



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA  
Y DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS PARA EL CENTRO DE  
DISTRIBUCIÓN DE GAS - TAMBILLO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: ISMAEL LEONIDAS GUZMÁN ASIMBAYA  
TUTOR: ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ

Quito -Ecuador  
2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Yo, Ismael Leonidas Guzmán Asimbaya con documento de identificación N° 1720400454 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 07 de octubre de 2025

Atentamente,



---

Ismael Leonidas Guzmán Asimbaya

1720400454

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Ismael Leonidas Guzmán Asimbaya con documento de identificación No. 1720400454, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Diseño de un sistema de puesta a tierra y de protección contra descargas atmosféricas para el centro de distribución de gas - Tambillo”, el cual 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 concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de octubre de 2025

Atentamente,



-----  
Ismael Leonidas Guzmán Asimbaya

1720400454

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez con documento de identificación N° 1757424195, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA EL CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE GAS - TAMBILLO, realizado por Ismael Leonidas Guzmán Asimbaya con documento de identificación N° 1720400454, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 07 de octubre de 2025

Atentamente,



---

Ing. Rogelio Alfredo Orizondo Martínez, MSc

1757424195

## ÍNDICE GENERAL

1. Introducción .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Alcance .....	2
1.3. Objetivo Principal .....	3
1.4. Objetivos específicos .....	3
2. Marco Teórico.....	5
2.1. La corriente y sus efectos .....	5
2.1.1. La corriente .....	5
2.1.2. Resistencia del cuerpo humano .....	5
2.1.3. Corriente en el cuerpo humano .....	6
2.1.4. Trayectoria de corriente por el cuerpo.....	7
2.2. Sistemas de puesta a tierra .....	9
2.2.1. Componentes .....	9
2.2.2. Resistencia eléctrica de tierra .....	14
2.2.3. Voltaje de Toque .....	15
2.2.4. Voltaje de Paso .....	15
2.2.5. Resistividad del terreno .....	16
2.2.6. Métodos de medición .....	18
2.3. Descargas Atmosféricas .....	21
2.3.1. Sobretensiones transitorias .....	21
2.3.2. Sobretensiones permanentes.....	21
2.3.3. Niveles de protección .....	22
2.3.4. Métodos de protección .....	23
2.3.5. Pararrayos.....	25
3. Normativa .....	28
3.1. IEEE 80 2000.....	28
3.2. IEC 62305.....	28
3.3. NTE INEN 2260 2010 .....	30
4. Marco Metodológico .....	31
4.1. Área de estudio.....	31
4.2. Mediciones del Terreno.....	32
4.3. Corriente de falla.....	37
5. Sistema de Protección a Tierra .....	39

5.1. Calibre del Conductor .....	39
5.2. Diseño preliminar .....	40
5.3. Coeficientes de Schwarz – K1 y K2 .....	42
5.4. Resistencia del Sistema .....	44
5.5. Voltaje de Toque y Paso .....	49
6. Sistema de Apantallamiento Contra Descargas Atmosféricas.....	54
6.1. Área Colectora Equivalente ( $A_e$ ).....	54
6.2. Densidad Anual de Rayos a Tierra ( $NG$ ).....	55
6.3. Número de eventos peligrosos al año ( $ND$ ).....	56
6.4. Evaluación de la Probabilidad de Daños ( $PA$ ) .....	56
6.5. Cantidad de Pérdidas en la Estructura.....	57
6.6. Identificación de los componentes de riesgo .....	58
6.7. Nivel de Protección .....	58
6.8. Criterio de Selección de LPS .....	59
6.9. Sistema de Canalización.....	59
6.10. Sistema de protección a tierra .....	61
6.11. Método de la esfera rodante .....	62
7. Conclusiones .....	66
8. Bibliografía.....	68
9. Anexos.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Centro de Distribución de Gas Tambillo .....	2
Figura 2. Corriente eléctrica tipo CC en un circuito .....	5
Figura 3. Valores aproximados de resistencia corporal .....	6
Figura 4. Gráfica corriente (mA) vs tiempo (ms) en corriente alterna.....	6
Figura 5. Ejemplos de recorridos de corriente en el cuerpo humano .....	8
Figura 6: Componentes más comunes del sistema de protección a tierra .....	10
Figura 7. Dibujo esquemático de la utilización de algunos tipos de electrodos.....	12
Figura 8. Elementos utilizados en una soldadura exotérmica .....	13
Figura 9. Voltajes de toque y de paso .....	15
Figura 10. Medición de resistividad (Wenner).....	18
Figura 11. Medición de resistividad (Schlumberger).....	20
Figura 12. Sistema de protección con corriente pico igual al diseño .....	24
Figura 13. Angulo de protección con una esfera rodante.....	24
Figura 14. Pararrayos de tipo franklin.....	26
Figura 15. Modelos de pararrayos radioactivos .....	26
Figura 16. Pararrayo PDC .....	27
Figura 17. Pararrayo Stream.....	27
Figura 18. Relación entre fuentes de impactos de rayo según la IEC 62305 .....	29
Figura 19. Área de estudio del Centro de Distribución de Gas Tambillo .....	31
Figura 20. Telurómetro FLUKE 1625-2 .....	32
Figura 21. Esquema utilizado para las mediciones de resistencia de tierra .....	33
Figura 22. Ingreso de datos de separación y resistividad calculada.....	34
Figura 23. Resultados de ETAP 19.0.1 sobre resistividad en 2 capas de terreno .....	35
Figura 24. Gráfica de error entre la resistividad medida y calculada.....	35
Figura 25. Esquema de resistividad a 2 capas con los resultados obtenidos.....	37
Figura 26. Diagrama preliminar de malla .....	41
Figura 27. Curvas y ecuaciones características para coeficiente K1 .....	43
Figura 28. Curvas y ecuaciones características para coeficientes K2 .....	44
Figura 29. Parámetro establecido para una Descarga .....	60
Figura 30. Longitud mínima de electrodo .....	61
Figura 31. Variables en el método de Esfera Rodante .....	62

Figura 32. Distancia entre Puntas Captadoras.....	63
Figura 33. Vista frontal del Diseño de Esfera Rodante planteado .....	64
Figura 34. Vista lateral del diseño de Esfera Rodante planteado.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Efectos fisiológicos de la corriente .....	7
Tabla 2: Valores referenciales de F en función del recorrido de la corriente .....	9
Tabla 3: Resistividad de diferentes tipos de suelo .....	17
Tabla 4: Estructura, efectos y nivel de protección recomendado.....	23
Tabla 5: Resultados obtenidos de resistencia de tierra.....	33
Tabla 6: Valores obtenidos de resistividad de terreno .....	34
Tabla 7: Resultados totales de resistividad en 2 capas.....	36
Tabla 8: Datos Técnicos del transformador que alimenta el CDGT .....	37
Tabla 9: Valores para calcular Tensiones de Toque y Paso .....	49
Tabla 10: Valores obtenidos para diseño de malla.....	50
Tabla 11: Niveles Isocerámicos de lugares aledaños al CDGT .....	55
Tabla 12: Mediciones realizadas .....	72
Tabla 13: Resultados en ETAP 19.0.1 .....	73
Tabla 14: Gráfica de error entre resistividad medida y calculada.....	74
Tabla 15: Tabla de conductores comerciales .....	75
Tabla 16: Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.....	75
Tabla 17: Datos de medidor que abastece el CDGT .....	76
Tabla 18: Valores de <i>CD</i> de acuerdo con la localización.....	80
Tabla 19: Valores de <i>PTA</i> de acuerdo con las medidas complementarias.....	80
Tabla 20: Valores de <i>PB</i> de acuerdo con la clase de LPS instalado .....	81
Tabla 21: Valores de <i>RT</i> de acuerdo con las pérdidas por una descarga .....	81
Tabla 22: Valores de <i>LF</i> de acuerdo con el tipo de estructura.....	81

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Gráfica corriente (mA) vs tiempo (ms) en corriente directa .....	70
Anexo 2. Área escogida para realizar el estudio de resistividad de suelo.....	71
Anexo 3. Resultados de la prueba de resistividad con el telurómetro.....	72
Anexo 4. Resultados obtenidos en software.....	73
Anexo 5. Grafica de error con ETAP 19.0.1 .....	74
Anexo 6. Características de conductores.....	75
Anexo 7. Resistencia de puesta a tierra de acuerdo con su objetivo de protección .....	75
Anexo 8. Datos del medidor de energía .....	76
Anexo 9. Plano de las estructuras analizadas .....	77
Anexo 10. Vista frontal del proyecto con malla, puntas captadoras y métodos de esfera rodante propuesto .....	78
Anexo 11. Vista Lateral del proyecto con malla, puntas captadoras y método de esfera rodante propuesto .....	79
Anexo 12. Nivel Isocerámico del Ecuador y el CDGT .....	80
Anexo 13. Coeficiente Ambiental <i>CD</i> .....	80
Anexo 14. Coeficiente de reducción de la probabilidad de descarga en la estructura <i>PTA</i> .....	80
Anexo 15. Coeficiente de probabilidad de que se produzcan daños físicos <i>PB</i> .....	81
Anexo 16. Coeficiente de Riesgo Tolerado <i>RT</i> .....	81
Anexo 17. Coeficiente de pérdidas por daños físicos <i>LF</i> .....	81

## RESUMEN

El propósito de este trabajo es el diseño de un sistema de protección a tierra que cumpla con los criterios establecidos por la norma IEEE Std. 80-2000, garantizando la protección del personal y equipos existentes en el Centro de Distribución de Gas - Tambillo, ubicado en el cantón Mejía, provincia de Pichincha.

El diseño apropiado de un sistema de puesta a tierra requiere considerar algunos parámetros necesarios como corriente de cortocircuito obtenida a partir del análisis de las características del transformador que suministra de energía el Centro de Acopio, resistividad de terreno utilizando un telurómetro, y por último los voltajes de toque y de paso tolerables para un dimensionamiento preciso y seguro.

También se realizarán los cálculos para el apantallamiento contra descargas atmosféricas tomando en cuenta el nivel isocerámico del área de ubicación del proyecto, permitiendo la utilización del método de esfera rodante, el cual, determina un radio específico formando una circunferencia imaginaria y estableciendo una zona de protección sobre los puntos que podrían recibir una descarga, para su determinación se utilizará la normativa IEC 62305.

**Palabras clave:** Norma IEEE 80 2000, Norma IEC 62305, Sistema de puesta a tierra, Sistemas contra descargas atmosféricas, Nivel Isocerámico.

## ABSTRACT

The purpose of this work is the design of a ground protection system that meets the criteria established by IEEE Std. 80-2000, ensuring the protection of personnel and existing equipment at the Gas Distribution Center - Tambillo, located in the Mejía canton, Pichincha province.

The proper design of a grounding system requires consideration of certain necessary parameters, such as short-circuit current obtained from analysis of the characteristics of the transformer that supplies power to the Collection Center, soil resistivity using a tellurium meter, and finally, tolerable touch and step voltages for accurate and safe sizing.

Calculations will also be made for lightning protection, considering the isoceraunic level of the project location area, allowing the use of the rolling sphere method, which determines a specific radius forming an imaginary circumference and establishing a protection zone over the points that could receive a discharge. IEC 62305 will be used to determine this.

**Key words:** IEEE 80-2000 Standard, IEC 62305 Standard, Grounding system, Lightning Protection Systems, Isoceraunic Level.

## 1. Introducción

Un Sistema de Puesta a Tierra (SPAT) es un tipo de conexión eléctrica que permite brindar seguridad ante pequeñas fugas de corriente, así como a los equipos eléctricos y/o electrónicos que se encuentren dentro de una estructura o edificación.

La falla se produce cuando la corriente busca el camino con la menor oposición a su paso para llegar a tierra. Este medio conductor puede ser una persona que este caminando o tocando un equipo. La resistencia del cuerpo humano puede variar desde los 1000  $\Omega$  hasta los 4000  $\Omega$ , las consecuencias de la exposición a un voltaje que produzca circulación de la corriente son desde quemaduras, tetanización o en el peor de los casos fallecimiento dependiendo de la gravedad del accidente o el tiempo en el que se tuvo contacto con la falla.

La empresa auspiciante es un centro de acopio y distribución de gas licuado de petróleo (GLP), tiene un alto grado de inflamabilidad por la cantidad de bombonas de gas que almacena, por lo que desde el punto de vista eléctrico y anticipándonos a cualquier probable eventualidad, una malla a tierra es necesaria para así reducir en lo posible cualquier accidente causado por estas fugas de corrientes.

Al ser un lugar con alto grado de inflamabilidad por la composición química del GLP, se debe proteger también contra un fenómeno natural no controlable como lo son las descargas atmosféricas, de este acontecimiento natural no se puede prever su aparición ya que son eventos aleatorios con diferente grado de impacto, pero sí se puede tener una referencia estadística de su aparición mediante el Nivel Isocerámico del área donde está ubicado el Centro de Distribución.

El diseño de un sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas permite evitar que por la estructura metálica cercana a donde se almacenan las bombonas circulen corrientes derivadas del impacto que puedan generar una chispa o que puedan producir el calentamiento que impliquen alcanzar la temperatura crítica del punto de ignición del gas.

## 1.1. Planteamiento del problema

El Centro de Distribución de Gas Tambillo, **Figura 1**, es el más grande de la parroquia día a día llegan grandes vehículos a cargar y descargar cientos de tanques, al ser estos de gran inflamabilidad es necesario tener una protección para que estos no causen graves accidentes en el caso de alguna falla eléctrica por lo que un sistema de puesta a tierra permitirá eliminar esta clase de accidentes y con una protección adicional contra descargas atmosféricas los posibles accidentes quedarán reducidos a una mínima probabilidad de ocurrencia.



**Figura 1.** Centro de Distribución de Gas - Tambillo  
**Fuente:** Google Maps [1]

## 1.2. Alcance

El proyecto técnico contempla el diseño del sistema de puesta a tierra en este proyecto técnico, conforme a la norma IEEE Std. 80-2000 que establece los criterios técnicos y de seguridad necesarios para salvaguardar la integridad de personas y equipos, de tal forma que el dimensionamiento esté acorde con lo previsto en la normativa y de acuerdo con las condiciones del terreno y de la infraestructura civil.

En el diseño del Sistema de Puesta a Tierra se emplean algunas herramientas computacionales como Excel para cálculos, el software ETAP para simulaciones y AutoCAD para representar gráficamente la malla y los planos del Centro de Distribución. Adicionalmente se utiliza el telurómetro para medir la resistividad del terreno.

En relación con el cumplimiento de objetivos planteados, inicialmente se realizó la medición de resistividad del terreno y el cálculo de la mediante el método de Wenner, los resultados obtenidos fueron procesados y analizados con el software ETAP 19 para obtener la estratificación del suelo. Posteriormente, se procedió al diseño técnico del sistema de protección a tierra para el Centro de Distribución, considerando la norma IEEE Std. 80-2000. Se identificó el nivel isocerámico del área de estudio, mediante estudios previos determinando la cantidad de días de tormenta al año, lo que permite dimensionar correctamente el sistema de apantallamiento contra descargas en conformidad a la normativa IEC 62305. Finalmente, con la validación de cálculos correspondientes se elaboró un esquema de ambos productos en AutoCAD, dando cumplimiento a los objetivos establecidos.

Finalizado el proyecto técnico, la empresa auspiciante dispondrá de un diseño de puesta a tierra que cumpla con los parámetros necesarios para su funcionamiento y cuya finalidad es salvaguardar al personal y a los equipos, además de conducir un fenómeno natural fortuito como lo es una descarga atmosférica a un punto de descarga seguro.

El estudio realizado permite que la empresa se pueda anticipar a futuros permisos que las entidades reguladoras de funcionamiento puedan solicitarles, y contar con una base para implementar el proyecto de sistema de puesta a tierra.

### **1.3. Objetivo Principal**

- La finalidad principal del proyecto es diseñar el sistema de puesta a tierra para el Centro de Distribución de Gas, orientado a garantizar la protección del personal, en cumplimiento con la Norma IEEE 80. Adicionalmente, se contempla el diseño de un sistema de protección contra descargas atmosféricas de acuerdo con la Norma IEC 62305, con la finalidad de mitigar los riesgos asociados a fallas eléctricas y evitar accidentes como explosiones de los tanques de GLP almacenados en el Centro de Acopio.

### **1.4. Objetivos específicos**

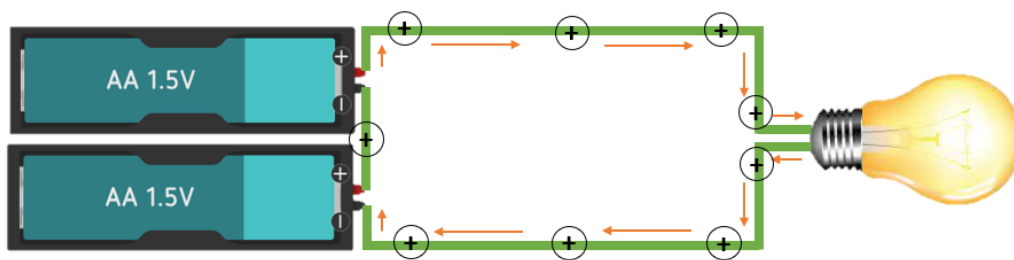
- Medir y calcular la resistividad del terreno e interpretar mediante software ETAP 19 la estratificación del suelo.
- Hacer un diseño del sistema de protección a tierra apropiado para el Centro de Distribución de Gas - Tambillo.
- Realizar un esquema mediante software CAD de la malla a tierra una vez que se haya culminado los cálculos que permitan cumplir con los requerimientos de las normativas mencionadas anteriormente.
- Identificar el nivel isocerámico del área donde se encuentra localizado el Centro de Acopio para dimensionar correctamente el apantallamiento que lo protegerá contra descargas atmosféricas.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. La corriente y sus efectos

#### 2.1.1. La corriente

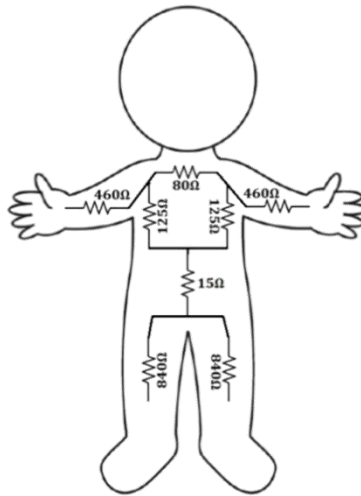
Dentro de la teoría de circuitos la corriente eléctrica se define como el movimiento de cargas eléctricas a través de un material conductor, desde una región de mayor potencial hacia una de menor potencial. cómo se visualiza en la **Figura 2**. El flujo de cargas permite el funcionamiento de la tecnología moderna, su unidad de medida son amperios [A] y puede ser de dos tipos: corriente continua cuando los electrones se mueven en una dirección y permanecen constantes en el tiempo y corriente alterna cuando cambian de dirección en un periodo de ciclo determinado [2].



**Figura 2.** Corriente eléctrica tipo CC en un circuito  
Fuente: Autor

#### 2.1.2. Resistencia del cuerpo humano

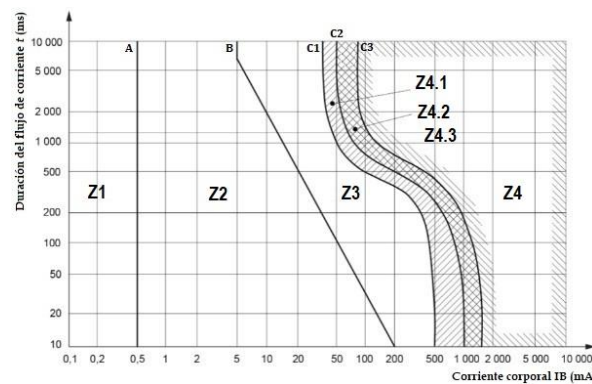
La resistencia corporal puede variar desde los 1000  $\Omega$  hasta los 4000  $\Omega$ , oponiéndose al paso de la corriente, como se puede apreciar en la **Figura 3**, estos valores van a depender de algunos factores biológicos como el estado físico del sujeto y el contenido de agua en los órganos.



