camino de tierra, siempre y cuando se garantice que su capacidad conductiva, incluyendo las conexiones, sea la adecuada.

 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 56 de 76

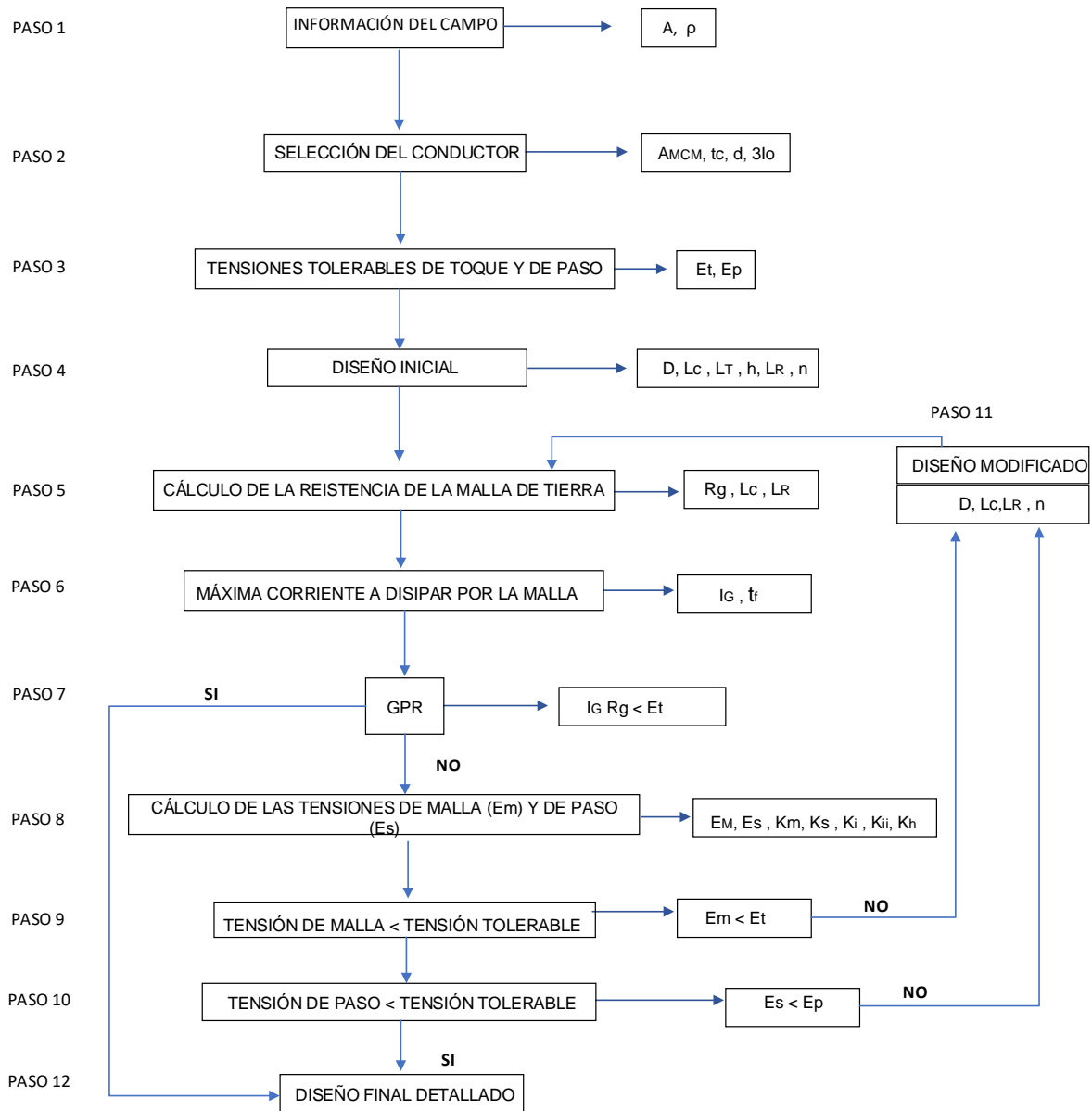
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 57 de 76	

8.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.

