

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN
CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EL COMPLEJO
AGROECOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PRODUCTIVO
SAN JOSÉ DE AYORA, CANTÓN CAYAMBE**

**AUTOR:
FRANKLIN JONATHAN ROJAS CAICEDO**

**TUTOR:
ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ**

Quito, febrero del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Franklin Jonathan Rojas Caicedo, con documento de identificación N° 172227290-1, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: *DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EL COMPLEJO AGROECOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PRODUCTIVO SAN JOSÉ DE AYORA, CANTÓN CAYAMBE*, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., febrero de 2021



Franklin Jonathan Rojas Caicedo

CI. 172227290-1

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, *DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA Y PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EL COMPLEJO AGROECOLÓGICO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PRODUCTIVO SAN JOSÉ DE AYORA, CANTÓN CAYAMBE*, realizado por Franklin Jonathan Rojas Caicedo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., febrero de 2021



Rogelio Alfredo Orizondo Martínez

C.I. 1757424195

DEDICATORIA

A mi madre Silvia Lurdes Caicedo Díaz, padre Luis Franklin Rojas García y mis hermanos Josselyn Pamela y Luis Sebastián Rojas Caicedo por darme consejo y mucho apoyo a lo largo de mi travesía educativa, por estar siempre pendientes de mi ante cualquier adversidad y situación que se presentaba y sobre todo por inculcarme ese amor incondicional a Dios quien me mostró el camino en todos estos años de estudio.

Franklin Jonathan Rojas Caicedo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por su infinita gracia y amor incondicional, quien fue un pilar fundamental a lo largo de mi vida universitaria mostrándome de buena o mala manera el camino adecuado para llegar al objetivo final.

A mis padres y hermanos quienes con mucho amor, responsabilidad y tolerancia siempre estuvieron presentes en cada una de las etapas que formaron mi personalidad y carácter y a su vez son el mayor ejemplo de vida que tengo.

A cada uno de los docentes que forman parte de la Universidad Politécnica Salesiana quienes me brindaron parte de su vasto conocimiento durante todos y cada uno de los semestres cursados; en especial al MSC. Rogelio Orizondo quien me apoyó y confió en mi para la realización del presente proyecto, quién también es una persona con una ética profesional intachable y una fuente de inspiración profesional para mí.

Y, por último, a mis queridos compañeros y amigos Irving Guevara y Sergio Terán quienes compartieron conmigo cada una de las alegrías y tristezas las cuales conlleva estudiar la carrera de Ingeniería Eléctrica.

Franklin Jonathan Rojas Caicedo

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE.....	v
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I.....	xv
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	xv
1.1 Antecedentes	xv
1.2 Importancia y Alcances	xvi
1.3 Delimitación del Problema.....	xvii
CAPÍTULO II	1
MARCO TEÓRICO.....	1
2.1 Principios Fundamentales.....	1
2.1.1 Tierra.....	1
2.1.2 Resistividad Eléctrica.....	1
2.1.3 Resistividad del Terreno	2
2.1.4 Elementos que alteran a la Resistividad del Suelo.....	2
2.2 Medida de la resistividad del suelo	4
2.3 Técnicas para obtener la medición de la resistividad del suelo.....	6
2.3.1 Método de las 4 picas o Wenner	6
2.3.2 Método de Schlumberger	7
2.3.3 Utilizando muestras de terreno.....	8

2.4	Sistema de puesta a tierra	9
2.4.1	Definición y objetivos	9
2.4.2	Importancia de un sistema de tierra	10
2.4.3	Elementos de un sistema de tierra	11
2.4.4	Tomas de tierra.....	11
2.4.5	Línea principal de tierra	12
2.4.6	Derivaciones de las líneas principales.....	12
2.4.7	Conductores	13
2.4.8	Sistemas que deben estar conectados a tierra.....	14
2.4.9	Razones por las cuales se debe realizar una conexión a tierra.....	14
2.4.10	Clasificación de un sistema de tierra.....	15
2.4.11	Conexión efectiva a tierra	18
2.5	Criterios fundamentales de las descargas atmosféricas.....	19
2.5.1	Descargas eléctricas	19
2.5.2	Descargas directas	20
2.5.3	Factores que caracterizan a una descarga atmosférica.....	20
2.5.4	Nivel cerámico	22
2.6	Sistema de protección contra descargas atmosféricas.....	24
2.7	Funciones principales del sistema.	24
2.8	Clasificación de los métodos de protección existentes contra descargas atmosféricas.....	25
2.8.1	Método de la esfera rodante.	25
2.8.2	Método del cono o del ángulo de protección.	27
2.8.3	Elementos de un dispositivo de protección contra rayos o pararrayos	32
2.8.4	Ejemplos de pararrayos	34
CAPÍTULO III.....		38
NORMATIVA		38

3.1	Introducción.....	38
3.2	Norma IEEE 80 – 2013	38
3.2.1	Procedimiento de diseño.	40
3.3	Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano (Reglamento NEC)	41
3.3.1	Disposiciones generales.	41
3.4	Sistemas de protección contra rayos.....	43
3.4.1	IEC 62305-1 Principios generales.....	43
3.4.2	IEC 62305-2 Riesgos en la misión.....	43
3.4.3	IEC 62305-3 Daño físico en las estructuras y riesgo en la integridad física de las personas.....	43
3.4.4	IEC 62305-4 Sistemas electrónicos y eléctricos en el interior de las instalaciones.....	44
3.4.5	IEC 62305-5 Servicios	44
	CAPÍTULO IV.....	45
	METODOLOGÍA DE DISEÑO	45
4.1	Diseño del sistema de tierra del complejo.....	45
4.1.1	Medida de la resistividad del suelo	45
4.1.2	Método de Medición Utilizado	46
4.1.3	Procedimiento de medición.....	47
4.1.4	Resistividad del terreno mediante el modelo de dos capas	50
4.1.5	Selección del calibre del conductor.....	53
4.1.6	Cálculo de la corriente de Cortocircuito (<i>ICC</i>)	58
4.1.7	Tiempo máximo en el cual se despejará la falla	60
4.1.8	Factor <i>Sf</i>	60
4.1.9	Dimensionamiento del pararrayos.....	61
	CAPÍTULO V.....	66
	Análisis de Resultados	66

CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del complejo en el cual se llevará a cabo el proyecto.	xviii
Figura 2. Configuración del método de Wenner.....	6
Figura 3. Configuración del método de Schlumberger.	8
Figura 4. Configuración mediante muestras de terreno.	9
Figura 5. Representación del esquema de los elementos de una puesta a tierra.....	12
Figura 6. Esquema de la tierra de protección contra descargas atmosféricas.	16
Figura 7. Esquema de la tierra del conductor neutro conectado a tierra.	17
Figura 8. Descarga Eléctrica	19
Figura 9. Esquema de las consecuencias ocasionadas por la descarga de un rayo en líneas de transmisión aéreas.	21
Figura 10. Esquema del impacto de un rayo sobre un objeto cercano a una vivienda	22
Figura 11. Nivel cerámico del Ecuador.....	23
Figura 12. Partes de un sistema de protección contra rayos	24
Figura 13. Aplicativo de la actuación de la esfera rodante en una edificación.....	26
Figura 14. Ángulo perteneciente a la esfera rodante en función de su radio de protección.....	28
Figura 15. Zona de protección mediante el método del ángulo de protección.	29
Figura 16. Gráfica de los niveles de protección mediante la relación entre el ángulo “ α ” de protección y la altura “h” de la edificación y pararrayos.....	29
Figura 17. Ejemplos de edificaciones mediante el ángulo de protección “ α ”	32
Figura 18. Cabezal captador con adaptador mástil	33
Figura 19. Sistema completo de Pararrayos con su toma a tierra	34
Figura 20. Pararrayos tipo Punta Franklin	35
Figura 21. Pararrayos con dispositivo cebado	36
Figura 22. Ejemplo de instalación de una malla captadora.....	37
Figura 23. Fluke 1625-2 Kit.....	46
Figura 24. Esquema de la utilización del equipo de medida mediante el método de Wenner	47
Figura 25. Esquema del sentido en el cual se efectuó la toma de datos de resistividad.	48

Figura 26. Gráfica de puntos que representan los datos obtenidos en la resistividad en cada una de las direcciones establecidas para cada espaciamento mediante el software ETAP.....	51
Figura 27. Curva característica que representa la relación existente entre la resistividad aparente “ ρ ” y el espaciamento “ a ” existente al realizar la medición, mediante el software ETAP	51
Figura 28. Resultados obtenidos al realizar el método de las dos capas mediante el software ETAP.....	52
Figura 29. Esquematación del terreno, de las dos capas presentes mediante los resultados obtenidos.....	52
Figura 30. Ingreso de los valores de resistividad y profundidad el terreno con los cuales se llevará a cabo el diseño mediante el editor de suelos de ETAP.	53
Figura 31. Valores característicos del conductor a utilizar en el diseño del sistema de tierra.	55
Figura 32. Valores característicos de las varillas (picas) a utilizar en el diseño del sistema de tierra.....	55
Figura 33. Sistema de Tierra del complejo en el software AutoCAD.	57
Figura 34. Sistema de Tierra en el software ETAP.....	58
Figura 35. Ingreso de los valores con los cuales se establecerá el caso de estudio para el diseño del sistema de tierra.	59
Figura 36. Mapa de precipitación anual del Ecuador.....	61
Figura 37. Pararrayos de 4.5 metros instalado en la planta derivada de lácteos.	62
Figura 38. Punta Franklin actuando en la planta derivada de lácteos	63
Figura 39. Pararrayos de 14 metros instalado en la planta de bioinsumos.	63
Figura 40. Puntas Franklin colocadas en la planta de bioinsumos	64
Figura 41. Resultados obtenidos de acuerdo con el caso de estudio previamente establecido.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Profundidad a la que penetra una esfera rodante en relación con la posición entre sus puntas.	27
Tabla 2. Valores representativos existentes en el método del cono con relación al ángulo, altura y el nivel a proteger.	30
Tabla 3. Valores obtenidos en la medición de la resistividad en el complejo.....	49
Tabla 4. Valores de resistividad aparente del complejo agroecológico de investigación y desarrollo productivo San José de Ayora.....	50
Tabla 5. Dimensión de la pica de tierra (Acero recubierto, acero inoxidable y cobre)	56
Tabla 6. Datos representativos del transformador a instalar en el complejo.....	58
Tabla 7. Resultados Obtenidos del Sistema de tierra del complejo.	65
Tabla 8. Constantes de los materiales a utilizar en la instalación del sistema de tierra.	65

RESUMEN

El trabajo tiene como principal objetivo desarrollar el diseño del sistema a tierra y contra descargas atmosféricas del Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora, el cual será puesto en marcha con el objetivo de promover el turismo comunitario del sector. Para proponer el diseño preliminar de cada uno de estos sistemas el proyecto tiene como propósito fundamental realizar el estudio previo del comportamiento eléctrico del terreno otorgando la información necesaria para estipular de mejor manera la calidad y tipos de materiales con los cuales se procederá a realizar el diseño.

Mediante la utilización del software AutoCAD se establecerá el diseño de la malla a tierra efectuando un anillo por cada una de las instalaciones a construir las cuales se encuentran estipuladas por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD). A su vez, mediante la ayuda del software ETAP, específicamente utilizando el método de elementos finitos se realizará la simulación del sistema de puesta a tierra teniendo en cuenta cada uno de los parámetros necesarios los cuales debe cumplir para que se efectúe el diseño óptimo. De igual manera teniendo en cuenta el nivel cerámico del sector se establecerá el diseño adecuado del sistema contra descargas atmosféricas el cual constará de la utilización de las puntas Franklin las cuales serán diseñadas efectuando el método del ángulo de protección.

Con los resultados obtenidos tanto en el diseño del sistema de puesta a tierra como contra descargas atmosféricas se procederá a realizar un análisis el cual verifica el correcto funcionamiento de los sistemas los cuales cumplen con el principal objetivo que es de proteger al personal, los equipos y las instalaciones eléctricas al interior del complejo.

ABSTRACT

The main objective of this work is to develop the design of the grounding and lightning protection system for the Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora, which will be implemented with the objective of promoting community tourism in the sector. In order to propose the preliminary design of each of these systems, the project's main purpose is to carry out a preliminary study of the electrical behavior of the terrain, providing the necessary information to better stipulate the quality and types of materials with which the design will be carried out.

Using AutoCAD software, the design of the grounding mesh will be established by making a ring for each of the facilities to be built, which are stipulated by the Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD). In turn, with the help of ETAP software, specifically using the finite element method, the simulation of the grounding system will be carried out, considering each of the necessary parameters which must be fulfilled for the optimal design to be carried out. Likewise, considering the ceramics level of the sector, the adequate design of the system against atmospheric discharges will be established, which will consist of the use of Franklin tips, which will be designed using the protection angle method.

With the results obtained in the design of the grounding system and the lightning protection system, an analysis will be made to verify the correct operation of the systems, which will comply with the main objective of protecting personnel, equipment, and electrical installations inside the complex.

INTRODUCCIÓN

Con el fin de resguardar al personal y a las instalaciones que se encuentran dentro de un sitio determinado surge la necesidad de realizar el estudio para el diseño y la instalación de los sistemas de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas.

El sistema de puesta a tierra es una instalación que otorga seguridad al ser humano. Se diseña de igual manera con la finalidad de proteger los equipos eléctricos y electrónicos de anomalías o fallas dentro de la instalación. Cabe recordar que esta falla se origina por una fuga de corriente la cual intenta encontrar un medio de conducción de baja impedancia para llegar a tierra. Este medio en el peor de los casos podría ser una persona y es peor aún si la superficie del lugar se encuentra humedecida, por ende, esta es una de las razones primordiales de la instalación de un sistema de puesta a tierra.

De igual manera, el sistema de protección contra descargas atmosféricas que también es denominado como punta Franklin tiene una función de protección similar ya que una descarga atmosférica puede generar grandes diferencias de potencial en los sistemas eléctricos aledaños al sitio. En consecuencia, pueden circular corrientes sumamente altas en las estructuras metálicas y en el subsuelo causando daños potencialmente irremediables a las personas y que tendrían un alto valor económico.

Debido a lo mencionado anteriormente es que surge la necesidad de diseñar un sistema de puesta a tierra y contra descargas atmosféricas estudiando previamente la característica del terreno en donde serán implementados estos sistemas. Es sumamente importante tener el equipo necesario para realizar un estudio del comportamiento eléctrico del suelo, por ello, en este documento se mencionará su importancia con el fin de realizar un buen diseño.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

Teniendo en cuenta la importancia del diseño y utilización de los sistemas de descargas atmosféricas y de tierra se ha propuesto diseñar un sistema que cumpla con los parámetros requeridos en la construcción del complejo agroecológico, teniendo como referencia diseños preliminares los cuales se han consultado en la bibliografía propuesta en este proyecto a partir de los estudios previos del suelo y del nivel cerámico presentes en la localidad en la cual se llevará a cabo.

La simulación la cual fue desarrollada en ETAP permite vislumbrar los parámetros necesarios para un correcto diseño, verificando de esta manera que los valores calculados son admisibles a los tolerables de acuerdo con las características del diseño propuesto.

A su vez, también se muestra un estudio del comportamiento eléctrico del suelo en el cual va a ser desarrollado este sistema de tierra. Este estudio es primordial debido a que mediante una simulación describe el tipo de suelo en el cual va a ser desarrollado el diseño de la malla a tierra del complejo, otorgando su valor de resistividad y sus características principales.

De igual manera es fundamental conocer la cantidad de tormentas las cuales son producidas en un año para establecer el tipo de sistema contra descargas atmosféricas a emplear, para ello el diseño hace referencia al nivel cerámico que posee cada localidad del país lo cual se menciona de igual manera en la bibliografía presentada en el documento.

Todos estos datos obtenidos son necesarios para realizar la simulación final la cual establece el correcto diseño de tierra del complejo, es decir el diseño de las estructuras como de las puntas Franklin necesarias para cubrir con el sistema de protección.

1.2 Importancia y Alcances

El ser humano está involucrado en muchas actividades que conllevan el uso de la electricidad ya sea en el hogar o en el lugar en el cual realiza sus actividades diarias. Sin embargo, existe la posibilidad técnica de que el sistema de alimentación eléctrica pueda utilizarse sin contar con un sistema de tierra y funcionar, violando lo previsto en la norma ecuatoriana de la construcción y en los demás estándares de obligatorio cumplimiento a nivel nacional e internacional. Como se presenta la posibilidad técnica de operar sin el sistema de tierra, también se presenta la oportunidad económica de hacerlo. Sin embargo, la ausencia de este sistema va en detrimento de la seguridad de las personas, del trabajo de los equipos y de los sistemas de protecciones eléctricas.

El proyecto tiene como primer objetivo llevar a cabo el diseño de un sistema de tierra que permita proteger a las personas contra tensiones peligrosas al interior del complejo, y a su vez asegurar correctamente los sistemas de protecciones eléctricas y del sistema de alimentación de energía eléctrica.

Dado lo importante que es un sistema de tierras y dado que estos sistemas no pueden ser replicados, siendo que único para cada infraestructura eléctrica, es necesario medir la resistividad del suelo sobre el cual se ubicarán los equipos. Se sabe que factores como la naturaleza del terreno, la humedad de la zona, la salinidad y la estratigrafía, entre otros determinan la resistividad eléctrica del suelo. De esta manera, es conveniente diseñar un sistema de tierra el cual se adapte de gran manera a todos los escenarios que puede tener el terreno en el cual va a ser instalado, teniendo en cuenta que se debe contar con la tecnología adecuada para realizar los estudios pertinentes para una óptima implementación; esta tecnología también debe estar sujeta a un constante desarrollo y mejoramiento con la finalidad de ser lo más preciso posible.

De igual manera un sistema externo contra descargas atmosféricas es muy importante dentro de una instalación eléctrica, sobre todo en lugares donde las tormentas eléctricas pueden llegar a ocurrir con relativa frecuencia. Para ello se debe conocer el nivel cerámico del sitio donde estará construida la instalación. Esta información es sumamente importante debido a que nos provee la información de la cantidad de tormentas eléctricas en el sector.

Este proyecto tiene como segundo objetivo proponer el diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas para el complejo, con la finalidad de proteger al personal, los equipos y las instalaciones eléctricas al interior del complejo.

En resumen, este proyecto tiene como propósito fundamental diseñar un sistema de tierra para los equipos eléctricos que se listan como parte de la información técnica en función de los parámetros ofrecidos por el Gobierno Autónomo Descentralizado de Pichincha (GAD), así como un pararrayos o punta Franklin, según lo establecido en la normativa vigente.

1.3 Delimitación del Problema

Mediante el GAD de Pichincha, la Universidad Politécnica Salesiana y la junta parroquial de Ayora, se establecieron varios proyectos referentes al complejo, los cuales han sido desarrollados de forma autónoma. En este caso se presenta el diseño de un sistema de tierra y de descargas atmosféricas.

El estudio preliminar se lo llevará a cabo con ayuda del software ETAP en conjunto con AutoCAD. Para el diseño de estos sistemas se partió de las mediciones de la resistividad eléctrica las cuales permiten establecer el tipo de terreno existente en el complejo.

El complejo se encuentra situado en el kilómetro 2 de la vía a Otavalo exactamente situado sobre la Panamericana Norte como se observa en la Figura 1. [1] Las

instalaciones se encuentran en proceso de construcción por lo que las instalaciones detalladas dentro del documento podrían variar de acuerdo con las diferentes modificaciones que se puedan presentar hasta la culminación del proyecto. Se partirá de la información previamente establecida para de esta manera llevar a cabo el correcto diseño de los sistemas de protección externos.



Figura 1. Ubicación del complejo en el cual se llevará a cabo el proyecto.

Fuente: Google Earth Pro.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Principios Fundamentales

2.1.1 Tierra

En sistemas eléctricos el término “tierra” hace referencia de forma general a todo lo relacionado con los sistemas de tierra. En temas eléctricos el término “tierra” es asociada a la masa conductora o al terreno como tal, en los cuales la diferencia de potencial es igual a cero. [2]

2.1.2 Resistividad Eléctrica

A la resistividad se la puede definir como el comportamiento que tiene un elemento o material frente al paso de la intensidad de corriente, dicho valor permanece constante y pende únicamente de la naturaleza del elemento conductor. [3]

Si el valor de resistividad de un elemento es elevado indica que el material de dicho elemento es un aislante, a su vez, si este valor es bajo, quiere decir que el elemento es un conductor. Cabe recalcar también que un elemento es considerado como “conductor ideal” cuando su valor de resistividad es igual a cero, de igual manera un elemento es considerado como “aislante ideal” cuando su valor de resistividad tiende o va hacia el infinito. [2], [3]

De igual manera la conductividad es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica; siendo esta otra propiedad física de la materia.

A la resistividad eléctrica (ρ) se la puede describir como el impedimento el cual exhibe un material frente a la circulación de la corriente, viene expresada en ($\Omega \cdot m$) y se la utiliza para caracterizar la resistencia (R) de dicho material en función de su sección transversal (s) y la longitud (l) de dicho material. [4]

A la resistencia se la puede determinar con la siguiente ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

De esta ecuación se puede despejar la resistividad, teniendo una nueva ecuación:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

2.1.3 Resistividad del Terreno

La resistividad del suelo es uno de los elementos más importantes con el cual se va a realizar un diseño de un sistema de tierra, dado que es la propiedad más importante que posee el suelo para la conducir electricidad, esta propiedad es única de acuerdo con el tipo de suelo y al sector en el que está ubicado dicho terreno; es decir, que varía ampliamente según las condiciones a las que está sometido. [5]

El valor de resistividad del terreno viene representado por (ρ), y se expresa en ($\Omega \cdot m$), lo cual es equivalente a la impedancia que impide la circulación de corriente en un cubo de suelo con una medida de un metro de arista. [5]

2.1.4 Elementos que alteran a la Resistividad del Suelo

El valor de la resistividad el suelo viene establecido por una serie de elementos que pueden alterarla dependiendo de las características, entra las cuales se tienen:

2.1.4.1 Salinidad

La salinidad en el suelo o en el agua indica la cantidad de sales presentes. Por ejemplo, los fertilizantes inorgánicos son sales y la materia inorgánica como los alcalinos, los carbonatos, etc. Si se llegan a disolver cada uno de estos compuestos en agua se transforman en electrolitos. Al elevar esta concentración en agua, menor será la resistividad eléctrica. Los iones son conductores de la electricidad debido a su carga neta positiva o negativa (aniones y cationes). [6]

2.1.4.2 Composición del terreno

Según el tipo de terreno, existen rangos de valores de resistividad eléctrica, es decir, valores específicos de la resistividad del terreno según la naturaleza de este, los cuales se pueden visualizar en el Anexo 31.

En esta tabla se puede observar que un terreno rocoso, desértico o pedregoso presenta una resistividad mucho más elevada que uno arenoso pudiendo también clasificar de esta manera a un terreno como bueno o malo en términos de conductividad. [7]

Para fines didácticos, es decir para la realización de estimaciones se pueden utilizar las constantes estipuladas en el Anexo 32.

2.1.4.3 Estratigrafía

La estratigrafía hace referencia a que un terreno no es uniforme, sino que está formado por capas a distinta profundidad, las cuales presentan una composición diferente por lo que la resistividad varía en cada una de estas.

En algunos terrenos, mientras más profundo se llega menor resistividad presenta debido a que se va acercando a su nivel freático lo cual provee de mayor cantidad de minerales y humedad. [6], [7]

2.1.4.4 Temperatura

Este es otro de los elementos fundamentales el cual intervienen en la resistividad del terreno. Este factor actúa de forma inversamente proporcional, es decir, que cuando la temperatura desciende se incrementa el valor de la resistividad.

Cuando la temperatura llega a valores menores a los 0°C la resistividad del suelo empeora abruptamente ya que el agua que se encuentra situada en toda la superficie del terreno cambia su estado y procede a congelarse. [8] - [7]

2.1.4.5 Compactación

La resistividad del terreno y la compactación de este van asociadas directamente ya que la resistividad disminuye mientras se incrementa la compactación de este. [9]

2.1.4.6 Estado higrométrico.

El estado higrométrico hace referencia a la humedad presente en el terreno la cual varía en función del clima, del nivel freático, de la profundidad y de la época del año.

Mientras más húmedo se encuentra el terreno menor es su valor de resistividad o incluso en algunos casos permanece constante. De igual manera, cuando el terreno carece de humedad o básicamente esta disminuye, su valor de resistividad aumenta. Incluso puede darse el caso en el que un determinado lugar atraviesa una época de sequía, en este caso puede que no sea recomendable instalar un sistema de tierras, debido a que al sistema de tierras se lo tiene que diseñar en función de la resistividad en el peor de los casos posibles de acuerdo con la localidad del terreno.

También existen casos en la que varias industrias realizan una conexión interna de agua en el terreno en la cual se va a llevar una construcción para de esta manera mantener constante la concentración de humedad a través de los años incluso en las épocas de sequía, manteniendo de esta forma un valor bajo de resistividad en el terreno. [6] - [9]

2.2 Medida de la resistividad del suelo

El valor de la medida de la resistividad del suelo se utiliza principalmente para encontrar un tipo de suelo para el diseño de tierra en subestaciones, plantas generadoras, etc. También este tipo de estudio y medición se la utiliza para encontrar la profundidad y grueso de la roca en los diversos estudios geofísicos. [10]

Es sumamente importante que el valor de resistividad del terreno pueda ser verificable lo más preciso posible debido a que la cantidad obtenida en la resistencia del electrodo es proporcional de manera directa con el valor de resistividad del suelo

Si inconscientemente se toma una cantidad diferente en la resistividad del suelo en el diseño, el valor de la medición en la impedancia en el sistema de tierra podría obtener un error bastante significativo. [10], [11]

La medida de resistividad del suelo puede obtenerse mediante:

Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), Sondeos Magneto Telúricos, este tipo de sondeos abarca el estudio orientado de los métodos de Wenner y Schlumberger, estos métodos estudian una gran cantidad de volumen del terreno en condiciones normales para obtener sus mediciones.

Mediciones realizadas en el interior de sondeos mecánicos, en este caso también se estudia al terreno en condiciones normales, con mejor detalle y con menos volumen.

