

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN PLANTA GENERADORA
TERMICA, ACAJUTLA**

PRESENTADO POR:

CUELLAR CALDERON, ALBERTO ALEXANDER

MARROQUÍN VILLALTA, AMILCAR ENRIQUE

SEGOVIA SALAZAR, MARIO ALEJANDRO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN PLANTA GENERADORA
TERMICA, ACAJUTLA**

Presentado por:

CUELLAR CALDERON, ALBERTO ALEXANDER

MARROQUÍN VILLALTA, AMILCAR ENRIQUE

SEGOVIA SALAZAR, MARIO ALEJANDRO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

SAN SALVADOR, JUNIO DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

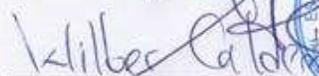
ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 8 de junio de 2018, en el Centro de Computo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 2:30 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma

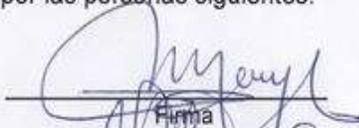
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

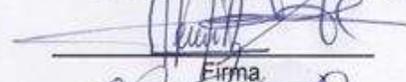


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

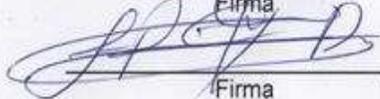
- ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN
(Docente Asesor)


Firma

- MSC. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHÉVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DISEÑO DE SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN
PLANTA GENERADORA TERMICA, ACAJUTLA

A cargo de los Bachilleres:

- CUELLAR CALDERÓN ALBERTO ALEXANDER

- MARROQUÍN VILLALTA AMÍLCAR ENRIQUE

- SEGOVIA SALAZAR MARIO ALEJANDRO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.2

(nueve punto dos)

Agradecimiento

Este logro es dedicado especialmente a mi madre, Evelia de la Cruz Calderón, quien, a pesar de las dificultades, siempre ha estado a mi lado apoyándome en todo momento, y el fruto de su esfuerzo me ha dado la posibilidad de seguir adelante, a quien le debo todo lo que he logrado y lo que soy. Su amor y apoyo incondicional me permite culminar una etapa más en mi vida.

A mi padre, Alex Osvaldo Cuellar, quien me brinda su confianza, su apoyo y siempre me incentiva para luchar por lo que quiero.

A mi familia en general, que me han manifestado su amor y cariño de diversas maneras, con los cuales he convivido desde niño, quienes me cuidaron mientras mi madre trabajaba, a mis abuelos que siempre se preocuparon por mí, a mis tíos y primos que siempre están dispuestos a ayudarme en lo que sea y en quienes confío.

A nuestro docente asesor Ing. Armando Martínez Calderón, por haber confiado en nosotros, y ser un excelente guía, quien comparte su experiencia y recomendaciones profesionales, procurando siempre que se desarrolle un trabajo de calidad, y mantener en alto el nombre de nuestra escuela a la cual orgullosamente pertenezco.

A las autoridades de la empresa generadora, quienes nos brindaron su tiempo y la oportunidad de aplicar nuestros conocimientos en sus instalaciones llevándonos a desarrollar aún más nuestras capacidades.

A todos mis amigos, aquellos que a pesar de la distancia y el tiempo seguimos en contacto, desde la Facultad Multidisciplinaria de Occidente (FMOCC), hasta culminar en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, donde llegué a formar lazos con personas de Occidente hasta Oriente, con quienes hemos luchado, con desvelos de día tras día, esfuerzo y dedicación, hemos celebrado victorias, y también hemos compartido fracasos. Con las que comparto el vínculo de dejar nuestras familias, nuestras comodidades, con tal de salir adelante. A mis amigos de este trabajo de grado, que venimos como equipo juntos desde la FMOCC, Alejandro Segovia y Amílcar Marroquín, por todo el trabajo que hemos realizado juntos y los retos que hemos enfrentado, a pesar de nuestras diferencias y discusiones de diferente índole. A mi novia Jacqueline por su cariño, comprensión y la paciencia que ha tenido, dándole prioridad a mi estudio.

Alberto Alexander Cuellar Calderón.

Agradecimientos.

Primeramente agradecer a Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por darme fortaleza en los momentos más difíciles, y brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo salud.