**Figura 3.** Valores aproximados de resistencia corporal  
**Fuente:** Autor [3]

### 2.1.3. Corriente en el cuerpo humano

El daño que pueda producir la corriente en el organismo está sujeto algunos factores como el tiempo de duración del contacto y la magnitud de la misma, produciendo graves efectos si es extendido, la **Figura 4** muestra las posibles consecuencias entre el tiempo de contacto y la intensidad de corriente alterna, las zonas indicadas tienen la misma consecuencia en corriente directa presentando un ligero cambio en cuanto a la corriente que abarcan las distintas zonas, como se visualiza en el **Anexo 1**.



**Figura 4.** Gráfica corriente (mA) vs tiempo (ms) en corriente alterna  
**Fuente:** Elaboración propia [4]

De acuerdo con la **Figura 4**, existen 4 zonas, la zona Z1 llamada “umbral de percepción” normalmente no genera ninguna reacción y es el nivel de corriente mínimo que logra sentir el

individuo, la zona Z2 el “umbral de reacción” no produce efectos peligrosos sin embargo es el límite que puede provocar tetanización (contracción muscular no controlada), la zona Z3 es el “umbral de no soltar” la cantidad máxima de corriente que permite al sujeto liberarse de un contacto accidental, si tiene una duración mayor a 2 segundos ocasiona contracciones musculares, dificultad para respirar y pequeños daños cardíacos.

El “umbral de fibrilación ventricular” se localiza en la zona Z4, aquí se puede presentar un paro cardio-respiratorio y quemaduras graves, esta franja se divide en 3 subzonas donde la posibilidad de infarto aumenta porcentualmente como se visualiza en la **Tabla 1**, siendo esta la zona en la que encontramos la mayor probabilidad de muerte [4].

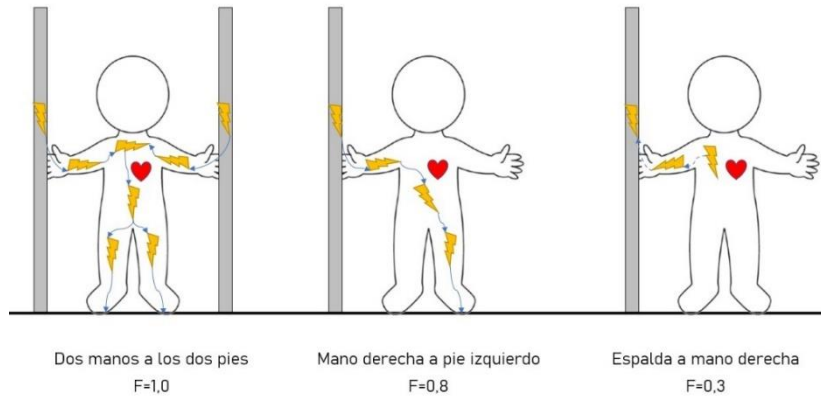
**Tabla 1:** Efectos fisiológicos de la corriente

Zonas	Límites	Efectos Fisiológicos
Z1	0,01 hasta 0,5 mA curva “A”	Posible percepción
Z2	0,5 mA hasta la curva “B”	Percepción y contracciones musculares involuntarias sin efectos dañinos.
Z3	Curva “B” y por encima de ella	Contracciones musculares fuerte e involuntarias, dificultad respiratoria, pequeñas alteraciones reversibles en la función cardíaca.
Z4	Sobre la curva C1	Se producen efectos como paro cardíaco, paro respiratorio, quemaduras y alta probabilidad de fibrilación ventricular.
	C1 – C2	Z4.1 Aumento en 5% de la fibrilación ventricular.
	C2 – C3	Z4.2 Fibrilación ventricular hasta 50%
	Sobre la curva C3	Z4.3 Fibrilación ventricular superior al 50%

Nota: NTP 400 [4]

#### 2.1.4. Trayectoria de corriente por el cuerpo

Un accidente producido por la corriente dependerá de la trayectoria por la que circula a través del cuerpo, un camino más extenso puede presentar mayor resistencia corporal permitiendo circular menos corriente sin embargo si esta atraviesa órganos vitales puede ocasionar graves consecuencias, como se observa en la **Figura 5**.



**Figura 5.** Ejemplos de recorridos de corriente en el cuerpo humano  
Fuente: Elaboración propia [5]

La **Tabla 1** indica los posibles efectos fisiológicos si la trayectoria que recorre la corriente es dos manos-dos pies, para obtener un valor de equivalente de otros posibles caminos en el cuerpo humano se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$I_{eq} = \frac{I_B}{F} \quad (1)$$

Donde:

$I_B$ : Corriente corporal

$F$ : Factor de corriente a través del corazón

La **Tabla 2** muestra los valores del factor corazón ( $F$ ) tomando en cuenta la trayectoria por la que circula la corriente, con los valores indicados se puede concluir que cuando la corriente pasa por órganos vitales (corazón, hígado, etc.) tiene un valor alto y cuando no toca órganos importantes se obtiene un valor bajo [5].

**Tabla 2:** Valores referenciales de F en función del recorrido de la corriente

Trayectoria de la corriente	Factor de corriente de corazón
Mano izquierda a tórax	1,5
Mano derecha a tórax	1,3
Mano izquierda a pie izquierdo o pie derecho o dos pies	1,0
Dos manos a dos pies	1,0
Mano derecha a pie izquierdo o pie derecho o dos pies	0,8
Espalda a Mano izquierda	0,7
Glúteos a mano izquierda o mano derecha o dos manos	0,7
Mano izquierdo a mano derecha	0,4
Espalda a mano derecha	0,3
Pie izquierdo a pie derecho	0,04

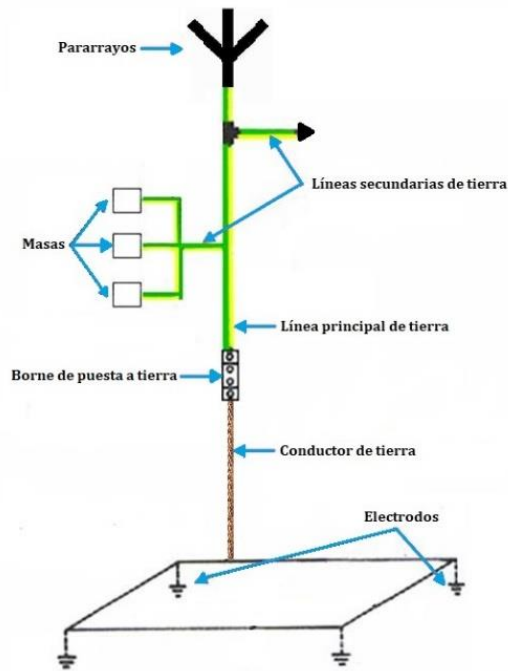
Nota: IEC TS 60479-1 [5]

## 2.2. Sistemas de puesta a tierra

Estos sistemas conocidos simplemente como puestas a tierra son un tipo de conexión eléctrica formada por un conjunto de materiales conductores, su objetivo principal es brindar un camino rápido para la disipación de corriente, se calcula y diseña para reducir la probabilidad de accidentes producidos por corrientes que pueden ser originadas por descargas atmosféricas o corrientes de fuga.

### 2.2.1. Componentes

Los componentes empleados en un sistema de puesta a tierra varían según la necesidad requerida de protección, sin embargo, entre los más comunes y mayormente utilizados se observan en la **Figura 6** y se describen a continuación:



**Figura 6:** Componentes más comunes del sistema de protección a tierra  
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.2.1.1. Electrodo de puesta a tierra

Los electrodos de tierra son formados por la unión de uno o más conectores, que permiten tener una trayectoria controlada con una diferencia de potencial cero para el drenaje de la corriente, en contacto permanente con el terreno y enterrados a una profundidad fija por lo que deben cumplir con ciertas características de durabilidad y baja resistencia.

Las principales funciones que tienen dentro del sistema son: proveer uno o varios trayectos para disipar instantáneamente la corriente, mantener la tierra o voltaje cero de la instalación eléctrica junto a la estructura metálica de la edificación, la baja impedancia de los electrodos se condiciona con la composición del suelo que puede proporcionar mayor o menor conductividad por los minerales que lo forman.

Existen una gran variedad de tipos de electrodos que son permitidos y utilizados conforme la necesidad de protección contra corrientes y la estructura civil del edificio a proteger, como se visualiza en la **Figura 7**, pueden usarse:

a) Tuberías metálicas de agua

Estas deben poseer continuidad eléctrica y debe ser instalada bajo tierra con una longitud mínima de contacto de 3 metros [6].

b) Estructura metálica del edificio

Para utilizar la estructura o esqueleto metálico de una edificación como electrodo de tierra este debe tener una conexión efectiva a tierra, es decir estar contacto con el suelo. Si los cimientos cuentan con arena que no es un material conductor, impide una conexión adecuada a tierra.

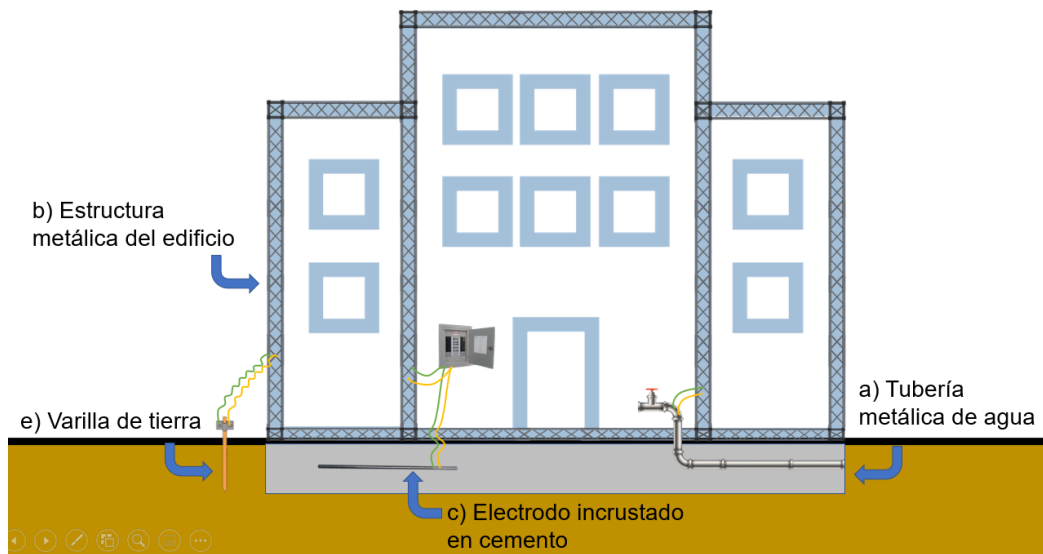
c) Electrodo embebido en concreto

Este tipo de electrodo fue propuesto por el ingeniero Herb Ufer durante la 2da guerra mundial, quien experimento enterrando varillas en los cimientos de concreto y determinó que estos podían ofrecer resistencias de 5 ohm o menos en suelos secos y arenosos, los terrenos menos apropiados y más dificultosos para obtener bajas resistencias [7].

El uso de electrodo consiste en la adición de una o más varillas de 6 metros de longitud mínima en contacto físico con la tierra y enterradas en concreto a 5,8 cm, cabe resaltar que este método puede ocasionar daños en el concreto de la construcción por la corrosión de la varilla, por lo que se debe tener cuidado al momento de utilizar este tipo de electrodo.

d) Anillo a tierra

La instalación consiste en aplicar un conductor de cobre desnudo calibre mínimo 2 AWG, longitud total no menor de 6 metros, colocada a una profundidad de al menos 0,75 m, y estar en contacto directo y permanente con el terreno.



**Figura 7.** Dibujo esquemático de la utilización de algunos tipos de electrodos

**Fuente:** Elaboración propia

#### e) Electrodos de tubos y varillas

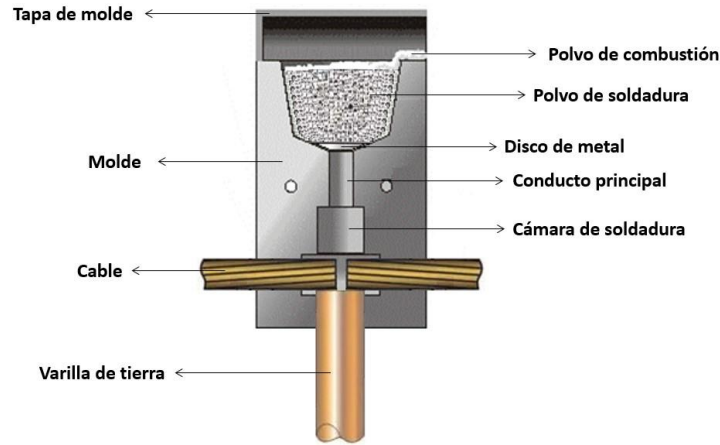
Este tipo de electrodo necesita tener una longitud mínima de 1,80 m de largo y ser enterrado completamente en forma vertical, varillas formadas de núcleo de acero con recubrimiento de cobre para evitar su corrosión, conocidas como copperweld, se recomienda que tengan un diámetro de 5/8 de pulgada (1,59 cm) y para otros materiales deben ser de 1/2 pulgada (1,27 cm) [8].

#### f) Electrodos de placa metálica

Estos se pueden utilizar si tienen una superficie de al menos 0,186 m<sup>2</sup> y están en contacto con la tierra, si la placa es de acero o hierro deben contar con un espesor no menor a 6,35 mm, mientras que los electrodos de materiales no ferrosos deben poseer un grosor mínimo de 1,52 mm, para evitar la corrosión en este tipo de electrodos, la placa debe estar en contacto con una superficie externa galvanizada o una cubierta de metal [9].

### 2.2.1.2. Soldaduras exotérmicas

Son uniones que permiten obtener una conexión permanente entre la varilla o electrodos y los conductores que forman la malla, como muestra la **Figura 8**, se la realiza mediante un molde en el que ingresan los conductores, la varilla y polvo de soldadura, mediante una reacción exotérmica a alta temperatura se obtiene una unión sólida entre todos los elementos, las ventajas de estas soldaduras incluyen su resistencia a la corrosión y su baja resistividad eléctrica.



**Figura 8.** Elementos utilizados en una soldadura exotérmica  
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.2.1.3. Conductor de tierra

Es la línea de enlace con tierra, es responsable de juntar los electrodos con el punto principal de tierra que generalmente se ubica en el Tablero Principal de Distribución. Para su implementación se utiliza mayormente un cable de cobre de sección mínima 4 AWG, se puede seleccionar un conductor con mayor calibre y capacidad de conducción en función de la corriente de falla y el tiempo de duración de esta, según lo estipulado por la normativa IEEE Std. 80-2000.

### 2.2.1.4. Borne de puesta a tierra

Elemento compuesto de placas metálicas y tornillos que permiten la conexión y desconexión del sistema con la toma a tierra, su función es acoplar el conductor principal de tierra con los conductores de protección provenientes de las masas y los cables de unión equipotencial en caso

de existir otra puesta a tierra cercana, el borne debe estar protegido en donde se lo coloque (a nivel del suelo o sobre él) además debe asegurar la continuidad eléctrica.

#### **2.2.1.5. Línea principal de tierra**

Son conductores de protección interconectan las masas con el sistema principal de puesta a tierra y a su vez con sus derivaciones internas (líneas secundarias de tierra), evitando de esta manera un contacto indirecto ocasionado accidentalmente por algún equipo o estructura que se encuentre bajo tensión.

Los cables deben ser de cobre, puede ser desnudo o aislado principalmente de color verde-amarillo o verde únicamente, el calibre de este depende de la corriente de falla y también puede ser calculado mediante el calibre de las líneas principales (fases).

#### **2.2.1.6. Masas**

Son el conjunto de partes metálicas conductoras asequibles de una instalación o aparato eléctrico, que en situaciones normales se encuentran separadas de las partes operativas, pero que pueden cargarse de tensión como resultado de una falla.

#### **2.2.2. Resistencia eléctrica de tierra**

Se define como el impedimento que ofrece un medio conductor, en este caso un electrodo de tierra, al paso de la corriente hacia una determinada área del terreno. Su unidad de medición es el ohmio ( $\Omega$ ), para su medición se deben tener en consideración las características físicas del electrodo utilizado y el punto de referencia con potencial cero.

La resistencia eléctrica del suelo describe la relación que existe entre el voltaje introducido entre dos electrodos y la corriente inyectada durante el proceso de medición, durante este procedimiento se utiliza un equipo llamado telurómetro el cual mide la resistencia del terreno circundante.

### 2.2.3. Voltaje de Toque

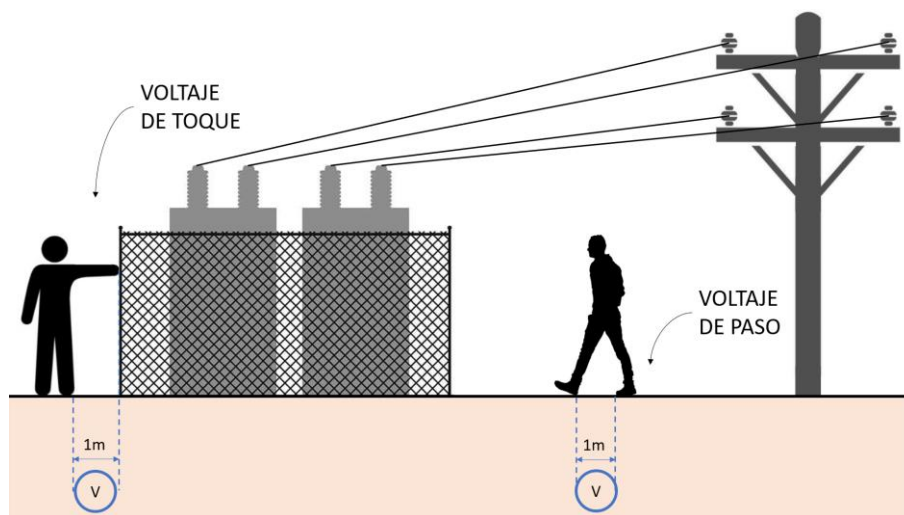
Este voltaje corresponde a la diferencia de potencial eléctrico que se presenta en medio de una estructura metálica conectada a tierra y una superficie, donde un individuo se encuentra de pie, siempre y cuando las manos mantengan contacto con la estructura, como se visualiza en la **Figura 9**.

La corriente circula casi de manera directa por el corazón y también por otros órganos del cuerpo, como se explica en el numeral 2.1.4.

### 2.2.4. Voltaje de Paso

El voltaje de paso se define como la diferencia de potencial eléctrico producida en una superficie, que puede experimentar un individuo con los pies al existir una separación de un metro aproximadamente, sin estar en contacto con ninguna otra superficie que se encuentre conectada a tierra, como se observa en la **Figura 9** [7].

Los umbrales permitidos para este voltaje generalmente son mayores que los de la tensión de toque.



**Figura 9.** Voltajes de toque y de paso  
**Fuente:** Elaboración propia [10]

### **2.2.5. Resistividad del terreno**

Se trata de una propiedad intrínseca a cualquier material para oponerse a la circulación de corriente. La medición de resistividad del terreno implica realizarlo a una determinada profundidad, la que se obtiene de manera indirecta al ubicar las varillas del telurómetro a una determinada distancia.

La resistividad de un mismo terreno puede verse alterada a lo largo del año ante diversos factores que modifican las condiciones de suelo entre las cuales encontramos:

#### **2.2.5.1. Tipología**

La composición natural del suelo puede afectar la resistencia de este, si el suelo contiene arcilla, rocas o arena tendrá diferente resistividad por lo general un suelo seco tiene una resistividad alta. De este apartado también podríamos clasificar a los suelos como homogéneos y heterogéneos.

Suelos Homogéneos: Son aquellos que en toda su extensión tienen con propiedades uniformes, por lo tanto, su resistividad es constante a diferentes profundidades. Estos suelos ayudan al diseño e implementación de mallas a tierra.

Suelos Heterogéneos: Estos presentan variaciones en sus propiedades, por lo que su resistividad cambia a distintas profundidades debido a los diferentes materiales que lo componen, en este tipo de suelos se utilizan electrodos pasivos para mejorar la resistividad y favorecer el diseño de mallas a tierra.