Fuente: IEEE 80, 2013 página 92

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 58 de 76	

Diagrama de flujo para el diseño de la malla de puesta a tierra en una subestación




	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 59 de 76	

Figura 8 Diagrama de flujo para el diseño de la malla de tierra

9. APANTALLAMIENTO

9.1. INTRODUCCIÓN

El término "apantallamiento de una subestación" se refiere a la combinación de elementos instalados con el propósito principal de proteger los equipos y componentes dentro de la subestación contra las descargas directas de rayos, que son comúnmente conocidas como rayos. Este documento presenta una metodología para el diseño de apantallamientos de subestaciones que es ampliamente utilizada:

- El método electrogeométrico.


9.2. MODELO ELECTRO-GEOMÉTRICO

Este enfoque permite la selección de la altura efectiva del sistema de protección después de que se hayan establecido las dimensiones de las estructuras, así como las alturas de los espacios y conductores en la subestación.

9.2.1. Distancia de descarga crítica

La distancia crítica de descarga, denotada como S_m , es la parte final del recorrido del rayo durante la fase crítica de la descarga atmosférica. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$S_m = 8 k I_c^{0.65} \quad (42)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 60 de 76

Donde:

I_c → Corriente crítica de flameo kA.

k → Coeficiente que tiene en cuenta las diferentes distancias de descarga:

a) 1.0 para cables de guarda

b) 1.2 para mástiles y puntas

9.2.2. Corriente Critica

La corriente crítica, designada como I_c , representa la corriente que puede causar una sobretensión peligrosa en el aislamiento. Se determina mediante la siguiente fórmula:

$$I_c = \frac{2.2BIL}{Z_0} \quad (43)$$

O por:


$$I_c = \frac{2.068CFO}{Z_0} \quad (44)$$

Donde:

Z_0 → Impedancia característica del barraje a proteger Ω .

BIL → Tensión soportada al impulso tipo atmosférico del aislamiento del equipo kV.

CFO → Tensión crítica de flameo de los aisladores kV.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 61 de 76	

La ecuación (43) se utiliza cuando el sistema de protección está protegiendo una barra colectora que se sostiene mediante aisladores de poste o equipos. En este escenario, el Valor de Tensión de Impulso BIL se ajustará según la configuración particular de la instalación, tomando en cuenta los análisis de coordinación de aislamiento realizados.

La ecuación (44) se aplica cuando el sistema de protección abarca una barra colectora que se sostiene mediante cadenas de platos aisladores. En esta situación, el Valor de la Tensión Crítica de Flashover CFO se puede estimar utilizando la fórmula siguiente:

$$CFO = 0.94 * 585w \quad (45)$$

Donde:

$CFO \rightarrow$ Tensión crítica de flameo inverso de los aisladores y explosores kV.

$w \rightarrow$ Longitud de la cadena de aisladores en m.

9.2.3. Impedancia Característica


$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2h_{av}}{R_c} \ln \frac{2h_{av}}{r}} \quad (46)$$

Donde:

$h_{av} \rightarrow$ Altura promedio del conductor en m.

$r \rightarrow$ Radio del cable o R_0 para un haz de conductores.

$R_c \rightarrow$ Radio corona en m.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Fecha de emisión:
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS			10/10/2023
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 62 de 76	

9.2.4. Altura Promedio

La altura promedio de los cables en la fase se debe calcular como:

$$h_{av} = \frac{1}{3}h_{max} + \frac{2}{3}h_{min} \quad (47)$$

Donde:

h_{max} → Altura de conexión del cable de fase en m.

h_{min} → Altura en la mitad del vano en m.

Cuando h_{min} no se conoce se puede calcular usando la expresión.

$$h_{min} = h_{max} - \bar{\omega}L \quad (48)$$

Donde:

L → Longitud del vano en m.


$\bar{\omega}$ → Cte que relaciona la flecha máxima Y_c con la longitud del vano L usualmente entre 0.02 y 0.06.

9.2.5. Radio Corona

A continuación, se presenta un resumen del procedimiento para calcular el radio de corona, junto con las ecuaciones correspondientes, como se describe en el Apéndice C de la norma IEEE Std 998 (2012).