A mis padres Huberto Marroquín y Claudia de Marroquín, por apoyarme incondicionalmente en cada una de mis decisiones, y por la oportunidad que me brindaron de estudiar una carrera universitaria. La culminación de mis estudios, así como otros logros más se los debo a ustedes, ya que sin el constante esfuerzo que mantenían cada día, esto no hubiera sido posible. Gracias por ser un ejemplo y guía a seguir, por inculcarme buenos principios y valores.

A mis compañeros de tesis Alberto Cuellar y Alejandro Segovia, personas responsables en la realización de cualquier actividad, a quienes conocí en la Facultad Multidisciplinaria de Occidente y nos supimos llevar muy bien en todo momento: cuando estudiamos para parciales, tareas, y cualquier actividad relacionada con el proceso académico.

A mis amigos y compañeros de la carrera, por esas reuniones y noches de desvelo en las que compartimos nuestros conocimientos ante una actividad evaluada o la entrega de algún trabajo grupal, estoy consciente que sin la ayuda de ustedes la carrera hubiese sido aún más difícil.

A nuestro asesor de tesis Ing. Armando Calderón, por la confianza y apoyo brindado durante el trabajo de graduación, y previamente en proyecto de ingeniería; por transmitir sus conocimientos sobre el tema de tesis y ayudarnos en cuanto al desarrollo del diseño.

A cada uno de los docentes que tuve a lo largo de mi carrera por compartir sus conocimientos y aclarar nuestras dudas.

A mis familiares cercanos y amigos, que de alguna manera mostraron su apoyo y confiaron en mí durante este proceso.

Amilcar Enrique Marroquín Villalta

Agradecimiento

Estar escribiendo estas palabras es una gran satisfacción. Llegar a este punto de mi carrera universitaria me llena de alegría ya que los esfuerzos y sacrificios que he hecho durante el tiempo de estudio han dado frutos. Lo que me mantenía y llenaba de inspiración es mi familia por lo que nunca estuve solo; cada día que realizaba cualquier actividad relacionada a la universidad pensaba en ese esfuerzo y comprensión por parte de ellos; y ver su alegría luego de terminar esta fase importante en mi vida es mi mayor premio por lo que este trabajo lo considero un logro familiar. Todas mis amistades que gane durante estos años de estudio, tanto en universidad y educación básica (Pop Crew), también han sido muy importantes para mí; es aquel apoyo moral entre amigos y amigas para darle frente a todos los retos que la universidad da a los estudiantes con el objetivo de darnos el entrenamiento necesario para ser un profesional competente. Las “desveladas” de estudio para los parciales, los éxitos y fracasos en todas las asignaturas, discusiones pacíficas y “fuertes” entre compañeros por un desacuerdo en una actividad entre otras; son detalles que nunca olvidare ya que han sido parte de mi formación académica, profesional y personal. Agradezco a los docentes de la Facultad Multidisciplinaria De Occidente y también de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Mecánica e Industrial de la Facultad De Ingeniería y Arquitectura; todos de la Universidad de El Salvador; por los conocimientos, consejos, llamadas de atención y experiencias compartidas en cada una de sus asignaturas. A nuestro asesor Ing. Armando Calderón, por la oportunidad y confianza de trabajar en este tema muy importante en el campo que es la protección contra descargas atmosféricas. A la empresa generadora térmica en Acajutla: por su amabilidad y buena disposición en el desarrollo del proyecto. A mis compañeros de trabajo de grado: Alberto Cuellar y Amilcar Enrique; he encontrado una gran amistad en ustedes por lo que fue un factor clave en la realización de este trabajo. A mi novia Alejandra Estrada: gracias por la comprensión y cariño en estos últimos años. Finalmente, mamá (Doris Salazar) papá (Mario Segovia) y mi hermano (Ariel Segovia); este trabajo es de ustedes y agradezco a Dios por rodearme de todas las personas que formaron parte de este etapa académica.