Muestras extraídas en sondeos, afloramientos, etc. Es decir, mediante la utilización de un laboratorio el cual abarca un volumen pequeño de terreno que ha sido previamente alterado y puede que no sea representativo. [10]

Por lo general un terreno o suelo presenta algunas capas que se encuentran sobrepuestas una con otra, a su vez cada una de estas presenta una resistividad propia, incluso en algunas ocasiones también el suelo puede presentar cambios laterales en la resistividad, pero estos cambios son de una forma mucho más gradual. Por ello las mediciones para determinar la resistividad del terreno tienen que ejecutarse para averiguar la existencia de alguna alteración significativa en la resistividad en cada una de estas circunstancias. [10], [12]

Cada uno de los métodos pertinentes para realizar la toma de datos o medición de la resistividad son descritas a profundidad en la norma IEEE estándar 81 del año 2013". [11]

2.3 Técnicas para obtener la medición de la resistividad del suelo

2.3.1 Método de las 4 picas o Wenner

Para obtener el valor de la medida de la resistividad del suelo el presente método inyecta una corriente con una frecuencia relativamente baja la cual atraviesa el suelo o la tierra mediante la utilización de dos electrodos externos, a su vez el valor del potencial o voltaje se lo verifica o mide a través de otros dos electrodos internos; dichos electrodos se encuentran enterrados a una misma distancia de separación entre ellos y en línea recta. A la relación entre la corriente inducida por los electrodos y el voltaje (V/I) se la conoce como resistencia aparente, en cambio a la resistividad aparente del suelo se calcula en base a la geometría del electrodo y de esta resistencia aparente. [6]

Como se mencionó, para medir la resistividad del suelo bajo esta técnica se necesita enterrar dos electrodos externos y dos electrodos internos, dando un total de cuatro electrodos en el suelo los cuales deben estar alineados y ubicados profundidad equivalente, esta profundidad no debe sobrepasar el valor de la relación $(a/20)$ y a su vez se encuentra limitada hacia unos 30 centímetros. El valor de resistividad variará según el distanciamiento existente entre electrodos y la resistividad como tal del suelo, no tiene dependencia ni de la extensión de terreno ni del material de los electrodos, aunque en varios casos depende del tipo de contacto que se hace con la tierra. [6]

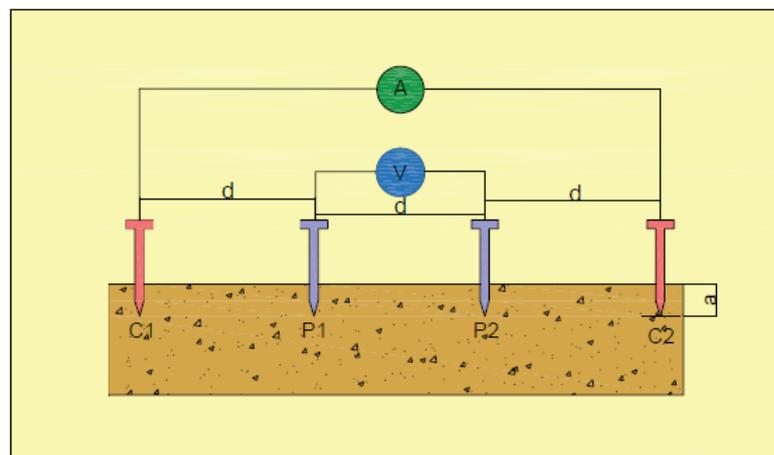


Figura 2. Configuración del método de Wenner.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

En la Figura 2 se puede apreciar cómo se deben ubicar cada uno de los electrodos, todos ellos a una misma distancia, a su vez se puede apreciar que en los dos electrodos exteriores es donde se inyecta la corriente y en los electrodos interiores es donde se procede a realizar la medición. [13]

La resistividad aparente viene expresada bajo la siguiente fórmula:

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

Donde:

ρ : Valor de resistividad aparente del suelo, expresada en ($\Omega \cdot m$).

a : Distanciamiento en metros existente en los electrodos.

R : Valor de la resistencia aparente del suelo.

b : Profundidad a la cual se encuentran enterrados los electrodos.

Dado el caso en que la distancia de enterramiento " b " posea un valor muy pequeño comparado con el existente al de distanciamiento entre electrodos " a ", es decir $a > 20b$ se puede reducir la ecuación a la siguiente expresión:

$$\rho = 2\pi aR$$

El valor obtenido como resultado en cualquiera de las ecuaciones equivale a la resistencia de una porción de terreno que posee un radio igual al distanciamiento de los electrodos " a ".[13]

2.3.2 Método de Schlumberger

Esta técnica surgió como alternativa al método anterior o de Wenner, debido a que este método también emplea el mismo número de electrodos para obtener el valor de la resistividad del suelo; la variación resulta en la distancia a la que se ubican los electrodos externos, que en este caso se encuentran ubicados a una distancia con múltiplos " na " de separación en base a los electrodos internos que se mantienen constantes a una distancia " a ". [6]

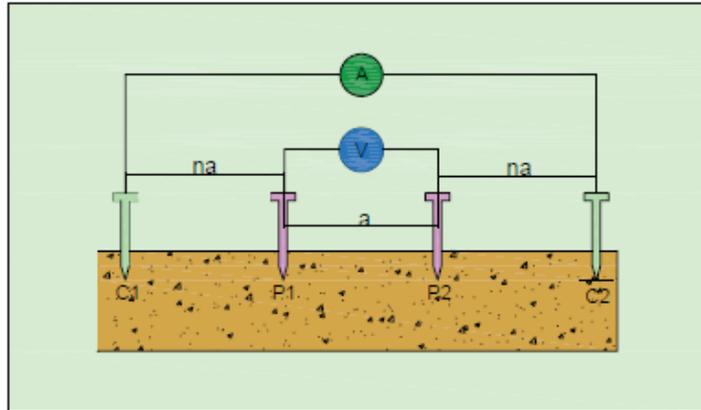


Figura 3. Configuración del método de Schlumberger.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Según este método la resistividad del suelo se lo establece mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = 2\pi \cdot na \cdot R(n + 1)$$

Donde:

ρ : Valor de resistividad aparente del suelo, expresada en ($\Omega \cdot m$).

a : Distanciamiento de electrodos (m).

R : Valor de resistencia aparente del suelo.

n : Magnitud equivalente a la separación de los electrodos externos.

En la Figura 3 se puede apreciar cómo se ejecuta este método, y a su vez esta técnica presenta mucho beneficio cuando se desea establecer la resistividad de las capas profundas de un determinado terreno evitando realizar numerosas mediciones para establecer este valor o incluso cuando los aparatos de medición no son exactos. Eso sí, es recomendable realizar mediciones con un desfase de 90 grados para que estas mediciones no sean alteradas por la presencia de alguna estructura subterránea. [13], [6]

2.3.3 Utilizando muestras de terreno

Para obtener la resistividad del terreno utilizando una muestra de este se la realiza mediante el método de Wenner, pero en una pequeña porción de terreno el cual tiene forma de prisma debido a la caja en la cual se encuentra.

Este valor de resistividad posee menor exactitud que el que se obtiene como resultado de una medición en un suelo real, pero resulta ser de gran utilidad porque debido a características propias del suelo u otras alternativas esta suele ser la única manera de encontrar este valor debido a las condiciones del terreno o a su estructura como tal. [13]

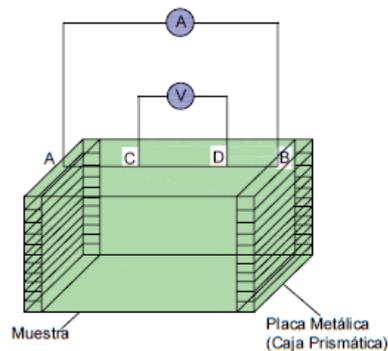


Figura 4. Configuración mediante muestras de terreno.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

La Figura 4 establece la configuración con la cual se realiza la medición utilizando piezas o porciones de terreno las cuales se encuentran estructuradas bajo una placa metálica dentro de una caja prismática de dimensión “n”.

2.4 Sistema de puesta a tierra

2.4.1 Definición y objetivos

Un sistema de puesta a tierra se establece mediante el conjunto de conductores ya sean cables o electrodos que se encuentran de manera directa enterrados en el suelo ubicados de acuerdo con la instalación para la cual fue diseñado con la finalidad de controlar los voltajes asociados con las corrientes de gran magnitud tales como la de cortocircuito o de descargas atmosféricas entre las principales causantes de perturbaciones eléctricas. [6]

En este sistema se realiza la conexión de cada uno de los dispositivos eléctricos o electrónicos propios de la instalación que desean ser protegidos ya sean: cables,

estructuras, equipos y toda superficie metálica las cuales tienen que presentar una equipotencialidad. Por ello el sistema de tierra presenta los siguientes objetivos:

Generar un espacio seguro para la protección del personal.

Propiciar un circuito que posea una impedancia de un valor muy pequeño para la descarga de la corriente a tierra.

Establecer un camino mediante el cual las corrientes no deseadas puedan ser disipadas.

Facilitar el uso de los elementos de protección que tiene el sistema.

Generar una ruta de desenergización y descarga de los equipos e instalaciones antes de realizar cualquier tipo de mantenimiento.

Brindar un servicio de seguridad y confiabilidad a la red eléctrica.

Dispersar la corriente generada mediante una descarga atmosférica evitando generar sobretensiones.

Limitar el cambio de potencial abrupto generado por la red eléctrica presente al originar cualquier anomalía a tierra.

Generar equipotencialidad eficiente en el sistema eléctrico. [8]

2.4.2 Importancia de un sistema de tierra

La presencia de un sistema de tierra es sumamente importante al frente de cualquier instalación la cual posea dispositivos o equipos eléctricos, ya que si existe una fuga de corriente en la red eléctrica o en cualquier circuito eléctrico esta se dirige a tierra inmediatamente evitando que de esta forma exista una descarga eléctrica sobre alguien que de forma accidentada realice algún tipo de contacto sobre esta superficie afectada.

[8]

Como se mencionaron en los objetivos, la prioridad de un sistema de tierras es salvaguardar la integridad física del ser humano que se encuentra circundante a la instalación eléctrica, a su vez, también tiene como finalidad evitar las pérdidas totales

de los equipos que se encuentran en dicha instalación o una reparación que podría costar mucho dinero. En este caso también se aplica la instalación de los pararrayos los cuales ayudan a disipar las corrientes generadas por descargas atmosféricas. [8]

2.4.3 Elementos de un sistema de tierra

Un sistema de tierra se conforma en su gran mayoría de electrodos, los cuales a su vez son los que se encuentran siempre en contacto con el suelo, ya que se encuentran enterrados y también de los conductores o cables los cuales se utilizan para entrelazar los electrodos y todos los equipos y dispositivos que se desean proteger manteniendo una equipotencialidad. [6]

Los elementos principales de un sistema de tierra son:

2.4.4 Tomas de tierra.

Este elemento del sistema de tierras se subdivide en:

2.4.4.1 Electrodo de tierra o pica.

Los electrodos hacen referencia a los conductores que se encuentran conectados y enterrados en el terreno, su finalidad es canalizar las corrientes de fuga que se presentan en una instalación o incluso procedentes de descargas atmosféricas. [13]

2.4.4.2 Línea de enlace con tierra.

Este es un elemento de enlace como lo dice propiamente su nombre que une a la varilla o a su conjunto de varillas con el punto de tierra del sistema. [13]

2.4.4.3 Punto de puesta a tierra.

Este término hace referencia a la unión existente entre el conductor principal del sistema de tierra con el conductor que hace de enlace con tierra. Este punto se encuentra ubicado estratégicamente en un lugar de fácil acceso con la finalidad de que mediante las herramientas adecuadas estas dos líneas puedan ser separadas apropiadamente para efectuar la medición del valor de la resistencia de tierra. [13]

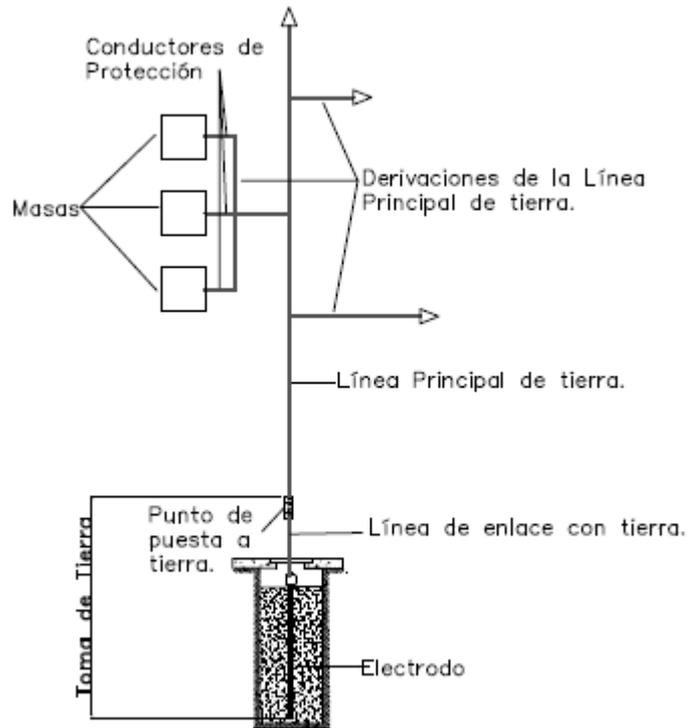


Figura 5. Representación del esquema de los elementos de una puesta a tierra

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

En la Figura 5 se observan cada uno de los elementos de un sistema a tierra existentes en una determinada instalación eléctrica, a su vez se puede identificar gráficamente la ubicación de la toma de tierra con sus elementos.

2.4.5 Línea principal de tierra

Tanto el conjunto de líneas secundarias como la línea principal existentes en un sistema de tierra junto a todos los conductores pertenecientes a la protección del sistema cumplen la función de enlazar los equipos con el sistema de tierra o a su vez la puesta a tierra perteneciente a una edificación o instalación eléctrica. [13]

2.4.6 Derivaciones de las líneas principales.

Tienen la misma finalidad que las líneas principales ya que a estas derivaciones también se las conoce como líneas o conductores secundarios de tierra y lo conforman varios de estos conductores mencionados que enlazan o acoplan a la línea o conductor principal con los equipos destinados a ser protegidos. [8]

2.4.7 Conductores

Son los elementos los cuales enlazan las diferentes masas o equipos en una instalación con la línea principal de tierra

De igual manera cada conductor viene representado por su color con el cual se pueda identificar de manera más fácil en un grupo de conductores en una misma instalación, también existen varios tipos de conductores, pero en este caso para los sistemas de tierra se tiene los siguientes:

2.4.7.1 Conductores CP

La finalidad de este tipo de conductores es acoplar de forma eléctrica los equipos de una instalación o edificación con los demás elementos con la finalidad de garantizar la protección que surge al existir algún contacto indirecto, es decir el contacto de personas con superficies que se encuentran accidentalmente alimentadas a cierta tensión. [13], [8]

Existen varios tipos de conductores los cuales cumplen con varias finalidades, pero si en cualquier caso se desea utilizar una canalización como conductor en este caso se debe tener en cuenta las siguientes instancias:

La continuidad eléctrica existente no debe ser afectada por problemas mecánicos, químicos y eléctricos.

La conductibilidad debe tener un valor mínimo el cual surge por la colocación del apartado.

Debe consentir que se pueda realizar la conexión con otros conductores en toda derivación que sea requerida. [8]

2.4.7.2 Conductores CPN

El objetivo que tienen estos conductores es realizar tanto la función de protección como la de neutro de manera simultánea, esto sucede en instalaciones en las cuales el conductor de protección posee al menos 10 mm², de igual manera es recomendable

que la instalación a la cual pertenece este conductor no presente algún tipo de protección diferencial de corriente la cual puede ser residual.

La sección mínima de este tipo de conductores puede tener valores de hasta 4mm². Este conductor debe ser utilizado desde el transformador y su uso debe ser limitado para las instalaciones las cuales utilicen accesorios o dispositivos los cuales se encuentran adaptados para esta finalidad. [13]

Algunas de las características principales de estos conductores son:

Deben estar aislados para soportar la tensión máxima o más elevada a la cual puede estar sometido dentro de la instalación con la finalidad de evitar las corrientes de fuga que puedan existir.

Este conductor no tiene la necesidad de presentar un aislamiento en el interior de los equipos eléctricos y electrónicos a proteger. [13], [8]

2.4.8 Sistemas que deben estar conectados a tierra

Todos los sistemas deben ser necesariamente protegidos a las diversas eventualidades que pueden presentarse, dicho de esta manera se los ha clasificado de la siguiente manera:

- 1) Equipos eléctricos.
- 2) Estructuras Metálicas.
- 3) Sistemas eléctricos de Potencia.
- 4) Sistemas contra descargas atmosféricas.
- 5) Sistemas de telecomunicaciones o que trabajan con señales electrónicas. [8]

2.4.9 Razones por las cuales se debe realizar una conexión a tierra

La principal razón de diseñar e implementar un sistema de tierra en una instalación como se estableció anteriormente en este documento es para seguridad de las personas que desempeñan alguna actividad en dicho sitio, posteriormente también se lo diseña para la protección de aparatos, dispositivos y equipos electrónicos o eléctricos que se encuentran instalados en dicho lugar. [8], [6]

Técnicamente las razones por las cuales los materiales conductores deban tener una conexión a tierra son las siguientes:

- 1) Equilibrar la tensión cuando se presenten operaciones normales.
- 2) Proporcionar una alternativa óptima de protección de los dispositivos que se encargan del despeje de sobrecargas y de los interruptores del circuito.
- 3) Restringir la tensión generada por descargas atmosféricas, sobretensiones transitorias o temporales y contactos accidentales con altas tensiones. [8]

2.4.10 Clasificación de un sistema de tierra

2.4.10.1 Tierra física

La tierra física consiste en el conjunto de electrodos de tierra, los cuales son utilizados mediante la conexión entre el sistema eléctrico y estos electrodos mencionados. Este sistema primordialmente consta de una pica, varilla, tubería o cualquier electrodo apropiado que cumpla con la función a la cual va a ser implementada; este dispositivo se encuentra en contacto directo con el terreno en el cual se encuentra ubicada la instalación a proteger, es decir tiene una relación directa con el sistema eléctrico a proteger. [5]

2.4.10.2 Tierra de un circuito

La tierra del circuito hace referencia al conductor que une a la tierra física con la instalación o equipo al que será instalado, su función principal es transportar la corriente de falla generada mediante un cortocircuito o por cualquier otra falla existente en dicha instalación. Este conductor debe tener la capacidad de soportar dicha corriente de falla de todos y cada uno de los equipos o circuitos que comprenden la instalación a proteger. [5], [8]

2.4.10.3 Tierra de un equipo

Este tipo de protección se encuentra destinado a la protección tanto de personas como equipos cuando ocurriese un cortocircuito o alguna falla con un incremento abrupto de la corriente, también se lo denomina cable de tierra de seguridad. El objetivo principal de esta tierra es interconectar todas las partes metálicas existentes en una instalación

para de esta manera mantenerla con equipotencialidad o referencia cero, en algunos sectores a la tierra de un equipo se la denomina masa, para diferenciar los términos de una mejor manera. [8], [6]

2.4.10.4 Tierra de protección hacia sistemas de descargas atmosféricas

Para este tipo de tierra se tiene que establecer un sistema de tierra diferente al de la edificación al cual este sistema protege como se observa en la Figura 6. Este tipo de protecciones está referenciado bajo la NFPA, la cual de igual manera es de autoría del NEC. [8]

La principal característica de este sistema es lograr realizar un drenaje de toda la energía la cual se origina en una descarga atmosférica, esta energía es drenada a tierra mediante una varilla (pararrayos) e cual consta de un conductor bajante y un electrodo a tierra independiente el cual se encuentra unido a la tierra física o sistema de tierras que presenten las instalaciones a proteger. [8]

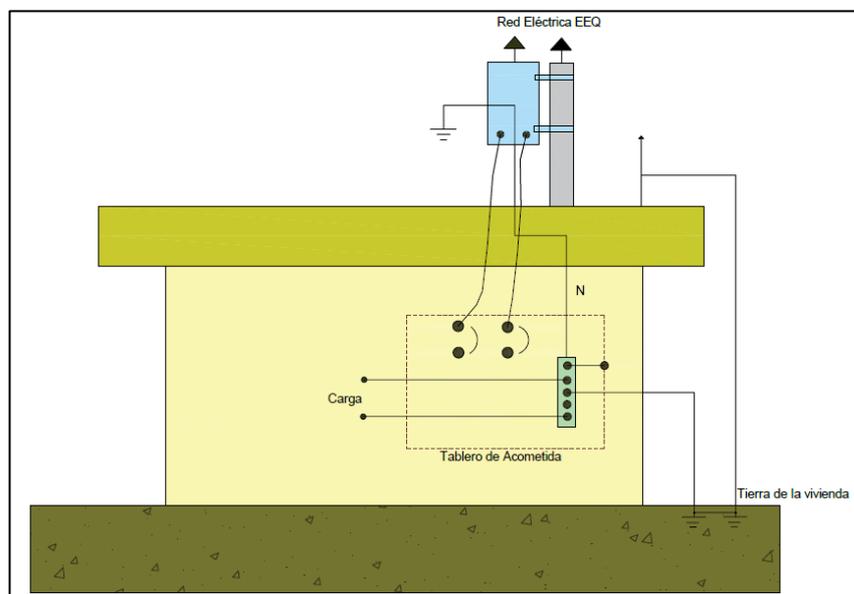


Figura 6. Esquema de la tierra de protección contra descargas atmosféricas.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

2.4.10.5 Neutro como conductor conectado a tierra

El conductor neutro tiene como principal característica transportar la intensidad de corriente existente en la fase de un sistema trifásico como monofásico, es decir se encarga de trasladar la corriente de retorno en dichos sistemas. [6]

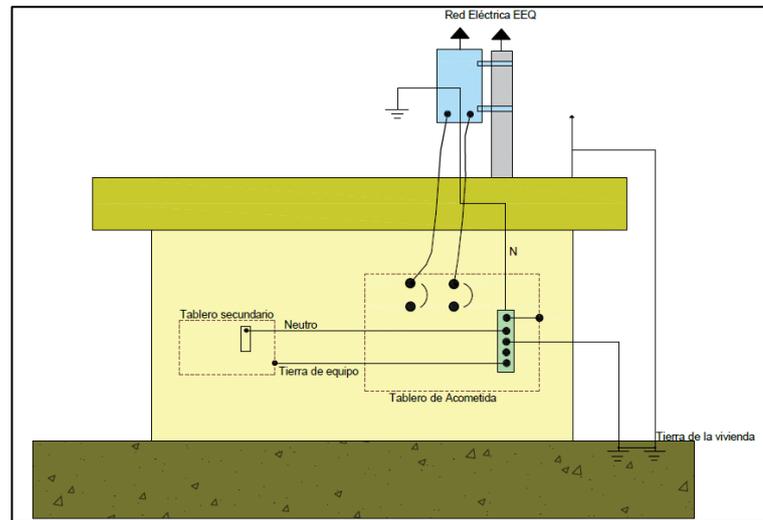


Figura 7. Esquema de la tierra del conductor neutro conectado a tierra.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

La Figura 7 hace referencia a este tipo de tierra en la cual se visualiza como desde el neutro de la sección del tablero de una instalación o una vivienda se realiza la conexión a tierra.

2.4.10.6 Tierra aislada

La tierra aislada brinda al consumidor una puesta a tierra que carece de ruido y armónicos, esta tierra se utiliza especialmente cuando se presenta en la instalación algún tipo de aparato electrónico sensible ya sean salas de computadores, sistemas de telecomunicaciones o equipos que otorguen al usuario algún tipo de recepción y envío de señales. [6]

Estos equipos al ser muy sensibles al ruido eléctrico no pueden estar conectados a la par con los demás sistemas de tierra, por lo que se debería preparar otro conductor independiente que cumpla con la misma función, y a su vez debe estar única y exclusivamente conectada a estos aparatos electrónicos. [6]

2.4.10.7 Tierra de referencia de señal

A este tipo de sistema de tierra se lo establece como la referencia cero para todos los equipos que presenten algún tipo de señal digital. La característica principal de esta tierra de referencia es otorgar una tierra la cual no se encuentre contaminada y además se encuentre separada de la tierra del equipo. A esta tierra referencial también se la conoce como: tierra de señal, ruido o tierra electrónica, pero para que pueda cumplir con el código otorgado por la NEC la tierra referencial debe encontrarse interconectada con el sistema de tierra que posea la instalación o edificación en la cual va a proteger. [5], [6]

2.4.11 Conexión efectiva a tierra

Para que una conexión a tierra sea efectiva debe existir una conductancia lo suficientemente baja la cual pueda presentarse de acuerdo con los varios análisis y condiciones del sistema a instalar. Para implementar de manera adecuada una trayectoria efectiva a tierra se requiere de la instalación de estos elementos:

- 1) Circuitos
- 2) Equipos
- 3) Cubiertas conductoras de equipos

Para efectuar esta conexión efectiva a tierra es necesario que todas las conexiones del sistema sean indelebles (permanente) y a su vez continuas, debido a que es sumamente escoger un conductor el cual tenga un dimensionamiento adecuado el cual permita tolerar las eventualidades ocasionadas por la corriente de falla. [8]

De forma resumida se puede decir que la trayectoria efectiva debería ser o estar:

- 1) Conectada intencionalmente a tierra.
- 2) Continua.
- 3) Permanente.
- 4) Segura; es decir con el calibre del conductor correcto el cual logre tolerar las corrientes parásitas o de falla y que no presente riesgos eventualmente.
- 5) De baja impedancia.

A su vez, es necesario mantener la impedancia con un valor bajo por los siguientes motivos:

- 1) Establecer un límite del voltaje o potencial a tierra.
- 2) Hacer mucho más sencillo el trabajo y operación de los elementos de protección.
- 3) Realizar un drenado de corrientes de fuga, estáticas, es decir corrientes que producen armónicos en el sistema. [8], [6]

2.5 Criterios fundamentales de las descargas atmosféricas

2.5.1 Descargas eléctricas

Una descarga eléctrica es un fenómeno físico electroestático que consta de una chispa o arco voltaico que se produce entre dos puntos cuando existe una diferencia de potencial eléctrico.

Cuando la resistencia del aire o cualquier medio dieléctrico es vencida se produce una descarga eléctrica la cual se origina de forma directa o indirectamente, esta descarga origina sobrevoltajes los cuales llegan a su punto más alto generando corrientes transitorias de gran intensidad que son perjudiciales si no se tienen las debidas protecciones. [13]



Figura 8. Descarga Eléctrica

Fuente: Brad Hannon

2.5.2 Descargas directas

Las descargas directas son aquellas que se originan en una tormenta o tempestad ya sea entre nubes o a su vez entre nube y superficie, este tipo de descarga se caracteriza por los elevados valores de tensión, intensidad de corriente y por su corta duración. [14]

El origen de este fenómeno no está completamente estudiado debido a la rapidez con la que se lleva a cabo, aunque se puede realizar una explicación de lo que ocurre antes de que se origine la descarga. [15]

En la atmósfera se encuentran partículas con carga positiva y negativa, con el paso del tiempo prevalecen las partículas positivas, a su vez la superficie terrestre presenta una carga negativa, al tener un exceso de carga positivo en la atmósfera origina un campo eléctrico en el aire.