Cuando se considera un único conductor por fase, el cálculo del radio de corona se lleva a cabo utilizando la siguiente fórmula:

$$R_c * \ln\left(\frac{2h_{av}}{R_c}\right) - \frac{V_c}{E_0} = 0 \quad (49)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 63 de 76

Donde:

$R_c \rightarrow$ Radio corona en m.

$h_{av} \rightarrow$ Altura promedio del conductor en m.

$E_0 \rightarrow$ Gradiente de corona límite, se toma igual a 1500 kV / m.

$V_c \rightarrow$ Máxima tensión soportada por el aislamiento de los aisladores para una onda de impulso con polaridad negativa.

La solución de R_c se encuentra aplicando el método de Newton Raphson tomando la siguiente solución:

$$R_c = 1.2 * 10^{-4} V_c \quad (50)$$

En caso de un haz de conductores por fase el radio corona se calcula como:

$$R'_c = R_0 + R_c \quad (51)$$

Donde:

$R_c \rightarrow$ Radio corona para un solo conductor en m.

$R_0 \rightarrow$ Radio del haz de conductores en m.


$$R_0 = \sqrt{rl} \text{ haz de dos conductores}$$

$$R_0 = \sqrt[4]{\sqrt{2}rl^3} \text{ Haz de cuatro conductores} \quad (52)$$

Donde:

$r \rightarrow$ Radio del subconductor en m

$l \rightarrow$ Distancia entre 2 subconductores adyacentes en m

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 64 de 76

9.2.6. Apantallamiento por cables de guarda

La subestación puede apantallarse con cables de guarda ubicados cada campo o cada dos campos.

9.2.7. Altura efectiva del cable de guarda

La altura efectiva del apantallamiento con cable de guarda se define como la distancia vertical desde el cable de guarda hasta el sistema que se desea proteger. Esta altura se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$h_e = S_m - \sqrt{S_m^2 - d^2} \quad (53)$$

El parámetro d corresponde a la mitad de la distancia entre cables de guarda, $2d$.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 65 de 76