#### **2.2.5.2. Humedad**

El factor que más influye en la resistividad de suelos, entre mayor contenido de humedad disponga el terreno, mayor será la conductividad debido a que el agua actúa como un conductor eléctrico.

#### **2.2.5.3. Temperatura**

La resistividad del terreno se ve influenciada por la temperatura del ambiente, a medida que disminuye o se acerca al punto de congelación hace que la resistividad se incremente.

#### 2.2.5.4. Salinidad

La presencia de sales minerales naturales en el suelo ayuda significativamente en la conductividad eléctrica, disminuyendo la resistividad del terreno, es por esta razón que en algunos terrenos secos de alta resistividad se realiza una mezcla de agua con sales minerales.

#### 2.2.5.5. Compactación del suelo

Si el terreno no se encuentra bien compactado y existen pequeños espacios por donde pueda circular aire la resistividad aumenta, mientras más compactado se encuentre el terreno la resistividad será baja.

#### 2.2.5.6. Estratificación

Estudia la composición de un terreno y sus características, muchas veces el suelo no es uniforme por sus diferentes capas, por lo general este estudio se realiza en terrenos heterogéneos, a mayor profundidad se obtiene menor resistividad debido a la presencia de sales minerales y humedad [8].

A continuación, en la **Tabla 3** se muestran valores para diversos tipos de suelos.

**Tabla 3:** Resistividad de diferentes tipos de suelo

Tipo de Suelo	Resistividad en $\Omega.m$
Pantanosos	$\pm 3$ hasta 30
Limo	20 hasta 100
Humus	10 hasta 150
Turba Húmeda	5 hasta 100
Arcilla Plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 hasta 200
Margas del Jurásico	30 hasta 40
Arena arcillosa	50 hasta 500

Arena sílice	200 hasta 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 hasta 5000
Suelo pedregoso desnudo	1500 hasta 3000
Calizas blandas	100 hasta 300
Calizas compactas	1000 hasta 5000
Calizas agrietadas	500 hasta 1000
Pizarras	50 hasta 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1500 hasta 10000
Granito y gres muy alterado	100 hasta 600

Nota: H. Sanz [11]

## 2.2.6. Métodos de medición

Para recopilar los valores de resistividad del terreno se utiliza un equipo llamado telurómetro, el cual contiene terminales para inyectar corriente y voltaje, incluyen carretes de cable generalmente de 14 AWG y electrodos para ser hincados en el suelo.

### 2.2.6.1. Método de Wenner

Este procedimiento se lo conoce también como el método de los 4 puntos y es uno de los métodos más utilizados para la medición de resistividad, consiste en insertar 4 electrodos alineados en el suelo, manteniendo una distancia equidistante ( $a$ ) con una misma profundidad ( $b$ ), según se detalla en la **Figura 10**.

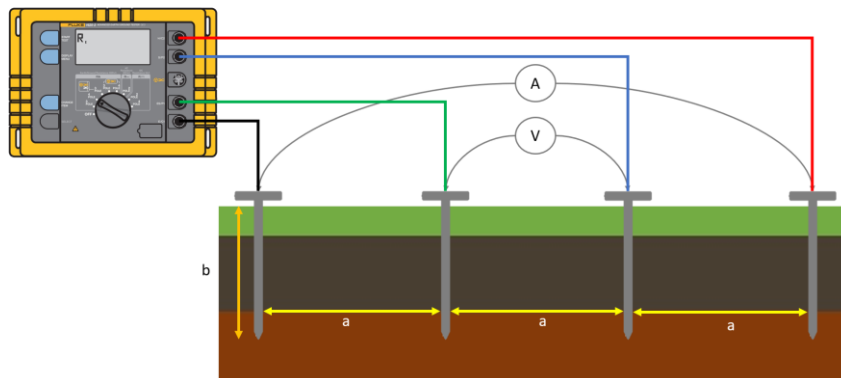


Figura 10. Medición de resistividad (Wenner)

Fuente: Elaboración propia

El telurómetro inyecta corriente en baja frecuencia en los electrodos externos y al mismo tiempo mide el voltaje en los electrodos internos, de esta manera se calcula la resistencia aparente del suelo mediante la ley de Ohm  $R = \frac{V}{I}$ . El valor obtenido permite realizar el cálculo de la resistividad mediante la ecuación siguiente: [10]

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

Donde:

$\rho$  = Resistividad aparente del suelo [ $\Omega \cdot m$ ]

$a$  = Distancia entre electrodos [ $m$ ]

$R$  = Resistencia aparente del suelo [ $\Omega$ ]

$b$  = Profundidad de los electrodos [ $m$ ]

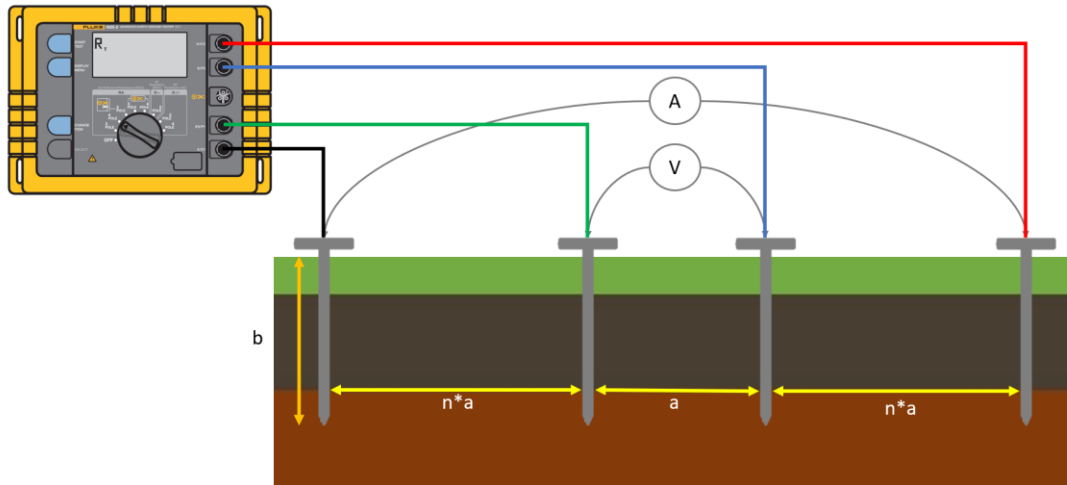
La ecuación 2 se puede simplificar siempre y cuando cumpla la condición de que la separación de electrodos ( $a$ ) sea mucho mayor que la profundidad de enterramiento de estos ( $b$ ) en proporción 20:1, quedando de la siguiente manera: [12]

$$\rho = 4\pi a R \quad (3)$$

### 2.2.6.2. Método de Schlumberger

Es una técnica variante del método Wenner, donde se emplean los mismos 4 electrodos con la diferencia que los electrodos centrales que miden el voltaje no cambian su separación ( $a$ ), mientras

que los exteriores cambian a distancias múltiples ( $n \cdot a$ ) de la distancia central, según se ilustra en la **Figura 11** [13].



**Figura 11.** Medición de resistividad (Schlumberger)  
Fuente: Elaboración propia

Este método se diferencia del método Wenner por la capacidad para determinar la resistividad del terreno a distintas profundidades, con una menor cantidad de mediciones, se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\rho = 2\pi R(n + 1)na \quad (4)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad aparente del suelo [ $\Omega \cdot m$ ]

$R$  = Resistencia aparente del suelo [ $\Omega$ ]

$a$  = Distancia entre electrodos [ $m$ ]

$n$  = Número de medición

## **2.3. Descargas Atmosféricas**

Las descargas atmosféricas o conocidos coloquialmente como rayos son un fenómeno natural variante en el tiempo, donde las condiciones de tormentas y a pesar de los avances tecnológicos no hay una forma de predecirlos. Sin embargo, existen formas de prevenirlos, evitando de esta manera los daños potencialmente peligrosos para personas e instalaciones. El fenómeno sucede debido a la ionización del aire, en donde las nubes acumulan cargas que generan un campo eléctrico fuerte respecto de otra nube o bien respecto del plano de tierra. Posteriormente se produce una descarga, el rayo mismo que libera energía en forma de corriente al romperse la rigidez dieléctrica, que se la puede ver en forma de luz y sonido.

### **2.3.1. Sobretensiones transitorias**

Las sobretensiones transitorias son aumentos bruscos y extremos de voltaje, con picos que pueden llegar a valores de kilovoltios (kV) y durar apenas unos microsegundos. Estas descargas pueden originarse por diversos factores, como el impacto directo de rayos en pararrayos o líneas eléctricas, o por campos electromagnéticos generados por las descargas, los cuales se inducen en los conductores metálicos. Las líneas exteriores, especialmente las de mayor longitud, son las más vulnerables a este tipo de fenómenos.

### **2.3.2. Sobretensiones permanentes**

Las sobretensiones permanentes, ya sean continuas o temporales, consisten en aumentos de voltaje que superan más del 20% el valor nominal de la red eléctrica y que se mantiene durante varios ciclos o de forma constante. Estos fenómenos suceden debido a la descompensación de fases, que se producen generalmente por rupturas o problemas en el conductor neutro, así como por fallas en los centros de transformación. Las instalaciones eléctricas son especialmente vulnerables a este tipo de sobretensiones, ya que su prolongación puede dañar dispositivos eléctricos y electrónicos conectados, reduciendo su vida útil. Además, estas elevaciones de voltaje también producen sobrecalentamiento que derivan en daños irreparables o, en casos extremos, incendios [14].

### 2.3.3. Niveles de protección

Según la IEC 62305, se establecen cuatro diferentes niveles para conocer el grado de protección necesario contra descargas atmosféricas, los cuales se basan en las pérdidas que pueden generar, los niveles son:

- **Nivel 1:** Indica los casos más graves de pérdidas patrimoniales, por ejemplo, en el caso de industrias de materiales explosivos, donde incluso con sistemas de protección, el daño puede afectar hasta a las estructuras colindantes.
- **Nivel 2:** También implica pérdidas patrimoniales, pero sin peligro para estructuras cercanas, siendo un ejemplo los estadios, museos y teatros, en donde los daños pueden llegar a ser cuantificables.
- **Nivel 3:** Está enfocado en pérdidas de uso cotidiano, como en edificios residenciales, comerciales o industriales pequeños, dentro de este tipo se pueden encontrar 3 subclases las cuales son:
  - **Protección Primaria:** Uso de sistemas de tierra, pararrayos y estructuras de blindaje.
  - **Protección Secundaria:** Relacionada con la protección eléctrica de equipos.
  - **Protección Terciaria:** Protección específica de redes de datos y componentes electrónicos.
- **Nivel 4:** Construcciones de limitada ocupación humana, construidas en base de materiales no inflamables, como andamios o depósitos para materiales no combustibles.

En la **Tabla 4** se puede observar un ejemplo de las estructuras más comunes y su respectivo nivel de protección.

**Tabla 4:** Estructura, efectos y nivel de protección recomendado

Estructuras Comunes	Efectos de las Tormentas Eléctricas	Nivel de Protección Recomendado
Residencias	Daño a instalaciones eléctricas, y componentes materiales de una estructura. Daño producido a objetos expuestos al rayo o a su trayectoria al suelo.	III o IV
Granja	Riesgo de incendio y potenciales de paso. Riesgo por pérdida de suministro eléctrico, afectando ventilación y suministro de alimentos.	II o III
Tanques de agua elevados (metálicos o de concreto con elementos metálicos salientes)	Daño limitado a objetos expuestos al rayo o su paso a tierra; daños a los equipos de control del flujo de agua.	III
Edificios de servicios (aseguradoras, aeropuertos, centros comerciales, etc.)	Daño en instalaciones eléctricas y pánico. Fallas en sistemas de control (alarmas). Pérdida de sistemas de comunicación fallas de ordenadores y pérdida de información.	II
Hospitales, asilos y reclusorios	Falla de equipos médicos. Daño a instalaciones eléctricas. Fallas en dispositivos de control. Pérdida de información y enlaces de comunicación.	I o II
Industria (máquinas, herramientas, manufactura, etc.)	Efectos diversos según el contenido, con riesgo desde inaceptables hasta pérdida de producción	I o II
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de obras culturales irremplazables	II
Edificios de telecomunicaciones	Interrupciones y pérdida de datos, equipos dañados y costos elevados por fallas en el servicio.	I o II

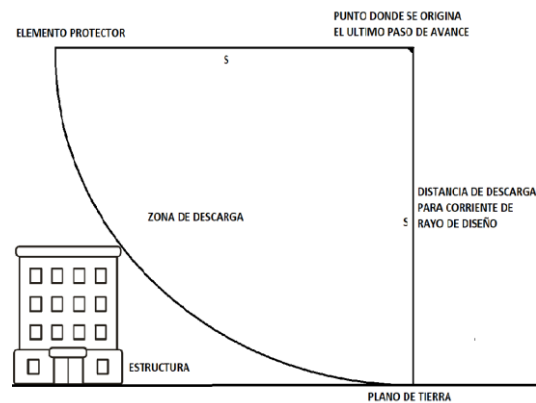
Nota: Huaira [15]

## 2.3.4. Métodos de protección

### 2.3.4.1. Esfera rodante

Este método usa la correlación entre la intensidad de corriente del rayo y la distancia de impacto para encontrar la zona de descarga, que es el espacio que puede alcanzar el rayo. Se rota una esfera imaginaria de radio R, correspondiente a la corriente pico del diseño, como se muestra en la **Figura**

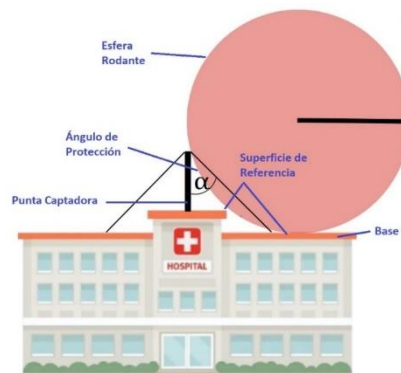
12, sobre la superficie a proteger. La esfera se apoya en puntas Franklin, cables de guarda u objetos metálicos aterrizados, delimitando la Zona Protectora de la RTA. Si un elemento de la estructura entra dentro de esta zona, estará expuesta a descargas atmosféricas. El diseño protege contra rayos con corrientes pico iguales o menores a la de diseño, pero deja zonas vulnerables frente a descargas de mayor magnitud. Por esta razón, se debe seleccionar un valor mínimo de corriente pico basado en el tipo de estructura a proteger [12].



**Figura 12.** Sistema de protección con corriente pico igual al diseño  
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.3.4.2. Angulo de protección

Este método representa una variación de la modelación del método electro-geométrico, lo cual implica un cambio en el ángulo producido por una esfera, cuando una parte de la línea se segmenta en la esfera y genera un área de igual magnitud como se visualiza en la **Figura 13**.



**Figura 13.** Angulo de protección con una esfera rodante  
**Fuente:** Elaboración propia

Este método se emplea en edificaciones con cubiertas inclinadas o estructuras simétricas. El ángulo se determina en función de la altura de la edificación donde se ubica la punta de captación. De esta forma se diseña el parámetro de tal manera que la punta de captación forma el área de protección en figura de cono, la punta captadora es el vértice y junto a la estructura forman altura desde la superficie del suelo, el ángulo de protección forma la generatriz del cono.

### **2.3.5. Pararrayos**

Los pararrayos están diseñados para proteger áreas específicas al desviar de forma segura la energía de los rayos, ya que, aunque no se pueden detener las descargas, es posible derivar su energía a tierra. Estos sistemas deben cumplir tres funciones principales: capturar el rayo en la zona específica, conducir la energía hacia tierra mediante el uso de conductores con impedancia baja para desviar la energía mediante un sistema de electrodos, considerando que la resistividad del suelo no es uniforme y que para minimizar diferencias de potencial se emplean mallas con electrodos múltiples conectados. Existen diversos tipos de pararrayos, cada uno con características y aplicaciones específicas, que han evolucionado desde los primeros diseños hasta los modelos actuales [16].

#### **2.3.5.1. Pararrayos tipo franklin**

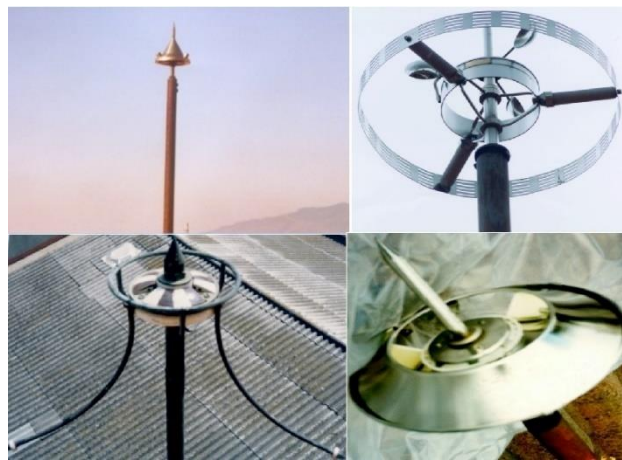
El dispositivo se compone de una barra de hierro con una punta de cobre o platino, se coloca en la parte más alta de la estructura que se busca proteger y conectada a tierra mediante un cable como se observa en la **Figura 14**. Se considera como el primer pararrayos de su tipo, el mecanismo se basa en crear un campo eléctrico entre la nube y la tierra durante una tormenta, lo que genera cargas eléctricas que se conectan en la punta del pararrayos. Este fenómeno, conocido como efecto corona, genera una ionización natural que produce un canal conductor para facilitar la descarga del rayo, la cual protege una zona cuyo radio es equivalente a la altura del pararrayos desde el nivel del suelo hasta su punta.



**Figura 14.** Pararrayos de tipo franklin  
**Fuente:** Cenergía [17]

### 2.3.5.2. Pararrayos Radioactivo

Los pararrayos radioactivos que se observan en la **Figura 15**, pueden cubrir un radio de protección de más de 100m debido a su adición de sales radioactivas. Sin embargo, estudios realizados en 1962 por los científicos Müller, Hillerban y H. Baatz concluyeron que estos pararrayos no cumplían con el radio de seguridad establecido y generaban un riesgo de radiación para la salud. Por esta razón, a partir de 1985 se comenzó a desmontar este tipo de dispositivos.



**Figura 15.** Modelos de pararrayos radioactivos  
**Fuente:** Catálogo pararrayos [18]

### 2.3.5.3. Pararrayo con dispositivo de cebado

Tras el fracaso de los pararrayos radioactivos, se desarrollaron durante la década de los 80 otro tipo con dispositivo de cebado (PDC) que se observan en la **Figura 16**, los cuales, según sus fabricantes, emiten un trazador ascendente para captar y derivar las descargas eléctricas a tierra de forma

segura. Regulados por normativas internacionales como la UNE 21-186 y la NFC 17-102, los PDC destacan por su eficacia del 100%, nivel de protección muy alto, resistencia al paso de descarga sin pérdida de propiedades tras cada impacto, y no requieren fuente de alimentación externa. Este tipo de pararrayos se clasifican en piezoeléctricos, electrónicos y mecánicos o puros.



**Figura 16.** Pararrayo PDC  
Fuente: Ingesco [19]

#### 2.3.5.4. Pararrayo Stream

El pararrayo Stream, ver la **Figura 17**, incorpora un dispositivo de cebado de última generación que reduce el tiempo de cebado, aumentando así la velocidad, efectividad y ampliando su radio de protección. Se activa ante el aumento del campo eléctrico durante una tormenta, acumulando carga antes de la descarga atmosférica y liberándola en forma de impulsos de alta tensión que ionizan el aire para dirigir la descarga al pararrayos. Este dispositivo es altamente eficiente, ya que solo actúa en presencia de descargas atmosféricas reales, sin generar descargas falsas, no opone resistencia a la descarga y conserva las propiedades técnicas después de cada impacto.



**Figura 17.** Pararrayo Stream  
Fuente: Ingesco [19]

### **3. Normativa**

#### **3.1. IEEE 80 2000**

Dentro de esta normativa se mencionan los principios para diseñar sistemas de puesta a tierra seguros y confiables, a manera general sin abarcar todas las posibles situaciones en las que aplica este tipo de sistema. En esta norma se mencionan los aspectos clave dentro del diseño, siendo el primero la resistividad del suelo, que debe medirse in situ, ya que depende de factores como composición, contenido de agua, temperatura y profundidad. Estos valores influyen directamente en la capacidad del sistema para despejar la corriente de tierra.