La descarga eléctrica puede perjudicar o maltratar las edificaciones o instalaciones directa o indirectamente, a esto se lo conoce como rayo directo e indirecto respectivamente. La situación más usual y a su vez la más perjudicial es la de la descarga directa que se produce al caer directamente en una estructura o en una línea, en esta situación ya sea la línea o estructura son las que absorben toda la tensión inducida por el rayo la cual alcanza valores muy elevados, en este caso una descarga eléctrica puede producirse a través del conductor a tierra o de los elementos tales como postes los cuales se encuentran instalados. [15], [14]

2.5.3 Factores que caracterizan a una descarga atmosférica

Existen varios parámetros que caracterizan a una descarga atmosférica los más relevantes son:

- 1) Sobretensión temporal
- 2) Sobretensión transitoria
- 3) Sobretensión conducida
- 4) Sobretensión Inducida

5) Aumento del potencial eléctrico en la tierra

2.5.3.1 Sobretensión Temporal

Una sobretensión temporal es aquella en la que se incrementa el voltaje por encima de un 10% de su valor nominal, esta sobretensión se mantiene en el tiempo durante varios ciclos y surgen principalmente por defectos de conexión, cortes de neutro y descargas atmosféricas. [15]

2.5.3.2 Sobretensión transitoria

Esta sobretensión presenta un aumento de voltaje durante un periodo de tiempo muy pequeño (de corta duración), esta sobretensión se la mide entre dos fases o entre fase y tierra. [15]

2.5.3.3 Sobretensión conducida

Esta sobretensión se origina por una caída directa del rayo en las líneas de transmisión, esta sobretensión se propaga a lo largo de estas líneas, puede viajar cientos de kilómetros llegando en el peor de los casos hasta los usuarios y se propaga a tierra mediante los equipos electrónicos que estos posean generando descomposturas y averías totales. [13], [15]

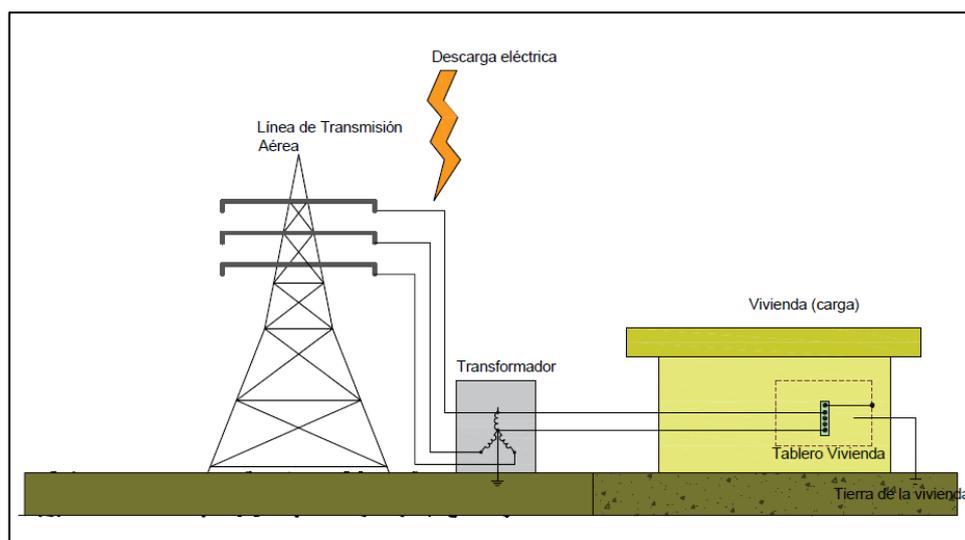


Figura 9. Esquema de las consecuencias ocasionadas por la descarga de un rayo en líneas de transmisión aéreas.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

2.5.3.4 Sobretensión inducida

Esta sobretensión se origina por el campo electromagnético que se origina en una descarga eléctrica, la cual genera corrientes transitorias las cuales son transmitidas al interior de los equipos o aparatos eléctricos cercanos provocando su avería o destrucción. [14]

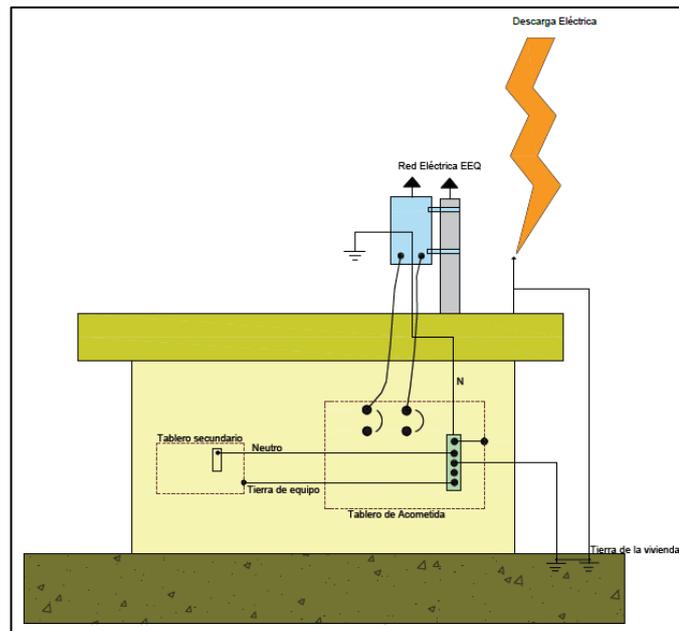


Figura 10. Esquema del impacto de un rayo sobre un objeto cercano a una vivienda

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

2.5.3.5 Aumento del potencial eléctrico en la tierra

Este aumento de potencial se origina cuando un rayo cae de forma directa al suelo, o mediante alguna estructura que se encuentra conectada a tierra (como un pararrayos, poste eléctrico, un árbol, etc.) la corriente de descarga generada por el rayo puede elevar el potencial eléctrico en la tierra en varios miles de voltios, este incremento abrupto surge como consecuencia de la corriente que se encuentra circulando por el terreno. [15]

2.5.4 Nivel cerámico

El nivel cerámico de una determinada localidad hace referencia a la cantidad de días en el año en los cuales ha existido una descarga eléctrica en 24 horas. Para

interpretarlos de mejor manera estos niveles se suelen visualizar en mapas cerámicos, es decir en mapas que poseen curvas con variaciones en el nivel isocerámico. [16]

El número de descargas atmosféricas tiene relación al nivel previamente mencionado de acuerdo con la siguiente ecuación, gráficamente se puede apreciar en la Figura 11 la cual fue proporcionada por el INAMHI:

$$N_o = NI * C \text{ Descargas/Km}^2 \text{ por año}$$

Donde:

N_o : Representa la densidad de descargas atmosféricas a tierra

C : Constante la cual depende de la localidad o región, puede ser 0.1 o 0.2

NI : Representa el nivel Isocerámico

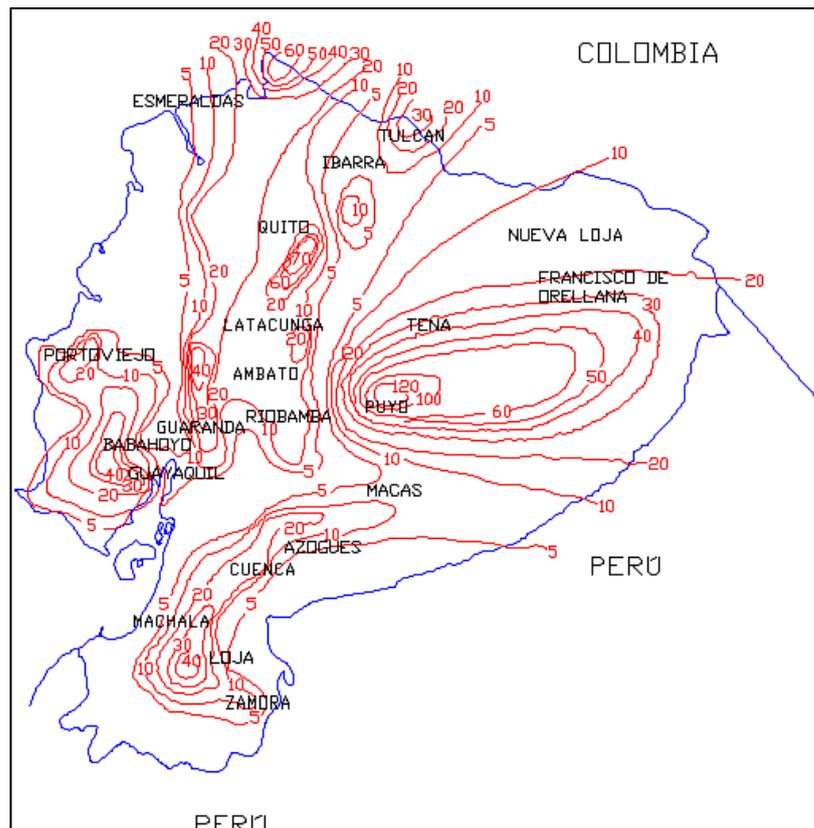


Figura 11. Nivel cerámico del Ecuador

Fuente: INAMHI

2.6 Sistema de protección contra descargas atmosféricas

Al igual que el sistema de tierra este tipo de sistema tiene como primicia salvaguardar la integridad de las personas, edificaciones y/o estructuras las cuales pueden sufrir algún percance mediante la descarga de un rayo.

A su vez este tipo de sistema considera medidas de protección tanto internas como externas, las cuales vienen establecidas según el diseño adecuado en base a las características de la instalación. [16], [15]

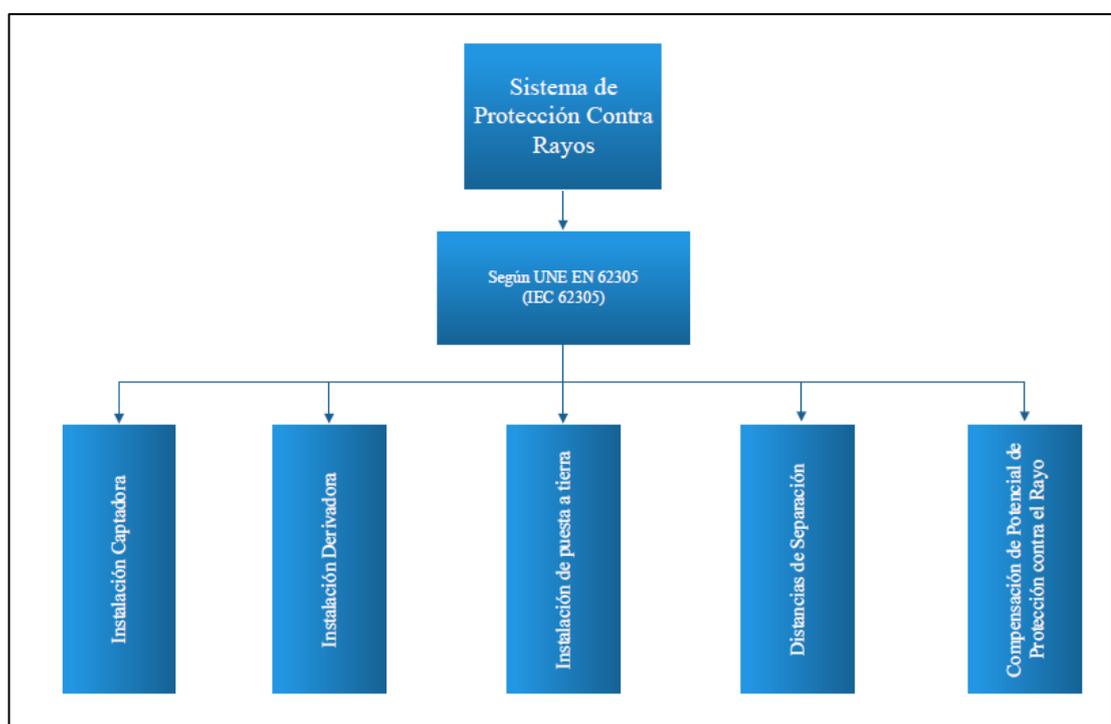


Figura 12. Partes de un sistema de protección contra rayos

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

2.7 Funciones principales del sistema.

El sistema de protección contra rayos tiene como funciones principales las siguientes:

- 1) Recibir directamente el impacto ocasionado por el rayo mediante la instalación de una unidad captadora.
- 2) Conducir la corriente generada por el rayo a tierra de forma segura mediante la instalación de una unidad derivadora.
- 3) Disipar la corriente producida por la descarga en el suelo mediante el establecimiento de un sistema de tierra independiente.

- 4) Impedir la creación de perturbaciones eléctricas o chispas que pueden generar peligro en el interior de la edificación a construir. [17]

2.8 Clasificación de los métodos de protección existentes contra descargas atmosféricas.

2.8.1 Método de la esfera rodante.

Este método maneja un sistema con mucha más planificación y, además, este método es altamente recomendable de implementar en diseños de edificaciones mucho más complejos.

Para interpretar de una forma óptima este método se debe realizar una primera aproximación en la cual surge una relación causada por el pico del valor de la intensidad de corriente generada a causa de la descarga eléctrica y la carga que se encuentra almacenada en dicha descarga. [17], [12]

De esta manera, se establece una proporción entre la magnitud del pico de la intensidad de la descarga y el distanciamiento final de la descarga que en este caso se lo interpreta como el radio contenido en la esfera rodante. [12]

La ecuación es:

$$r = 10 * I^{0.65}$$

Donde:

r: Representa el radio contenido en la esfera rodante (m).

I: Representa el valor de la intensidad de la corriente (kA).

La protección contra descargas atmosféricas se encuentra detallada bajo los parámetros de la norma IEC 62305-1, así esta norma a su vez define los tipos de cada uno de los sistemas de protección y las características internas de ca. [18]

Para el caso de la esfera rodante se establecen cuatro niveles de protección siendo el primero el que brinda una protección mucho mayor que las que le siguen, aunque se

debe escoger el nivel de protección de acuerdo con el nivel cerámico del sector en el cual se encuentra dicha instalación. [17]

A continuación, se muestran los valores que establecen cada uno de los niveles de protección:

El Anexo 35 presenta la conexión que existe en cada uno de los componentes disponibles en la instalación, tanto la eficacia como el tipo de protección existente, el radio que presentará la esfera rodante de acuerdo con el nivel de riesgo seleccionado y los valores picos de corriente.

Posteriormente se mostrarán ejemplos en los cuales se pueda visualizar de mejor manera una instalación protegida bajo este modelo de protección. [17], [11]

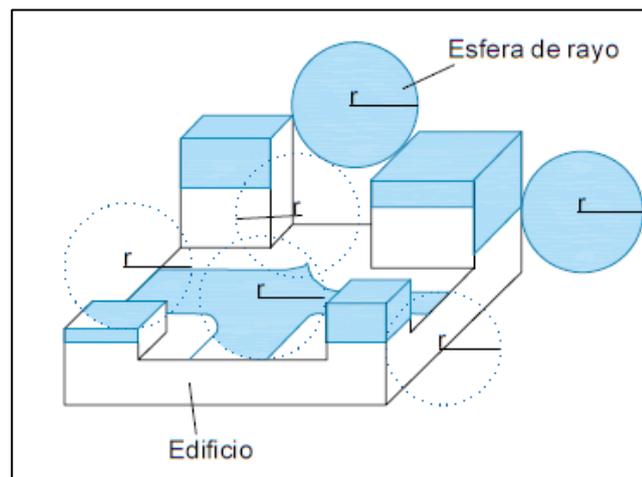


Figura 13. Aplicativo de la actuación de la esfera rodante en una edificación.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

La profundidad a la cual penetra una esfera rodante viene determinada en el dimensionamiento de las unidades captadoras las cuales serán utilizadas en la parte superior de la edificación para realizar la protección debida. [14]

Mediante la siguiente fórmula se puede establecer esta profundidad de penetración con la que la esfera rodante rueda por cada una de las unidades captadoras:

$$p = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Donde:

r : Magnitud del radio perteneciente a la esfera rodante (m).

d : Separación existente entre cada de las puntas captadoras.

p : Profundidad de penetración.

De igual manera si se conoce la distancia máxima de separación se puede establecer un valor aproximado de la profundidad de penetración el cual viene dado en la siguiente tabla:

Tabla 1. Profundidad a la que penetra una esfera rodante en relación con la posición entre sus puntas.

d Distancia entre puntas captadoras	Profundidad de Penetración (redondeada) (m)			
	Nivel de protección (m)			
	I (20m)	II (30m)	III (45m)	IV (60m)
2	0.03	0.02	0.01	0.01
4	0.10	0.07	0.04	0.03
6	0.23	0.15	0.10	0.08
8	0.40	0.27	0.18	0.13
10	0.64	0.42	0.28	0.21
12	0.92	0.61	0.40	0.30
14	1.27	0.83	0.55	0.41
16	1.67	1.09	0.72	0.54
18	2.14	1.38	0.91	0.68
20	2.68	1.72	1.13	0.84
23	3.64	2.29	1.49	1.11
26	4.80	2.96	1.92	1.43
29	6.23	3.74	2.40	1.78
32	8.00	4.62	2.94	2.17
35	10.32	5.63	3.54	2.61

Fuente: Blitzplaner, "Manual de Protección contra Rayos".

2.8.2 Método del cono o del ángulo de protección.

El método del cono o del ángulo representa una derivación de la modelación de rayo electro-geométrico, es decir representa una variación en el ángulo que genera una esfera rodante, específicamente cuando un segmento de línea inclinado segmenta a

dicha esfera de tal manera que las áreas provenientes de dicho corte son de igual magnitud. [14], [17]

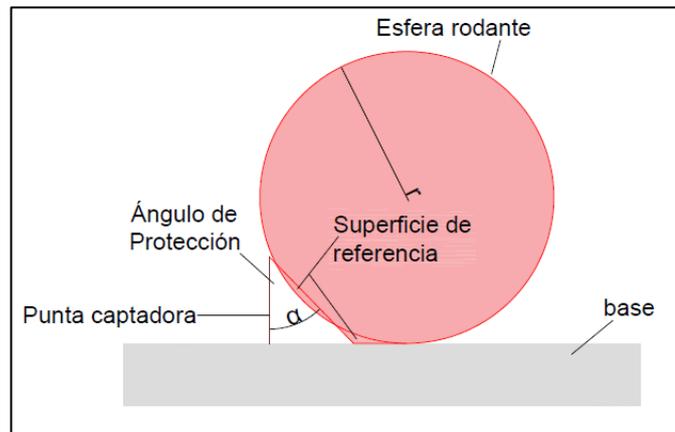


Figura 14. Ángulo perteneciente a la esfera rodante en función de su radio de protección.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Este método en específico se lo utiliza cuando se presentan edificaciones con un dimensionamiento simétrico o que presenten una cubierta inclinada. Este ángulo de protección es dependiente de la altura a la cual se ubicará la punta captadora.

De esta manera al establecer previamente un parámetro para el ángulo la punta captadora forma un cono el cual engloba el área de protección establecida por dicha punta, este ángulo viene dado en función del radio del cono y la altura a la cual estará ubicada la punta captadora desde la superficie del suelo y se la expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{R}{h}$$

Donde:

α : Ángulo de protección

R : Superficie (Radio del cono) de protección.

h : Altura a la cual se encuentra la punta franklin.

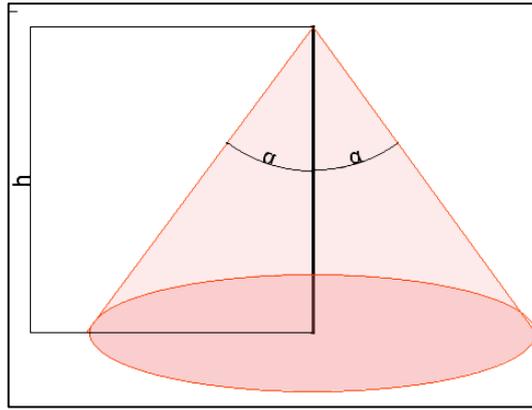


Figura 15. Zona de protección mediante el método del ángulo de protección.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Como en el caso de la esfera rodante este método también presenta cuatro niveles de protección los cuales se encuentran ubicados estableciendo una relación entre la altura de la punta Franklin o del dispositivo de cebado y el área de protección que genera su ángulo siendo al igual que en la esfera rodante el nivel uno el que presenta una mayor protección de las instalaciones y personal y el nivel cuatro el que presenta una menor protección, claro que para alturas superiores a los veinte metros es indispensable que se tome en cuenta un nivel de protección de un nivel mayor al uno debido a las características que presenta cada uno de estos. [17]

Para visualizar de una mejor manera lo mencionado anteriormente se establece la siguiente gráfica:

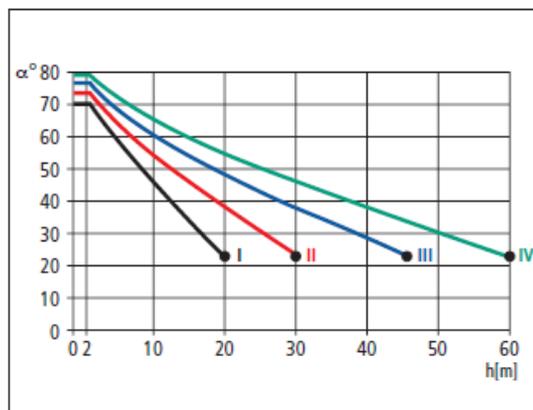


Figura 16. Gráfica de los niveles de protección mediante la relación entre el ángulo “ α ” de protección y la altura “h” de la edificación y pararrayos.

Fuente: Blitzplaner, “Manual de Protección contra Rayos”.

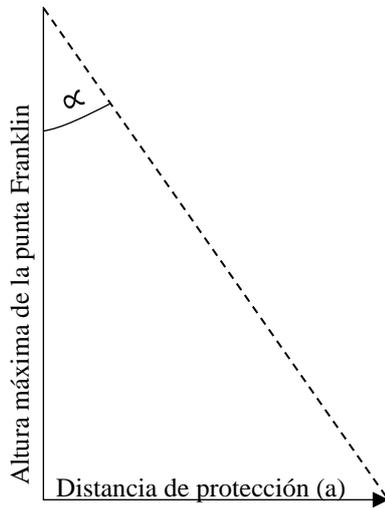
La gráfica permite visualizar cada uno de los niveles de protección existentes en relación con el ángulo de protección y la altura de la punta. De igual manera se puede visualizar que la altura mínima que debe tener el conjunto tanto de la unidad captadora como de la instalación es de 2 metros, de igual manera el ángulo mínimo existente para la protección es de 22.5 grados. [17]

Posteriormente, se muestra la Tabla 2, donde se permite visualizar cada uno de los ángulos existentes para cada uno de los niveles asociados a proteger una instalación en relación con su respectiva altura y distancia de superficie que genera el cono:

Tabla 2. Valores representativos existentes en el método del cono con relación al ángulo, altura y el nivel a proteger.

Altura de la punta Franklin	SK I		SK II		SK III		SK IV	
	Ángulo α	Distan. a (m)	Ángulo α	Distan.a (m)	Ángulo α	Distan. a (m)	Ángulo α	Distan. a (m)
1	71	2,90	74	3,49	77	4,33	79	5,14
2	71	5,81	74	6,97	77	8,66	79	10,29
3	66	6,74	71	8,71	74	10,46	76	12,03
4	62	7,52	68	9,90	72	12,31	74	13,95
5	59	8,32	65	10,72	70	13,74	72	15,39
6	56	8,90	62	11,28	68	14,85	71	17,43
7	53	9,29	60	12,12	66	15,72	69	18,24
8	50	9,53	58	12,80	64	16,40	68	19,80
9	48	10,00	56	13,34	62	16,93	66	20,21
10	45	10,00	54	13,76	61	18,04	65	21,45
11	43	10,26	52	14,08	59	18,31	64	22,55
12	40	10,07	50	14,30	58	19,20	62	22,57
13	38	10,16	49	14,95	57	20,02	61	23,45
14	36	10,17	47	15,01	55	19,99	60	24,25
15	34	10,12	45	15,00	54	20,65	59	24,96
16	32	10,00	44	15,45	53	21,23	58	25,61
17	30	9,81	42	15,31	51	20,99	57	26,18
18	27	9,17	40	15,10	50	21,45	56	26,69
19	25	8,86	39	15,39	49	21,86	55	27,13
20	23	8,49	37	15,07	48	22,21	54	27,53
21			36	15,26	47	22,52	53	27,87
22			35	15,40	46	22,78	52	28,16
23			36	16,71	47	24,66	53	30,52
24			32	15,00	44	23,18	50	28,60
25			30	14,43	43	23,31	49	28,76
26			29	14,41	41	22,60	49	29,91
27			27	13,76	40	22,66	48	29,99
28			26	13,66	39	22,67	47	30,03

29	25	13,52	38	22,66	46	30,03
30	23	12,73	37	22,61	45	30,00
31			36	22,52	44	29,94
32			35	22,41	44	30,90
33			35	23,11	43	30,77
34			34	22,93	42	30,61
35			33	22,73	41	30,43
36			32	22,50	40	30,21
37			31	22,23	40	31,05
38			30	21,94	39	30,77
39			29	21,62	38	30,47
40			28	21,27	37	30,14
41			27	20,89	37	30,90
42			26	20,48	36	30,51
43			25	20,05	35	30,11
44			24	19,59	35	30,81
45			23	19,10	34	30,35
46					33	29,87
47					32	29,37
48					32	29,99
49					31	29,44
50					30	28,87
51					30	29,44
52					29	28,82
53					28	28,18
54					27	27,51
55					27	28,02
56					26	27,31
57					25	26,58
58					25	27,05
59					24	26,27
60					23	25,47



Fuente: Blitzplaner, “Manual de Protección contra Rayos”.