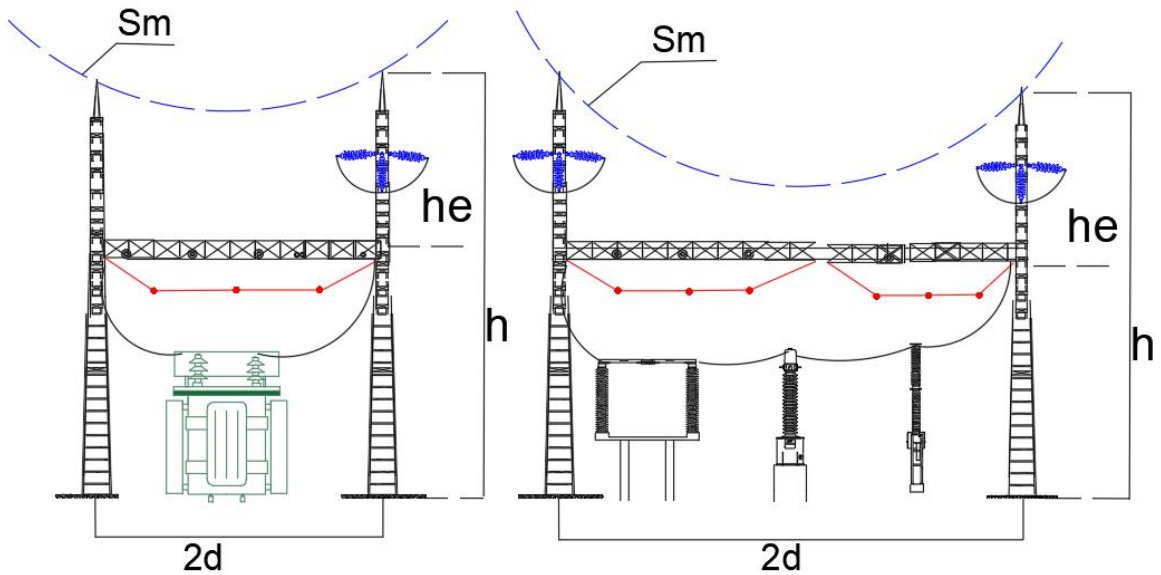


Figura 9 Apantallamiento con cable de guarda cada campo o cada dos campos

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 66 de 76

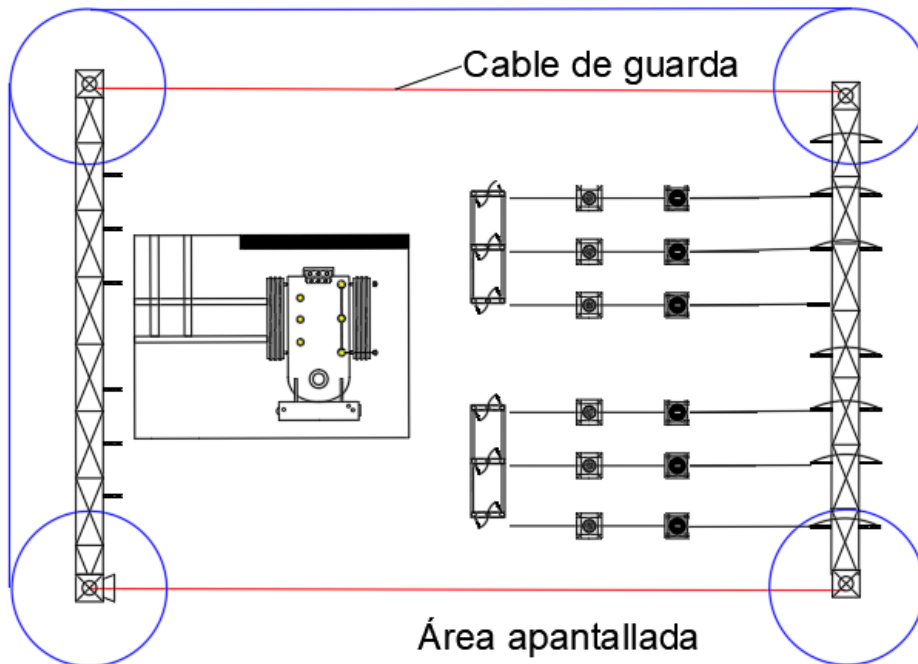



Figura 10 Apantallamiento con cable de guarda vista superior

Límite práctico para la separación entre cables de guarda adyacentes

El límite está determinado por:

$$2d_{max} = 1.5S_m \quad (54)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 67 de 76

9.2.8. Mástiles.

El uso de puntas no es recomendado ya que requieren de una estructura adicional para su soporte. Sin embargo, si el costo del apantallamiento con cable de guarda resulta ser significativamente más alto, el apantallamiento con mástiles puede ser una alternativa segura y efectiva.

Diseño con un solo mástil

Para calcular el área de cobertura de un solo mástil, se emplea un enfoque geométrico que tiene en cuenta tres variables esenciales: la altura del mástil (h), la altura del equipo (d), y la distancia crítica de descarga (también conocida como el radio de la esfera S_m).

Ya que $h < S_m$, se emplea la ecuación:

$$x = \sqrt{S_m^2 - (S_m - h)^2} - \sqrt{S_m^2 - (S_m - d_e)^2} \quad (55)$$


Donde:

h → Altura del mástil.

d_e → Altura del equipo a proteger.

x → Distancia máxima horizontal desde la punta hasta el objeto que se quiere proteger.

El área de alcance alrededor de la punta con un radio X se refiere a la región de protección que proporciona la punta contra una descarga directa de cierta magnitud hacia un objeto que se encuentra a una altura específica. La figura 11 muestra las distancias

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 68 de 76	

relevantes que se consideran en este cálculo.