Mario Alejandro Segovia Salazar

Índice

_Toc516871783Capítulo 1 : Generalidades del proyecto.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2.1 Generales.....	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 Antecedentes	3
1.4. Justificación	7
Capítulo 2 : Teoría de las descargas atmosféricas	9
2.1. Experimento de Benjamín Franklin	9
2.2. Definición y características de la descarga atmosférica.....	11
2.3. Tipos de descargas atmosféricas.....	12
2.3.1 Descarga tipo nube-ionosfera.....	12
2.3.2 Descarga tipo nube-nube e intranube.....	14
2.3.3 Descarga tipo nube-tierra (viceversa).....	15
2.4 Proceso de una descarga atmosférica nube-tierra descendente negativa	17
2.4.1 Física del rayo	17
2.4.2 Electrificación de las nubes.....	17
2.4.3 Sucesos luego de la electrificación de la nube	19
2.4.4. Parámetros asociados a la descarga atmosférica nube-tierra	24
2.5. Potencial de paso, potencial toque y descarga lateral	25
2.5.1. Potencial de paso.....	25
2.5.2 Potencial de Toque.....	26
2.5.3. Descargas laterales	27
2.6. Probabilidad de impacto de una descarga atmosférica	30
2.6.1 Días -tormenta.....	30

2.6.2 Mapa isocerámico	30
Capítulo 3 : Tipos de terminales aéreas y métodos de diseño de un SPCDA.....	33
3.1. Terminales aéreas convencionales.	33
3.2. Terminales aéreas no convencionales.	34
3.3. Terminales aéreas convencionales vs. no convencionales.....	36
3.4 Métodos de protección.....	38
3.4.1 Método del ángulo fijo	38
3.4.2 Método de la esfera rodante	39
3.4.3. Método del cable de guarda (o apantallamiento)	41
3.4.4. Método de las mallas	42
Capítulo 4 : Diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas	44
4.1. Método de diseño y normativa a utilizar.....	44
4.2. Levantamiento tridimensional de la planta	46
4.3. Posicionamiento de terminales aéreas y volumen de protección	46
4.4. Número de bajantes y diseño de puesta a tierra	47
4.4.1. Selección del número de bajantes	47
4.4.2. Mediciones de resistividad del terreno	48
4.4.3. Selección del arreglo de puesta a tierra.....	49
4.4.4. Resistencia a tierra del arreglo a utilizar.	53
4.5 Recomendaciones para equipotencialización (Bonding)	54
4.6 Supresores de sobretensión	56
4.8. Diseño del SPCDA en la planta generadora	57
4.8.1. Unidad SIGMA.....	58
4.8.2. Unidad de enfriamiento uno.....	63
4.8.3. Unidad de enfriamiento dos	68

4.8.4. Tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín	73
4.8.5. Tanques diarios unidad de enfriamiento dos y tanques de lodo	80
4.8.6. Edificio administrativo y área de calderas	88
4.8.7. Presupuesto total	98
Recomendaciones.....	99
Conclusiones	102
Referencias bibliográficas.....	104
Anexos	107