Teniendo a consideración los valores expuestos en la tabla para realizar un diseño adecuado de un pararrayos mediante el método del ángulo se pueden tener dos ejemplos de sistemas de protección los cuales de acuerdo con los parámetros iniciales de diseño pueden ser instalados, estos dos casos no dependen de algún factor externo, sino más bien del criterio del diseño. Estos ejemplos de sistema vienen determinados por la localización de las puntas captadoras las cuales se las puede colocar en la parte superior de la superficie de la edificación o sino en la parte externa de la misma a su costado. [14], [17]

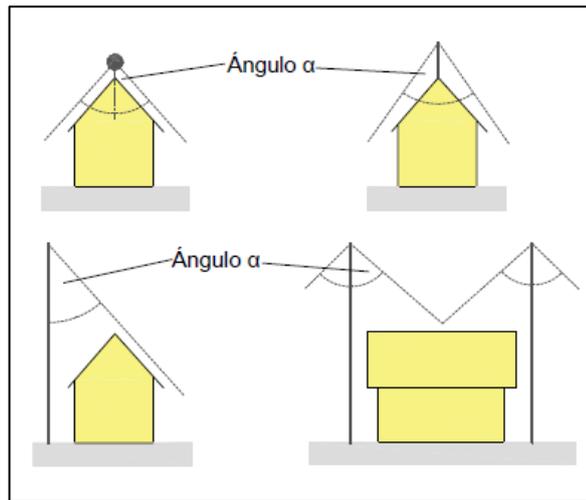


Figura 17. Ejemplos de edificaciones mediante el ángulo de protección “ α ”

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

En la primera parte se puede visualizar a la punta captadora situada sobre la superficie de la edificación y en la segunda se puede visualizar a la punta captadora colocada en los extremos de la edificación. En cada caso se cumple con la función principal que es la protección de la edificación, pero realizada de una manera diferente.

[14]

2.8.3 Elementos de un dispositivo de protección contra rayos o pararrayos

Si se quiere solventar esta incertidumbre acerca de las descargas atmosféricas es necesario establecer una solución adecuada y garantizada de acuerdo a los parámetros de diseño de la edificación a la cual se quiere proteger y bajo las características del mapa cerámico en el cual se encuentra la localidad, para lo cual es necesario colocar un dispositivo (en este caso punta Franklin) que prevenga los daños ocasionados por las descargas eléctricas, esta, a su vez, presenta algunos elementos fundamentales los cuales son necesarios para llevar a cabo esta función, los elementos mencionados son los siguientes:

2.8.3.1 Cabezal Captador

Este es el elemento principal del pararrayos, ya que su función primordial es realizar la captación del rayo (descargas eléctricas). Al ser el elemento más expuesto del

sistema los cabezales deben presentar una protección adecuada contra la corrosión mediante algún revestimiento. Presenta a su vez una rosca la cual le permite adecuarse a la pieza de adaptación mediante una soldadura térmica. [13]



Figura 18. Cabezal captador con adaptador mástil

Fuente: INGESCO “Lightning Solutions”.

2.8.3.2 Red conductora

A este elemento también se lo conoce como línea principal de tierra, este elemento lo conforman los conductores que tienen como función principal la conexión entre el cabezal con el sistema de tierra posee el pararrayos.

La instalación de este elemento debe realizarse de manera visible desde el cabezal hasta el sistema de tierra describiendo la trayectoria más corta y directa. [13]

Esta red conductora a su vez está formada por los siguientes elementos:

- 1) Mástil.
- 2) Piezas de adaptación.
- 3) Anclaje de mástil.
- 4) Conductor bajante.
- 5) Soportes para cable.
- 6) Contador de descargas.
- 7) Juntas de control y uniones.
- 8) Tubos de protección.

2.8.3.3 Punto de conexión de tierra.

Este es el elemento más importante de la instalación de un pararrayos debido a que es el lugar por el cual se va a evacuar la corriente originada por la descarga atmosférica.

[13]

Para diseñar esta toma de tierra se tienen dos criterios, el primero es que es permitido la utilización del sistema de tierra perteneciente a la edificación en la cual va a ser instalado el pararrayos, y el segundo es que es recomendable diseñar un sistema de tierra que sea único e independiente para conectar al pararrayos el cual a su vez debe encontrarse conectado al sistema de tierras de la instalación con la finalidad de asegurar la equipotencialidad en los sistemas de tierra y evitar la filtración de corrientes parásitas. [14]

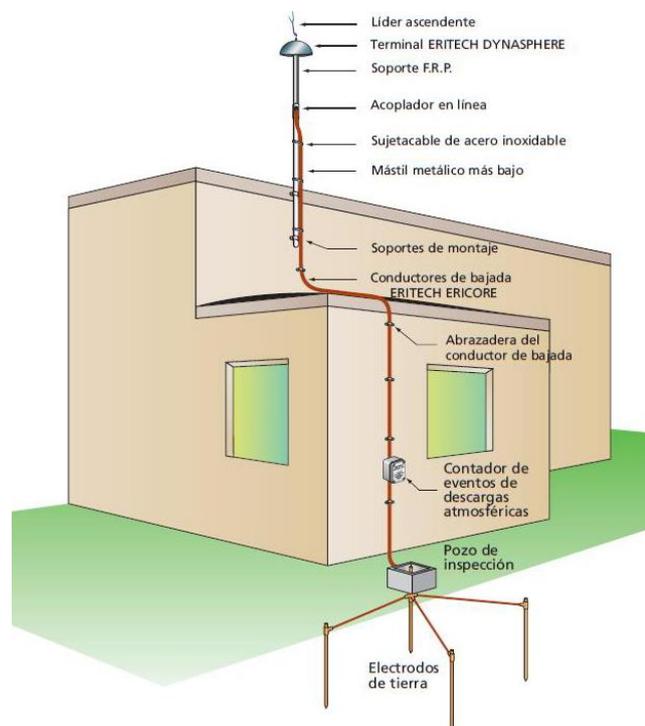


Figura 19. Sistema completo de Pararrayos con su toma a tierra

Fuente: SIQ Sistemas IQ

2.8.4 Ejemplos de pararrayos

2.8.4.1 Puntas Franklin

Este tipo de sistemas únicamente capturan las descargas que una instalación o edificación puede recibir de manera indiscriminada, ya que la descarga no está controlada por falta de trayectos previos. [13]

En este tipo de sistemas, es complejo encontrar la ubicación o el sector en el cual impactaría una descarga; tanto las jaulas de Faraday como las puntas Franklin son

algunos de los dispositivos más comunes que existen en este apartado, los cuales han venido en constante uso desde su creación y han venido variando a lo largo del tiempo en las aleaciones con las cuales se pueden elaborar más no es el principio de protección como tal. [13], [15]

La ubicación del pararrayos, en este caso de la punta franklin se coloca en el mástil, es decir se sitúa en lo más alto que el edificio a proteger. Según el tipo que presente el cabezal, la altura a la cual va a ser instalada y a su vez la forma que presenta la edificación, se puede proporcionar el radio el cual proteja a dicha edificación. Generalmente cuanto más alto sea el pararrayos, mucho más grande será el área de cobertura de este. [15]



Figura 20. Pararrayos tipo Punta Franklin

Fuente: AIDITEC SYSTEMS

2.8.4.2 Dispositivo Cebado (PDC)

A diferencia con la punta franklin los pararrayos que presentan un dispositivo cebado actúan cuando existe una aproximación de la descarga o rayo, actuando más rápido que cualquier otro dispositivo que se encuentre en su área de accionamiento, para de esta manera despejar la corriente generada por el rayo a tierra de una manera óptima y generando seguridad. [15]

Este tipo de pararrayos generan una descarga eléctrica con polaridad distinta al rayo, para de esta manera atraerlo mucho más fácilmente y llevar el punto de impacto de este por la parte superior de la instalación o edificación a proteger, esto le permite

generar un campo mucho mayor de cobertura en la base de la edificación a diferencia de un pararrayos convencional. [15]

Para una adecuada implementación es recomendable buscar una acreditación por medio de una normativa internacional, ya que este pararrayos tiene que mantenerse en funcionamiento bajo condiciones meteorológicas desfavorables que eviten que este dispositivo llegara a cortocircuitar y de esta manera perder su eficiencia. [15]



Figura 21. Pararrayos con dispositivo cebado

Fuente: INGESCO “Lightning Solutions”.

2.8.4.3 Malla captadora

Este tipo de protección describe los que realiza básicamente la jaula de Faraday y la utilización de este tipo de protecciones es adecuada para construcciones o edificaciones en las cuales exista una predominación de la superficie sobre la altura.

Este sistema lo conforman un grupo de puntas captadoras ubicadas especialmente en cada uno de los vértices de la instalación, las cuales se encuentran unidas mediante un cable conductor lo cual le permite formar una red conductora o una malla la cual será aterrizada con ayuda de otro conjunto de conductores los cuales provienen de todas y cada una de las puntas captadoras. Cada punta conductora genera un cono de protección el cual utiliza el principio del ángulo de protección. [17]

Cabe mencionar que en este caso en particular también existe un nivel de protección el cual establece el dimensionamiento de la malla captadora.

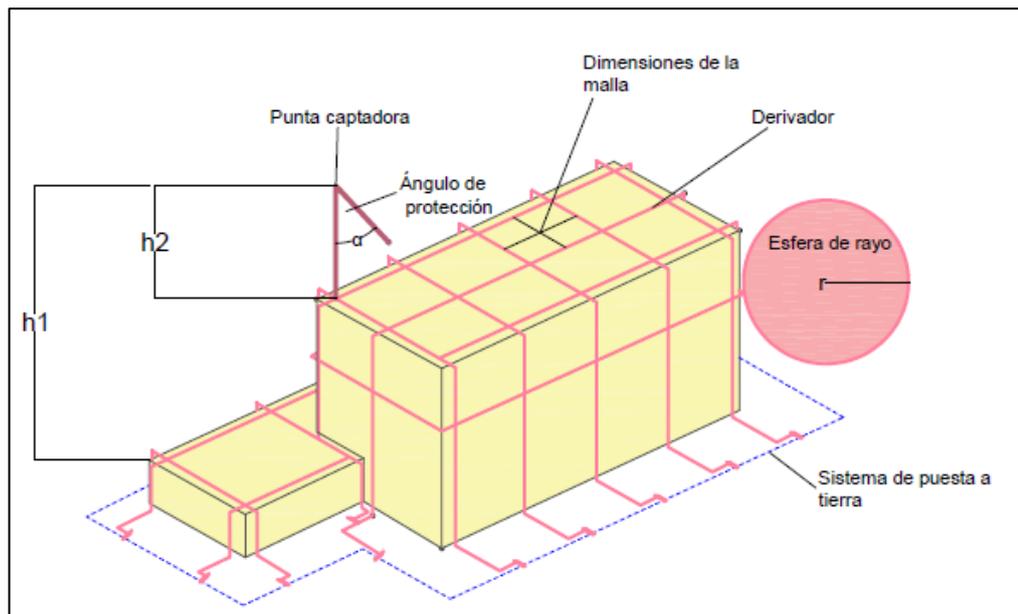


Figura 22. Ejemplo de instalación de una malla captadora.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

En la Figura 22 se puede visualizar la distribución de una instalación la cual se encuentra protegida mediante una malla captadora, en este caso se establece de igual manera el ángulo y la altura a la cual se encuentra ubicada la punta captadora. Cada uno de los conductores se encuentra debidamente aterrizado y conectado al sistema general manteniendo una equipotencialidad en el sistema.

CAPÍTULO III

NORMATIVA

3.1 Introducción

Las diferentes normativas y estándares tanto nacionales como internacionales tienen fundamentos los cuales fueron científicamente comprobados y experimentados en todo el mundo mediante personas que poseen un arduo conocimiento en la materia. Esta normativa imparte los detalles que se deben seguir para la culminación de un diseño en específico (en este caso un sistema de tierra y de puntas Franklin).

Para solventar y sustentar los diseños preliminares de un sistema de tierra y contra descargas atmosféricas es necesario conocer los estándares y parámetros actuales los cuales mantengan una credibilidad y a su vez tenga aceptación tanto nacional como internacionalmente.

De esta manera para el diseño de dichos sistemas se ha tomado como referencia las siguientes normativas:

- 1) Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)
- 2) Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)
- 3) Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano (NEC)
- 4) Publicaciones debidamente referenciadas.

A continuación, se hará énfasis en cada uno de los lineamientos más importantes los cuales fueron fundamentales para cumplir con el diseño adecuado de los sistemas mencionados.

3.2 Norma IEEE 80 – 2013

En el apartado o capítulo 9 de esta normativa hace referencia a las principales consideraciones para el diseño de un sistema de tierra en el cual destacan siguientes aspectos:

- 1) Instalar un sistema de tierra en el cual exista un límite en los gradientes de potencial, de manera el nivel de potencial e intensidad de corriente no atenten a la seguridad de las personas e instalaciones tanto en condiciones de falla como en condiciones normales.
- 2) El sistema de tierra deberá garantizar de forma efectiva y continua el servicio sin presentar interrupciones o fallas en los circuitos. [19]

De forma conceptual para empezar a efectuar el diseño de los anillos que conforman una malla a tierra esta sección de la normativa también sugiere que se debe realizar una inspección del plano de distribución, posteriormente para generar las ideas de diseño y conceptos básicos se tomarán en cuenta las siguientes pautas:

- 1) Un sistema de conductores continuos deberá rodear el perímetro de la instalación para de esta manera abarcar tanta área como sea posible. Esta medida de seguridad ayudaría a disipar una alta concentración de la corriente de falla, dicho de otra manera, evitará los altos gradientes en el área que la malla rodea protegiendo las estructuras y el personal.
- 2) Los conductores dentro de la malla serán colocados de forma paralela a esta, exceptuando cuando se requiera instalar conexiones a tierra cortas.
- 3) La malla de tierra o rejilla puede utilizar conductores de cobre desnudos 4/0 los cuales se encontrarían enterrados de 0.3 a 0.5 metros por debajo del nivel del suelo. En los empalmes, uniones o conexiones cruzadas se pueden colocar varillas de tierra las cuales pueden ser tanto de baja o alta camada.
- 4) Si se desea se podría colocar varillas de tierra en equipos que se consideren susceptibles o importantes, esencialmente si se tiene cerca un pararrayos.
- 5) Este sistema de tierra se deberá colocar al largo de la instalación, si se dispone más de una edificación se podrían utilizar varias rejillas cada una conectada realizando una equipotencialidad adecuada. [19]

El capítulo 16 de esta normativa establece los criterios fundamentales para la elaboración del diseño de un sistema de tierra, los cuales, a su vez, se llevarán a cabo en condiciones normales y presuntos a fallas. [19]

Las principales características para el correcto dimensionamiento y diseño de un sistema de tierra son:

- 1) Proveer del medio en el que se permita disipar corrientes eléctricas de falla las cuales serán dirigidas a tierra sin la necesidad de sobrepasar algún límite de operación en el equipo o instalaciones eléctricas.
- 2) Brindar seguridad al personal que se encuentre aledaño a una instalación eléctrica y que a su vez esta no ponga en riesgo su integridad frente a un choque eléctrico.
- 3) Generar límites adecuados de seguridad los cuales serán obtenidos mediante condiciones de falla en la respectiva estación eléctrica. [19]

Siguiendo estos parámetros la normativa hace referencia a los cálculos de ciertos parámetros críticos fundamentales en el desarrollo del sistema de tierra tales como:

- 1) Corriente máxima de malla (I_G).
- 2) Resistividad del suelo (ρ).
- 3) Tiempo máximo en el cual se despejará la falla (t_f, t_s).
- 4) Resistividad del suelo (capa superior) (ρ_s).
- 5) Geometría de la malla. [19]

3.2.1 Procedimiento de diseño.

Esta normativa establece ciertos parámetros de diseño sugeridos en una cantidad determinada de pasos los cuales son:

- 1) Delimitar las características del terreno, es decir perfil de resistividad y el modelamiento del suelo (suelo uniforme o dos capas).
- 2) Establecer el tamaño del conductor para el sistema teniendo en cuenta la corriente de falla máxima y del tiempo del despeje de esta.
- 3) Calcular el valor tolerable tanto del voltaje de paso como de contacto
- 4) Elaborar un diseño preliminar en el que se especifique el número de conductores necesarios para la creación del sistema de tierra.
- 5) Estimar el valor de la malla en función al modelo geométrico utilizado.
- 6) Calcular la corriente de falla para diseñar el sistema de tierra.
- 7) Comparar el GPR obtenido del diseño preliminar con el voltaje de toque tolerable, si este valor es menor el diseño únicamente necesita un conductor más que proporcione el acceso a tierra del equipo a proteger.

- 8) Calcular las tensiones de la malla y escalón de red.
- 9) Si el voltaje de toque tolerable es mayor al voltaje calculado en la malla el diseño del sistema de tierras estaría completo (seguir al paso 10), caso contrario se deberá revisar el diseño preliminar de la malla.
- 10) Si el valor de los voltajes tolerables de toque y paso están por encima de los calculados únicamente se deberá refinar el diseño para brindar acceso a tierra al equipo o instalación.
- 11) Si tanto el voltaje de toque y paso exceden los valores tolerables de diseño se deberá realizar un reajuste en el diseño de la malla a tierra. Este reajuste podría ser aumentar la cantidad de conductores en la malla o colocar varillas adicionales.
- 12) Realizar una revisión del diseño de detalle, el cual se desarrolla una vez terminados todos estos pasos para realizar una verificación de los valores obtenidos. [19]

Si se siguen estos pasos a raja tabla se puede establecer el correcto diseño del sistema de tierra bajo los criterios fundamentales de diseño, entablando una rápida visión y formulación de los criterios fundamentales de diseño propuestos por la IEEE STD 80-2013. [19]

3.3 Código Eléctrico Nacional Ecuatoriano (Reglamento NEC)

Este apartado hace referencia a la normativa vigente que existe en el país, es decir abarca los requisitos y especificaciones generales para una edificación de un sistema de tierra.

3.3.1 Disposiciones generales.

La sección 250-1 cubre con los requerimientos específicos necesarios para el establecimiento de un sistema de tierra, estos requisitos se detallan a continuación:

- 1) Los circuitos, equipos y sistemas los cuales les admiten o a su vez no permiten que estén aterrizados.
- 2) El calibre del conductor a elegir en el sistema de tierra.
- 3) Ubicación de la tierra.
- 4) Diferentes tipos de materiales existentes los cuales son utilizados en el sistema.
- 5) Tipos de tierras y de los puentes de unión.

- 6) Situaciones las que se podría reemplazar los aislamientos diseñados para la tierra.

La sección 250-25 establece el cable a colocar a tierra en un sistema AC, el cual se deberá especificar de acuerdo con una:

- 1) Instalación con un sistema monofásico a dos hilos: un conductor.
- 2) Instalación con un sistema monofásico a tres hilos: un conductor derivado al neutro.
- 3) Instalación con un sistema polifásico que contengan un conductor semejante en cada una de las fases: cualquier conductor proveniente de cualquier fase.
- 4) Instalación con un sistema polifásico en la que se aterriza alguna fase: el conductor proveniente de cualquier fase.
- 5) Instalación con un sistema polifásico en la que se disponga de una fase al igual que en el apartado preliminar: el conductor que se dirige a neutro.

La sección 250-81 establece los sistemas de electrodos de tierra los cuales deberían encontrarse todos ellos conectados entre sí para de esta manera conformar el conjunto de electrodos aterrizados, es recomendable cada electrodo llegue libre sin realizar algún empalme para evitar que pierda las propiedades características que posee el material del electrodo; claro está, que si existiera algún proceso de soldadura para que estos electrodos puedan conectarse deberían ser mediante soldadura exotérmica, este es el único método aprobado para conectar dos electrodos en un sistema de tierra.

De igual forma este apartado sugiere que la tubería que se encuentra dentro de las edificaciones que usualmente suele ser de material metálico no debe ser utilizado como una pieza en la cual se la utilice para realizar el aterrizaje o como cualquier tipo de conductor el cual permita realizar algún tipo de enlace con los algún electrodo o varilla de manera que pueda utilizarse como una malla a tierra.

La sección 250-86 hace referencia a las varillas de pararrayos, este apartado señala que no está permitido utilizar los conductores, tubos, varillas ni demás elementos con los cuales se aterriza un pararrayos o punta Franklin en sustitución de cada electrodo

de tierra, debido a que cada sistema tiene su respectivo material de apoyo y cumplen una función especial, por lo que para hacer un diseño correcto se debe tener en cuenta que estos materiales deben ser utilizados para el fin que les fue desempeñado.

3.4 Sistemas de protección contra rayos.

Existía una normativa anteriormente utilizada la cual establecía los siguientes apartados:

- 1) IEC 61024
- 2) IEC 61312
- 3) IEC 61663

Hoy en día todas estas normas se han recopilado en un nuevo apartado, el cual es la viene estipulado por la Comisión Electrotécnica Internacional 62305.

Este estándar se subdivide en 5 secciones las cuales explican las características generales adecuadas para establecer la protección contra descargas atmosféricas incluyendo su instalación y su mantenimiento.

3.4.1 IEC 62305-1 Principios generales

En este primer apartado se establecen los términos, definiciones y parámetros de la corriente del rayo, a su vez los daños ocasionados por este y las medidas necesarias de protección, normas básicas para estructuras y servicios de protección, y todos los parámetros de equipos de sistemas de protección que simulan cualquier impacto del rayo en cada uno de los componentes del equipo. [18]

3.4.2 IEC 62305-2 Riesgos en la misión.

En este apartado se describen la metodología con la cual va a ser evaluado el riesgo, los componentes que se utilizarán en las estructuras y de igual manera los mecanismos de riesgo para todos los demás servicios. [18]

3.4.3 IEC 62305-3 Daño físico en las estructuras y riesgo en la integridad física de las personas.

Este apartado hace referencia a los sistemas, medidas de defensa contra daños ocasionados a las personas, que atienden a la integridad física por la subida de voltaje y por último establece un guía que ayuda a efectuar algún diseño, mantenimiento y ubicación de estos sistemas (LPS). [18]

3.4.4 IEC 62305-4 Sistemas electrónicos y eléctricos en el interior de las instalaciones.

Este apartado toma en consideración la protección contra el impulso electromagnético de la descarga, sus características principales, puesta a tierra y la conexión eléctrica dentro de la estructura; protecciones magnéticas, los requisitos para dispositivos que se encargan de proteger a determinadas instalaciones, equipos y edificaciones de sobrecargas. [18]

3.4.5 IEC 62305-5 Servicios

Este apartado abarca las líneas presentes en sistemas de telecomunicaciones, tanto de fibra óptica como conductores metálicos, líneas de alimentación energética y su respectiva tubería. [18]

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE DISEÑO

4.1 Diseño del sistema de tierra del complejo.

4.1.1 Medida de la resistividad del suelo

La eficiencia dentro de un sistema de tierra viene ligada a la exactitud con la que los instrumentos de medición realizan su trabajo, en este caso en particular se dispuso de un telurómetro de la marca Fluke 1625-2 Kit el cual proporciona una exactitud y precisión a la hora de realizar la toma de datos al medir el valor de la resistividad del suelo en base a su desarrollo tecnológico y a las características que presenta este dispositivo; a su vez esta herramienta de trabajo es sumamente sencilla de utilizar y no presenta ningún inconveniente a la hora de realizar la recolección de datos.

Este dispositivo permite realizar las mediciones de resistividad del terreno utilizando tres o cuatro polos, por lo que su versatilidad lo hace un instrumento compacto y relativamente útil, el cual puede ser utilizado para realizar mediciones rápidas y exactas de las diversas conexiones de tierra presentes en cualquier instalación, ya sean torres de energía eléctrica o instalaciones civiles e industriales.

La resistencia y resistividad del suelo siempre deben medirse al realizar lo siguiente:

- 1) Diseños de sistemas de puesta a tierra.
- 2) Comprobación de los parámetros pertenecientes a un sistema de protección contra rayos.
- 3) Instalación de un sistema de tierra diferente en alguna instalación.
- 4) Instalación de grandes equipos eléctricos como generadores, transformadores, aparatos de alta tensión, etc.

En la Figura 23 se puede apreciar de mejor manera cual es la estructura del dispositivo de medición con cada una de las características que este dispone al momento de efectuar cualquier tipo de medición, en este caso se efectuará la medición de la resistividad del suelo.



Figura 23. Fluke 1625-2 Kit

Fuente: FLUKE

4.1.2 Método de Medición Utilizado

En este proyecto se procedió a medir la resistividad del suelo con ayuda del método de Wenner el cual afirma que se deben enterrar cada uno de los electrodos en el terreno, esta profundidad no debe ser superior a la proporción “a/20” y se encuentra normalmente restringida por 30 centímetros, las medidas de resistividad no dependen de la distancia existente en los electrodos.

La característica principal de este método de medición sugiere que se inyecte una corriente con una frecuencia relativamente baja la cual atraviesa el suelo o la tierra mediante la utilización de dos electrodos externos (C1 y C2), a su vez el valor del potencial o voltaje se lo verifica o mide a través de otros dos electrodos internos (P1 y P2); dichos electrodos se encuentran enterrados a una misma distancia de separación.

La fracción V/I generada en este método se la denomina resistencia aparente, por ende, el valor de resistividad aparente del suelo viene expresada en relación de la resistencia aparente y de la forma que posee el electrodo.

Como se mencionó, para medir la resistividad del suelo bajo esta técnica se necesita enterrar dos electrodos externos y dos electrodos internos, dando un total de cuatro electrodos en el suelo los cuales deben estar alineados y ubicados profundidad

equivalente, esta profundidad no debe sobrepasar el valor de la relación $(a/20)$ y a su vez se encuentra limitada hacia unos 30 centímetros.

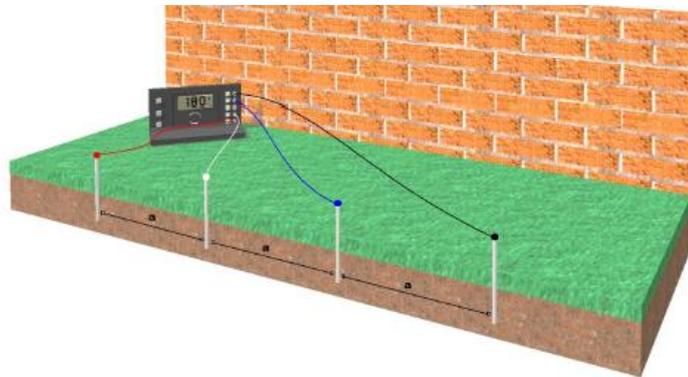


Figura 24. Esquema de la utilización del equipo de medida mediante el método de Wenner

Fuente: Emerson Duche Zabala

En la Figura 24 se puede apreciar cómo se deben ubicar cada uno de los electrodos, todos ellos a una misma distancia, a su vez se puede apreciar que en los dos electrodos exteriores es donde se inyecta la corriente y en los electrodos interiores es donde se procede a realizar la medición.

4.1.3 Procedimiento de medición

Para medir la resistividad del suelo se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se colocaron las cuatro puntas separadas con un distanciamiento inicial de 1 metro enterrados 0.3 metros.
- 2) Se ubicó el selector en la posición adecuada para iniciar la medición pertinente (RA 4 POLE) verificando que el cableado sea el indicado, es decir que las puntas exteriores coincidan con los terminales exteriores del equipo de medición y de igual manera los terminales interiores.
- 3) Se prosiguió a iniciar con el testeo de datos establecido con el distanciamiento previo.
- 4) Se registró el valor medido por el aparato de medición.
- 5) Se repetirán las mediciones, pero esta vez con un distanciamiento de 2 metros, es decir el distanciamiento entre picas llevará una progresión de 1 metro hasta llegar a 13 metros.