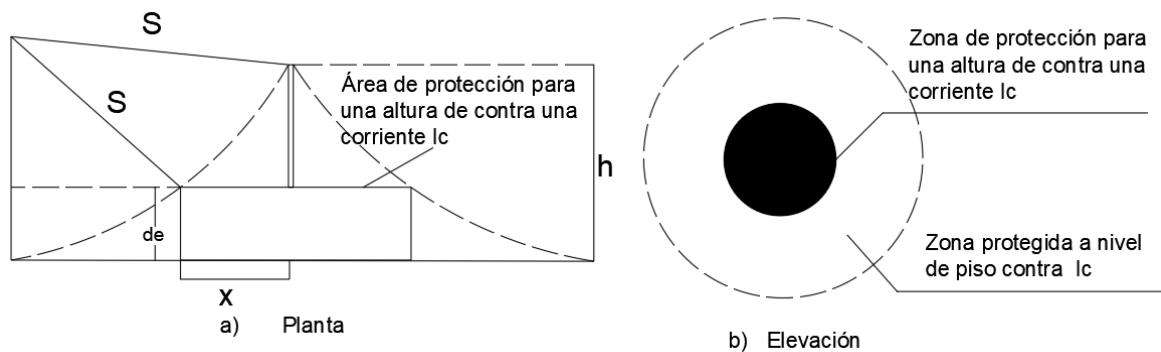


Figura 11 Área protegida por un mástil

Diseño con cuatro mástiles

Cuando se desea proteger un objeto utilizando cuatro mástiles, se comienza por determinar las alturas adecuadas para cada uno de los mástiles. Luego, se calcula la separación máxima que debe existir entre estos mástiles para garantizar una protección efectiva del objeto.

Para determinar la separación máxima entre los cuatro mástiles en un sistema de protección, se utiliza un enfoque geométrico que toma en cuenta la altura de los mástiles (h), la altura del equipo (y) y la distancia crítica de descarga (también conocida como radio de la esfera S_m). El procedimiento para calcular esta separación máxima se basa en que la esfera del modelo electrogeométrico se apoya en los cuatro mástiles.

Las ecuaciones que determinan la separación máxima entre los mástiles se describen a continuación (Figura 12).

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	Página 69 de 76
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	

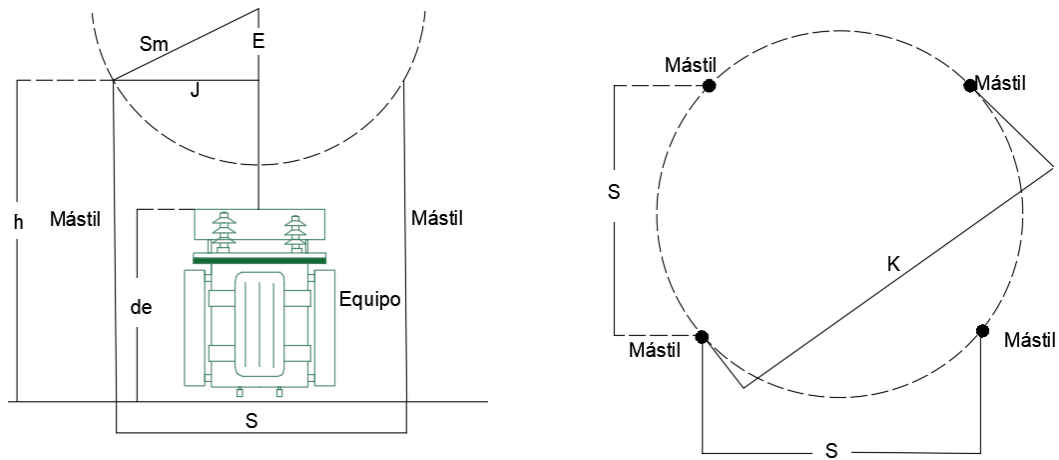



Figura 12 Protección con cuatro mástiles vista frontal y vista superior

$$y = h - d_e \quad (56)$$

$$E = S_m - y \quad (57)$$

$$J = \sqrt{S_m^2 - E^2} \quad (58)$$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:	
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023	
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL			Versión:
	Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 70 de 76	

$$K = 2J \quad (59)$$

$$S = \frac{K}{\sqrt{2}} \quad (60)$$

Donde:

h → Altura del mástil en m.

d_e → Altura del equipo a proteger en m.

y → Diferencia de elevación entre el mástil y el equipo en m.