Posteriormente se indica que se debe seleccionar los materiales conductores, los cuales deben ser resistentes a la corrosión y con dimensiones adecuadas para garantizar su durabilidad. Se requiere la sección transversal del conductor y analizar las tensiones de paso y de toque, que son niveles máximos que una persona puede tolerar sin riesgo. La norma IEEE establece que estos valores deben calcularse de acuerdo con el peso de una persona, asegurando el cumplimiento de los estándares de seguridad del sistema.

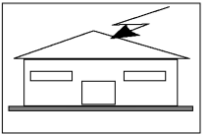
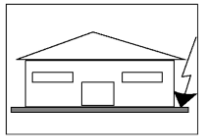
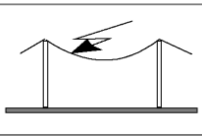
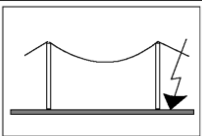
Por último, dentro del diseño preliminar muestra la definición de un conductor que rodee el área, la ubicación de los electrodos y establecer la corriente máxima para evitar sobredimensionamientos. Un sistema está correctamente diseñado cuando tiene una resistencia de sistema baja y los voltajes de paso y toque se encuentren dentro y por debajo de los niveles admisibles. Si estos requisitos se cumplen, el diseño se considera completo y funcional para proteger personal y equipos conectados [20].

#### **3.2. IEC 62305**

La International Electrotechnical Commission (IEC) es la encargada de la normalización sobre campos eléctricos, electrónicos y tecnologías relacionadas. La norma IEC 62305, establece principios, metodologías de diseño y medidas de protección contra rayos, dividiéndose en cuatro

partes: principios generales, evaluación de riesgos, protección de estructuras y personas, y protección de sistemas eléctricos y electrónicos [21].

Con respecto a los rayos o descargas eléctricas atmosféricas, se las divide de acuerdo con el impacto directo o cercano de estructuras, las cuales causan daños como lesiones a seres vivos, daños físicos y fallos internos, ver **Figura 18**. La normativa clasifica las fuentes de impacto en descargas directas o cercanas a estructuras y líneas conectadas, y establece medidas de protección para mitigar estos daños.

Punto de impacto		Fuente del daño	Tipo de daño	Tipo de pérdida
En la estructura		S1	D1 D2 D3	L1, L4** L1, L2, L3, L4 L1*, L2, L4
Cerca de la estructura		S2	D3	L1*, L2, L4
Servicio conectado a la estructura		S3	D1 D2 D3	L1, L4** L1, L2, L3, L4 L1*, L2, L4
Cerca del servicio		S4	D3	L1*, L2, L4

\* Solamente para estructuras con riesgo de explosión y para hospitales o estructuras análogas en las que el fallo de los sistemas internos pone en peligro la vida humana inmediatamente.  
\*\* Solamente en el caso de pérdida de animales.

**Figura 18.** Relación entre fuentes de impactos de rayo según la IEC 62305

**Fuente:** IEC 62305-1 [22]

Esta normativa también identifica las pérdidas resultantes de estos daños: pérdida de vidas humanas, servicios públicos, patrimonios culturales y de valor económico. La prioridad está en reducir las pérdidas de carácter social, como L1, L2 y L3, mediante sistemas de protección adecuados y una metodología de cálculo de riesgos. Este permite evaluar si el riesgo asociado a una estructura supera los valores de tolerancia establecidos, asegurando una mitigación efectiva de los impactos y preservando tanto la seguridad humana como los bienes materiales y culturales [21].

### **3.3. NTE INEN 2260 2010**

La siguiente normativa establece las necesidades técnicas y de seguridad para diseñar, construir, operar o reformar instalaciones receptoras de gases combustibles en contextos residenciales, comerciales e industriales. Esto incluye las exigencias para los equipos que consumen gas, sus conexiones y condiciones de puesta en marcha. El diseño de las instalaciones debe garantizar un flujo adecuado de gas, considerando aspectos como la naturaleza del gas (GLP o gas natural), poder calorífico, densidad, presiones, caudal, presencia de condensados y el medio externo. Además, debe incluir dispositivos específicos para la evacuación de condensados y prever factores de simultaneidad en la operación. La accesibilidad para reparaciones, la limitación de presión en las tuberías internas y la calificación de los soldadores son criterios fundamentales.

Las instalaciones también deben cumplir requisitos específicos para la ubicación de estaciones de GLP y sistemas eléctricos, asegurando materiales resistentes al fuego, ventilación adecuada y parámetros de seguridad para emergencias. Las edificaciones destinadas a estas estaciones deben ser de una sola planta, con construcción ligera y pisos no absorbentes, mientras que las puertas deben abrir hacia el exterior y ser manipulables sin llaves. Toda instalación eléctrica tiene que estar sellada contra explosiones, con pulsadores centralizados y fácil acceso. Además, las estaciones clasificadas como A-4, A-5 y E-3 deben contar con iluminación suficiente para garantizar operatividad y circulación segura, especialmente durante la noche [23].

## 4. Marco Metodológico

Para empezar con el diseño se debe tomar en cuenta diversas variables requeridas para conseguir un proceso secuencial que permita obtener el cálculo más preciso cumpliendo con los requisitos del sistema de protección a tierra considerando la protección a personas y equipos. En cuanto a los principales datos requeridos se consideran los siguientes:

- Área de estudio
- Resistividad del terreno
- Corriente de falla
- Tiempo de duración de falla

### 4.1. Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo es “El Centro de Distribución de Gas – Tambillo”, mismo que se encuentra localizado en la provincia de Pichincha, cantón Mejía en el km 8 de la Panamericana Sur (Av. Pedro Vicente Maldonado). Su área está conformada por un galpón en forma de trapecio visto desde la parte superior y otro galpón más pequeño de forma rectangular, un área de estacionamiento para camiones, y un área total aproximada de 1931,89 m<sup>2</sup>.



**Figura 19.** Área de estudio del Centro de Distribución de Gas - Tambillo  
**Fuente:** Elaboración propia [24]

Dentro del Centro de Distribución, se seleccionó el área de terreno que se encuentra frente al galpón pequeño, como se muestra en la **Figura 19**, debido a que esta plaza no se encuentra adoquinada y cerca de ella se encuentra un pequeño riachuelo como se muestra en la fotografía del **Anexo 2**.

#### 4.2. Mediciones del Terreno

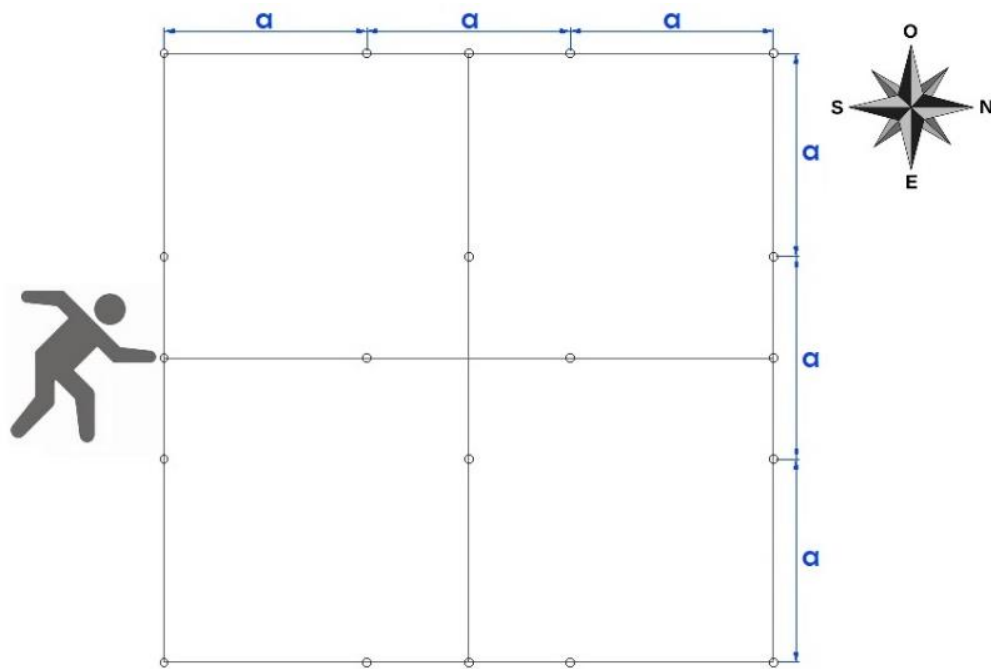
Para obtener la resistencia de tierra y después la resistividad del terreno con el método Wenner, se debe utilizar el instrumento especializado en mediciones de tierra, el cual es proporcionado por la Universidad, y corresponde a un telurómetro Fluke 1625-2 que se observa en la **Figura 20**, un equipo compacto, resistente y fácil de usar que cuenta con la precisión necesaria para realizar nuestro estudio [25].



**Figura 20.** Telurómetro FLUKE 1625-2  
**Fuente:** Fluke [25]

El procedimiento consiste en obtener las distancias (a) en donde se procederá a enterrar las picas, posteriormente se conecta los cables al medidor de tierra Fluke 1625-2 en donde se coloca el selector del equipo en la función de “*Earth/Ground Resistance 300k $\Omega$  - 4 Pole*” y se presiona “*Start Test*”. Se realiza el registro de los resultados que se visualizan en la pantalla, se apaga el instrumento y se cambia nuevamente las distancias entre picas. El proceso se repite hasta conseguir los registros necesarios para el estudio.

Para obtener un esquema de estudio con la resistividad del terreno, se realizan mediciones de tal manera que se forme un cuadrado y con una dirección hacia los puntos cardinales tal y como se muestra en la **Figura 21**. Estas medidas se ajustaron con distancias de separación de picas (a) de 1, 2 y 3 metros, mientras que la profundidad de pica (b) se ajusta a 0,20 metros.



**Figura 21.** Esquema utilizado para las mediciones de resistencia de tierra  
**Fuente:** Elaboración propia

Una vez realizadas las mediciones respectivas con el instrumento como se observa en el **Anexo 3**, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas en la **Tabla 5**, obteniendo un total de 18 mediciones de resistencia en el terreno de estudio.

**Tabla 5:** Resultados obtenidos de resistencia de tierra

Distancia entre picas [m]	Norte – Sur Superior [Ω]	Este – Oeste Superior [Ω]	Norte – Sur Inferior [Ω]	Este – Oeste Inferior [Ω]	Norte – Sur Transversal [Ω]	Este – Oeste Transversal [Ω]
1	21,28	25,38	24,63	25,59	20,14	26,52
2	14,10	16,24	14,53	16,29	14,46	11,17
3	10,34	10,51	10,28	10,52	13,34	9,13

**Fuente:** Elaboración propia

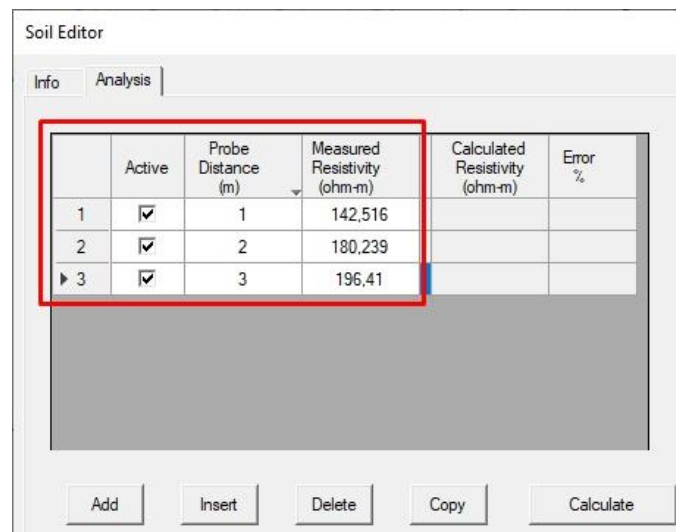
Con los resultados entregados por el equipo de medición y la ecuación 2, se calcula la resistividad del terreno, una vez identificadas las variables, se realiza el reemplazo respectivo donde se alcanzan los resultados de la **Tabla 6**, los cuales permitirán estimar la resistividad exacta del terreno con sus profundidades mediante el uso del software ETAP 19.0.1.

**Tabla 6:** Valores obtenidos de resistividad de terreno

Espacio entre picas [m]	Norte – Sur Superior [ $\Omega.m$ ]	Este – Oeste Superior [ $\Omega.m$ ]	Norte – Sur Inferior [ $\Omega.m$ ]	Este – Oeste Inferior [ $\Omega.m$ ]	Norte – Sur Transversal [ $\Omega.m$ ]	Este – Oeste Transversal [ $\Omega.m$ ]
1	142,516	169,974	164,951	171,380	134,881	177,609
2	180,239	207,594	185,735	208,233	184,841	142,785
3	196,410	199,639	195,270	199,829	253,395	173,426

**Fuente:** Elaboración propia

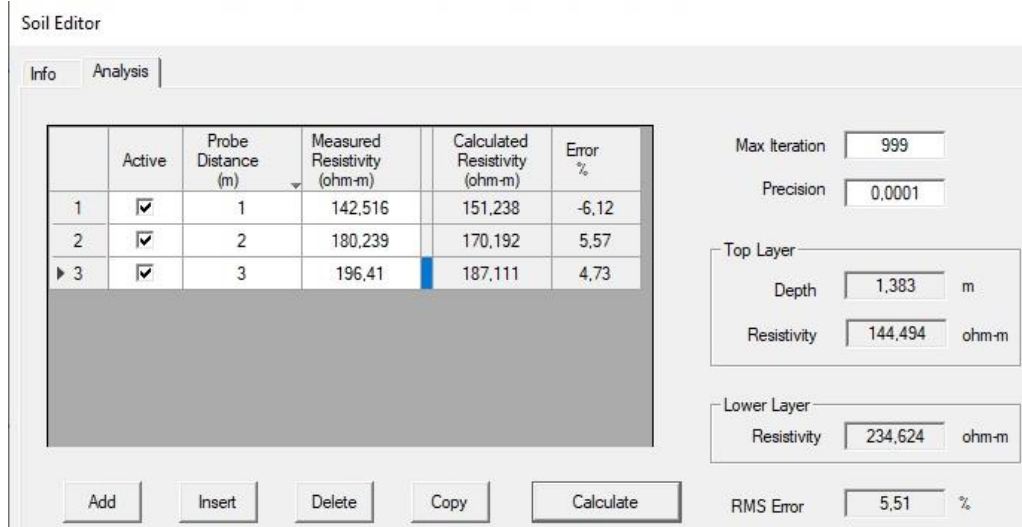
Con los valores registrados en la **Tabla 6**, se determina que el terreno analizado es no homogéneo debido a la diferencia existente de resistividad entre los diferentes espacios donde se realizan las mediciones.



**Figura 22.** Ingreso de datos de separación y resistividad calculada

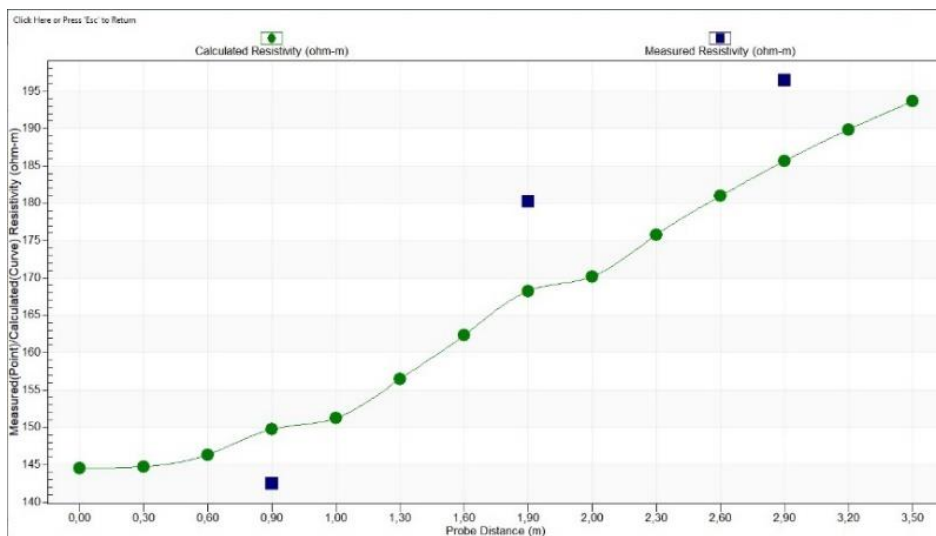
**Fuente:** Elaboración propia

Con el software ETAP se consigue la profundidad de las capas que forman el terreno. Una vez ingresados los datos se presiona el botón “Calculate”, como se visualiza en la **Figura 22**, por consiguiente, el software muestra los valores de profundidad y resistividad de las capas del sitio de estudio, así como el error entre la resistividad medida y calculada como se mira en la **Figura 23**.



**Figura 23.** Resultados de ETAP 19.0.1 sobre resistividad en 2 capas de terreno  
**Fuente:** Elaboración propia

Adicionalmente, el programa entrega información adicional, la cual se observa en la **Figura 24**, una gráfica en donde se indica la relación de error existente entre la resistividad calculada con los datos medidos por medio del telurómetro y la estimada por medio de ETAP con valores que varían entre 4% y 6%.



**Figura 24.** Gráfica de error entre la resistividad medida y calculada  
**Fuente:** Elaboración propia

Este proceso se lo realiza con todos los valores anteriormente estimados para cada uno de los lados donde se realiza las mediciones. Los resultados obtenidos de la resistividad en 2 capas se las

observa en la **Tabla 7**, mientras que los valores dados por el software ETAP se visualiza en el **Anexo 4** y el **Anexo 5**.

**Tabla 7:** Resultados totales de resistividad en 2 capas

Valores de resistividad	Norte – Sur Superior	Este - Oeste Superior	Norte – Sur Inferior	Este – Oeste Inferior	Norte – Sur Transversal	Este – Oeste Transversal
Altura Capa Superior [m]	1,383	1,565	1,6	1,569	1,126	1,536
Resistividad Capa Superior [ $\Omega.m$ ]	144,494	179,384	170,304	180,507	120,388	165,078
Resistividad Capa Inferior [ $\Omega.m$ ]	234,624	210,691	201,606	210,471	371,4	161,19

**Fuente:** Elaboración propia

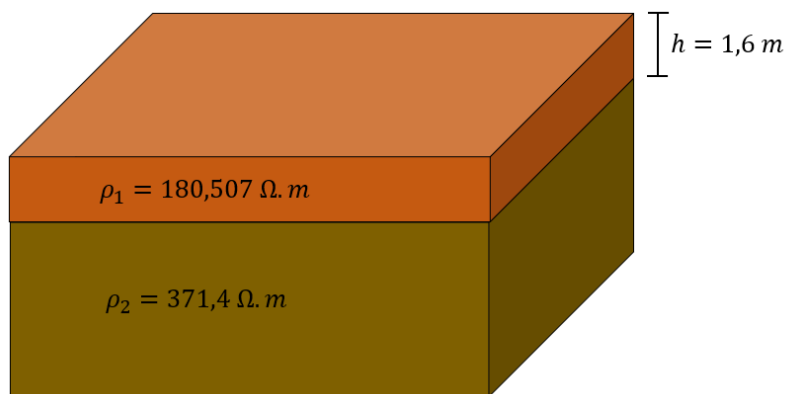
La norma IEEE 81 en su sección 8.1.2. recomienda diseñar el sistema a tierra tomando en cuenta las más desfavorables condiciones, para ello, de los valores presentados en la **Tabla 7**, se seleccionan los resultados más elevados de resistividad y la altura de capa superior con mayor espesor, con el fin de asegurar la confiabilidad del sistema en los peores escenarios [26].

$$\text{Altura de capa superior} = 1,6 [m]$$

$$\text{Resistividad capa superior} = 180,507 [\Omega . m]$$

$$\text{Resistividad capa inferior} = 371,4 [\Omega . m]$$

Posteriormente, con los valores de resistividad del terreno en las dos capas como se observa en la **Figura 25** se realiza la simulación en software ETAP para verificar el sistema completo.