Debido a que los resultados normalmente suelen presentar variaciones y suelen salir distorsionados es aconsejable realizar una medición nueva, pero en este caso tomando otro sentido para de esta manera encontrar un aproximado de los valores obtenidos y evitar que estos resultados varíen demasiado.

Para este caso de estudio se tomaron en cuenta 4 direcciones diferentes para encontrar mejor equilibrio en los resultados obtenidos y de esta manera establecer un mejor diseño.

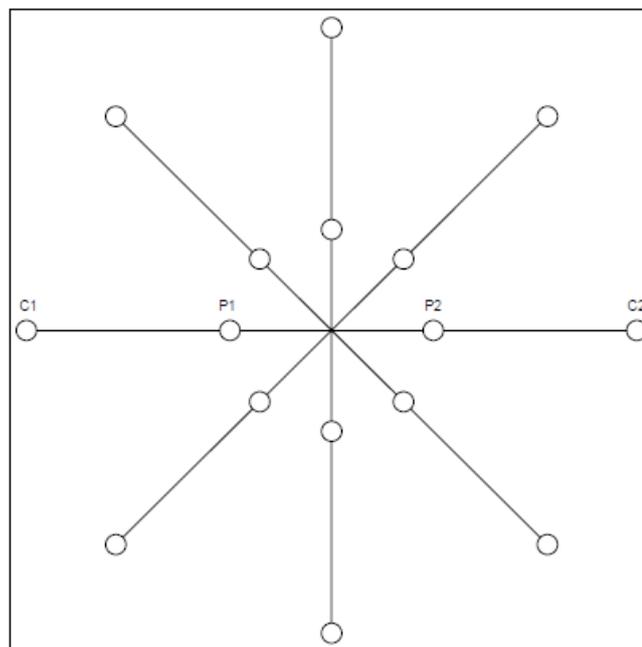


Figura 25. Esquema del sentido en el cual se efectuó la toma de datos de resistividad.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

La Figura 25 establece la forma en la cual se tomaron las medidas, a su vez se tomaron en cuenta los 4 principales sentidos que otorgan los puntos cardinales, por ejemplo: norte – sur, noreste – suroeste, etc.

Cabe mencionar que siempre se partió del mismo eje central, que en este caso siempre debe ser el mismo para efectuar de esta manera las mediciones adecuadas y correctas.

Los resultados obtenidos serán presentados en la Tabla 3, la cual detalla cada uno de los valores de resistividad aparente del suelo en el complejo:

Tabla 3. Valores obtenidos en la medición de la resistividad en el complejo

Espaciamiento	Norte-Sur	Este-Oeste	Noreste-Suroeste	Noroeste-Sureste
a (m)	R (Ω)	R (Ω)	R (Ω)	R (Ω)
1	15,22	10,83	13,5	15,44
2	5,95	5,61	5,65	5,8
3	4,66	4,6	4,43	4,7
4	4,28	4,26	4,03	4,17
5	3,95	3,8	3,78	3,93
6	3,57	3,69	3,64	3,64
7	3,32	3,42	3,52	3,32
8	3,1	3,28	3,35	3,14
9	2,87	3,05	3,1	2,92
10	2,68	2,76	2,75	2,74
11	2,49	2,56	2,55	2,6
12	2,31	2,31	2,36	2,43
13	2,19	2,21	2,18	2,26

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez obtenidos y organizados los valores de resistividad otorgados por el equipo de medición, se procedió a realizar el cálculo de la resistividad aparente del terreno mediante la expresión mencionada anteriormente:

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

Donde:

ρ : Valor de resistividad aparente del suelo, expresada en ($\Omega \cdot m$).

a : Distanciamiento en metros existente en los electrodos.

R : Valor de la resistencia aparente del suelo.

b : Profundidad a la cual se encuentran enterrados los electrodos.

Luego de identificar cada una de las variables establecidas se procede a reemplazar en la expresión mencionada y de esta manera se prevé una nueva tabulación de datos los cuales serán los que se utilicen para realizar el modelamiento del estudio eléctrico del terreno con el cual se efectuará el diseño del sistema de tierra.

Una vez obtenida esta resistividad aparente se procedió a colocarla en una la Tabla 4 la cual es mostrada a continuación:

Tabla 4. Valores de resistividad aparente del complejo agroecológico de investigación y desarrollo productivo San José de Ayora

Espaciamiento	N-S	E-O	NE-SO	NO-SE
a (m)	ρ ($\Omega \cdot m$)			
1	108,85	77,45	96,55	110,42
2	77,61	73,18	73,70	75,66
3	89,35	88,20	84,94	90,12
4	108,62	108,11	102,27	105,83
5	124,87	120,13	119,50	124,24
6	135,17	139,72	137,82	137,82
7	146,49	150,90	155,31	146,49
8	156,21	165,28	168,80	158,22
9	162,61	172,81	175,64	165,44
10	168,65	173,69	173,06	172,43
11	172,32	177,16	176,47	179,93
12	174,36	174,36	178,13	183,42
13	179,05	180,68	178,23	184,77

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

4.1.4 Resistividad del terreno mediante el modelo de dos capas

Al visualizar los resultados obtenidos en la tabla 11 se puede interpretar que existe una diferencia notoria entre los valores de resistividad existentes entre el primer espaciamiento como en el último, por lo que se puede afirmar que el terreno no es homogéneo.

Con los datos de la tabla se procederá a realizar el método de Sunde utilizando el software ETAP V19.0.1.

En una primera instancia se procederán a introducir todos los datos obtenidos en el software el cual como resultado proporcionará una gráfica de puntos.

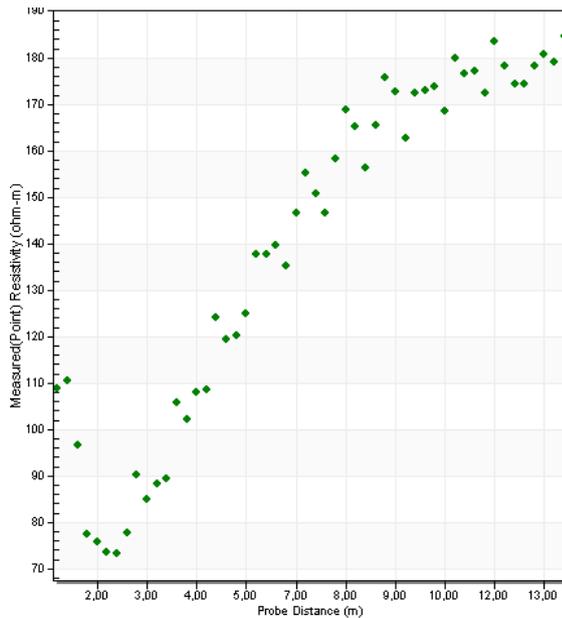


Figura 26. Gráfica de puntos que representan los datos obtenidos en la resistividad en cada una de las direcciones establecidas para cada espaciamiento mediante el software ETAP

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Posteriormente se procede a linealizar la Figura 26, es decir obtener el promedio de los datos obtenidos para encontrar la gráfica resultante de la relación entre la resistividad (ρ) y el espaciamiento (a).

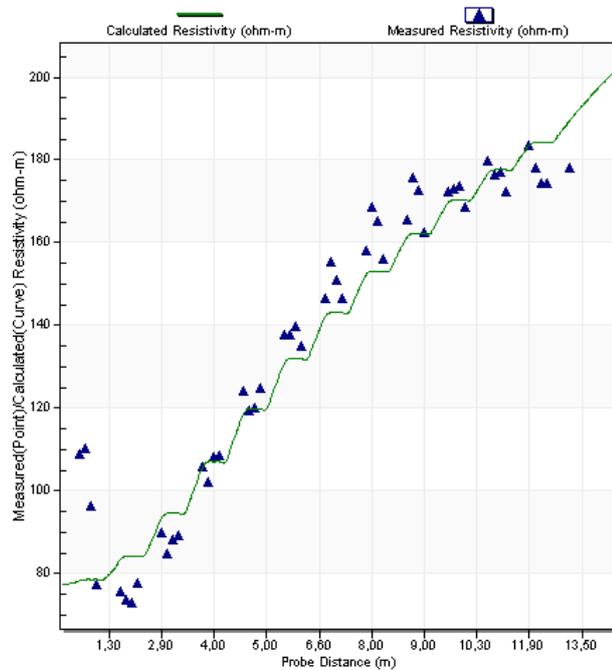


Figura 27. Curva característica que representa la relación existente entre la resistividad aparente “ ρ ” y el espaciamiento “ a ” existente al realizar la medición, mediante el software ETAP

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez obtenida la gráfica entre la resistividad (ρ) vs el espaciamiento (a) se procederá a obtener los valores de resistividad tanto de la sección superior como inferior y a qué profundidad se encuentra cada una de estas capas.

Top Layer		
Depth	3,362	m
Resistivity	78,841	ohm-m
Lower Layer		
Resistivity	294,897	ohm-m

Figura 28. Resultados obtenidos al realizar el método de las dos capas mediante el software ETAP
Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

El software ETAP nos muestra que los valores calculados son los siguientes:

$$\rho_1 = 78.841 (\Omega \cdot m)$$

$$\rho_2 = 294.897 (\Omega \cdot m)$$

$$h = 3.362 (m)$$

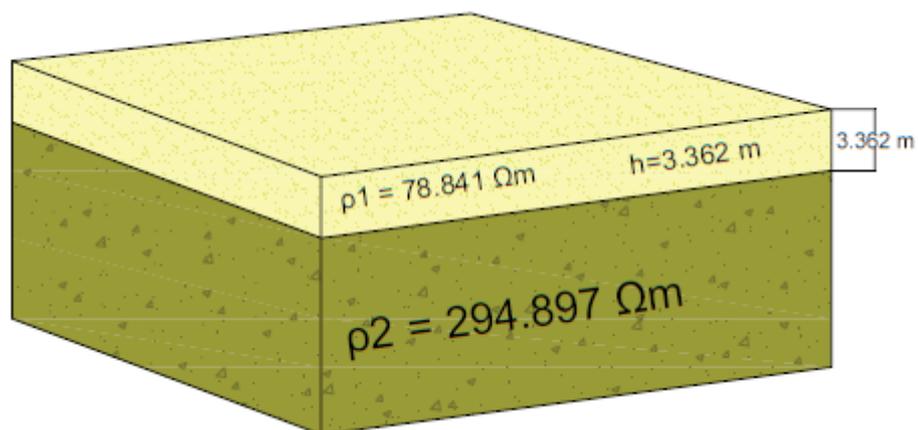


Figura 29. Esquematación del terreno, de las dos capas presentes mediante los resultados obtenidos.
Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez obtenidos estos valores se dará por terminado la utilización del editor de suelos de ETAP, en el que a su vez se tomará una resistividad de 2500 ($\Omega \cdot m$) en la

capa de la superficie del material con una profundidad de 0 metros asumiendo que se encuentra en la superficie como tal.

En la siguiente gráfica se pueden apreciar los valores que se obtuvieron para el editor de suelos con el cual se procederá a realizar la simulación para el sistema de tierra.

The screenshot shows the 'Soil Editor' window with the 'Analysis' tab selected. The interface includes the following fields and controls:

- Surface Material:** Resistivity (ohm-m) set to 2500, Material dropdown set to 'Clean limestone', and Depth (m) set to 0.
- Layer Selection:** Radio buttons for 'User-Defined' (unselected) and 'Calculated' (selected).
- Top Layer:** Resistivity set to 78,841, Material dropdown set to 'Moist soil', and Depth set to 3,362.
- Lower Layer:** Resistivity set to 294,897, Material dropdown set to 'Moist soil', and Depth is blank.
- Buttons:** 'Help', 'OK', and 'Cancel' buttons are located at the bottom of the window.

Figura 30. Ingreso de los valores de resistividad y profundidad el terreno con los cuales se llevará a cabo el diseño mediante el editor de suelos de ETAP.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

4.1.5 Selección del calibre del conductor

Se debe tener en cuenta que el mínimo calibre permitido para un sistema de tierra es el número 2/0 AWG de cobre a 19 hilos.

Matemáticamente para obtener el calibre del conductor se pueden aplicar varias fórmulas entre ellas está la siguiente:

$$S_{min} = \frac{1000 \cdot I_f \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{9.64 \cdot \frac{C_g}{\rho_{cu} \cdot 0.004} \cdot \ln(1 + 0.004(T_g - T_1))}} \quad (KCU)$$

Donde:

I_f : Corriente de falla en kA

t : Tiempo de despeje de la falla

C : Calor específico del cobre $\left(0.092 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}\right)$.

g : Peso específico del cobre $\left(8.96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$.

ρ_{cu} : Resistividad del cobre a temperatura ambiente $\left(0.0171 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}\right)$.

T_g : Temperatura máxima de la malla.

T_1 : Temperatura inicial.

Una vez obtenido este valor se hace la conversión a mm^2 mediante la siguiente expresión:

$$1\text{KCU} = 0.5068 \text{ mm}^2$$

En caso del sistema de tierras del complejo se estableció un conductor # 4/0 AWG con la finalidad de mejorar la durabilidad mecánica y a su vez logre soportar de mejor manera la corrosión del material.

Una de las ventajas de ETAP es que al momento de seleccionar un conductor típico este nos brinda todas sus características, ya sean de costo, resistividad, etc. Mediante las cuales es mucho más fácil escoger un conductor típico para el sistema de tierra. Anteriormente se estableció que el conductor a utilizarse en el diseño sería el # 4/0 AWG, que en este caso debido a que el sistema utilizado es el métrico se lo encuentra mediante su dimensionamiento en milímetros cuadrados (mm^2) el cual tiene una medida de 120 mm^2 .

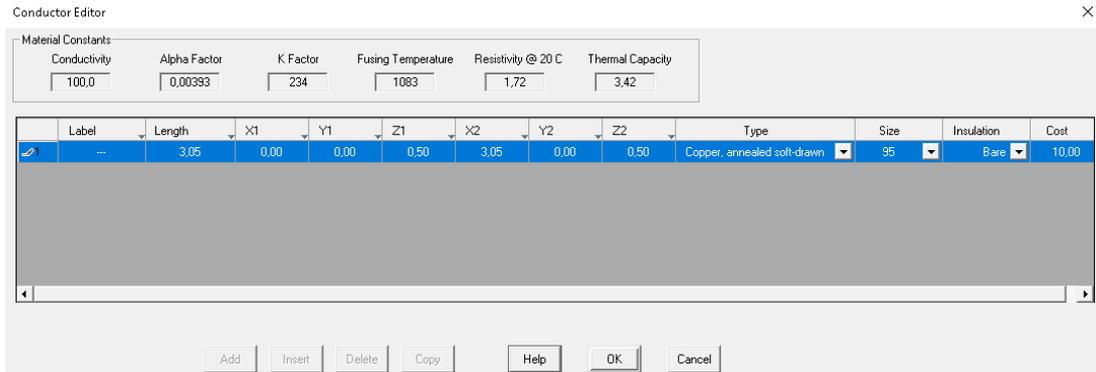


Figura 31. Valores característicos del conductor a utilizar en el diseño del sistema de tierra.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

En la imagen obtenida del ETAP cada calibre de conductor se lo puede caracterizar de acuerdo con las necesidades que presente el diseño, cada diferente configuración del conductor variará tanto en la conductividad como en el costo, es decir que mientras menos conductibilidad presente el material el costo va a ser mucho más bajo, pero esto no asegura que el diseño establecido sea el adecuado por lo que se debe elegir de manera que se pueda asegurar el servicio que va a brindar el diseño del sistema de tierras; en este caso se seleccionó un grupo de conductores de tipo “cobre desnudo estirado suave” el cual es un cable de cobre desnudo flexible y además presenta la mejor conductividad del mercado.

De igual manera para establecer un balance en la resistividad de la malla a tierra el material de las varillas será el mismo que el de los conductores, es decir conductor de cobre desnudo del tipo “copper, annealed soft drawn”.

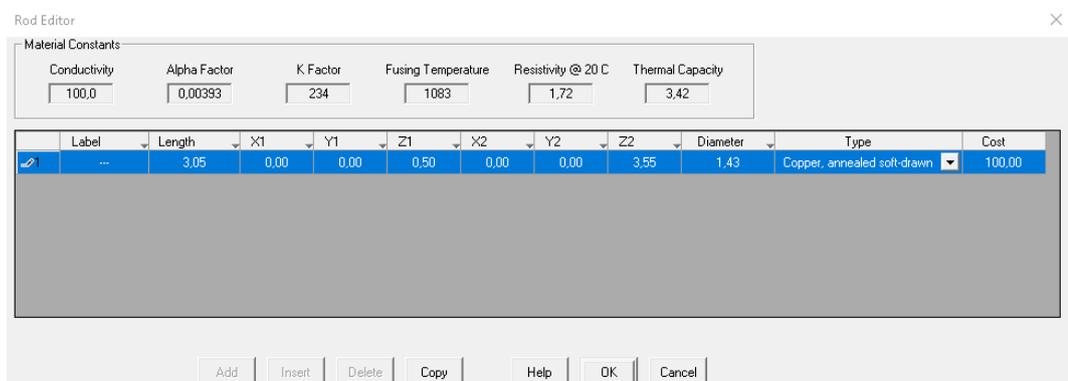


Figura 32. Valores característicos de las varillas (picas) a utilizar en el diseño del sistema de tierra.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Tabla 5. Dimensión de la pica de tierra (Acero recubierto, acero inoxidable y cobre)

Tamaño Comercial	Roscada		Sin Rosca	
	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
Acero Recubierto cobre 5/8"	14	14.35	14	14.35
Acero austenítico 304 - 5/8"	N/A	N/A	15	16.13
Cobre 5/8"	14	14.35	14	14.35

Fuente: Grupo EPM.

4.1.5.1 Representación del diseño en ETAP

Para efectuar el diseño del sistema de tierra del complejo se establecieron en primer lugar las instalaciones las cuales serán construidas en el terreno, para de esta manera tener en cuenta tanto las dimensiones de los anillos de la malla, como la ubicación de estas; las instalaciones que serán construidas son:

- 1) Instalación para cultivos hortícolas
- 2) Instalación para cultivos andinos
- 3) Planta de bioinsumos
- 4) Bodega para planta de bioinsumos
- 5) Instalación para área porcina
- 6) Bodega para el área porcina
- 7) Instalación para área bovina
- 8) Bodega para el área bovina
- 9) Instalación para animales menores
- 10) Centro de acopio
- 11) Molienda de granos andinos
- 12) Alumbrado.
- 13) Transformador.

Todas estas instalaciones se encuentran distribuidas en el área del complejo con sus respectivas instalaciones. De esta manera siguiendo con la normativa IEEE STD 80-2013 “Un sistema de conductores continuos deberá rodear el perímetro de la instalación para de esta manera abarcar tanta área como sea posible. Esta medida de

seguridad ayudaría a disipar una alta concentración de la corriente de falla, dicho de otra manera, evitará los altos gradientes en el área que la malla rodea protegiendo las estructuras y el personal.” Se procederá a diseñar los anillos de la malla a tierra rodeando el perímetro de cada una de las instalaciones y posteriormente se procederán a conectar entre sí, para de esta manera asegurar la equipotencialidad del sistema y evitar daños producidos por algún desbalance de corrientes o la presencia de armónicos en los aparatos eléctricos.

Cabe mencionar que de igual manera deben estar presentes en el sistema de tierras, la bajante de tierra existente en los pararrayos instalados con los cuales se asegurará el correcto diseño.

A continuación, se mostrará el sistema de tierras en la ubicación real de las instalaciones del complejo; cabe recalcar que las gráficas se encuentran a una escala de 1/2000.

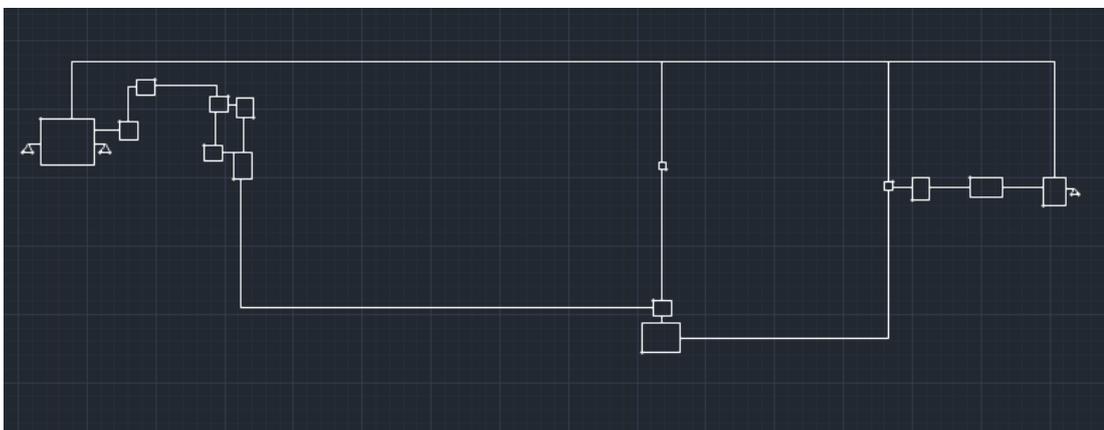


Figura 33. Sistema de Tierra del complejo en el software AutoCAD.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez realizado el diseño en AutoCAD se procederá a exportar el archivo el cual contiene el diseño de la malla a ETAP, software en el cual se realizarán todos los cálculos pertinentes para culminar con el diseño.

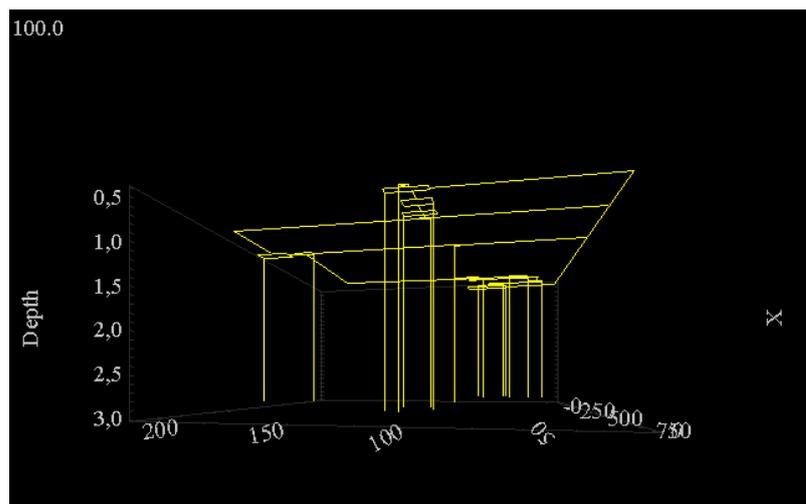


Figura 34. Sistema de Tierra en el software ETAP.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez listo el diseño se procederá a realizar los cálculos respectivos y a comprobar si el diseño de tierra es el adecuado para el complejo.

4.1.6 Cálculo de la corriente de Cortocircuito (I_{CC})

Para continuar con el diseño de la malla es necesario conocer el valor de corriente de cortocircuito, esta se la puede calcular mediante los valores característicos del transformador.

Para este proyecto se tiene previsto instalar un transformador tipo de 100 kVA, el cual presenta las siguientes características:

Tabla 6. Datos representativos del transformador a instalar en el complejo.

Datos Representativos	
Potencia del transformador	100 kVA
Porcentaje de Impedancia	3.5 %
Tensión en el Secundario	220/127 V
Fases	3

Fuente: INATRA

La Tabla 6 muestra las características principales con las cuales se realizarán los cálculos pertinentes para obtener el valor de la corriente de cortocircuito mediante la siguiente expresión:

$$I_{cc} = \frac{S * 100}{\sqrt{3} * V_{sec} * \%Impedancia}$$

Donde:

S: Potencia aparente del transformador [kVA]

V_{sec} : Voltaje en el secundario del transformador [V]

Reemplazando los valores se obtiene que la corriente de cortocircuito es:

$$I_{cc} = \frac{100 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 220V * 3.5\%}$$

$$I_{cc} = 7948.055 \text{ (A)} = 7.5 \text{ (kA)}$$

Una vez encontrado el valor de la corriente de cortocircuito se procede a analizar el caso de estudio con el cual se va a trabajar en el software ETAP.

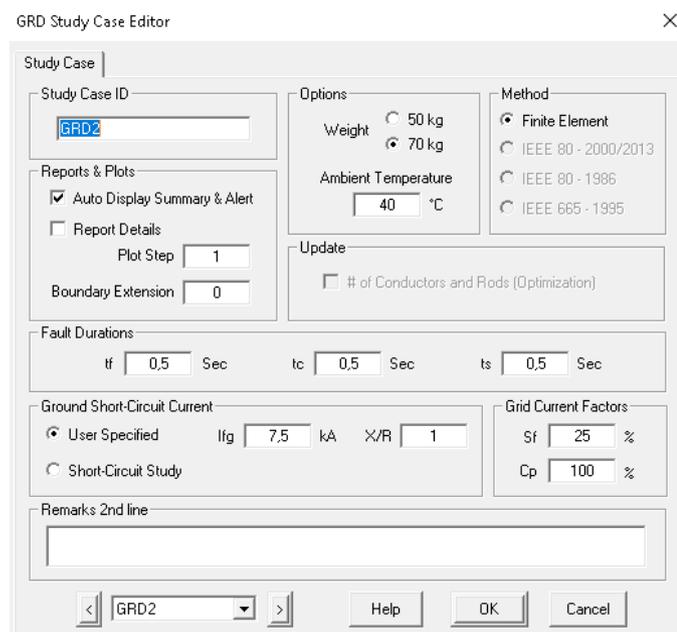


Figura 35. Ingreso de los valores con los cuales se establecerá el caso de estudio para el diseño del sistema de tierra.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Los demás parámetros se los analizan en el caso de estudio, los cuales van a ser tomados en cuenta para comprobar el diseño como tal, entre los parámetros a ingresar se tiene:

4.1.7 Tiempo máximo en el cual se despejará la falla

El tiempo máximo de falla irá en relación con los dispositivos de protección los cuales se seleccionarán en el complejo, los 3 factores típicos a considerar son:

t_f : Tiempo de duración de falla en el cual se lo utiliza para calcular el valor de decremento.

t_c : Tiempo de duración de falla en el cual se lo utiliza para dimensionar el conductor a tierra.

t_s : Tiempo de permanencia de la corriente de choque el cual se lo utiliza para determinar los valores permisibles para el cuerpo humano.