E → Diferencia de elevación entre el mástil y el centro de la esfera en m.

J → Diferencia horizontal entre el mástil y el centro de la esfera en m.

K → Distancia diagonal entre mástiles en m.

S → Distancia horizontal entre mástiles en m.

9.2.9. Procedimientos para el diseño

La aplicación del método electro-geométrico implica el uso de una esfera imaginaria con un radio S_m , que se desplaza sobre los dispositivos de protección de la subestación, como cables de guarda o mástiles. Este enfoque tiene como objetivo proteger equipos o barras conductoras, evitando cualquier interacción que pueda ocurrir con la esfera

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENT O DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 71 de 76

imaginaria en caso de una descarga atmosférica.

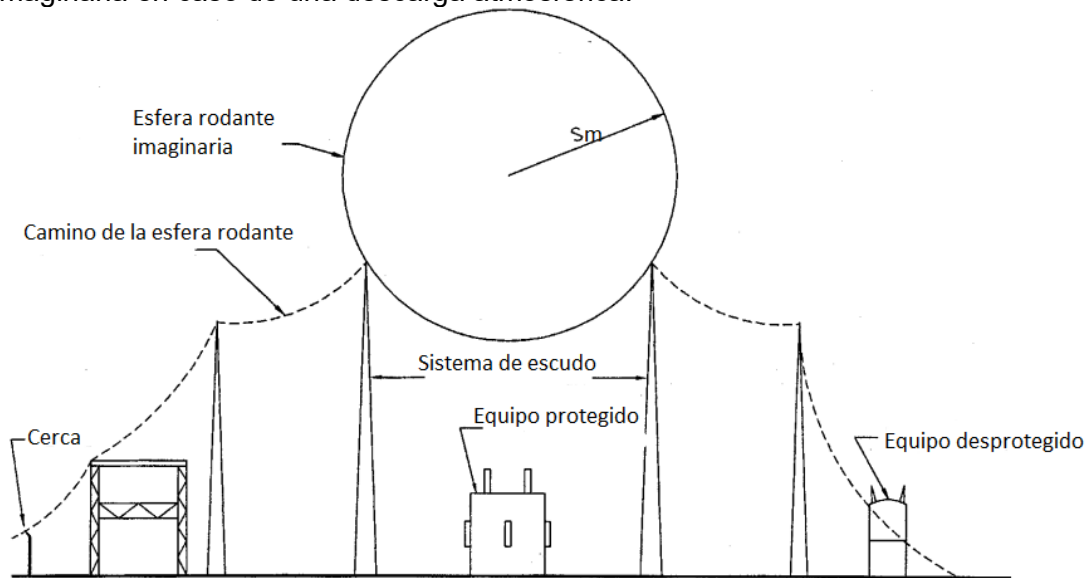


Figura 13 Esfera rodante

FUENTE: Figura tomada de la IEEE Std 998-2012

Para calcular el apantallamiento se ejecuta el siguiente procedimiento, tanto para cables de guarda como para mástiles:

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión:
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		10/10/2023
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión:
			1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
Elaboró:	María Franklin	Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 72 de 76