**Figura 25.** Esquema de resistividad a 2 capas con los resultados obtenidos  
**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3. Corriente de falla

Magnitud máxima de corriente que puede soportar la malla diseñada para evitar los daños producidos en personas y/o equipos; y se genera considerando la corriente de corto circuito. Para obtener este valor se puede realizar un estudio de carga de los equipos que posee la instalación o de acuerdo con las características técnicas del transformador que alimenta el Centro de Distribución, datos mostrados en **Tabla 8**.

**Tabla 8:** Datos Técnicos del transformador que alimenta el CDGT

Descripción	Valor
Número de transformador	167569
Alimentador / Fase conexión	Santa Rosa 37A / A
Potencia [kVA]	25
Voltaje operación primario [kV]	13,16
Voltaje operación secundario [V]	240
Impedancia [%]	2,5

**Fuente:** WEBGIS EEQ [27]

Con estos valores se calcula la corriente de cortocircuito monofásica de acuerdo con las características y conexiones del transformador mediante la siguiente ecuación: [28]

$$I_{CC1\phi} = \frac{S_n}{V_{ns} * \%Z_{transf}} \quad (5)$$

Donde:

$I_{CC}$  Corriente de cortocircuito

$S_n$  Potencia nominal del transformador

$V_{ns}$  Voltaje nominal en devanado secundario

$Z_{transf}$  Impedancia porcentual del transformador [29].

Reemplazando los valores se obtiene la corriente de falla para el cálculo de malla a tierra como se muestra a continuación:

$$I_{CC1\phi} = \frac{25K}{240 * 2,5\%}$$

$$I_{CC1\phi} = 4166,67 A = 4,167 kA$$

## 5. Sistema de Protección a Tierra

Una vez determinado las variables de resistividad del terreno, área de protección, corriente de falla, tiempo de disipación y tamaño de los galpones, se procede a diseñar la malla según la norma IEEE Std. 80-2000, cuyo procedimiento se detalla en los siguientes enunciados.

### 5.1. Calibre del Conductor

El primer punto en el diseño es determinar el calibre mínimo del conductor, que por normativa se requiere utilizar un cable de cobre #4 AWG, sin embargo, se debe realizar el cálculo debido a que no siempre cumple con esta condición, existe la necesidad de utilizar un conductor de mayor calibre si la corriente de falla y el tiempo así lo determinan, el cálculo se lo realiza mediante la siguiente ecuación:

$$S_{min_{kcmil}} = \frac{1000 * I_{cc}[KVA] * \sqrt{tf}}{\sqrt{9,64 * \frac{c * g}{\rho_{cu} * 0,004} * \ln(1 + 0,004 * (Tg - Ti))}} \quad (6)$$

Donde:

$c$  Calor específico del cobre con un valor fijo de  $0,092 \text{ cal}/(g * ^\circ C)$

$g$  Peso específico del cobre determinado en  $8,96 \text{ g}/(\text{cm}^3)$

$\rho_{cu}$  Resistividad del cobre definido en  $0,0171 (\Omega * \text{mm}^2)/\text{m}$

$Tg$  Temperatura de fundición del cobre  $450 ^\circ C$

$T_i$  Temperatura inicial del cobre al ambiente 35 °C

$$S_{min_{kcmil}} = \frac{1000 * 4,167 * \sqrt{0,2}}{\sqrt{9,64 * \frac{0.092 * 8.96}{0.0171 * 0,004} * \ln(1 + 0,004 * (450 - 35))}}$$

$$S_{min_{kcmil}} = 5,528 \text{ kcmil}$$

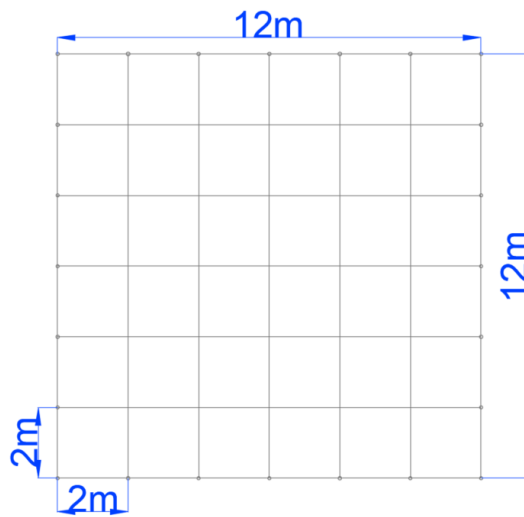
Para poder interpretar el resultado en unidades de medida conocidas localmente se utiliza la conversión  $kcmil = 0,5068 \text{ mm}^2$  obteniendo como resultado:

$$S_{min} = 5,528 * 0,5068 = 2,80 \text{ mm}^2$$

Una vez obtenida la sección transversal mínima que requiere el sistema diseñado se realiza la comparación con los calibres comerciales disponibles en el mercado según la tabla que se observa en el **Anexo 6**, del cual se identifica que el calibre necesario es el AWG #8, sin embargo, al ser mayor que al indicado por la normativa se selecciona el AWG #4 el cual posee una sección de 21,2 mm<sup>2</sup> tal y como se planteó en un principio.

## 5.2. Diseño preliminar

Se realiza el diseño preliminar para verificar que el sistema cumple con las condiciones de protección para el voltaje de paso y toque, por lo cual se realiza el diagrama experimental, como se observa en la **Figura 26**, un cuadrado de 12 metros x 12 metros con divisiones de 2 metros, lo cual forma 36 cuadrados pequeños. Adicionalmente se usan 24 electrodos tipo varilla de longitud 1,2 metros en las esquinas y en las intersecciones del perímetro de los conductores a una profundidad de 0,6 metros.



**Figura 26.** Diagrama preliminar de malla  
**Fuente:** Elaboración propia

Con el diseño preliminar se obtienen los valores correspondientes al perímetro de malla, longitud de malla y sección de malla, mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$Lp = (2Dx) + (2Dy) \quad (7)$$

$$Lm = (DxT_{cx}) + (DyT_{cy}) \quad (8)$$

$$Sm = Dx Dy \quad (9)$$

Donde:

$Lp$     Perímetro de malla

$Lm$     Longitud de malla

$Sm$  Sección de malla

$Dx$  Distancia en eje x

$Dy$  Distancia en eje y

$T_{cx}$  Total de conductores en eje x

$T_{cy}$  Total de conductores en eje y

Reemplazando los valores con respecto al esquema del diseño preliminar se obtiene:

$$Lp = (2(12m)) + (2(12m)) = 48m$$

$$Lm = 7(12m) + 7(12m) = 168m$$

$$Sm = 12m * 12m = 144m^2$$

### 5.3. Coeficientes de Schwarz – K1 y K2

El siguiente paso en el diseño es determinar los coeficientes K1 y K2, en donde el proceso para obtenerlos es similar. Se debe seleccionar mediante el análisis de 3 curvas características, siendo la curva que más se acerque a la profundidad en la que se enterró la malla según el diseño, es decir 0,6 m. Se toma la ecuación definida para determinar el coeficiente el cual corresponde a una relación entre el ancho y el largo del diseño preliminar.

Se determina la profundidad en base a las siguientes fórmulas, que se usan para determinar la altura de sección de malla anteriormente. Las ecuaciones especificadas para cada curva características son:

$$\text{Curva A} \quad h = 0 \quad (10)$$

$$\text{Curva B} \quad h = \frac{1}{10}\sqrt{Sm} \quad (11)$$

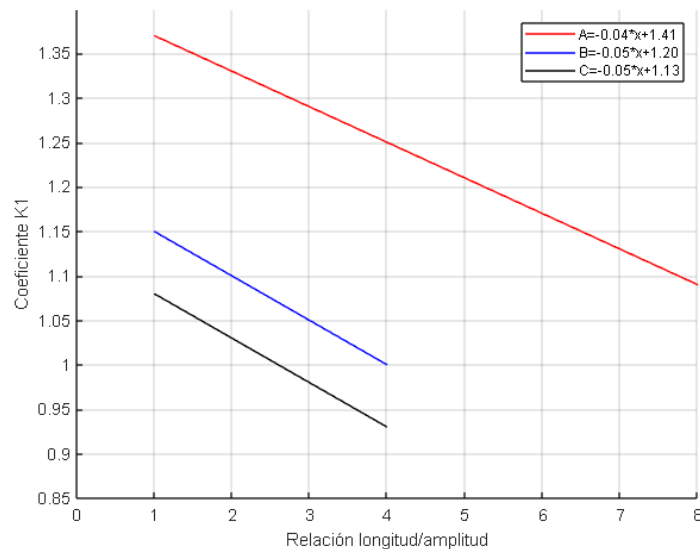
$$\text{Curva C} \quad h = \frac{1}{6}\sqrt{Sm} \quad (12)$$

Reemplazando la sección de malla obtenemos los siguientes resultados:

$$h_B = \frac{\sqrt{144m^2}}{10} = \frac{12m}{10} = 1,2m$$

$$h_C = \frac{\sqrt{144m^2}}{6} = \frac{12m}{6} = 2m$$

Los valores de  $h$  obtenidos sobrepasan la profundidad establecida en el diseño, por lo que considera el valor más cercano a los 0,6 metros que corresponde a la curva B, calculando de esta manera los coeficientes K1 y K2 con las ecuaciones definidas.

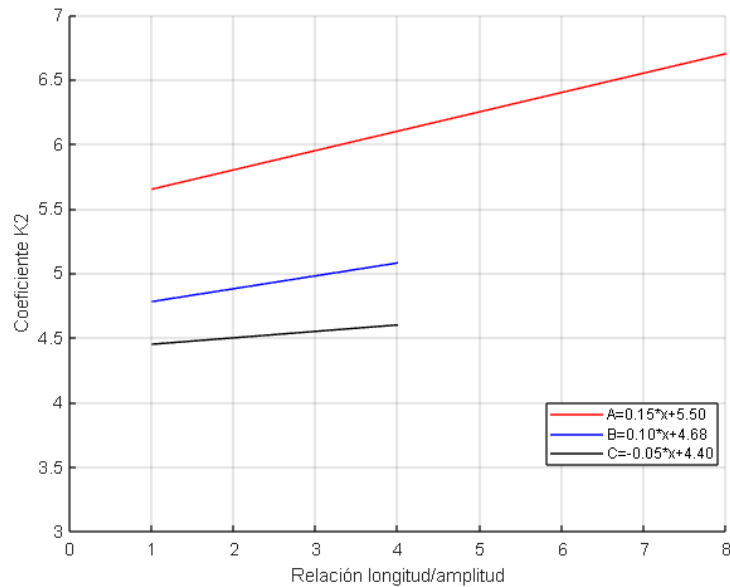


**Figura 27.** Curvas y ecuaciones características para coeficiente K1  
**Fuente:** Elaboración propia

El coeficiente K1 (**Figura 27**) se relaciona con la resistencia de la placa rectangular de la malla, mientras el coeficiente K2 (**Figura 28**) a la resistencia del lazo perimetral de la malla [30].

$$K1_B = -0.05(1) + 1.20 = 1.15$$

$$K2_B = 0.10(1) + 4.68 = 4.78$$



**Figura 28.** Curvas y ecuaciones características para coeficientes K2  
**Fuente:** Elaboración propia

#### 5.4. Resistencia del Sistema

Con los valores obtenidos en la etapa de diseño se procede a calcular la resistencia del sistema de protección a tierra mediante la siguiente ecuación:

$$R_s = \frac{R_m R_v - R_{mt}^2}{R_m + R_v - (2)R_{mt}} \quad (13)$$

Donde:

$R_s$  Resistencia del sistema

$R_m$  Resistencia de malla

$R_v$  Resistencia de varilla

$R_{mt}$  Resistencia mutua entre componentes

Para calcular la Resistencia de malla se usa la siguiente ecuación, que permite utilizar la resistividad de la capa superior correspondiente a la profundidad de la malla a tierra:

$$R_m = \frac{\rho_{CS}}{\pi * Lm} * \left[ \ln \left( \frac{2 * Lm}{\sqrt{\phi_c * h}} \right) + \frac{K1 * Lm}{\sqrt{Sm}} - K2 \right] \quad (14)$$

Donde:

$\rho_{CS}$  Resistividad del terreno capa superior

$\phi_c$  Diámetro del conductor

De cada uno de los términos presentados en la ecuación se desconoce el diámetro del conductor ( $\phi_c$ ), el cual se obtiene mediante la expresión para la sección del conductor con la fórmula:

$$S = \pi r^2 \quad (15)$$

Despejando los términos de radio y multiplicándolos por el doble, resulta en el diámetro correspondiente al conductor, en donde se obtiene un valor de 5,195 mm de los cuales se transforma en metros tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$2r = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (16)$$

$$\phi_c = 2 \sqrt{\frac{21,2}{\pi}} = 5,195 \text{ mm} = 0,005195 \text{ m}$$

Se reemplaza el valor en la ecuación para obtener la siguiente resistencia de malla:

$$Rm = \frac{180,507}{168\pi} \left[ \ln \left( \frac{2(168)}{\sqrt{0,005195(0,6)}} \right) + \frac{(1,15)168}{\sqrt{144}} - 4,78 \right]$$

$$Rm = 6,848 [\Omega]$$

Se procede a calcular el valor de la resistencia de varilla en base a las características de las escogidas en el diseño mediante la siguiente expresión:

$$Rv = \frac{\rho_a}{2\pi n_R L_R} \left( \ln \left( \frac{8L_R}{\phi_v} \right) - 1 + \frac{2k1L_R}{\sqrt{Sm}} * (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right) \quad (17)$$

Donde:

$\rho_a$  Resistividad aparente del terreno

$n_R$  Número de varillas

$L_R$  Longitud de las varillas

$\phi_v$  Diámetro de las varillas

Los valores desconocidos de la ecuación corresponden a la resistividad aparente del suelo ( $\rho_a$ ), siendo los datos de las varillas  $n_R = 24$ ,  $L_R = 1,2m$  y  $\phi_v = \frac{5}{8}pulg$ . Para encontrar la resistividad aparente se utiliza la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{L_R \rho_{CS} \rho_{CI}}{\rho_{CI}(H - h) + \rho_{CS}(L_R + h - H)} \quad (18)$$

Donde:

$\rho_{CI}$  Resistividad del terreno capa inferior.

$H$  Altura de la capa superior.

Al reemplazar los datos calculados en la ecuación de resistividad del terreno se obtiene la resistividad aparente, considerando las dos capas calculadas y contempladas para el diseño del sistema, de la siguiente manera:

$$\rho_a = \frac{(1,2)(180,507)(371,4)}{371,4(1,6 - 0,6) + 180,507(1,2 + 0,6 - 1,6)}$$

$$\rho_a = 197,419 \Omega \cdot m$$

Con el valor obtenido se determina la resistencia de las varillas:

$$Rv = \frac{197,419}{2\pi(24)(1,2)} \left( \ln \left( \frac{(1,2)8}{\frac{5}{8} * 0.0252} \right) - 1 + \frac{2(1,15)(1,2)}{\sqrt{144}} (\sqrt{24} - 1)^2 \right)$$

$$Rv = 9,72 [\Omega]$$

Con los datos de resistencia de malla y de varillas, se determina la resistencia mutua producida entre los componentes mediante la siguiente ecuación:

$$Rmt = \frac{\rho_a}{\pi(Lm)} \left( \ln \left( \frac{2(Lm)}{L_R} \right) + \frac{k1(Lm)}{\sqrt{Sm}} - k2 + 1 \right) \quad (19)$$

$$Rmt = \frac{197,419}{\pi(168)} \left( \ln \left( \frac{2(168)}{1,2} \right) + \frac{1,15(168)}{\sqrt{144}} - 4,78 + 1 \right)$$

$$Rmt = 6,716 [\Omega]$$

Finalmente se reemplaza los valores calculados para obtener la resistencia total del sistema:

$$Rs = \frac{6,848(9,72) - 6,716^2}{6,848 + 9,72 - 2(6,716)}$$

$$Rs = 6,842 [\Omega]$$

Este valor se debe comparar con una resistencia objetivo que se fija y escoge de acuerdo con el **Anexo 7** para que este dimensionada con el propósito de proteger al personal del CDGT de una descarga electrostática, en donde:

$$Rs \leq Rs_{obj} \quad (20)$$

$$6,842 \leq 25$$

Con esta comparación se determina que el sistema diseñado cumple con los requisitos de protección mínima.

### 5.5. Voltaje de Toque y Paso

Para calcular estas magnitudes se considera una constante  $k$  que depende de la masa de los individuos expuestos a la descarga, siendo el más utilizado el valor de 50 kg y 70 kg. En el presente estudio se toma en cuenta el valor correspondiente de 0,116 perteneciente a los 50 kg como se observa en la **Tabla 9** por ser un valor adecuado para el contexto de Latinoamérica donde la complejidad física suele ser menor, con este valor garantizamos mayor confiabilidad en el diseño.

**Tabla 9:** Valores para calcular Tensiones de Toque y Paso

Variables	Caso 1	Caso 2
Peso	70 kg	50 kg
Factor k	0,157	0,116
Resistencia corporal [RB]	1000 $\Omega$	
Tiempo de Falla [tF]	0,2 s	

**Fuente:** Elaboración propia

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$IB = \frac{K}{\sqrt{tF}} \quad (21)$$

$$V_{touch} = IB(RB + 1,5(\rho T)) \quad (22)$$

$$V_{step} = IB(RB + 6(\rho T)) \quad (23)$$

Obteniendo como resultado:

$$IB = \frac{0,116}{\sqrt{0,2}} = 0,259 [A]$$

$$V_{touch} = 0,259(1000 + 1,5(270,199)) = 336,195 [V]$$

$$V_{step} = 0,259(1000 + 6(270,199)) = 566,627 [V]$$

Para calcular las tensiones  $V_m$  y  $V_s$ , se usarán parámetros propios del diseño los cuales se observan en la **Tabla 10**.

**Tabla 10:** Valores obtenidos para diseño de malla

Variable	Descripción	Valor [Unidad]
$S_m$	Superficie de Malla	144 [m <sup>2</sup> ]
$L_p$	Perímetro	48 [m]
$L_s$	Largo de la Malla	12 [m]
$L_y$	Ancho de la Malla	12 [m]
$L_m$	Longitud Total de Malla	168 [m]
$h_0$	Profundidad de Referencia	1 [m]
$h$	Profundidad de Malla	0,6 [m]
$n_R$	Número de Varillas	24
$D$	Distancia entre conductores	2 [m]
$L_r$	Longitud de Electrodo	1,2 [m]

**Fuente:** Elaboración propia

Las ecuaciones para calcular los voltajes  $V_m$  y  $V_s$  se presentan de la siguiente forma:

$$V_m = \frac{\rho_T(k_m)(k_i)(I_f)}{L_m} \quad (24)$$

$$V_s = \frac{\rho_T(k_s)(k_i)(I_f)}{L_s} \quad (25)$$

Donde:

$k_m$  Factor de espacio en la tensión de contacto

$k_{ii}$	Factor de Potencia
$k_s$	Factor de espacio en la tensión de paso
$k_h$	Factor de Ponderación Correctivo
$k_i$	Factor Correctivo de la geometría de malla
$L_m$	Longitud Efectiva en Voltaje de Contacto
$L_s$	Longitud Efectiva en Voltaje de Paso
$n$	Número Efectivo de Conductores

Las expresiones matemáticas para calcular estos factores son las siguientes:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{D^2}{16(h)(\phi_c)} \right) + \frac{(D + 2(h))^2}{8(D)(\phi_c)} - \frac{h}{4(\phi_c)} \right) + \frac{k_{ii}}{k_h} \left( \ln \left( \frac{8}{\pi(2(n-1))} \right) \right) \quad (26)$$

$$k_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right) \quad (27)$$

$$k_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{Cuando posee varillas en las esquinas o perímetro} \\ \frac{1}{(2 * n)^{\frac{2}{n}}} & \text{Cuando no posee varillas en esquinas o perímetro} \end{cases} \quad (28)$$



Reemplazando los datos obtenidos en las ecuaciones (27) y (28) se obtiene:

$$V_m = 84,70 [V]$$

$$V_s = 4,55 [V]$$

Con esto se observa que  $84,70 \leq 336,195$  y que  $4,55 \leq 566,627$ , cumpliendo las condiciones que establece la normativa.