Para este caso en particular se tomará un tiempo de despeje en segunda zona o protección de respaldo, bastante conservador debido a que con los relés numéricos actuales se pueden presentar tiempos de 0.25 s, y entre más alto sea el tiempo, peores van a ser las tensiones de paso y toque, por ende, es necesario conocer y trabajar bajo parámetros lógicos los cuales puedan solventar el diseño estipulado. De igual manera la norma sugiere o recomienda que sea considerado un tiempo en que la protección en primera zona falle y pueda actuar de forma segura la malla a tierra por ende se estipuló un valor conservativo de diseño de 0.5 segundos para cada uno de los tiempos previamente nombrados.

4.1.8 Factor Sf

Este factor permite estimar el porcentaje de la corriente de cortocircuito la cual será conducida por la malla cuando se presente una falla.

El caso más conservador para un diseño sería del 100%, sin embargo, se vuelve de igual manera el caso más costoso.

En este caso se tomará el 25% para completar el diseño del sistema de tierra debido a las particularidades del complejo y al tipo del terreno presentes en este diseño de la malla. El resto retorna por los conductores de tierra del sistema.

Otros valores los cuales son importantes mencionar, vendría a ser el peso de la persona mediante la cual se realizará el cómputo de la tensión toque, y la temperatura ambiente del diseño.

Una vez definido el caso de estudio se procede a realizar la compilación del programa, para de esta manera obtener todos los valores calculados y verificar el diseño del sistema de tierra, si estos valores obtenidos satisfacen a los parámetros de diseño se puede dar por concluido el diseño del sistema, caso contrario se deberá realizar un ajuste específico hasta que los valores nominales cumplan con los estándares seleccionados.

4.1.9 Dimensionamiento del pararrayos

En el caso del pararrayos se estableció previamente el nivel cerámico del sector para de esta manera ver el tipo de protección contra descargas atmosféricas sería la mejor alternativa.

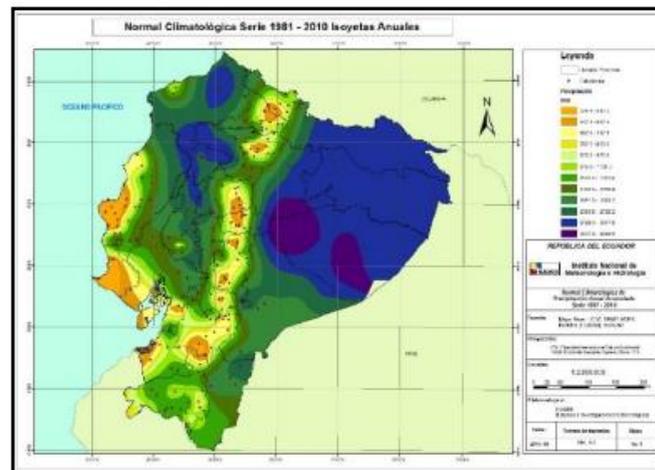


Figura 36. Mapa de precipitación anual del Ecuador

Fuente: INAMHI

Viendo los resultados obtenidos en el mapa cerámico del sector (Figura 11) y en el mapa de precipitación anual que presenta el país se llegó a obtener que en Cayambe ocurren aproximadamente de 5 a 10 días al año en los cuales se existe una tormenta.

De acuerdo con estas medidas se planificó diseñar un pararrayos que actúe bajo el método del ángulo de protección. En primera instancia se estableció la altura perteneciente a cada una de las instalaciones de las cuales todas estas exceptuando la Planta de bioinsumos presentan una altura de 2.5 metros, esta última presenta una altura de 6 metros.

Partiendo de esto se realizó el primer diseño del pararrayos para la planta derivada de lácteos la que a su vez posee un área de 200 m².

Visualizando el mapa cerámico del sector se estableció un nivel de protección III con ayuda de la tabla 8 en la cual se expresan los valores representativos que serán tomados, por lo que se tiene:

- 1) Altura del pararrayos: 7 metros
- 2) Ángulo de protección: 66°
- 3) Distancia de protección: 15.72 metros.

Comprobando resultados se tiene lo siguiente:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{h}{R}$$

$$R = \text{Tan} \alpha \cdot h$$

$$R = \text{Tan}(66) \cdot 7m$$

$$R = 15.722 m.$$

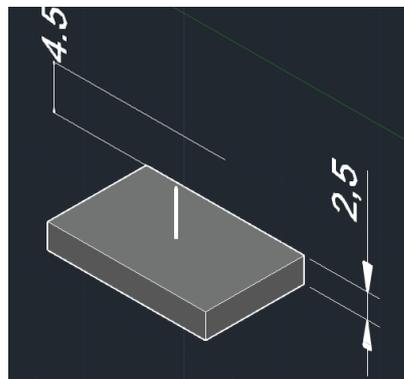


Figura 37. Pararrayos de 4.5 metros instalado en la planta derivada de lácteos.

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

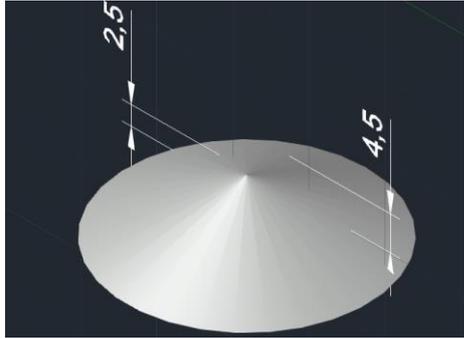


Figura 38. Punta Franklin actuando en la planta derivada de lácteos
Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Para el pararrayos de la planta de bioinsumos se establecieron 2 puntas las cuales se encontrarán distribuidas en la superficie de la edificación la cual cuenta con una superficie de 1000 m².

Al igual en este caso se estableció el ángulo de protección en función de la Tabla 8 bajo los siguientes parámetros:

- 1) Altura del pararrayos: 20 metros
- 2) Ángulo de protección: 54°
- 3) Distancia de protección: 27.528 metros.

Comprobando resultados se tiene lo siguiente:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{h}{R}$$

$$R = \text{Tan} \alpha \cdot h$$

$$R = \text{Tan}(54) \cdot 20m$$

$$R = 27.528 m.$$



Figura 39. Pararrayos de 14 metros instalado en la planta de bioinsumos.
Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

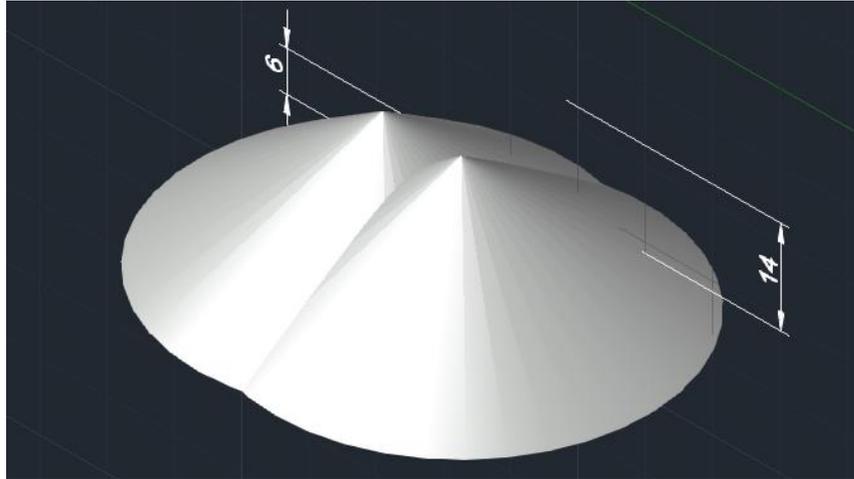


Figura 40. Puntas Franklin colocadas en la planta de bioinsumos
Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez ubicado el pararrayos se realizó el diseño de la malla de tierra de cada uno, para posteriormente conectarlos al sistema original y mantener la equipotencialidad del sistema.

Luego de tener tanto los pararrayos como el sistema de tierras se obtuvieron los siguientes resultados del sistema de tierras del complejo:

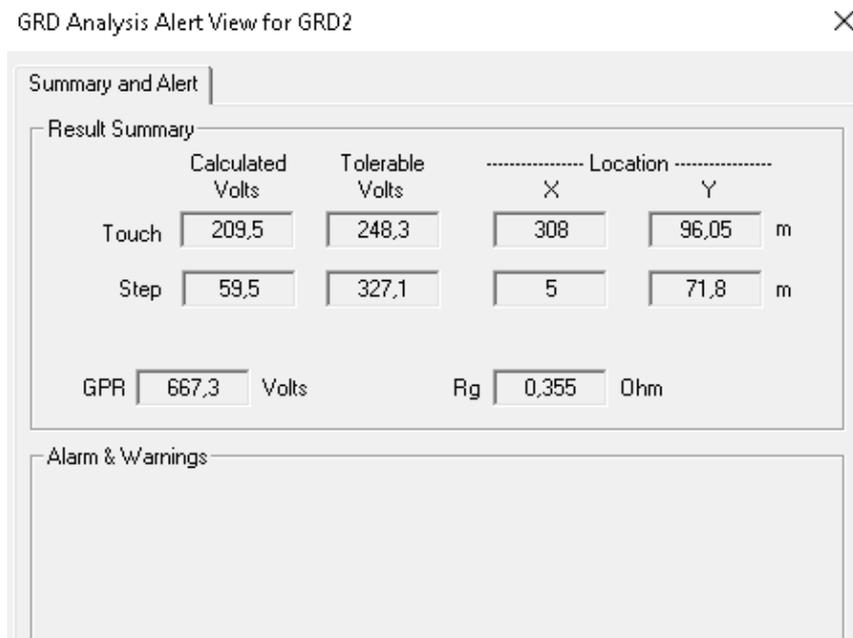


Figura 41. Resultados obtenidos de acuerdo con el caso de estudio previamente establecido.
Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

Una vez obtenidos los datos de salida se colocarán los datos en una tabla para su mejor visualización.

Tabla 7. Resultados Obtenidos del Sistema de tierra del complejo.

Parámetro	Valor calculado	Valor tolerable
Tensión de Toque	209.5 V	248.3 V
Tensión de paso	59.5 V	327.1 V
GPR		667.3 V
Resistencia		0.355 Ω

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

En la Tabla 7 se pueden apreciar los valores obtenidos en función de la simulación previamente otorgada por el ETAP, en ella se presentan todos los valores representativos con los cuales se cumple el diseño adecuado del sistema de tierras.

Tabla 8. Constantes de los materiales a utilizar en la instalación del sistema de tierra.

Elemento	Tipo de material	Conductividad %	Resistividad del conductor $\mu\Omega \cdot cm$	Capacidad térmica $J/(cm^3 \cdot C)$	Temperatura de fusión $^{\circ}C$
Conductor	Copper, annealed soft-drawn	100	1.72	3.42	1083
Varilla	Copper, annealed soft-drawn	100	1.72	3.42	1083

Elaborado por: Franklin Jonathan Rojas.

CAPÍTULO V

Análisis de Resultados

Al culminar con el capítulo del diseño se puede establecer que los resultados fueron obtenidos satisfactoriamente debido a los diseños propuestos cumplen con cada uno de los enunciados establecidos bajo la normativa, en los cuales se puede destacar lo siguiente:

El terreno sobre el cual va a ser implementado el diseño no es homogéneo debido a la variedad existente en la resistividad de este; la cual presenta una capa superior de $\rho_1 = 78.841 (\Omega \cdot m)$ y una inferior de $\rho_2 = 294.897 (\Omega \cdot m)$ situada a una profundidad de $h = 3.362 (m)$.

Estos valores llevan a realizar el diseño de una malla la cual está formada por un anillo que recubre a cada una de las instalaciones pertenecientes al complejo la cual se encuentra situada a 0.5 metros de profundidad del suelo.

En un diseño preliminar se presentó la malla sin la implementación de varillas lo cual no fue tan conveniente debido a los resultados que presentaba, por lo que se procedió a colocar al menos una varilla (pica) por cada anillo perteneciente al complejo (incluyendo los anillos de los pararrayos) y de esta manera mejorar los niveles de protección de la malla.

Al obtener los resultados mediante el cálculo matemático realizado por ETAP se confirmó el diseño adecuado, debido a que los valores calculados tanto de toque y de paso son más pequeños que los valores admisibles por el sistema (Figura 41); y a su vez la suma del voltaje de toque y paso es menor al valor obtenido por el GPR.

$$209.5 V + 59.5 V < 667.3V$$

$$269 V < 667.3V$$

Se ubicaron 2 pararrayos los cuales estarán colocados en las edificaciones que presentan una mayor afluencia tanto de personas como de equipos es decir en la planta de bioinsumos, planta derivada de lácteos (Figura 38 y Figura 40). Los cuales mediante el nivel cerámico y las características geométricas de las edificaciones cumplen con el objetivo que presentan. Se utilizaron puntas franklin para realizar el diseño de los pararrayos, obteniendo su ángulo y área de protección.

Cada uno de estos pararrayos presentan su respectiva conexión a tierra mediante una bajante utilizando un conductor desnudo número 2AWG. Esta puesta a tierra a su vez se encuentra conectada al sistema de tierras general manteniendo de esta manera una equipotencialidad en el sistema.

Las demás instalaciones al presentar una altura de 2.5 metros y a su vez contando con una estructura metálica (la cual se utilizará para esta finalidad) no disponen de la instalación y diseño de un pararrayos, justificando mediante la normativa la cual sugiere que la instalación obligatoria de un pararrayos se tiene que hacer cuando se presentan edificaciones con altura superiores a 43 metros.

CONCLUSIONES

En función de los datos obtenidos para determinar el diseño del sistema de tierra y las puntas Franklin, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Es sumamente necesario realizar un estudio del terreno en el cual va a ser diseñado e instalado un sistema de tierras, ya que al no presentar las condiciones necesarias se deberán tomar medidas las cuales ayuden a que la composición y resistividad sean adecuadas y de esta manera lograr un diseño aceptable.

Mientras más extensas sean las dimensiones de una malla a tierra tanto los valores de resistencia, voltaje de paso y toque serán mucho más pequeños garantizando de esta manera una mejor protección, pero a su vez esto genera un incremento en el costo de la construcción e implementación de la malla.

Se pudo comprobar el diseño adecuado de la malla mediante la normativa y los métodos de cálculo y diseño, debido a que los cálculos de los voltajes de paso y toque obtenidos por el software ETAP son menores a los valores máximos admisibles en el sistema, proporcionando de esta manera la protección tanto del personal que se encuentre en las instalaciones como de los equipos eléctricos que serán instalados.

Fue necesario colocar varillas adicionales (electrodos) en los vértices de cada uno de los anillos en la malla a tierra para incrementar la seguridad del sistema y disminuir los voltajes de paso y toque; estas varillas poseerán las mismas características del material conductor con el cual fue diseñado el sistema de tierras.

Para efectuar el diseño de la punta Franklin se deben establecer criterios previos tales como: nivel cerámico de la localidad, nivel de protección; debido a que estos factores son los que caracterizan a este tipo de protección bajo las condiciones estipuladas.

El pararrayos establecido debe proteger toda el área de la edificación en la cual va a ser instalado, atrayendo al rayo al dispositivo para de esta manera evitar que impacte en cualquier otro lugar de la instalación.

RECOMENDACIONES

Para garantizar una adecuada medida de la resistividad del suelo debe buscar un área en la cual se encuentre uniforme, debido a que si existen cambios drásticos en la composición del terreno podría ocasionar que las mediciones realizadas no sean las adecuadas para el diseño de la malla.

Es recomendable utilizar la metodología de Wenner para efectuar la recolecta de datos obtenidos al medir la resistividad del suelo, ya que este es el método que presenta resultados confiables; así de igual manera también es necesario que se realicen más de 2 mediciones distintas de la resistividad para de esta manera encontrar un valor mucho más acertado.

Si se va a realizar una conexión entre conductores mediante el uso de una suelda exotérmica es necesario que se verifiquen con mucho cuidado los resultados generados por dicha actividad, ya que si los conductores se encuentran en mal estado podrían fracturarse con el tiempo y con esto no se estaría cumpliendo con la finalidad del sistema.

Si en el futuro se pretende extender el sistema de mallas es necesario que se conserve la equipotencialidad de este para evitar la fuga de corrientes parásitas las cuales pueden generar inconvenientes en los dispositivos eléctricos los cuales se encuentran en las instalaciones.

Si se presentan dispositivos electrónicos, digitales o de telecomunicaciones es necesario realizar una instalación de una malla a tierra diferente la cual proteja a cada uno de estos nuevos elementos y posteriormente se deberá unir al sistema de tierra del complejo para mantener la equipotencialidad.

Evite colocar conductores aislados, o antenas las cuales sobrepasen al pararrayos establecido ya que esto podría generar daños y averías en estos dispositivos y evitarían que el pararrayos cumpla con su función.

Realizar un mantenimiento periódico para verificar el estado tanto de los pararrayos como de los sistemas de tierra, para de esta manera comprobar que se está cumpliendo con el objetivo de estos sistemas.

Si se desea reemplazar la punta Franklin por causa de algún mantenimiento, se deberá asegurar que el nuevo elemento a instalar tenga las mismas características del que se va a reemplazar, debido a que si esto no se cumple el sistema de protección contra descargas atmosféricas podría quedar vulnerable.

REFERENCIAS

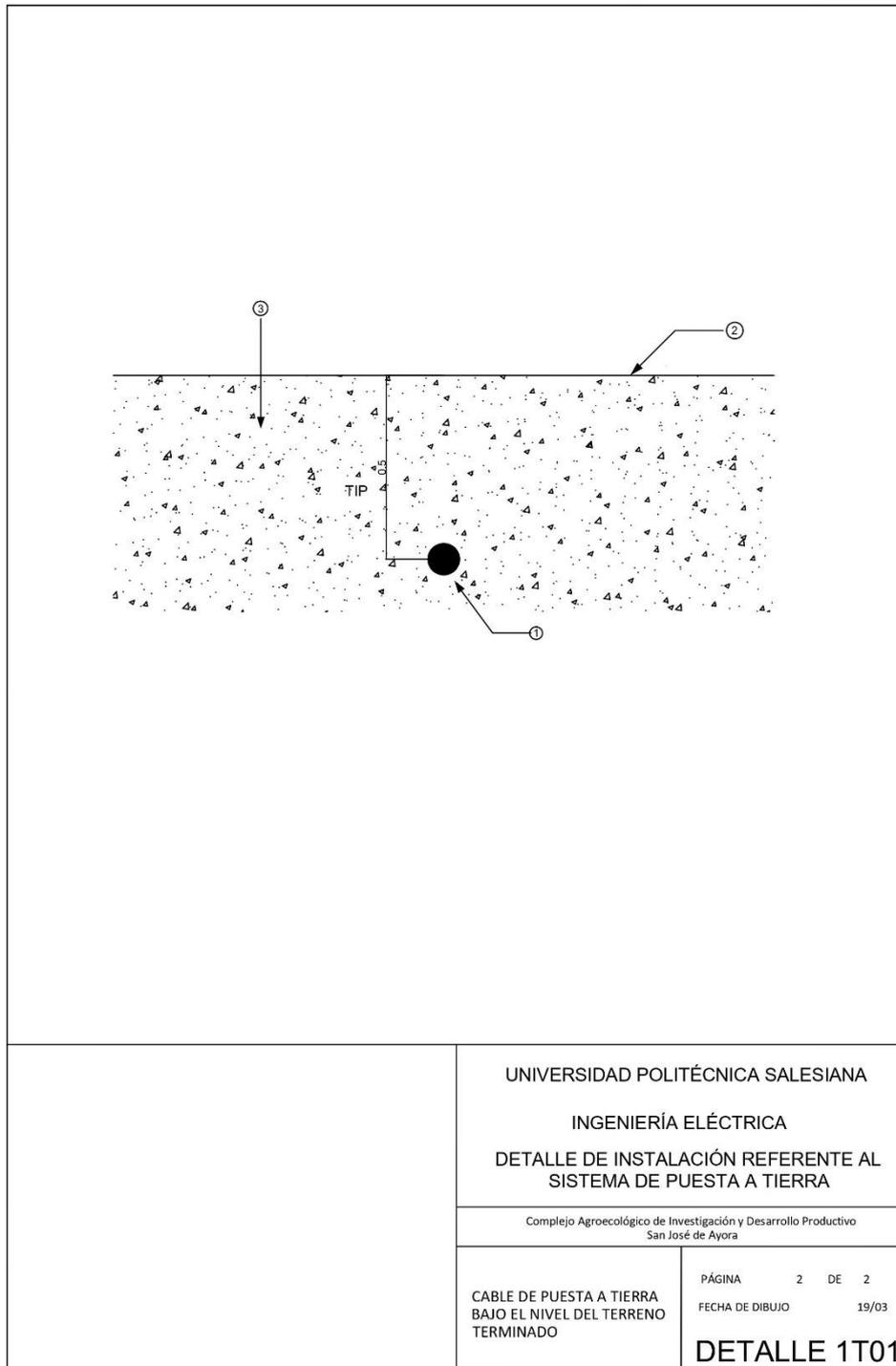
- [1] Google, “Google Earth Pro”, 2020.
- [2] K. A. Gil Pacheco, “Diseño de puesta a tierra para una subestación 115/13,8KV CADAFE”, *Bibliogeo.Ing.Ucv.Ve*, p. 138, 2017.
- [3] P. Gomez, “Diseño y construcción de puestas a tierra para el colegio técnico industrial Gualaceo, basado en las recomendaciones prácticas para el aterrizamiento en sistemas eléctricos comerciales e industriales de la IEE”, p. 150, 2010.
- [4] M. E. Huete S., “Sistema de puesta a tierra y protección para sistemas de telecomunicaciones”, p. 115, 2008.
- [5] V. G. Basante Gualpa, “Análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos y condiciones de suelos”, 2019.
- [6] M. Fergusson *et al.*, “Diseño del Sistema de Puesta a Tierra de la Estación Repetidora El Alisal Para Sistemas de Telecomunicaciones de Movistar”, *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, 2013.
- [7] F. González Longatt, “Sistemas de Puesta a Tierra: Una Introducción a la Seguridad.” .
- [8] S. Hurtado Villa y L. Inga, “Diseño de Malla Puesta a Tierra (Zona de Cancha Colegio Santo Domingo Comín)”, *Formas Constr.*, 2017.
- [9] D. Gómez Marcial, “Análisis de Contingencias Eléctricas en Centros Comerciales”, vol. 5546954, pp. 1–122, 2007.
- [10] J. Ramírez, *Sistemas de puesta a tierra : diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF / Jose Samuel Ramirez Castano, Eduardo Antonio Cano Plata*. 2010.
- [11] Grupo EPM, “Medida de Resistividad Eléctrica del Suelo”, pp. 1–20, 2008.
- [12] Chauvin Arnoux, “Guía de la medición de tierra”, p. 32, 2015.
- [13] M. Mogollón Escobar, “Diseño Del Sistema De Puesta a Tierra Y Pararrayos Para El Edificio ‘ Bloque De Aulas a Y B ’ De La Escuela Politécnica Del Ejército ””, 2006.
- [14] D. Herrera y E. Holguín, “Estudio, diseño e implementación de las protecciones eléctricas, puesta a tierra y pararrayos para los sistemas de comunicación de la UCSG, ubicado en la facultad de arquitectura.”, vol. 66, pp. 37–39, 2010.
- [15] L. G. Molano Cetina, “Estudio, diseño e implementación de las protecciones eléctricas, puesta a tierra y pararrayos para los sistemas de comunicación de la

- UCSG, ubicado en la facultad de arquitectura”, *Biomédica*, vol. 31, núm. sup3.2, 2011.
- [16] K. Verdugo, L. Aires, y H. Merchán, “Contribución para la Implementación de una Red de Detección de Rayos en Ecuador”, *Rev. Politécnica*, vol. 41, núm. 1, pp. 17–24, 2018.
- [17] Söhne Dehn, *Manual de Protección contra rayos*. 2007.
- [18] IEC 62305, “Protección Contra el Rayo”, pp. 1–74, 2007.
- [19] IEEE Std 80, *Guide for Safety In AC Substation Grounding*, vol. 2000, núm. February. 2000.

Anexo 2: Lista de Materiales del detalle de cable de puesta a tierra bajo el nivel del suelo terminado.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	C/U	Conductor de cobre blando desnudo, 4AWG	1
2	C/U	Nivel de terreno terminado	1
3	C/U	Terreno natural del complejo	1
		<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA</p> <p>Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora</p> <p>CABLE DE PUESTA A TIERRA BAJO EL NIVEL DEL TERRENO TERMINADO</p> <p>PÁGINA 1 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10</p> <p>DETALLE 1T01</p>	

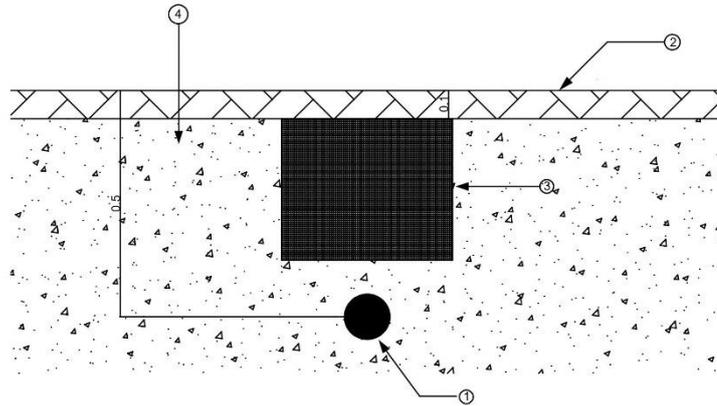
Anexo 3: Representación gráfica del detalle de cable de puesta a tierra bajo el nivel del suelo terminado.



Anexo 4: Lista de materiales del detalle de cable de puesta a tierra bajo el nivel de viabilidad.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	C/U	Conductor de cobre blando desnudo, 4AWG	1
2	C/U	Nivel de viabilidad	1
3	C/U	Concreto establecido por la instalación.	1
4	C/U	Terreno natural del complejo	1
		<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA</p> <p>Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora</p> <p>CABLE DE PUESTA A TIERRA BAJO EL NIVEL DE VIALIDAD</p> <p>PÁGINA 1 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10</p> <p>DETALLE 1T02</p>	

Anexo 5: Representación gráfica del detalle de cable de puesta a tierra bajo el nivel de viabilidad.