Diagrama de flujo para el diseño de apantallamiento en una subestación

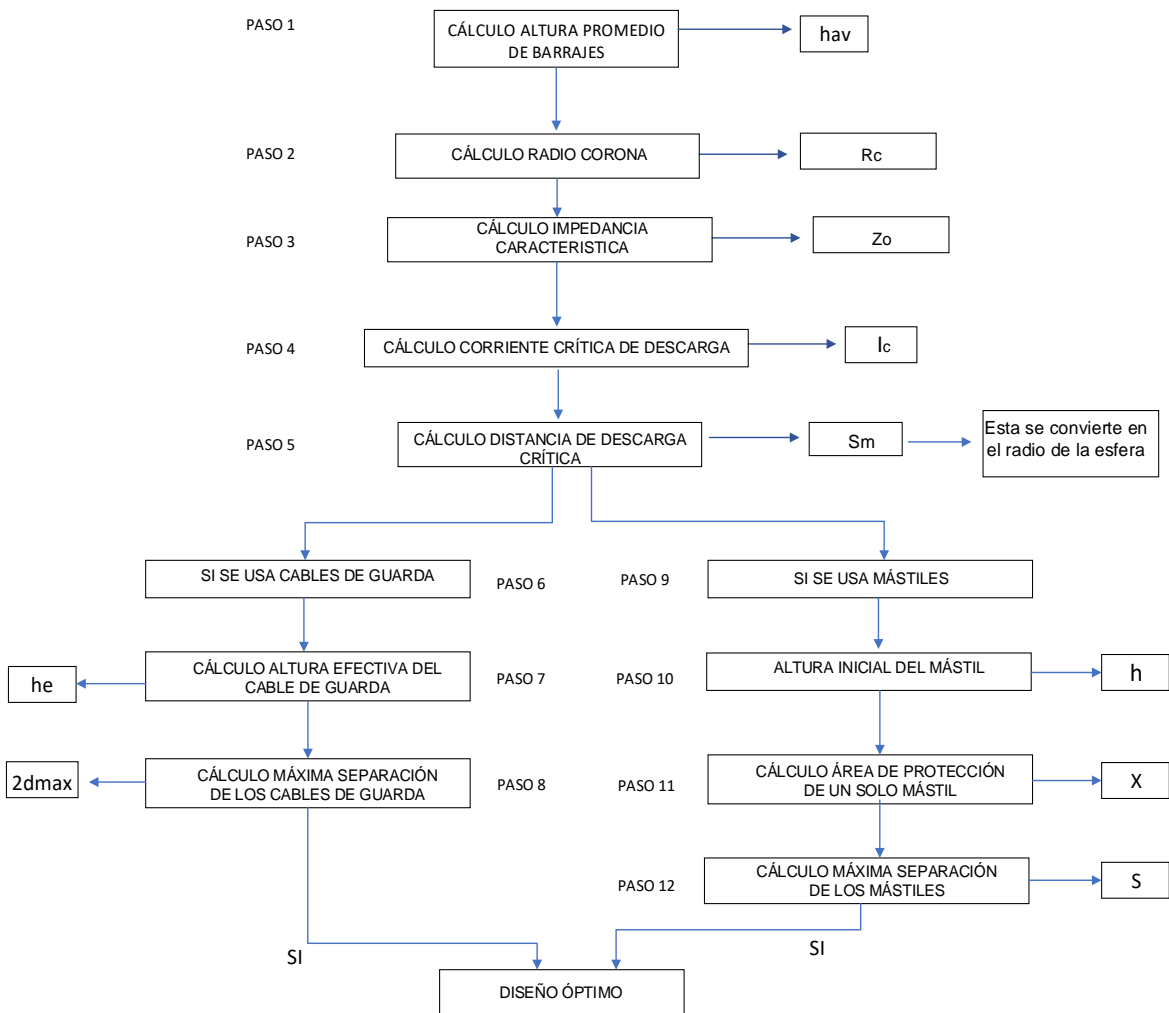


Figura 14 Procedimiento de apantallamiento en subestación

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

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 73 de 76	

Puntos no apantallados por el cable de guarda

En situaciones en las que resulta prohibitivamente costoso llevar un cable de guarda hasta un punto específico de la subestación expuesto a descargas atmosféricas, se sugiere la instalación de una punta de protección en ese lugar. Esto proporciona una protección más económica y efectiva contra las descargas.

Ejemplo aplicando la metodología del sistema de puesta a tierra

El ejemplo se supone para datos de una subestación de media tensión

Se seleccionaron los siguientes datos:

Corriente de falla $I_f = 2000 A$

Relación X/R del sistema de la falla $\frac{X}{R} = 3$

Tiempo de falla $t_c = 0.5 s$

Resistividad del suelo $\rho = 150 \Omega.m$

Resistividad de la capa superficial del material $\rho_s = 3000 \Omega.m$

Espesor de la capa superficial del material $h_s = 0.1m$

Largo de la malla $L_x = 9 m$

Ancho de la malla $L_y = 5 m$


Espaciamiento ideal entre conductores $D = 0.875 m$

Profundidad de enterramiento de los conductores $h = 0.70 m$

Número de varillas $n_R = 4$ varillas de 2.40 m

Este ejemplo para el sistema de puesta a tierra es un modelo para desarrollar la metodología planteada en esta guía, realizando los cálculos en la plantilla de Excel anexo B memoria de cálculo de la malla de puesta a tierra.