## 6. Sistema de Apantallamiento Contra Descargas Atmosféricas

Para diseñar este sistema de protección se necesita determinar el nivel de protección necesario para las estructuras el cual se determina según la norma IEC 62305-1 y del cual se detalla a continuación.

Como primer punto se requiere las dimensiones de las estructuras que componen los galpones de almacenamiento de GLP y cuyos valores se muestran en el **Anexo 9** y se asignará un nivel de protección II debido a la criticidad de la empresa y de los cuales se podrá obtener los datos que intervienen en las ecuaciones preliminares.

### 6.1. Área Colectora Equivalente ( $A_e$ )

Se define como el número de eventos con peligro que pueden ocurrir en la estructura, se determina en función del área de captación y los rayos cercanos. En estructuras independientes, el área se representa por  $A_e$ , corresponde a la zona contenida por intersección del gradiente de 1:3 y el área que está en la parte superior del edificio, contacta y la envuelve en el área de protección.

$$A_e = (L + A) + (6 + H(L + A)) + (9(\pi)(H^2)) \quad (34)$$

Donde:

$A$  Ancho de edificación = 17 [m]

$L$  Largo de edificación = 20 [m]

$H$  Altura de edificación = 7 [m]

$$A_e = (20 + 17) + (6 + 7 * (20 + 17)) + (9 * \pi * 7^2)$$

$$A_e = 1687,442$$

Como se observa en el **Anexo 2** y **Anexo 9**, la edificación se conforma por 2 estructuras independientes, pero con relativa cercanía entre sí, se considera para este análisis las dimensiones de la estructura de mayor tamaño.

## 6.2. Densidad Anual de Rayos a Tierra ( $N_G$ )

Un aspecto fundamental es determinar la cantidad de rayos activos en la zona de análisis. Esta variable se define como la cantidad de rayos por km<sup>2</sup>/año. Las superficies con una mayor densidad de rayos como Ecuador tienen una mayor susceptibilidad. La correlación entre la densidad de rayos y la cantidad de tormentas al año se expresa de la siguiente manera:

$$N_G = 0,04(T_D^{1,25}) \quad (35)$$

Donde:

$T_D$  Número de Tormentas al año.

$N_G$  Densidad Anual de rayos a tierra.

Para determinar la cantidad de días con tormenta al año en el país se utiliza el mapa de nivel ceráunico que se observa en el **Anexo 12**, y del cual para la ubicación de este estudio se encuentra en 40 y 50 días de tormenta por año, para determinar la cantidad exacta vamos a utilizar los valores de los lugares cercanos al Centro de Distribución indicados en un estudio previo, los valores elegidos son:

**Tabla 11:** Niveles Isoceráunicos de lugares aledaños al CDGT

Sector	Latitud	Longitud	Nivel Isoceráunico	Distancia al CDGT
Machachi 1 - Porvenir	-0,55	-78,45	48,6955625	36,9 km
El Chaupi	-0,55	-78,75	45,8782188	27,2 km
E20 Alóag	-0,45	-78,65	44,4326667	23,5 km

Machachi 2 - Achocha	-0,55	-78,55	43,6380313	21,8 km
Aloasí	-0,55	-78,65	43,5513438	27 km
Machachi 3	-0,45	-78,55	43,0532708	10 km
Amaguaña	-0,35	-78,5	42,3475	10 km

Fuente: Zurita [31]

A partir de los niveles isocerámicos descritos en la **Tabla 11**, se determina un valor promedio aplicado en la ecuación 38, con lo que se obtiene como resultado:

$$N_G = 0,04(44,5137991^{(1,25)}) = 4,599157878 \left[ \frac{\text{descargas} \cdot \text{km}^2}{\text{año}} \right]$$

### 6.3. Número de eventos peligrosos al año ( $N_D$ )

La cantidad de eventos se asocia con  $N_G$ ,  $A_e$  y  $C_D$ , siendo el último el coeficiente ambiental que se muestra en el **Anexo 13**, el cual responde a la topografía del lugar de análisis y los elementos que posee el área colectora equivalente y como incluyen dentro del nivel de peligrosidad. Este valor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N_D = N_G * A_e * C_D * 10^{-6} \quad (36)$$

$$N_D = 4,599 * 1687,442 * 0,5 * 10^{-6} = 0,00388$$

### 6.4. Evaluación de la Probabilidad de Daños ( $P_A$ )

La probabilidad de daño a seres vivos por esta causa está ligado a los coeficientes  $P_{TA}$  y  $P_B$ , cuyos datos se observan en el **Anexo 14** y **Anexo 15**. La fórmula que determina esta probabilidad se representa por:

$$P_A = P_{TA}(P_B) \quad (37)$$

Donde:

$P_{TA}$  Valor que indica la reducción de la probabilidad de una descarga en la estructura = 1

$P_B$  Probabilidad de que se produzcan daños físicos = 1

$$P_A = 1$$

### 6.5. Cantidad de Pérdidas en la Estructura

Estos valores determinan el número esperado de pérdidas humanas y materiales en la estructura de análisis, cuyos factores se los observa en el **Anexo 16** y **Anexo 17** se representa por:

$$L_A = r_t(L_T) \quad (38)$$

$$L_B = r_p(r_f)(L_f) \quad (39)$$

Donde:

$L_A$  Pérdidas con respecto a lesiones de seres vivos = 0,0000001

$L_B$  Pérdidas con respecto a la estructura = 0,0000021

$r_t$  Factor de reducción de pérdidas de vidas humanas en función al suelo =  $10^{-5}$

$r_p$  Factor de reducción de pérdidas físicas con respecto a consecuencias de incendio = 0,5

$r_f$  Factor de reducción de pérdidas físicas por riesgo de incendio =  $10^{-5}$

$L_T$  Pérdida por lesiones de descarga eléctrica = 0,01

$L_F$  Pérdida por daños físicos = 0,42

## 6.6. Identificación de los componentes de riesgo

Este coeficiente se evalúa de acuerdo con los subcomponentes de riesgo, siendo cada uno de estos en función de la fuente y el tipo de daño. Se representa mediante la siguiente ecuación:

$$R_n = R_A + R_B \quad (40)$$

$$R_A = N_D * P_A * L_A \quad (41)$$

$$R_B = N_D * P_B * L_B \quad (42)$$

Donde:

$R_A$  Riesgo en seres humanos producto de un choque en la estructura

$R_B$  Riesgo en bienes materiales producto de un choque en la estructura

$$R_A = 0,388 * 10^{-9}$$

$$R_B = 8,148 * 10^{-9}$$

$$R_n = 3.161 * 10^{-9}$$

## 6.7. Nivel de Protección

De acuerdo con el **Anexo 16** en donde se muestra la referencia de  $R_T = 1 * 10^{-5}$ , este valor es menor que el obtenido en  $R_N$ ;  $R_N < R_T$ , por lo cual se considera que la estructura requiere un Nivel II de Protección, el cual tiene un rango de corriente pico que va entre 5kA a 150kA; con probabilidades de 97% para choques mayores a 5kA y del 98% para choques menores a 150kA.

## 6.8. Criterio de Selección de LPS

Para el diseño del sistema de apantallamiento se consideran efectos térmicos y explosivos de acuerdo con las características de la estructura y que consecuencia puede traer durante el impacto. De acuerdo con lo identificado en secciones anteriores se puede tener LPS Aislado o LPS No Aislado. Al contener dentro de la estructura gases altamente explosivos o combustibles que pueden provocar explosión se requiere la instalación de un LPS Aislado. En base a esto se realiza la descripción de cada uno de los componentes del sistema planteado.

## 6.9. Sistema de Canalización

El sistema de canalización para las líneas de bajada se coloca en ruta directa hacia el sistema de protección a tierra (SPAT), considerando espacios físicos de la estructura analizada para que la corriente producida por una descarga se reparta entre los conductores. Entre mayor sea la bajante la corriente que se conduce por este componente será menor lo que sumando al equipotencial del SPAT diseñado para sobretensiones permitirá que el sistema sea eficiente. Dentro de la norma se indica que las distancias de separación mínimas entre conductores para sistemas para garantizar el aislamiento se rigen en base la siguiente ecuación:

$$s = k_c * k_i * k_m * l \quad (43)$$

Donde:

$k_c$       Coeficiente del tipo de corriente

$k_i$       Coeficiente de aislamiento

$k_m$       Coeficiente del material

$l$         Longitud del conductor

Obteniendo como resultado:

$$s = 6m$$

Posteriormente se procede al cálculo del área mínima del conductor mediante la ecuación:

$$A = \frac{I_f * K_f * \sqrt{t_c}}{1,9710} \quad (44)$$

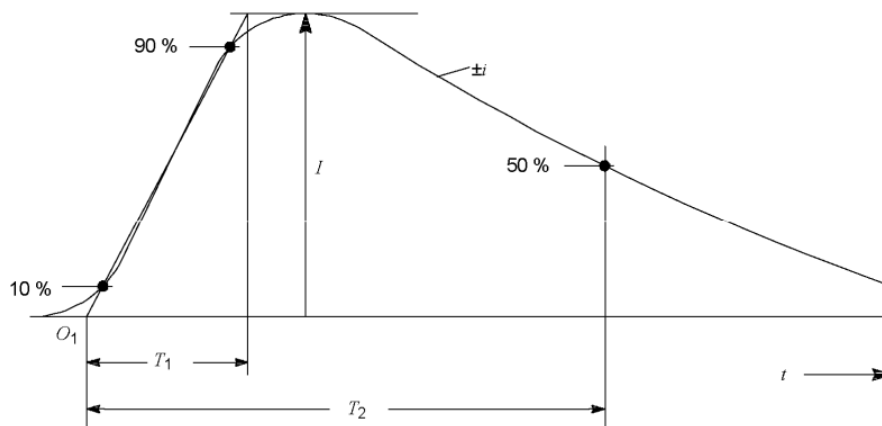
Donde:

$t_c$  Tiempo estimado de duración de un evento

$K_f$  Constante del conductor

$I_f$  Corriente de descarga máxima

En cuanto a la corriente de descarga máxima se la obtiene de los parámetros de nivel de protección que para este caso corresponde a un Nivel II con 150 kA, mientras que al considerar al cobre blanco como elemento conductor se tiene una constante de 7. Para el tiempo de duración de un evento la norma posee una referencia, como se visualiza en la **Figura 29**.



**Figura 29.** Parámetro establecido para una Descarga  
**Fuente:** IEC 62305-1 [22]

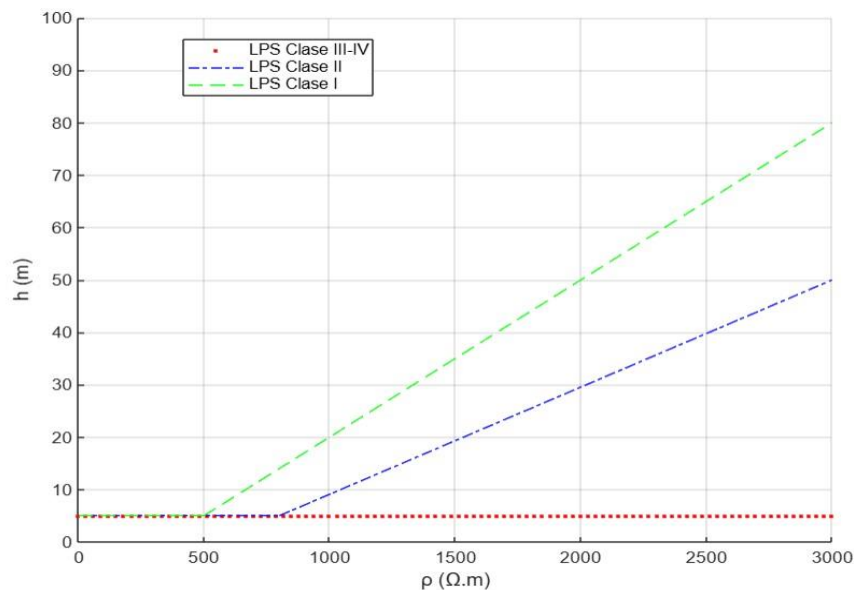
En base a esto se calcula el calibre del conductor:

$$A_{mm^2} = \frac{150 * 7 * \sqrt{350 * 10^{-6}}}{1,9740} = 9,95 \text{ mm}^2$$

La sección transversal del cálculo pertenece al conductor #6 AWG, pero se debe tener en cuenta la rigidez mecánica y se selecciona un conductor con mayor calibre como lo es el AWG 1/0.

### 6.10. Sistema de protección a tierra

Como se explica previamente el SPAT facilita una distribución eficiente y segura de las corrientes de descarga a tierra. Este sistema por normativa debe lograr una conexión de 10 ohmios o menor, considerando un arreglo de tipo B que es el que mejor se ajusta al proyecto tomando en cuenta el nivel de protección, resistividad del terreno y número de electrodos. Si se considera un tipo anillo el porcentaje que debe estar dentro de la tierra el electrodo, no puede ser menor al 80% de la extensión.



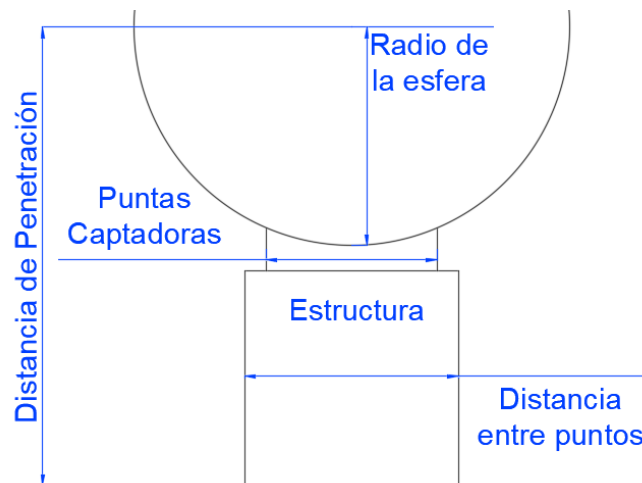
**Figura 30.** Longitud mínima de electrodo  
**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con lo que se observa en la **Figura 30**, la longitud del electrodo debe ser de al menos 5 metros al tener una resistividad menor a 230 [ $\Omega$ .m] y encontrarse clasificado dentro de un nivel protegido II. Se debe hincar 2 jabalinas de 2,4 m finalizando con una profundidad mínima de 0,5 m como se especifica dentro de la normativa.

### 6.11. Método de la esfera rodante

En este método se selecciona una punta denominada líder descendente el cual debe encontrarse en los puntos más altos de la estructura analizada tomando en cuenta que este punto debe ser el de mayor intensidad eléctrica para que la descarga no se dirija de manera accidental hacia algún punto dentro de la estructura. La cobertura que da la esfera corresponde a la rotación de esta a través de la estructura abarcando todos los posibles puntos de descarga.

En el diseño se utilizan puntas captadoras que mantienen la esfera lejos de la infraestructura y se procederá tomando en cuenta cada uno de los componentes que se presentan en la **Figura 31**.



**Figura 31.** Variables en el método de Esfera Rodante  
**Fuente:** Elaboración propia

Para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (45)$$

$$D = \sqrt{2 * P * R - P^2} \quad (46)$$

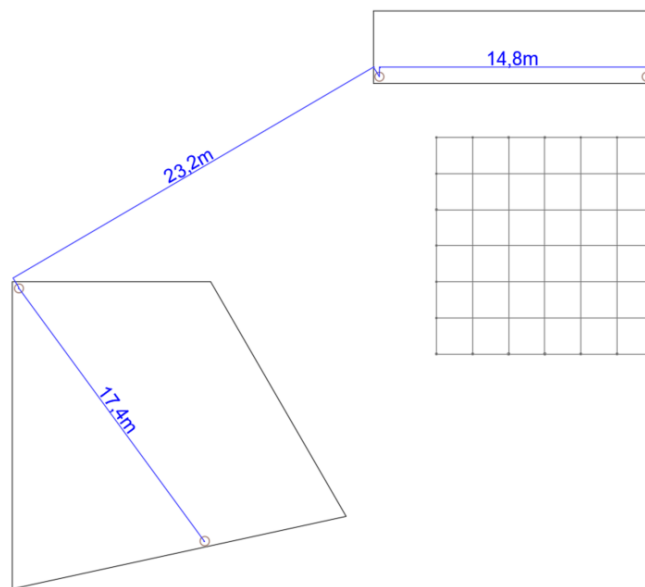
Donde:

$R$  Radio de la esfera rodante

$D$  Distancia entre punta captadoras

$P$  Distancia de penetración de la esfera rodante

El radio de la esfera rodante según la normativa debe ser de 30 metros, y para cubrir el área determinada por la estructura se requiere de 4 puntas captadoras de altura de 4 metros con una distancia de separación de 23,2 m tal y como se muestra en **Figura 32**.



**Figura 32.** Distancia entre Puntas Captadoras  
Fuente: Elaboración propia

Entonces se obtiene:

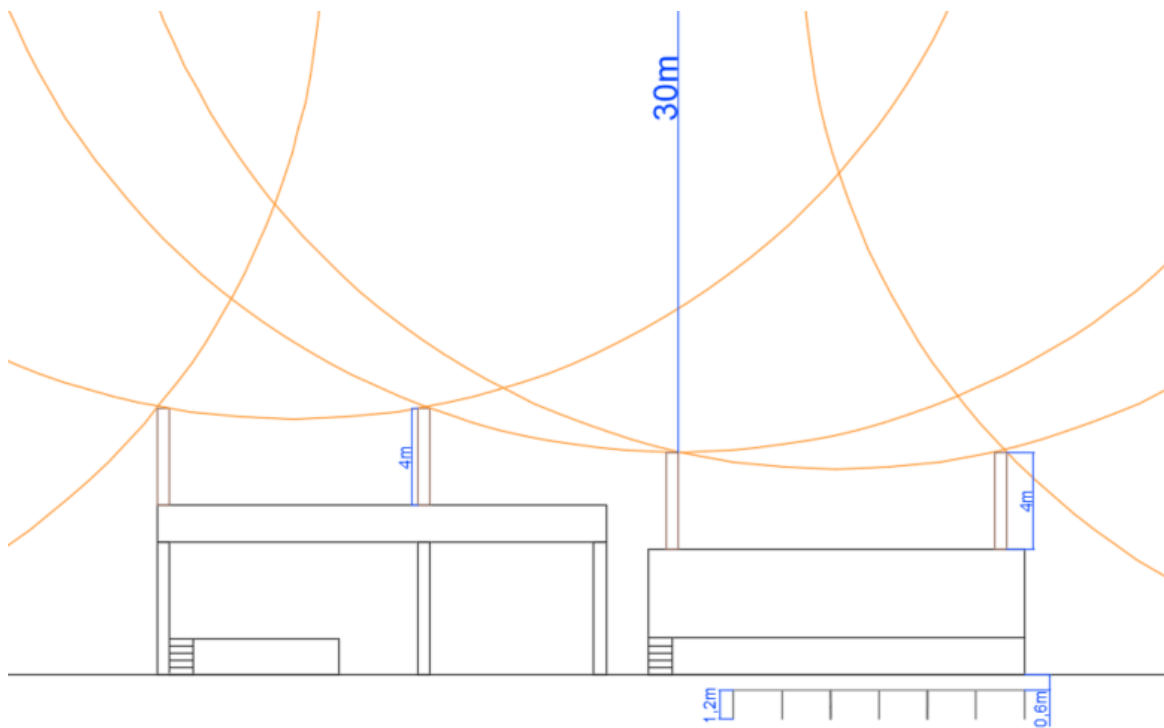
$$p = 30 - \sqrt{30^2 - \left(\frac{23,2}{2}\right)^2} = 2,33 \text{ m}$$

Donde:

$$p < 4 \text{ m}$$

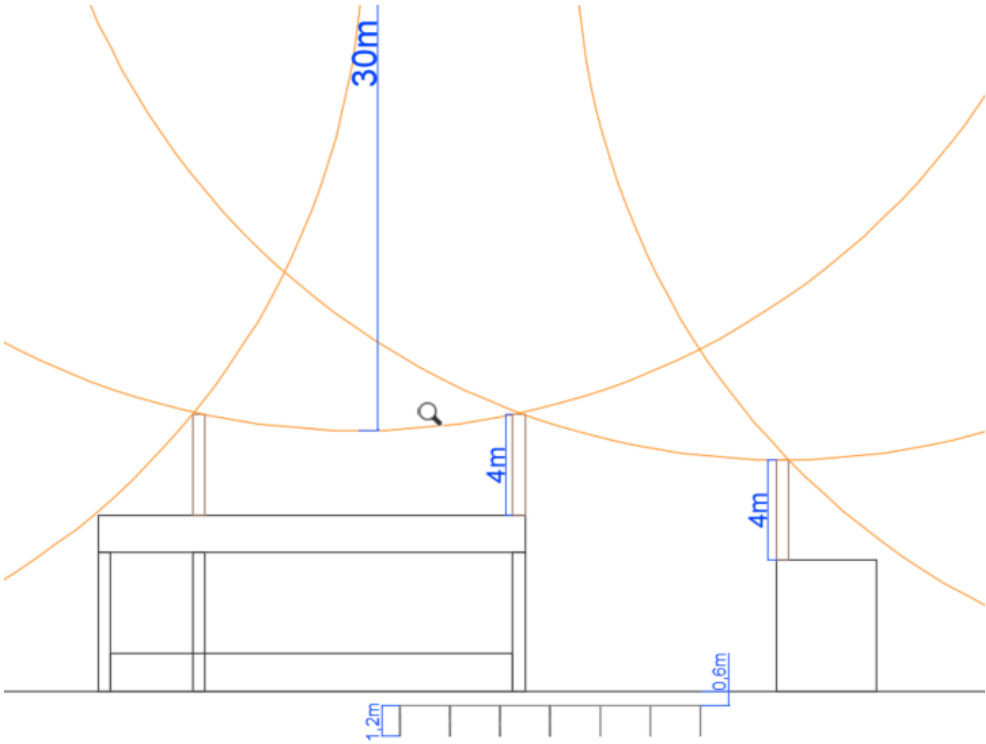
$$2,33 \text{ m} < 4 \text{ m}$$

De este análisis y observando la **Figura 33** y **Figura 34** se puede verificar que el diseño es correcto en donde la esfera en ningún punto alcanzable de la estructura se queda sin protección, reduciendo el riesgo de explosiones o daños debido al impacto de rayo.