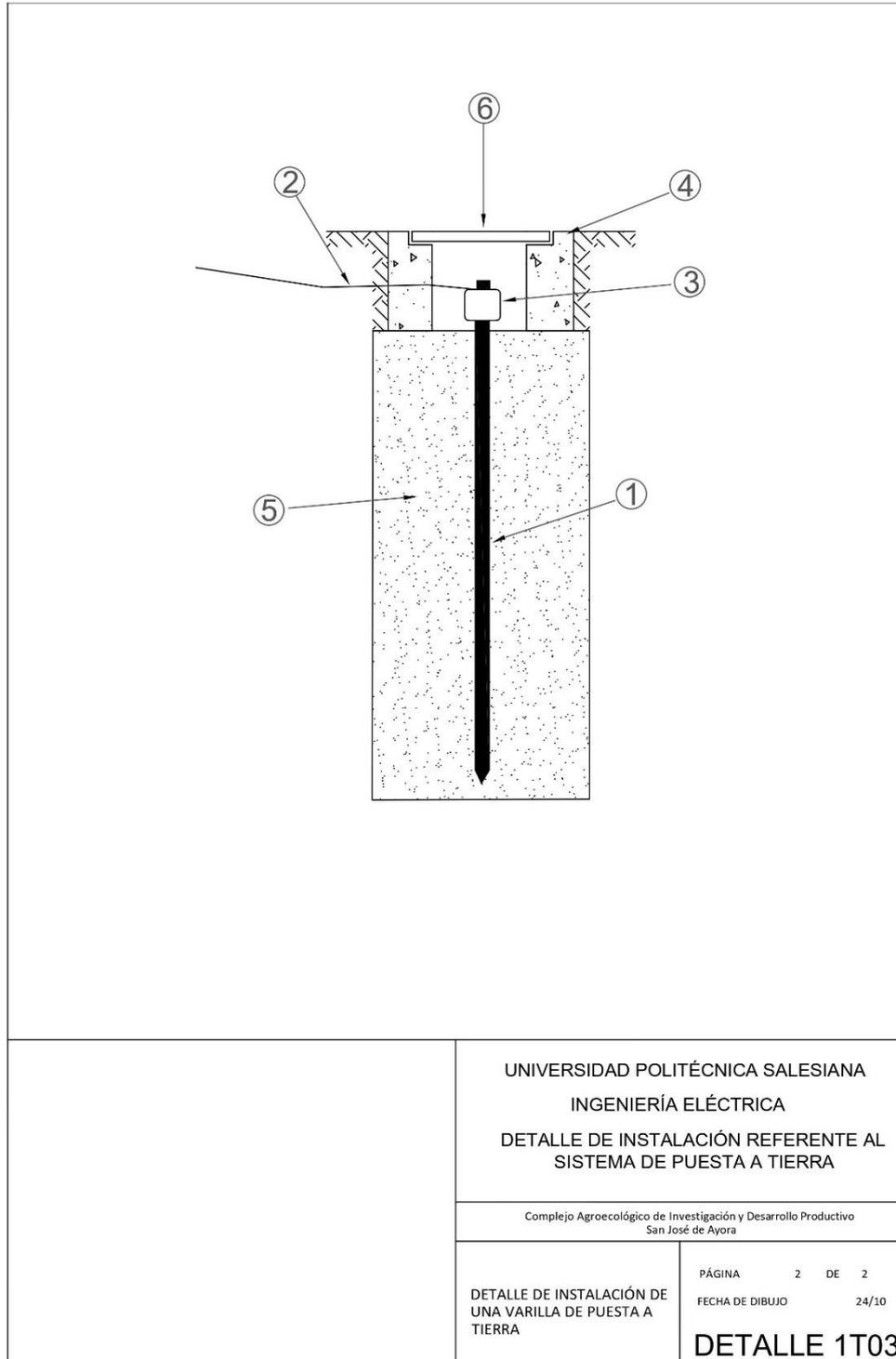


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	
Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora	
CABLE DE PUESTA A TIERRA BAJO EL NIVEL DE VIALIDAD	PÁGINA 2 DE 2 FECHA DE DIBUJO 19/03 DETALLE 1T02

Anexo 6: Lista de materiales del detalle de instalación de una varilla de puesta a tierra.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	C/U	Varilla de cobre blando desnudo de 14mm diámetro x 2.40m. longitud	1
2	C/U	Conductor de cobre blando desnudo 4/0 AWG listo para su uso en sistemas de puesta a tierra.	1
3	C/U	Conector de cobre para puesta a tierra 2/0	1
4	C/U	Caja de Concreto Bimetálico P/PT 400X 400X350mm	1
5	C/U	Terreno natural del complejo	1
6	C/U	Tapa de concreto metálico.	1
		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
		Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora	
		DETALLE DE INSTALACIÓN DE UNA VARILLA DE PUESTA A TIERRA	PÁGINA 1 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10 DETALLE 1T03

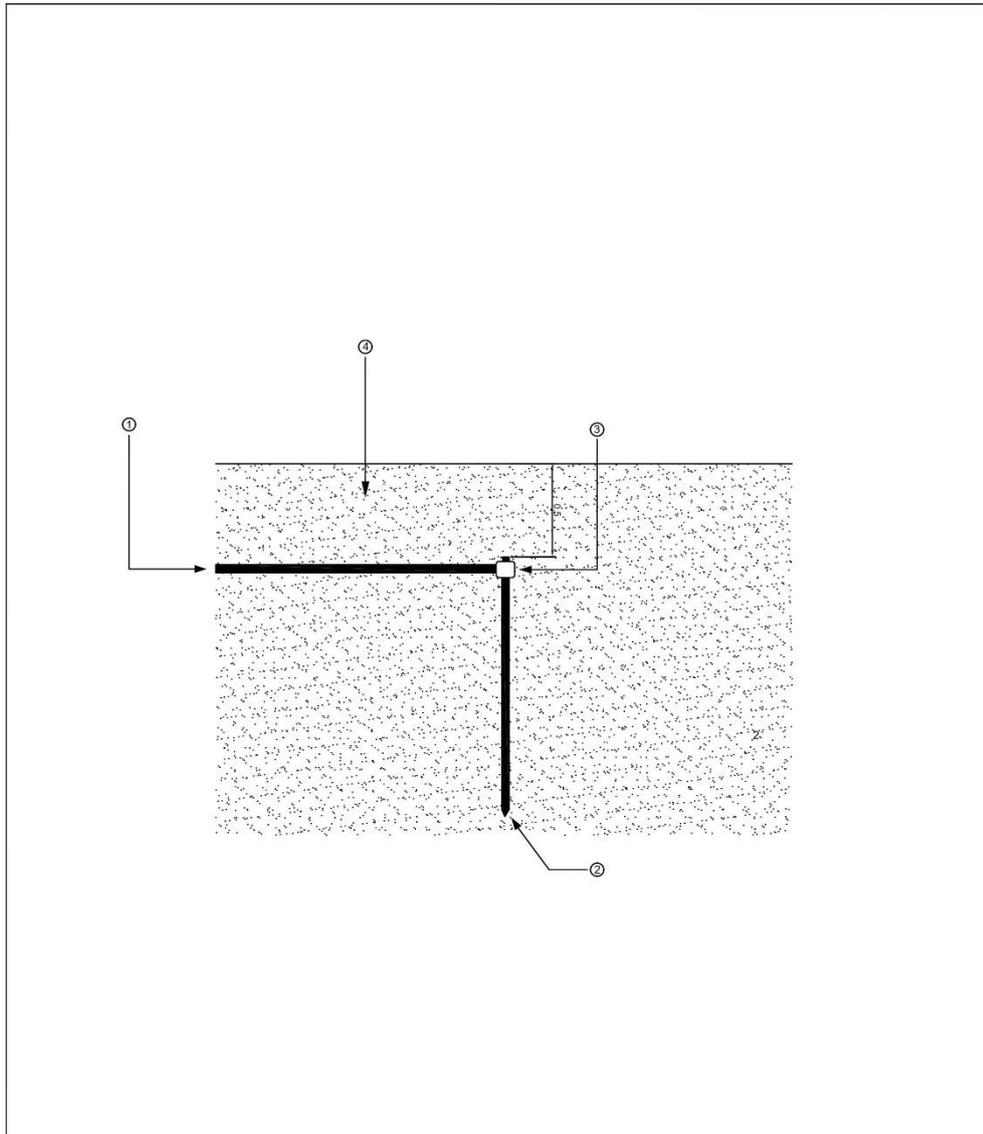
Anexo 7: Representación gráfica del detalle de instalación de una varilla de puesta a tierra.



Anexo 8: Lista de materiales del detalle de instalación entre la malla a tierra y una pica.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	m.	Conductor de cobre blando desnudo 4/0 AWG listo para su uso en sistemas de puesta a tierra.	5
2	C/U	Varilla de cobre blando desnudo de 14mm diámetro x 2.40m. longitud	1
3	C/U	Conector de cobre para puesta a tierra 2/0	1
4	C/U	Terreno natural del complejo	1
		<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA</p> <p>DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</p> <p>Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora</p> <p>PÁGINA 1 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10</p> <p>DETALLE DE INSTALACIÓN ENTRE LA MALLA DE TIERRA Y UNA PICA</p> <p>DETALLE 1T04</p>	

Anexo 9: Representación gráfica del detalle de instalación entre la malla a tierra y una pica.

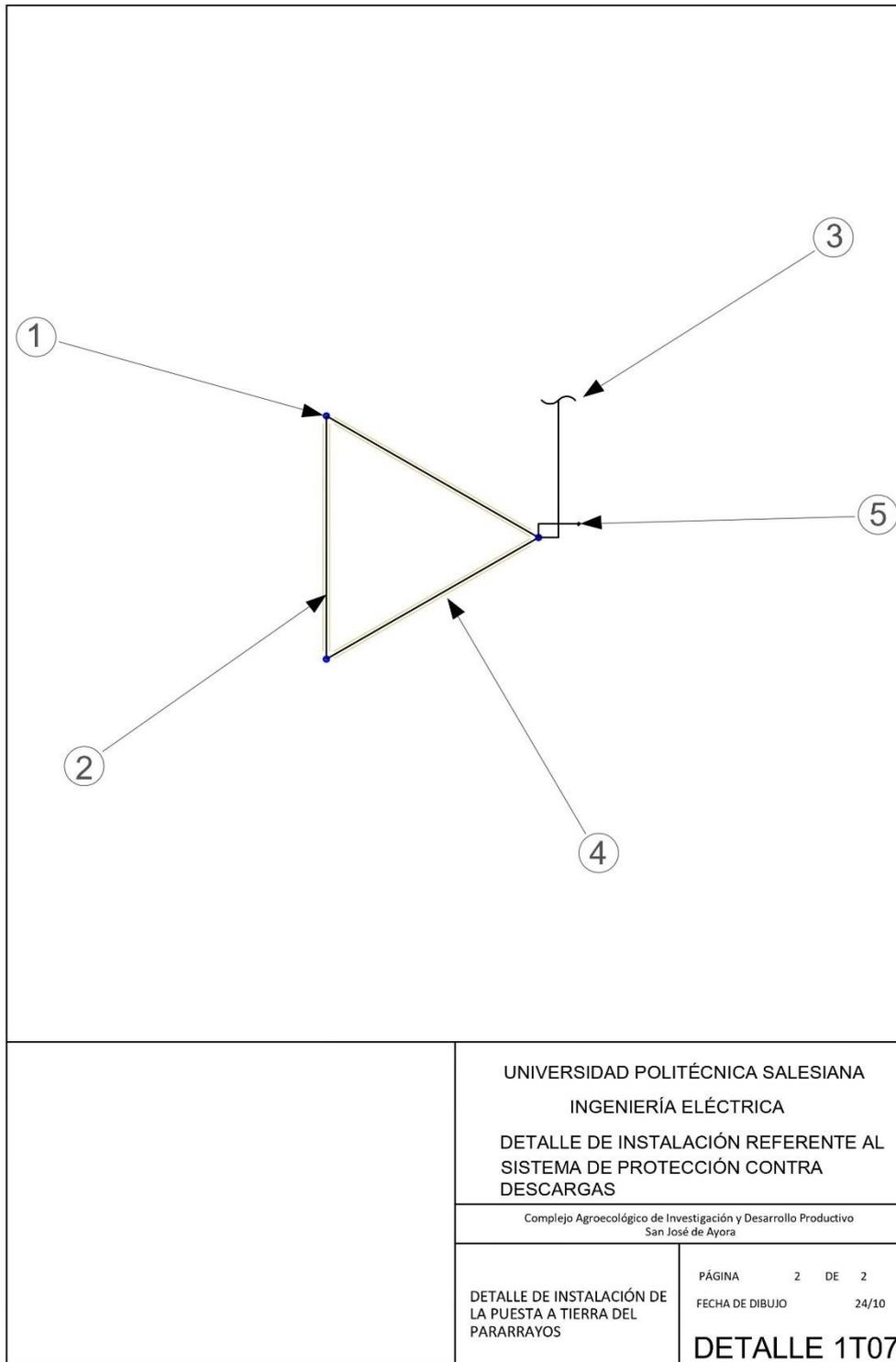


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS	
Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora	
DETALLE DE INSTALACIÓN ENTRE LA MALLA DE TIERRA Y UNA PICA	PÁGINA 2 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10 DETALLE 1T04

Anexo 10: Lista de materiales del detalle de instalación de la puesta a tierra de la punta Franklin.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	C/U	Varilla de cobre blando desnudo de 14mm diámetro x 2.40m. longitud	1
2	m.	Conductor de cobre blando desnudo 4 AWG.	15
3	C/U	Conductor de cobre blando desnudo 6 AWG.	1
4	C/U	Excavación del terreno para implantación o hincamiento de las varillas.	1
5	m.	Conductor para conexión a sistema de tierras 4 AWG	1
		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
		Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora	
		DETALLE DE INSTALACIÓN DE LA PUESTA A TIERRA DEL PARARRAYOS	PÁGINA 1 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10 DETALLE 1T07

Anexo 11: Representación gráfica del detalle de instalación de la puesta a tierra de la punta Franklin.

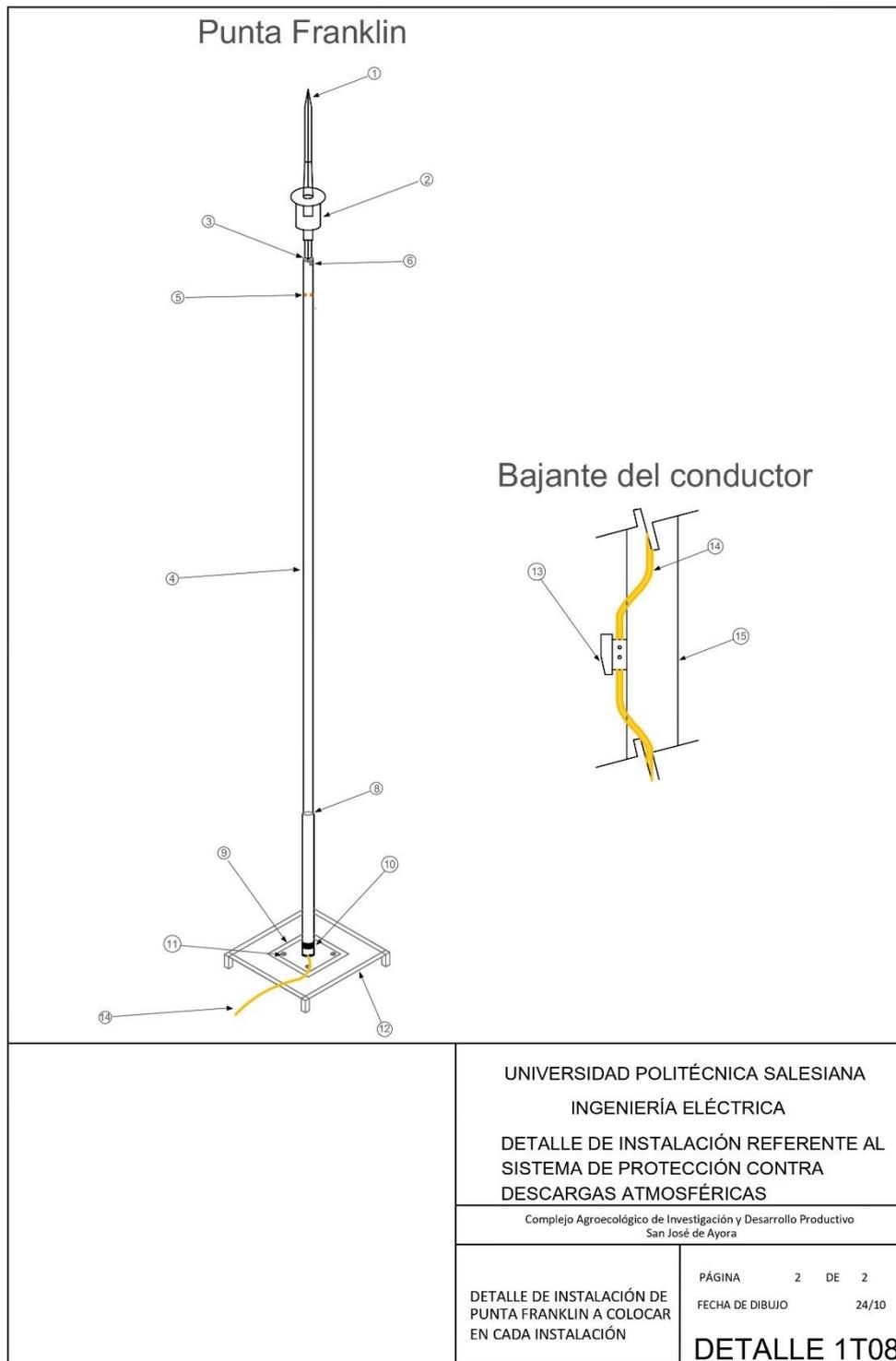


Anexo 12: Lista de materiales del detalle de instalación de la punta Franklin de cada instalación.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	C/U	Punta Captadora de cobre Cu500-16 500 mm (longitud) x 16 mm (diámetro).	1
2	C/U	Cabezal Aéreo de cobre 300 mm (longitud) x 100 mm (diámetro).	1
3	C/U	Pieza de adaptación 1'1/4" Ø20 redondo.	1
4	C/U	Mástil 4m Ø 1'1/2"+Ø1'1/4" ac. galv.	1
5	C/U	Tuerca de acero inoxidable de 1/2" para fijación de tensores.	2
6	C/U	Tornillo de acero inoxidable de 1/2" para fijar el mástil.	1
7	C/U	Cable de acero inoxidable de 1/4" de diámetro (tensores).	6
8	C/U	Soporte de mástil de hierro galvanizado en caliente de 2 1/2" de diám. x 1.5 m de long (roscado en el extremo inferior).	1
9	C/U	Placa de soporte para mástil de acero inoxidable dim. 16"x16"x1/4"	1
10	C/U	Acople con rosca interior para tubo conduit de 2 1/2 " de diámetro.	1
11	C/U	Tornillo de acero inoxidable de 1" para fijación de la placa de soporte.	4
12	C/U	Soporte para base de pararrayos soldado a estructura de 11/2" x1/2" x3/16"	1
13	C/U	Abrazadera abatible (Fijador del conductor bajante)	4
14	m.	Cable de cobre desnudo suave calibre 2AWG a 7 hilos.	10
15	C/U	Cuerpo de la edificación.	1

<p>NOTAS:</p> <p>Todos y cada uno de los materiales serán adquiridos en la empresa INGESCO, la cual cuenta con un kit para puntas Franklin con una referencia para cada material.</p>	<p>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</p> <p>INGENIERÍA ELÉCTRICA</p> <p>DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</p>	
	<p>Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora</p>	
	<p>DETALLE DE INSTALACIÓN DE PUNTA FRANKLIN A COLOCAR EN CADA INSTALACIÓN</p>	<p>PÁGINA 1 DE 2</p> <p>FECHA DE DIBUJO 24/10</p> <p>DETALLE 1T08</p>

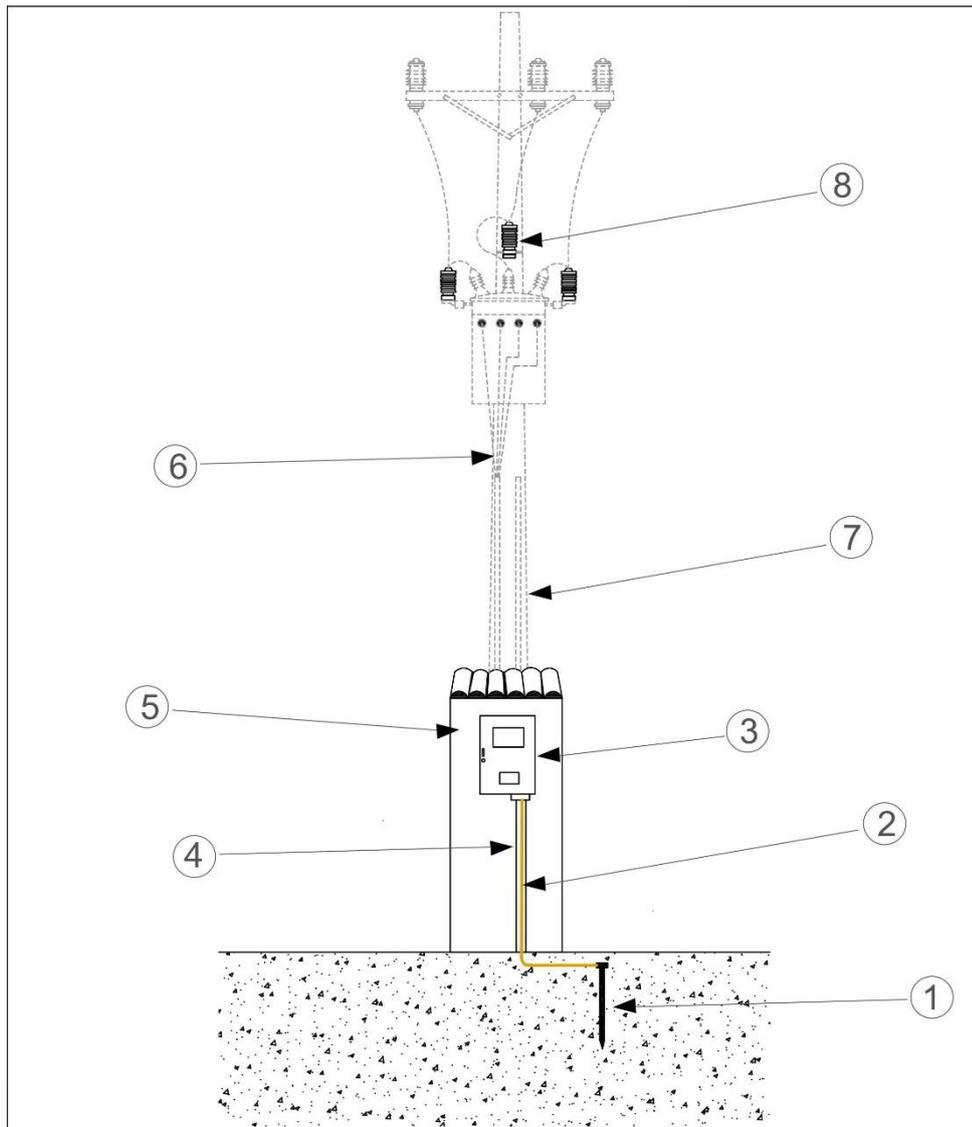
Anexo 13: Representación gráfica del detalle de instalación de la punta Franklin de cada instalación.



Anexo 14: Lista de materiales del detalle de instalación de la puesta a tierra de un sistema de distribución.

LISTA DE MATERIALES			
REF	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	C/U	Varilla de cobre blando desnudo de 14mm diámetro x 2.40m. longitud	1
2	m.	Conductor de cobre blando desnudo 2 AWG.	3
3	C/U	Caja metálica para medidor. CM3	1
4	C/U	Tubo PVC de 1/2".	1
5	C/U	Muro soporte para el medidor.	1
6	C/U	Conductor de aluminio para acometida 3 x 6 AWG.	3
7	C/U	Poste de concreto 12m.	6
8	C/U	Descargador de sobretensiones.	3
		UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA INGENIERÍA ELÉCTRICA DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
		<small>Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo San José de Ayora</small>	
		DETALLE DE INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	PÁGINA 1 DE 2 FECHA DE DIBUJO 24/10 DETALLE 1T09

Anexo 15: Representación gráfica del detalle de instalación de la puesta a tierra de un sistema de distribución.



NOTA:
Las líneas segmentadas representan la instalación tanto del poste como el transformador, los cuales serán instalados por la empresa distribuidora que sirve a la parroquia (Cayambe).