Para cada dimensionamiento partículas de debe realizar el respectivo diseño.

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111 SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 74 de 76	

Ejemplo aplicando la metodología del sistema de apantallamiento

El ejemplo se supone para datos de una subestación de media tensión

Utilizando cable de guarda

Ancho de un campo $2d = 15 \text{ m}$

Impedancia característica del barraje $Z_o = 336 \Omega$

Tensión crítica de flameo de los aisladores $CFO = 900 \text{ kV}$

Calcular la altura efectiva del cable de guarda

Corriente de descarga crítica:

$$I_c = \frac{2.068 * 900}{336} = 5539 \text{ A}$$

Distancia de descarga crítica

$K=1$

$$S_m = 8 k 5539^{0.65} = 24.34 \text{ m}$$

Altura efectiva del cable de guarda cada campo

$$h_e = S_m \sqrt{S_m^2 - (d)^2} = 24.34 \sqrt{24.34^2 - (7.5)^2} = 1.19 \text{ m}$$


Para apantallar con dos cables de guarda cada campo se requiere un castillete con altura mínima de 1.19m.

Utilizando mástiles

Ancho del equipo a proteger de = 5 m

Impedancia característica del barraje $Z_o = 336 \Omega$

Tensión soportada al impulso $BIL = 500 \text{ kV}$

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga Oscar Aguirre	Página 75 de 76	

Calcular la máxima separación para mástiles de 8m de altura con los que se quiere apantallar un campo

Corriente de descarga crítica:

$$I_c = \frac{2.2BIL}{Z_0} = \frac{2.2 * 170}{336} = 1113 A$$

Distancia de descarga crítica

K=1.2

$$S_m = 8 k 3273^{0.65} = 9.17m$$

Distancia entre mástiles

$$y = h - de = 8 - 5 = 3m$$

$$E = S_m - y = 18.49 - 3 = 6.17m$$


$$J = \sqrt{S_m^2 - (E)^2} = \sqrt{18.49^2 - (15.49)^2} = 6.78m$$

$$K = 2J = 2 * 6.78 = 13.56m$$

$$S = \frac{K}{\sqrt{2}} = \frac{13.56}{\sqrt{2}} = 9.58m$$

Se puede apantallar el campo colocando dos mástiles de 8 m de altura cada 9.58m

10. RECOMENDACIONES

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Fecha de emisión: 10/10/2023
	GUÍA METODOLÓGICA PARA ORIENTAR DISEÑOS		
	SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIENTO DE SUBESTACIONES CONVENCIONALES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL		Versión: 1111SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y APANTALLAMIE TO DE SUBESTACIONE S CONVENCIONAL ES DE MEDIA TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN LOCAL – SDL
	Elaboró:	María Franklin Johan Carreño	
Revisó:	Oscar Quiroga	Oscar Aguirre	Página 76 de 76

La aplicación de la metodología descrita en este documento conduce a la obtención de sistemas de puesta a tierra y apantallamiento para subestaciones convencionales de media tensión que son más confiables, seguros y completos.

Se recomienda complementar este documento utilizando diversos softwares y aplicaciones que ilustren el proceso, aplicando la metodología descrita para simplificar los parámetros y lograr un diseño de puesta a tierra y apantallamiento más preciso.

Es esencial que los sistemas de puesta a tierra se mantengan actualizados con los avances tecnológicos y se ajusten a las normativas vigentes para mejorar su eficiencia y rendimiento. La puesta a tierra desempeña un papel crucial en la protección contra eventos eléctricos no deseados en las instalaciones, y su efectividad puede aumentar significativamente mediante la incorporación de tecnologías de última generación y la conformidad con las regulaciones eléctricas más recientes.