**Figura 33.** Vista frontal del Diseño de Esfera Rodante planteado  
**Fuente:** Elaboración propia

En el **Anexo 10** se muestra la vista frontal y en el **Anexo 11** se muestran en vista lateral, todo el rango de protección proporcionado por las puntas captadoras en la edificación analizada. La representación de la esfera permite verificar el volumen de protección de la estructura, sin dejar zonas expuestas a rayos atmosféricos.



**Figura 34.** Vista lateral del diseño de Esfera Rodante planteado  
**Fuente:** Elaboración propia

## 7. Conclusiones

Tras la realización y análisis del presente proyecto técnico se llegó a las siguientes conclusiones:

Se midió la resistencia de tierra para calcular la resistividad del terreno. Se aplicó el método Wenner mediante un telurómetro Fluke 1625-2 registrando 18 mediciones que sirvieron para la estimación de la resistividad mediante el uso de software ETAP. Se obtuvo un valor de 180,507 [ $\Omega$ .m] para la primera capa y 371,4 [ $\Omega$ .m] para la segunda capa.

Para el diseño de la malla se utilizó la normativa IEEE Std. 80-2000 mediante la cual se estimó el uso de un conductor AWG #4 con 24 electrodos de tipo varilla, de longitud 1,2 metros situados en un área seleccionada de 144 m<sup>2</sup> y a una profundidad de 0,6 m. En base a este diseño se obtiene una resistencia del sistema de 6,842 [ $\Omega$ ] lo cual hace perfecta para la protección del personal al ser menor que los 25 [ $\Omega$ ] que indica la normativa del diseño.

Se realizó la estimación del voltaje de toque y voltaje de paso considerando un peso de 50 kg obteniendo como resultado un valor de Voltaje de Toque de 326,029 [V] y un valor de Voltaje de Paso de 608,116 [V]. Con esto se procedió a verificar el cumplimiento de estos parámetros bajo la normativa de diseño en donde ambos valores se encuentran en los rangos permitidos, garantizando la seguridad en cuanto a protección del personal se refiere.

Se realizó el diseño del sistema de apantallamiento contra descargas atmosféricas utilizando la normativa IEC-62305-1 considerando el área total del galpón como área colectora, con un valor de 1687,442 m<sup>2</sup> para posteriormente realizar la estimación de densidad anual de rayos tomando en cuenta que el Ecuador tiene gran susceptibilidad a tormentas y determinando el nivel isocerámico de 44,51 días obteniendo como resultado la cantidad de 4,599 [descargas\*km<sup>2</sup>] al año. En base a esto y a la identificación de componentes de riesgo se determinó que el sistema planteado requiere un nivel de protección II que soporta el rango de 5 a 150 kA.

Posteriormente se determinó el tipo de LPS requerido, que para este caso es aislado debido a la peligrosidad y alta flamabilidad de los tanques de gas. Tomando en cuenta esta consideración se realizó el diseño obteniendo una separación de bajantes de 6 metros mínimo con un conductor de calibre 1/0 y un sistema de tierra y 2 varillas de 2,4 metros a una profundidad mínima de 0,5 m.

Finalmente se utilizó el método de esfera rodante para establecer el área de protección de la edificación, para lo cual se escogió un radio de esfera de 30 metros tal y como indica la normativa para lugares con Nivel II de protección. Dentro del diseño se obtuvo una distancia entre las puntas de captación de 23,2 m a una altura de 4 m y con la ubicación de 4 de estos dispositivos, en donde se verificó que la distancia de penetración de la esfera se encuentra en los parámetros permitidos por la normativa y cubre la totalidad del área para la cual se diseñó.

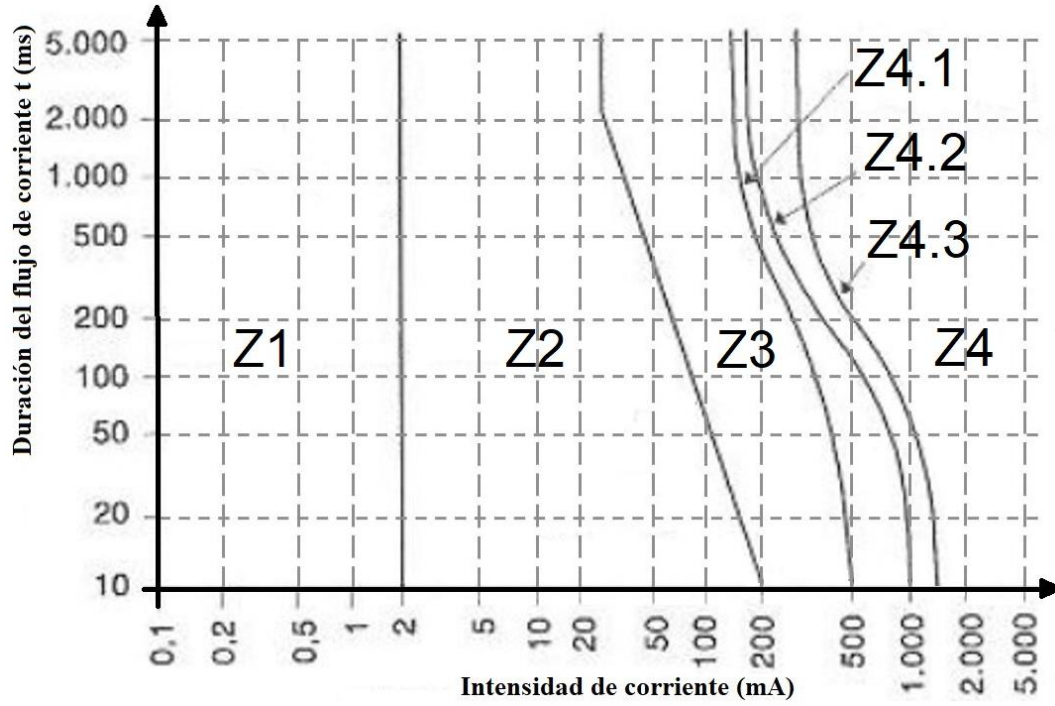
## 8. Bibliografía

- [1] “Google Maps.” <https://www.google.com/maps/@-0.2291619,-78.5092874>.
- [2] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, vol. 5, no. 1. México D.F., 2013.
- [3] H. S. Turner, “Human Responses to Electricity: A Literature Review,” p. 114, 1972.
- [4] L. Pérez Gabarda, “NTP 400 - Corriente eléctrica; efectos al atravesar el organismo humano,” *Minist. Trab. y asuntos Soc. España*, p. 9, 1993.
- [5] “IEC TS 60479-1 - Effects of current on human beings and livestock,” *Int. Electrotech. Comm.*, p. 140, 2016.
- [6] I. A. Villamarín Cobo and R. A. Orizondo Martínez, “Diseño de los Sistemas de Puesta a Tierra para protección de equipos eléctricos instalados y de protección contra Descargas Atmosféricas para las Instalaciones de la Empresa Royal Master Group,” Universidad Politécnica Salesiana, 2021
- [7] M. B. Mogollón Escobar, F. Ludeña, and P. Martínez, “Diseño Del Sistema De Puesta a Tierra Y Pararrayos Para El Edificio ‘Bloque De Aulas a Y B’ De La Escuela Politécnica Del Ejército,” Universidad Politécnica del Ejército, 2006.
- [8] V. G. Basante Gualpa and R. A. Orizondo Martínez, “Análisis de modelos de sistemas de puesta a tierra para diferentes electrodos y condiciones de suelos,” p. 38, 2019.
- [9] P. Díaz, *Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución.*, 1st ed., vol. 1. México, 2001.
- [10] I. of electrical an E. Engineers, “IEEE Std 80-2000 Guide for Safety in AC substation grounding,” 2000
- [11] H. Sanz, E. Duque, and S. Gómez, “Soil resistivity as a Function of frequency,” *Sci. Tech.*, vol. XVI, no. 44, pp. 1-6 p., 2010.
- [12] F. J. Rojas Caicedo and R. A. Orizondo Martínez, “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, Canton Cayambe,” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [13] J. R. Moya Piedra, W. B. Pilatasig Quispe, and M. A. León Segovia, “Dimensionamiento de la Malla de Puesta a Tierra para los Laboratorios de Alto Voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi,” Universidad Técnica de Cotopaxi, 2019.
- [14] R. L. Aguilera Balseca, H. S. Muñoz Hernández, and C. F. Chávez Córdova, “Diseño de Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas para Zona de Tanques de GLP,” 2024.
- [15] J. B. Huaira Curo and J. Colonio Llacua, “El Método Electrogeométrico en la Protección contra Sobretensiones por Descargas Atmosféricas en la Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.,” p. 117, 2021.
- [16] J. J. Salazar Paredes and D. G. Chani Ollachica, “Diseño del Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas para el Polideportivo y Pabellón S de la UCSM,” Universidad Católica de Santa María, 2018.

- [17] “PARARRAYOS FRANKLIN - Cenergia.” <https://cenergia.com.pe/pararrayos-tipo-franklin/>.
- [18] A. Rodríguez Montes, “Catálogo Pararrayos,” 2014.
- [19] Ingesco, “Catálogo de Productos INGESCO,” in *Pararrayos*, 2008, p. 20.
- [20] A. D. Paguay Gualotuña and P. E. Otero Valladares, “Diseño de sistemas de puesta a tierra utilizando electrodos químicos: utilización de un modelo matemático basado en ecuaciones de varillas para la inclusión de electrodos activos en el diseño de sistemas de puesta a tierra,” Escuela Politécnica Nacional, 2023.
- [21] J. A. Ramírez Páez, O. Florez, and A. Rojas Pion, “Diseño de un Sistema Integral de Protección Contra Rayos - SIPRA para una estación de transporte de hidrocarburos según la IEC 62305 2010 y NTC 4552 2023,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2024.
- [22] International Electrotechnical Commission, *CEI IEC 62305-1 Protección contra el Rayo: Principios Generales*. 2006.
- [23] “NTE INEN 2260 - Instalaciones de gases combustibles para uso residencial, comercial e industrial,” vol. 2260, 2010.
- [24] “Google Earth.”  
<https://earth.google.com/web/search/Parque+Central+de+Tambillo,+Tambillo/@-0.4073685,-78.54720801>.
- [25] “Medidores de resistencia de tierra Geo - Fluke 1623-2 y 1625-2”.
- [26] IEEE Power and Energy Society - Substations Committee, *IEEE Std. 81- Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System IEEE Power and Energy Society*, vol. 2012, no. December. 2012.
- [27] E. E. Quito, “WEBGIS.” <https://geoportal.eeq.com.ec/webgis/>
- [28] “Calculo de Cortocircuito eléctrico monofasico y trifasico.”  
<https://www.calculatorsconversion.com/es/calculo-cortocircuito-electrico-monofasico-trifasico/>.
- [29] ENEL, *ESPECIFICACIÓN TÉCNICA TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN AUTOPROTEGIDO HASTA 150 kVA TRIFÁSICO Y MONOFÁSICO*. 2002, pp. 1–19.
- [30] S. F. M. Sinchi, P. F. A. Quizhpi, and C. H. P. Guillen, “Calculation of the earth resistance of the union of two and three rods by modified Schwarz equations and field tests,” *2017 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2017*, vol. 2018-Janua, no. Ropec, pp. 1–6, 2018.
- [31] M. A. Zurita Álvarez and S. F. Varela Chamorro, “Mapa Isocerámico Georreferenciado para la Coordinación de Protecciones frente a Descargas Atmosféricas,” Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [32] Centelsa, “Conductores de Cobre Desnudo,” pp. 184–188.
- [33] J. S. Ramírez Castaño and E. A. Cano Plata, *Sistemas de puesta a tierra: diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Manizales, 2010.

## 9. Anexos

Anexo 1. Gráfica corriente (mA) vs tiempo (ms) en corriente directa




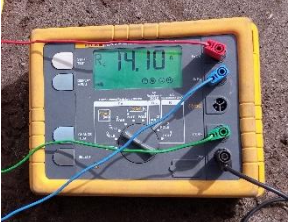















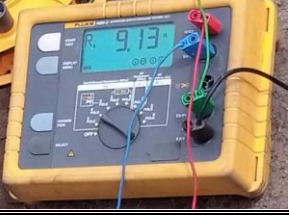
Fuente: NTP 400 [4]

Anexo 2. Área escogida para realizar el estudio de resistividad de suelo



Anexo 3. Resultados de la prueba de resistividad con el telurómetro

Tabla 12: Mediciones realizadas

Distancia entre picas	1m	2m	3m
Norte-Sur Superior [Ω]			
Este-Oeste Superior [Ω]			
Norte-Sur Inferior [Ω]			
Este-Oeste Inferior [Ω]			
Norte-Sur Transversal [Ω]			
Este-Oeste Transversal [Ω]			

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Resultados obtenidos en software

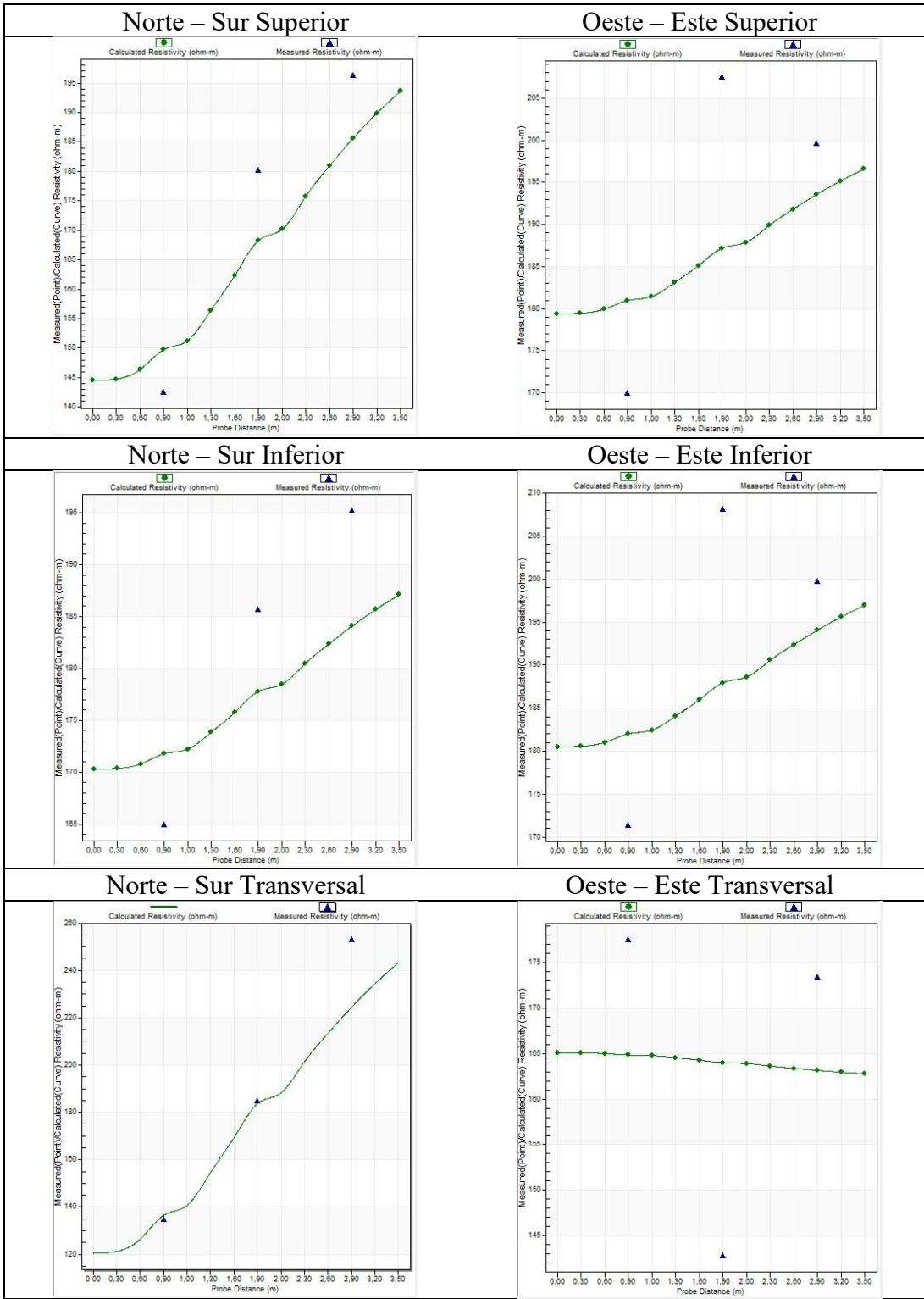
Tabla 13: Resultados en ETAP 19.0.1

Norte – Sur Superior	Oeste – Este Superior
<p>Top Layer</p> <p>Depth <input type="text" value="1,383"/> m</p> <p>Resistivity <input type="text" value="144,494"/> ohm-m</p> <p>Lower Layer</p> <p>Resistivity <input type="text" value="234,624"/> ohm-m</p>	<p>Top Layer</p> <p>Depth <input type="text" value="1,565"/> m</p> <p>Resistivity <input type="text" value="179,384"/> ohm-m</p> <p>Lower Layer</p> <p>Resistivity <input type="text" value="210,691"/> ohm-m</p>
Norte – Sur Inferior	Oeste – Este Inferior
<p>Top Layer</p> <p>Depth <input type="text" value="1,6"/> m</p> <p>Resistivity <input type="text" value="170,304"/> ohm-m</p> <p>Lower Layer</p> <p>Resistivity <input type="text" value="201,606"/> ohm-m</p>	<p>Top Layer</p> <p>Depth <input type="text" value="1,569"/> m</p> <p>Resistivity <input type="text" value="180,507"/> ohm-m</p> <p>Lower Layer</p> <p>Resistivity <input type="text" value="210,471"/> ohm-m</p>
Norte – Sur Transversal	Oeste – Este Transversal
<p>Top Layer</p> <p>Depth <input type="text" value="1,126"/> m</p> <p>Resistivity <input type="text" value="120,388"/> ohm-m</p> <p>Lower Layer</p> <p>Resistivity <input type="text" value="371,4"/> ohm-m</p>	<p>Top Layer</p> <p>Depth <input type="text" value="1,536"/> m</p> <p>Resistivity <input type="text" value="165,078"/> ohm-m</p> <p>Lower Layer</p> <p>Resistivity <input type="text" value="161,19"/> ohm-m</p>