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
DETALLE DE INSTALACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

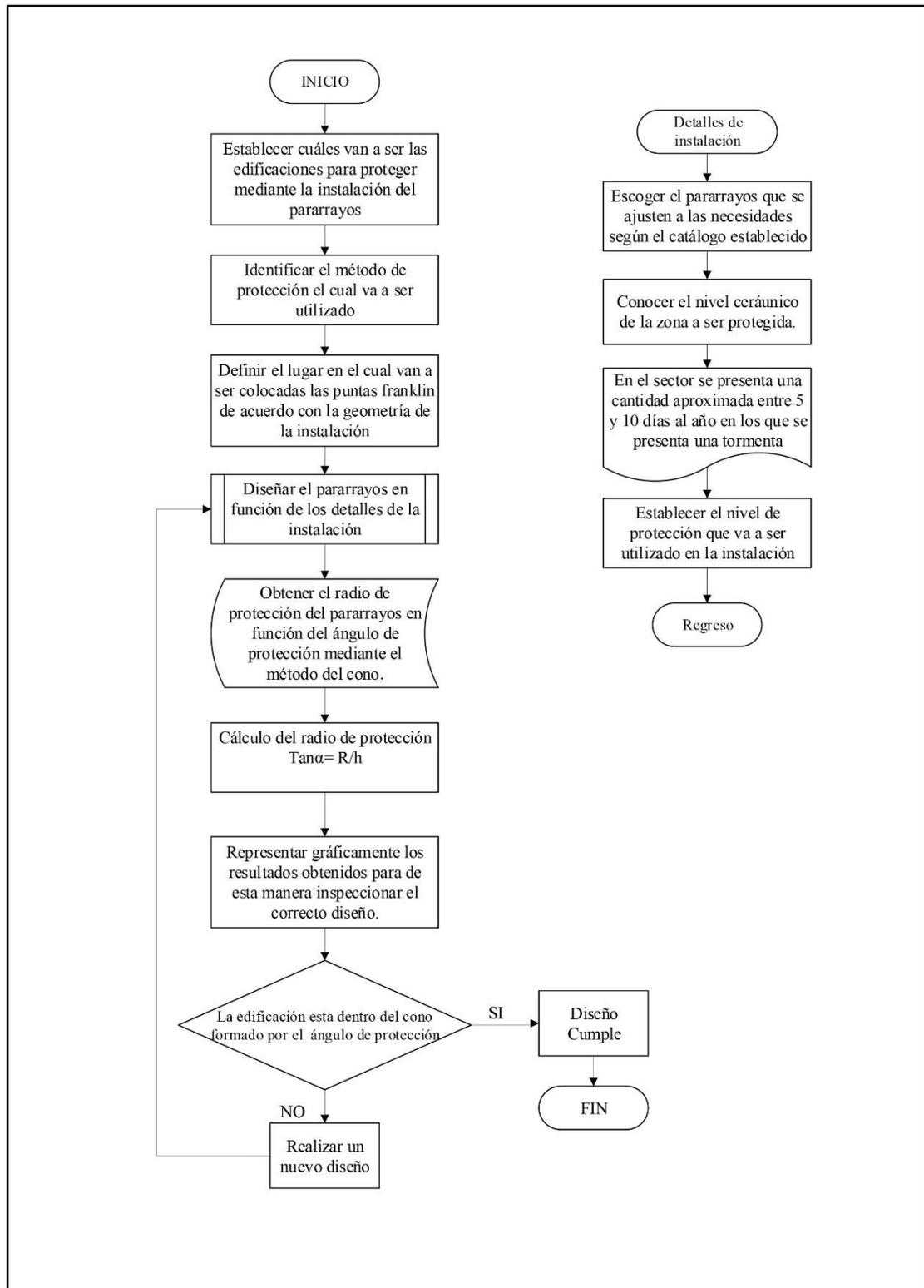
Complejo Agroecológico de Investigación y Desarrollo Productivo
San José de Ayora

DETALLE DE INSTALACIÓN DE PUESTA A TIERRA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

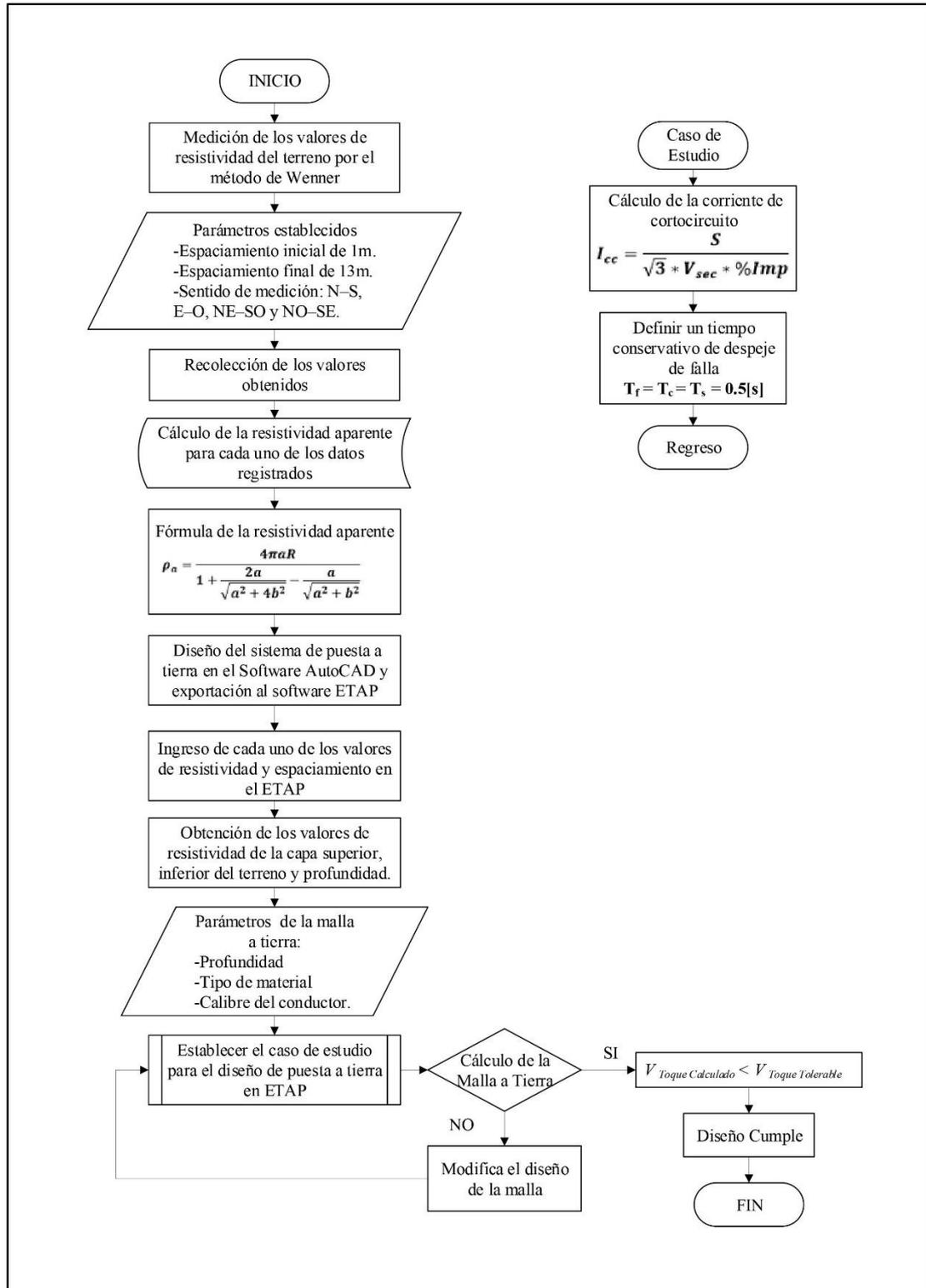
PÁGINA 2 DE 2
FECHA DE DIBUJO 24/10

DETALLE 1T09

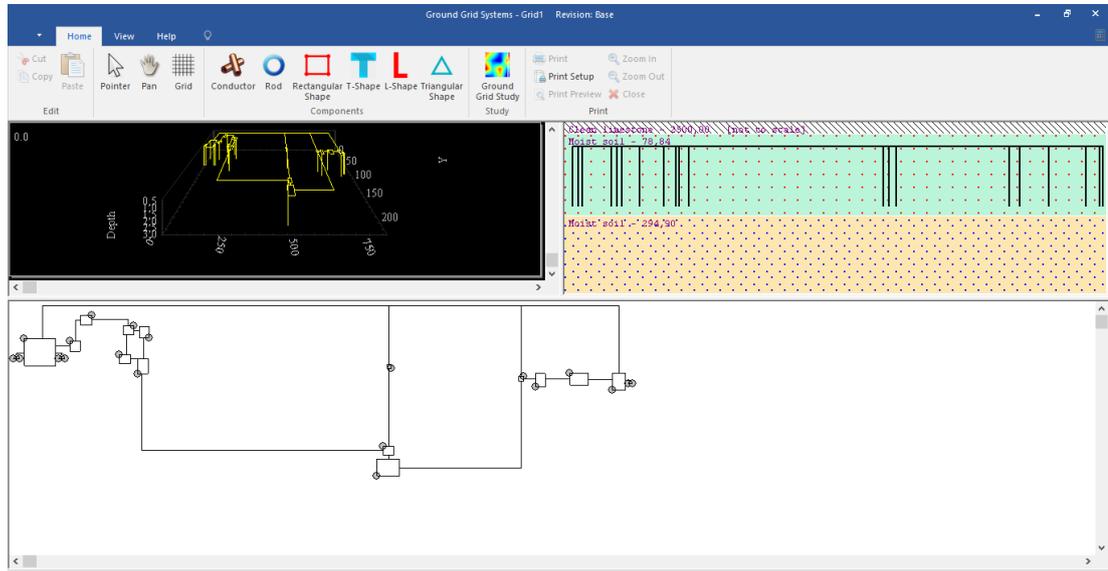
Anexo 16: Diagrama de Flujo del diseño de la punta Franklin.



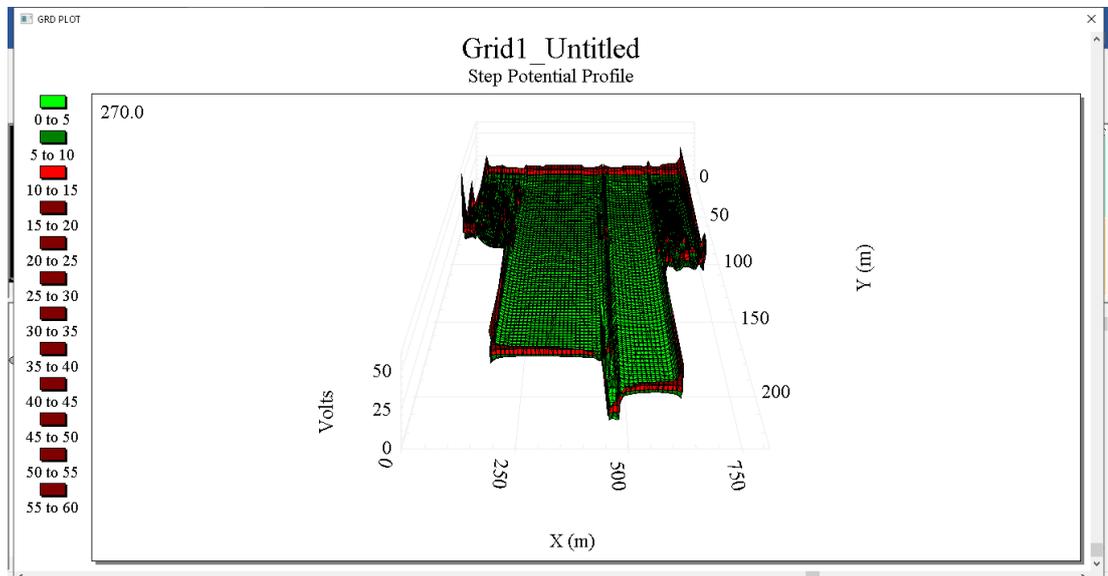
Anexo 17: Diagrama de flujo del diseño del sistema de puesta a tierra.



Anexo 18: Representación gráfica de la malla de puesta a tierra simulada en el software ETAP 19.0.1

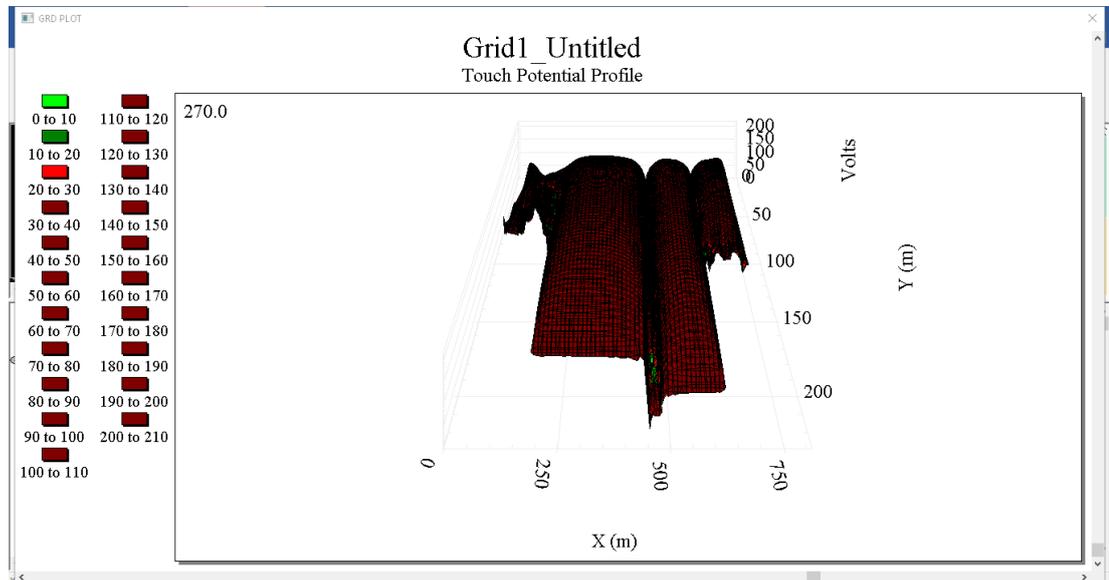


Anexo 19: Representación gráfica del perfil de voltaje de paso mediante el ETAP 19.0.1



Anexo 20: Representación gráfica del perfil de voltaje de toque mediante el ETAP

19.0.1



Anexo 21: Terreno en el cual será construido el complejo agroecológico de investigación y desarrollo productivo San José de Ayora, cantón Cayambe.



Anexo 22: Ubicación de las picas para realizar la medición de la resistividad del terreno.



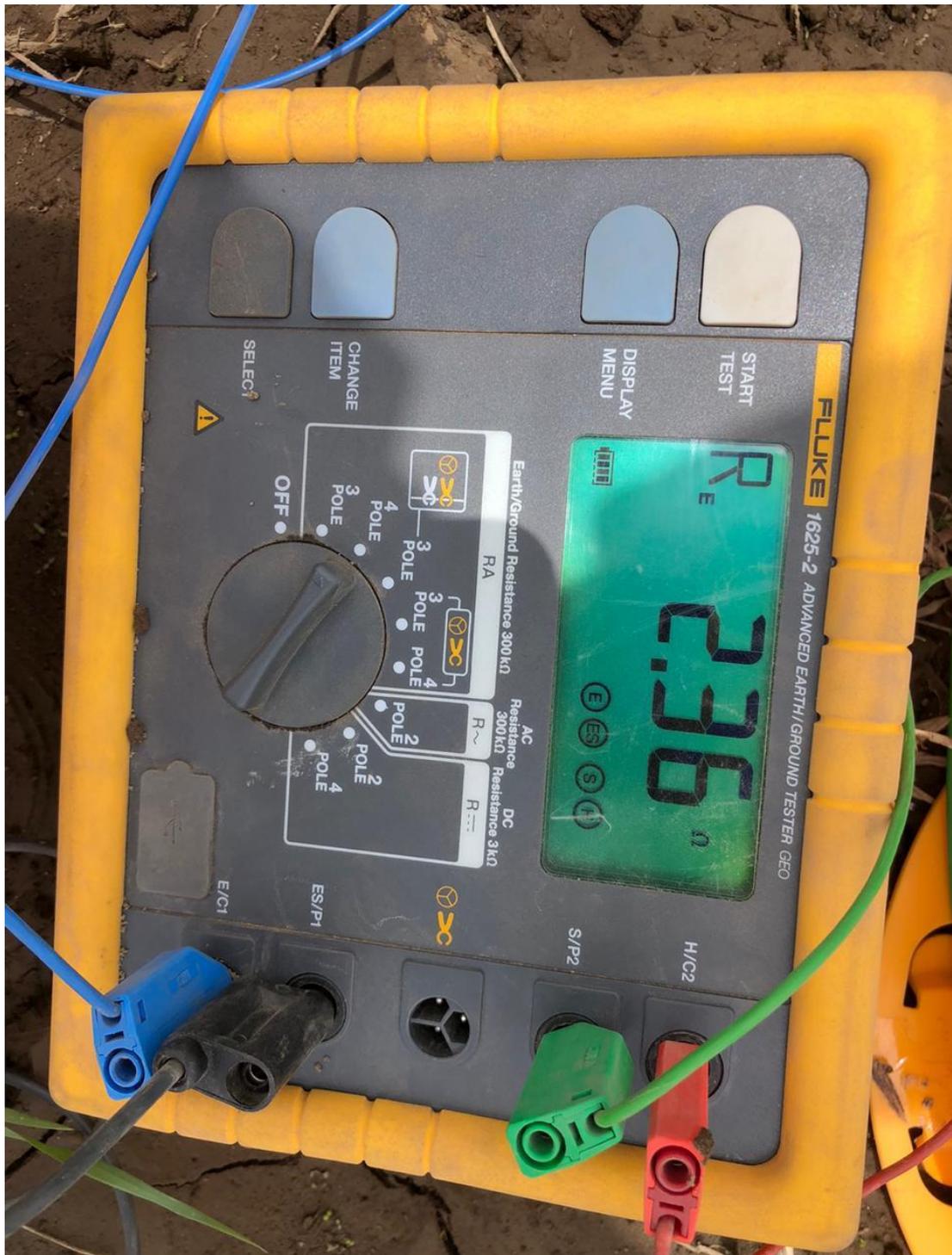
Anexo 23: Toma de Resultados de la resistividad del terreno mediante la utilización del Fluke.



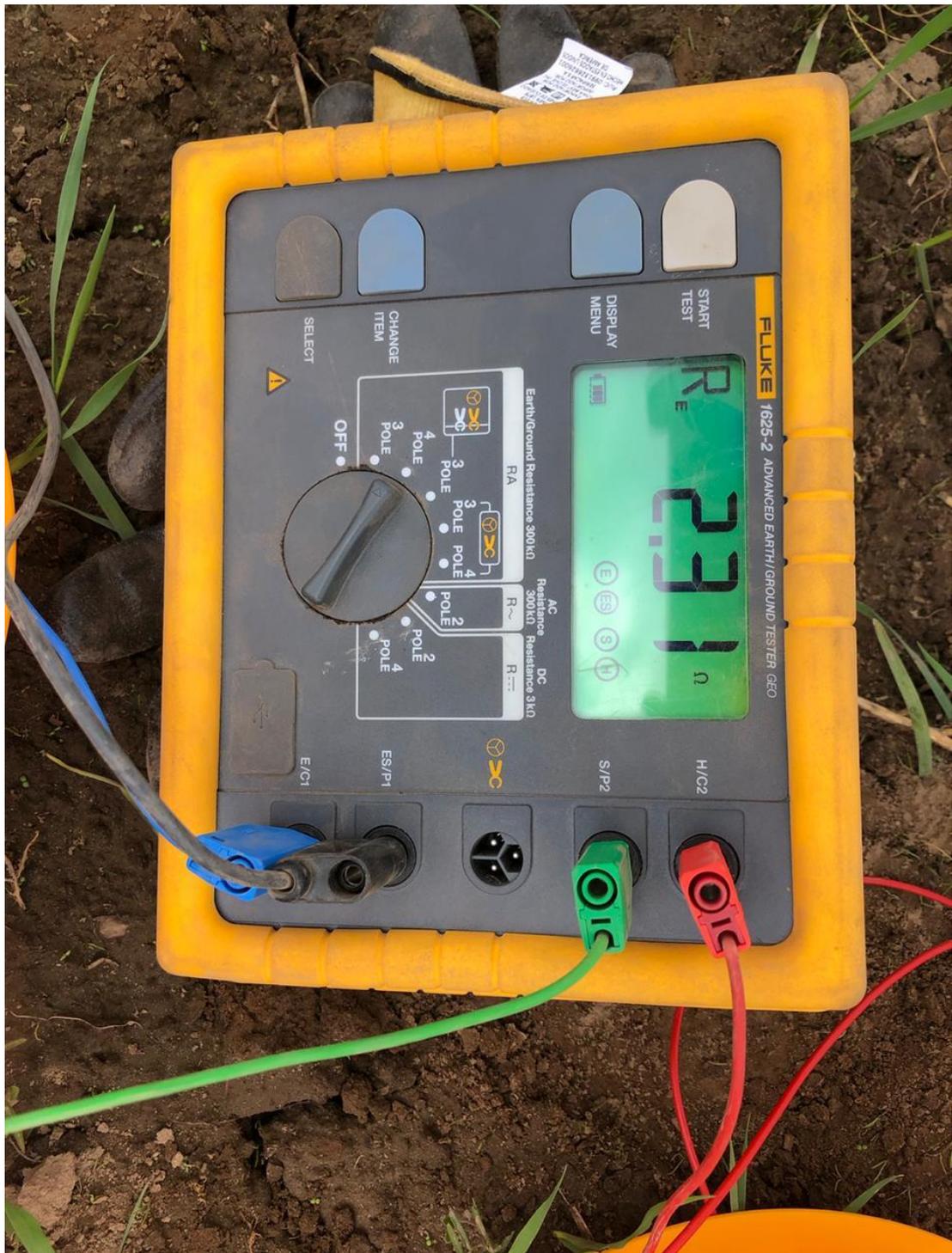
Anexo 24: Instalación de las picas para realizar la medición de la resistividad del terreno.



Anexo 25: Ejemplo de la medición de la resistividad del terreno a una distancia de 12 metros en el sentido de noreste a suroeste.



Anexo 26: Ejemplo de la medición de la resistividad del terreno a una distancia de 12 metros en el sentido de norte a sur.



Anexo 27: Medición de la distancia en la cual serán colocadas las picas para obtener el valor de resistividad del terreno.



Anexo 28: Ficha técnica del transformador de 100 kVA (marca INATRA)

ITEM	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN
	b) Tipo	PRESSPAN
	c) Clase de aislamiento	A
7	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
7.1	Tipo	RADIAL O MALLA
7.2	Número de fases	3
7.3	Potencia Nominal	SEGÚN LO SOLICITADO
7.4	Conexión	
	7.4.1 Transformadores en 6kV	Dyn5
	7.4.2 Transformadores en 15kV	Dyn5
	7.4.3 Transformadores en 25kV	YNyn0
7.5	Frecuencia	60Hz
7.6	Clase	DISTRIBUCIÓN
7.7	Relación de transformación en TAP nominal	
	7.7.1 Transformadores en 6kV	6000/ 127 V o 6300/ 127 V
	7.7.2 Transformadores en 15kV	13200/ 127 V o 13800/ 127 V
	7.7.3 Transformadores en 25kV	22000/ 127 V o 22860/ 127 V
7.8	Tensiones nominales de línea	
7.9	Bobinado primario	
	7.9.1 Transformadores en 6kV	6000 V o 6300 V
	7.9.2 Transformadores en 15kV	13200 V o 13800 V
	7.9.3 Transformadores en 25kV	22000/ 12700 V o 22860/ 13200 V
	Bobinado Secundario	220 V/127 V
7.10	Regulación de tensión Bobinado primario	
	Gama de regulación expresada en %	1 / -3 * 2.5%
	Posiciones del cambiador de derivaciones con accionamiento exterior	5
7.11	Pérdidas	NTE INEN 2115 2DA REV.
	7.11.1 Pérdidas en vacío al 100 % voltaje nominal	NTE INEN 2115 2DA REV.
	7.11.2. Pérdidas en los devanados a la carga nominal (85°C)	NTE INEN 2115 2DA REV.
	7.11.3 Pérdidas totales a plena carga (85°C)	NTE INEN 2115 2DA REV.
7.12	Impedancia a (85°C)	NTE INEN 2115 2DA REV.
7.13	Corriente de excitación máxima	NTE INEN 2115 2DA REV.
7.14	Nivel básico de Aislamiento	
	7.14.1 Primario	NTE INEN 2684
	7.14.2 Secundario	NTE INEN 2127

Anexo 29: Tabla de resistividad eléctrica de algunos materiales conductores.

Material	Resistividad (20°C – 25°C)($\Omega \cdot m$)
Grafeno	$1.00 * 10^{-8}$
Plata	$1.59 * 10^{-8}$
Cobre	$1.71 * 10^{-8}$
Oro	$2.35 * 10^{-8}$
Aluminio	$2.82 * 10^{-8}$
Hierro	$8.90 * 10^{-8}$
Grafeno	$1.00 * 10^{-8}$
Plata	$1.59 * 10^{-8}$

Anexo 30: Tabla de resistividad eléctrica según la naturaleza del terreno.

Naturaleza del terreno	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Terrenos Pantanosos	0 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba Húmeda	5 a 100
Arcilla Plástica	50
Margas y Arcillas Compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena Arcillosa	50 a 500
Arena silíceo	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

Anexo 31: Tabla de los valores medios de la resistividad del terreno.

Naturaleza del terreno	Valor medio de la resistividad ($\Omega \cdot m$)
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos.	50
Terraplenes cultivables poco fértiles y otros terraplenes.	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables.	3000

Anexo 32: Tabla de Influencia de la temperatura en la resistividad del terreno.

Temperatura °C	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
20	72
10	99
0 a -5 Agua	138
0 a -5 Hielo	300
-5	790
-15	3300

Anexo 33: Tabla de Influencia de la Humedad en la resistividad del terreno

Contenido de Humedad (% Por Peso)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	
	Capa Vegetal	Arcilla Arenosa
0	10^7	10^7
2.5	2500	1500
5	1650	430
10	530	185
15	190	105
20	120	63
30	64	42

Anexo 34: Tabla de relación de los niveles de riesgo, efectividad, distancia final y valor de la corriente mínima en un sistema contra descargas atmosféricas.

Nivel de Riesgo	Probabilidades para los valores		Radio de la esfera rodante m	Valor pico mínimo de la corriente kA
	límite de la corriente de rayo			
	Valores máximos	Valores mínimos		
IV	0.84	0.97	60	16
III	0.91	0.97	45	10
II	0.97	0.98	30	5
I	0.99	0.99	20	3

Anexo 35: Tabla de Constantes de conductores para sistemas de puesta a tierra

Material	Conductividad (%)	Temperatura de fusión °C	Kf
Cobre Blando	100	1083	7
Cobre Duro	97	1084	7.6
Conductor de acero recubierto de cobre	40	250	10.45
Conductor de acero recubierto de cobre	30	1084	14.64
Varilla de acero recubierto de cobre	20	1084	14.64
Acero 1020	10.8	1510	15.95
Varilla de acero galvanizado	9.8	1400	14.72
Varilla de acero con baño de cinc	8.6	419	28.96
Acero inoxidable 304	2.4	1400	30.05

Anexo 36: Especificaciones técnicas de Puntas Franklin de cobre (marca INGESCO)

Puntas captadoras cobre	Referencia	Material	L (mm)	D 1(mm)	M1	Peso (g)
CU300-16	110081	Cu	300	16	M16	440
CU500-16	110083	Cu	500	16	M16	800
CU1000-16	110035	Cu	1000	16	M16	1700
CU2000-16	110034	Cu	2000	16	M16	3500
CU300-20	110089	Cu	300	20	M20	740
CU500-20	110091	Cu	500	20	M20	1310
CU1000-20	110093	Cu	1000	20	M20	2710
CU2000-20	110095	Cu	2000	20	M20	5530

Anexo 37: Especificaciones técnicas de Puntas Franklin de acero inoxidable (marca INGESCO)

Puntas captadoras Acero inoxidable	Referencia	Material	L (mm)	D 1(mm)	M1	Peso (g)
IN300-16	110080	Inox	300	16	M16	420
IN500-16	110082	Inox	500	16	M16	740
IN1000-16	110084	Inox	1000	16	M16	1530
IN2000-16	110086	Inox	2000	16	M16	3110
IN300-20	110088	Inox	300	20	M20	690
IN500-20	110090	Inox	500	20	M20	1180
IN1000-20	110092	Inox	1000	20	M20	2420
IN2000-20	110031	Inox	2000	20	M20	4880