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Grafica de error con ETAP 19.0.1

Tabla 14: Gráfica de error entre resistividad medida y calculada



Fuente: Elaboración propia

**Anexo 6.** Características de conductores

**Tabla 15:** Tabla de conductores comerciales

Cantidad de alambres	Calibre AWG / <u>kcmil</u>	Sección Nominal [mm <sup>2</sup> ]	Diámetro Alambre [mm]	Diámetro Cable [mm]	RMG [mm]	Peso Total aprox.
	8	8,36	1,23	3,70	1,34	76
	6	13,3	1,56	4,67	1,69	121
	4	21,2	1,96	5,88	2,14	192
	2	33,6	2,47	7,42	2,69	305
	1/0	53,5	1,89	9,47	3,59	485
	2/0	67,4	2,13	10,63	4,03	611
	3/0	85,0	2,39	11,94	4,52	771
	4/0	107	2,68	13,40	5,08	972
	250	127	2,09	14,62	5,61	1149
	300	152	2,29	16,01	6,15	1378
	350	177	2,47	17,29	6,64	1608
	400	203	2,64	18,49	7,10	1838
	500	253	2,95	29,67	7,94	2297

**Fuente:** Centelsa [32]

**Anexo 7.** Resistencia de puesta a tierra de acuerdo con su objetivo de protección

**Tabla 16:** Valores máximos de resistencia de puesta a tierra

Objetivo de protección	Valor máximo de resistencia de puesta a tierra ( $\Omega$ )
Estructuras de líneas de transmisión	20
Subestaciones de alta y extra alta tensión $V \geq 115KV$	1
Subestaciones de media tensión de uso exterior en poste	10
Subestaciones de media tensión de uso interior	10
Protección contra rayos	4
Neutro de acometida en baja tensión	25
Descargas electrostáticas	25
Equipos electrónicos sensibles	5

**Fuente:** Ramírez J. y Cano E. [33]

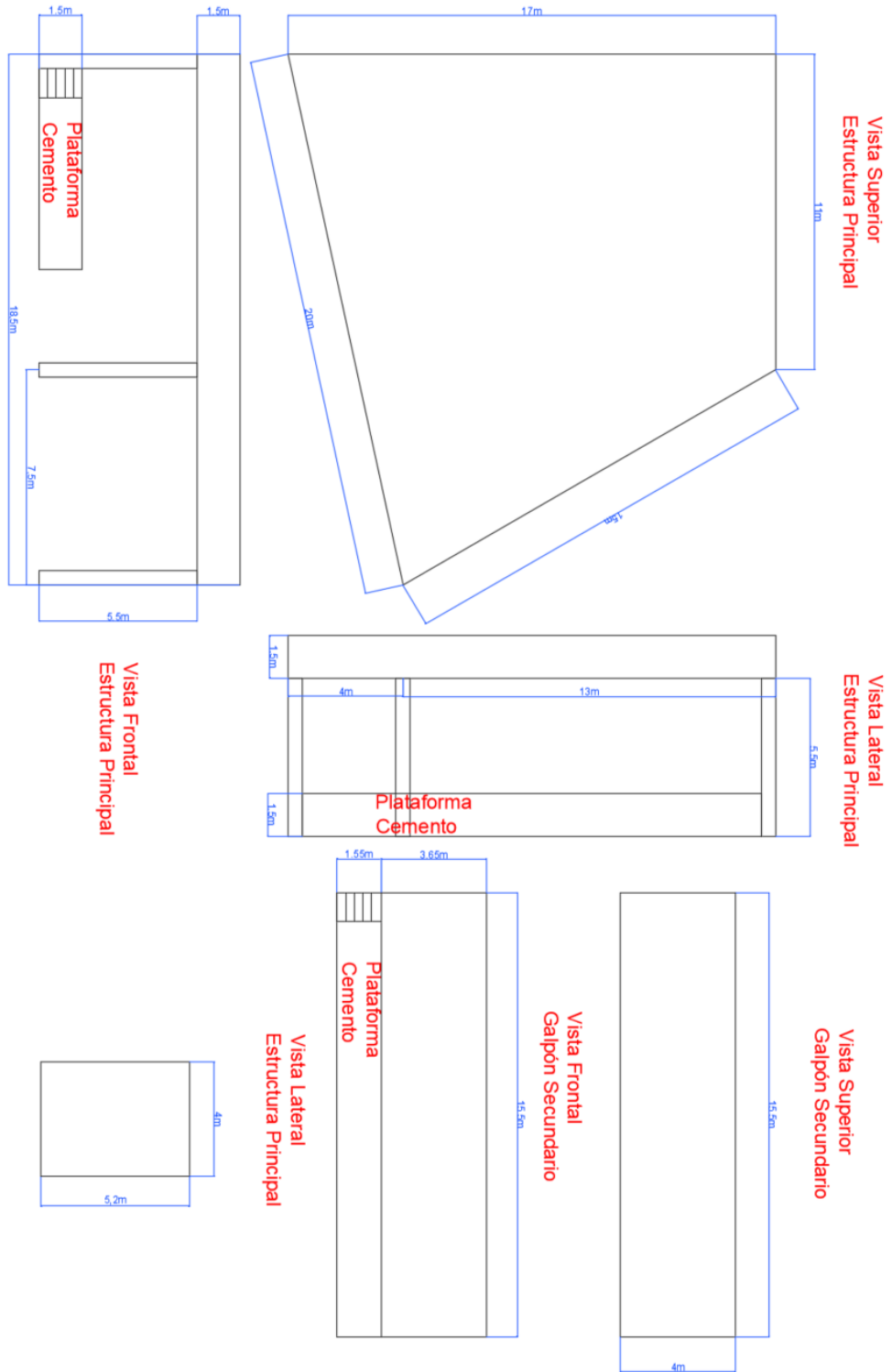
**Anexo 8.** Datos del medidor de energía

**Tabla 17:** Datos de medidor que abastece el CDGT

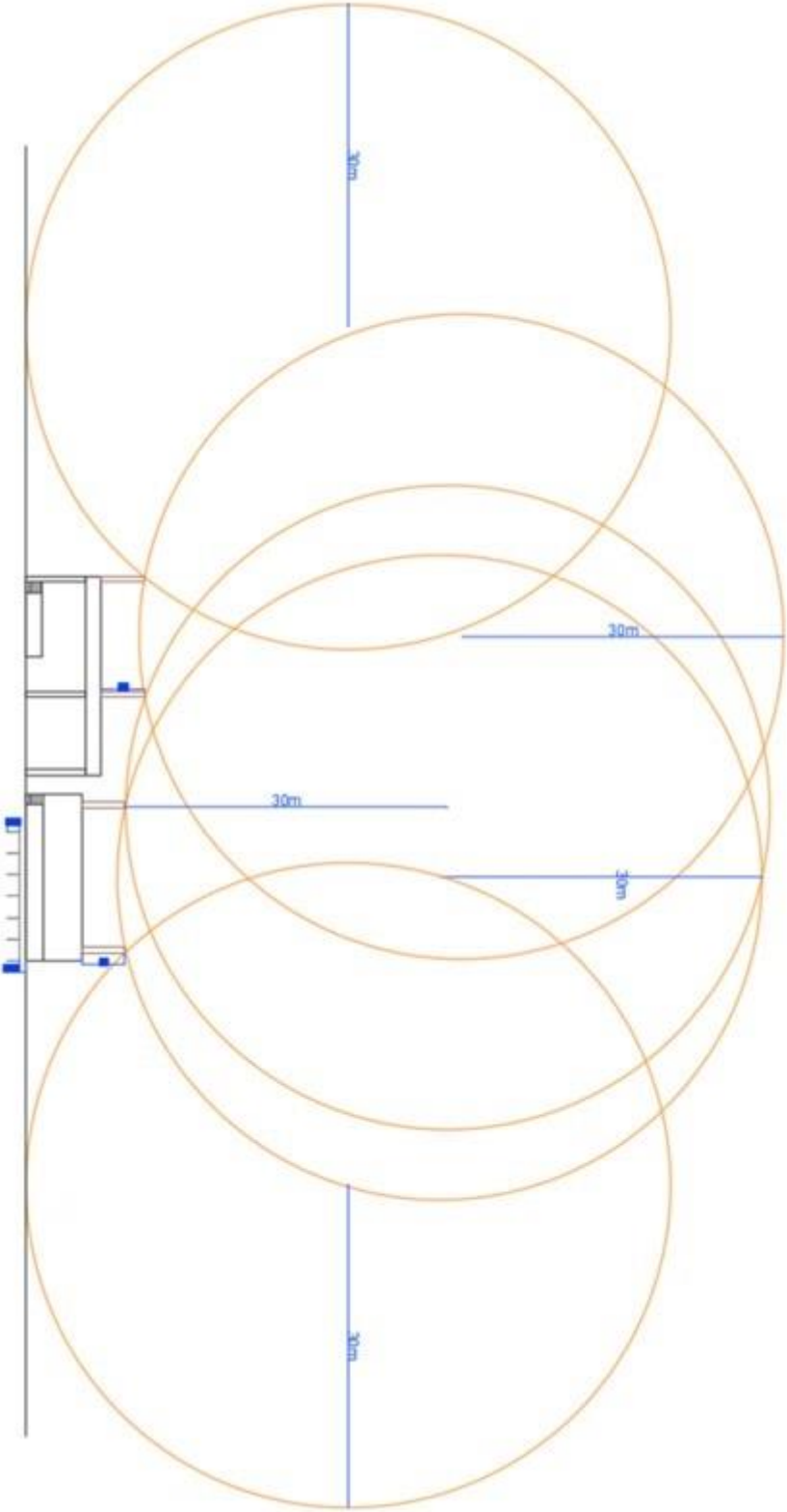
<b>Dato</b>	<b>Descripción</b>
Cuenta Contrato	201005953785
CUEN	1401796748
Cédula	1708341845001
Nombre	Ana María Asimbaya Pastrano
# Medidor	1002121892
Latitud	-0.407455101000
Longitud	-78.547181880000
Agencia	Mejía
Tarifa	Comercial

**Fuente:** Empresa Eléctrica Quito [27]

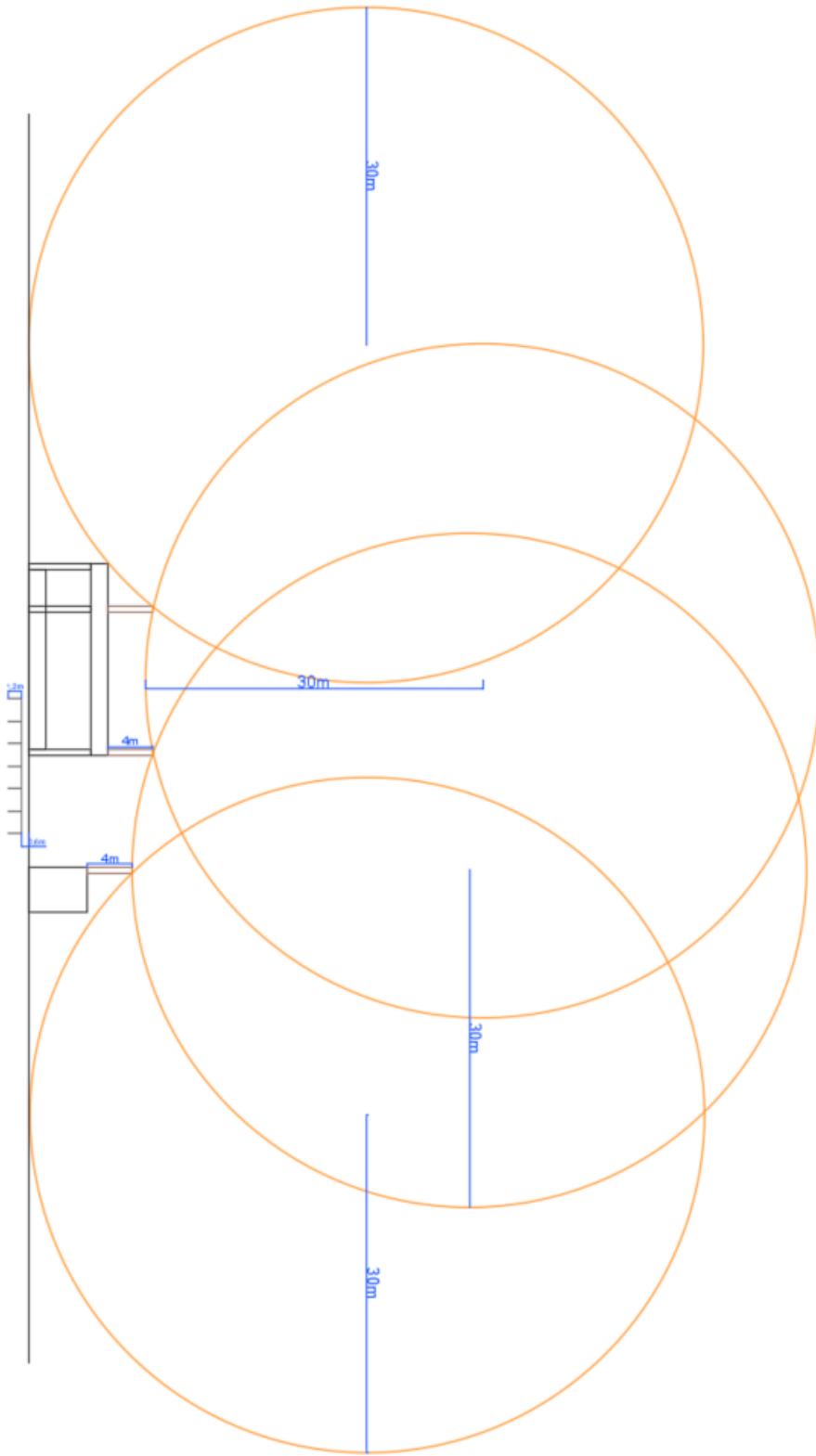
**Anexo 9. Plano de las estructuras analizadas**



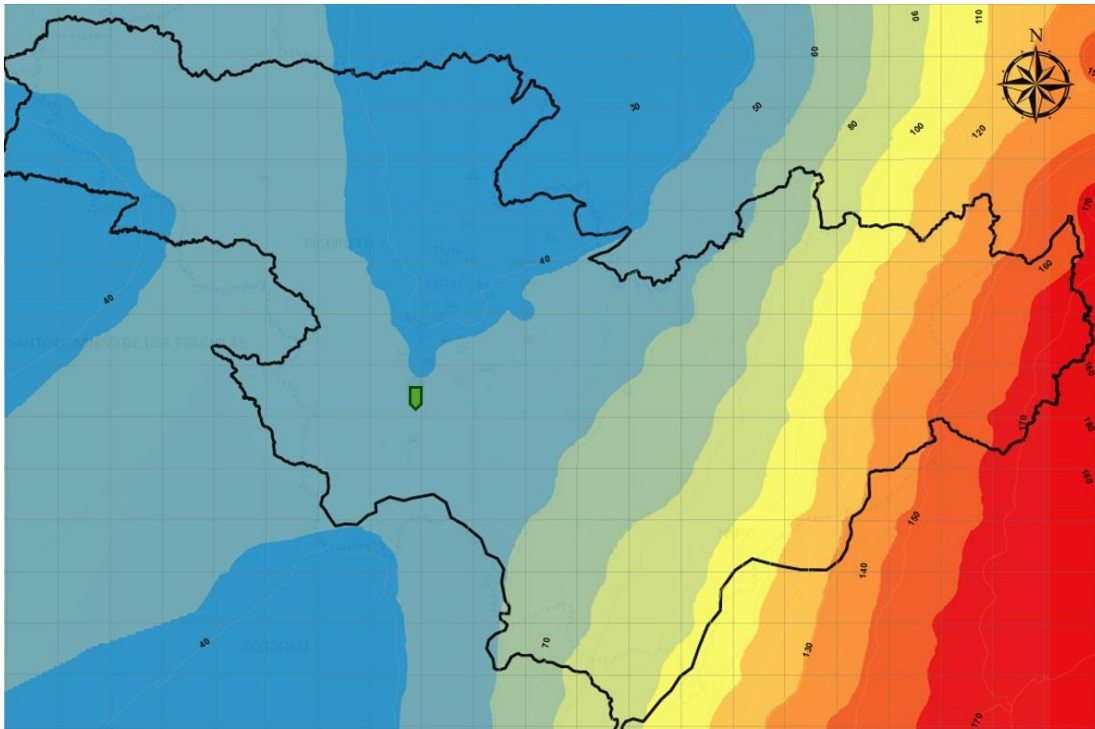
Anexo 10. Vista frontal del proyecto con malla, puntas captadoras y métodos de esfera rodante propuesto



Anexo 11. Vista Lateral del proyecto con malla, puntas captadoras y método de esfera rodante propuesto



**Anexo 12.** Nivel Isocerámico del Ecuador y el CDGT



Fuente: Zurita [31]

**Anexo 13.** Coeficiente Ambiental  $C_D$

**Tabla 18:** Valores de  $C_D$  de acuerdo con la localización

Localización relativa	$C_D$
Estructura rodeada de objetos altos	0,25
Estructura rodeada de objetos de la misma altura	0,5
Estructura aislada	1
Estructura de la cima de una colina o loma	2

Fuente: Villamarín [6]

**Anexo 14.** Coeficiente de reducción de la probabilidad de descarga en la estructura  $P_{TA}$

**Tabla 19:** Valores de  $P_{TA}$  de acuerdo con las medidas complementarias

Medidas de protección adicionales	$P_{TA}$
Sin medidas de protección	1
Avisos de peligro	0,1
Aislamiento eléctrico de las partes expuestas	0,01
Equipotencialización efectiva del suelo	0,01
Estructura del edificio utilizada como sistema de conducción descendente	0

Fuente: Villamarín [6]

**Anexo 15.** Coeficiente de probabilidad de que se produzcan daños físicos  $P_B$

**Tabla 20:** Valores de  $P_B$  de acuerdo con la clase de LPS instalado

Características de la estructura	Clase de LPS	$P_B$
No protegido por LPS	-	1
	IV	0,2
Protegida por LPS	III	0,2
	II	0,05
	I	0,02
Con un terminal de aire conforme a un LPS I y reforzada por la estructura metálica o de concreto como un sistema conductor de bajada natural		0,01

Fuente: Villamarín [6]

**Anexo 16.** Coeficiente de Riesgo Tolerado  $R_T$

**Tabla 21:** Valores de  $R_T$  de acuerdo con las pérdidas por una descarga

Tipo de pérdida	$R_T/año$
Pérdida de vidas o con daños permanentes	$1 * 10^{-5}$
Pérdida de servicio al público	$1 * 10^{-4}$
Pérdida de bienes culturales	$1 * 10^{-4}$

Fuente: Villamarín [6]

**Anexo 17.** Coeficiente de pérdidas por daños físicos  $L_F$

**Tabla 22:** Valores de  $L_F$  de acuerdo con el tipo de estructura

Tipo de estructura	$L_F$
Aeropuerto	0,75
Bloque de pisos	0,04
Edificio cívico	1,00
Iglesia catedral	0,50
Edificio comercial / bloque de oficinas	0,08
Centro comercial / Fábrica	0,33
Edificio agrícola	0,42
Estación de servicio / combustible	0,33
Residencias Hospitalarias	0,42
Hotel	0,75
Casa grande	1,00
Almacén industrial	0,42
Centro de ocio	0,33
Centro médico	1,00

Fuente: Villamarín [6]