Índice de figuras

Figura 1.1 Incendio en refinería El Palito, Venezuela; causado por un impacto de rayo.....	5
Figura 1.2 Incendio en un tanque de gas natural en el Condado Harris, Texas, Estados Unidos, causado por un impacto de rayo.....	5
Figura 1.3 Incendio en un tanque de la refinería Denbury que almacenaba petróleo crudo. Denham Springs, Los Angeles, Estados Unidos.....	5
Figura 2.1 Benjamín Franklin y el experimento de la cometa.....	10
Figura 2.2 Benjamín Franklin inspecciona en 1752 el hogar del Señor West, un habitante de Filadelfia.....	11
Figura 2.3 Primera documentación de las descargas nube-iónosfera por la Universidad de Minnesota en 1989 en su observatorio O'Brien.....	12
Figura 2.4 Descarga nube-iónosfera registrada por una aeronave y analizada por la Universidad de Alaska Fairbanks en el año de 1994.....	13
Figura 2.5 Descarga nube-iónosfera registrado durante una lluvia de meteoros el 13 de agosto de 2016 en Shikong, China.....	14
Figura 2.6 Descripción gráfica de las descargas: nube a nube e intranube.....	15
Figura 2.7 Tipos de descargas nube-tierra.....	16
Figura 2.8 Modelo del tripolo de la electrificación de una nube.....	18
Figura 2.9 Nube cumulonimbus.....	19
Figura 2.10 Etapas resumidas de la formación de rayo con descargas subsecuentes.....	19
Figura 2.11 Esquema de un rayo de tipo negativo descendente (visto por un espectador).....	21
Figura 2.12 Ilustración de los componentes del rayo: líder escalonado y líderes ascendentes.....	21
Figura 2.13 Línea del tiempo (sin escala) de varias descargas subsecuentes en un rayo.....	22
Figura 2.14 Línea del tiempo promedio de un evento de rayo.....	23
Figura 2.15 Línea del tiempo de un evento de rayo de manera resumida. Ejes sin escala.....	24
Figura 2.16 Gradientes de potencial desarrollados alrededor de un electrodo de puesta a tierra, cuando una corriente pasa por él.....	25
Figura 2.17 Potencial de paso desarrollado en una persona.....	26
Figura 2.18 Potencial de toque y de paso desarrollado en una persona.....	27
Figura 2.19 Descargas laterales en un SPCDA.....	28
Figura 2.20 Mapa isocerámico de El Salvador, proporcionado por la Unidad de Acceso a la Información y creado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de El Salvador.....	31
Figura 3.1 Punta Franklin.....	33
Figura 3.2 Terminales aéreas tipo Franklin tetrapuntal.....	34
Figura 3.3 Terminal aérea no convencional. (A) Eliminación de rayos, (B) De cebado o ESE.....	34
Figura 3.4 Funcionamiento del DAS antes de un evento de rayo.....	35
Figura 3.5 DAS desviando un rayo fuera de su zona de cobertura.....	35

<i>Figura 3.6 Método del ángulo fijo. A la derecha volumen de protección determinado por ángulo θ. A la izquierda, aplicando varias terminales aéreas para abarcar mayor área de protección, siempre utilizando un ángulo θ.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.7 Método de la esfera rodante con radio “d”.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.8 Método de la esfera rodante. Movimiento de la esfera en edificaciones mayores a su radio “d”.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 3.9 Método de protección del cable de guarda según la norma NFPA 780.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.10 Protección de una edificación mediante el método de mallas.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 3.11 Método de mallas. Formas de calcular las zonas de protección adyacentes a la edificación considerada.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.1 Arreglos de puesta a tierra permitidos utilizando conductores radiales y varillas.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.2 Arreglo de puesta a tierra a utilizar en el diseño.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.3 Distribución de la corriente de rayo en un campo de golf.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.4 Forma de realizar las conexiones de equipotencialización recomendada para el diseño.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.5 Barra bus de equipotencialidad.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.6 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puestas a tierra de unidad SIGMA.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.7 Volumen de protección resultante para unidad SIGMA.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.8 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puestas a tierra de unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.9 Volumen de protección resultante para unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.10 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puestas a tierra de unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.11 Volumen de protección resultante para unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.12 Distribución de terminales aéreas, cable de guarda y bajantes de puestas a tierra de tanques diario de unidad uno y tratamiento de agua (parte 1).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.13 Distribución de terminales aéreas, cable de guarda y bajantes de puestas a tierra de tratamiento de agua (parte 2) y cafetín.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.14 Simbología utilizada en planos de tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua, y cafetín.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.15 Volumen de protección resultante para tanques diarios de unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.16 Volumen de protección resultante de parte uno de tratamiento de agua.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.17 Volumen de protección resultante de parte dos de tratamiento de agua.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.18 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra de tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.19 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra de tanques de lodo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.20 Simbología utilizada en planos de tanques diarios de unidad de enfriamiento dos y tanques de lodo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.21 Volumen de protección resultante para tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.22 Volumen de protección resultante para tanques de lodo.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.23 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra del edificio administrativo.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.24 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra del área de calderas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.25 Volumen de protección de edificio administrativo y área de calderas.....</i>	<i>93</i>

<i>Figura. A-1 Terminal aérea en parapeto.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura. A-2 Terminal aérea en parapeto (esquina).....</i>	<i>109</i>
<i>Figura. A-3 Terminal aérea en base horizontal adhesiva.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura. A-4 Terminal aérea en base horizontal adhesiva (esquina).....</i>	<i>111</i>
<i>Figura. A-5 Terminal aérea en cumbrera a utilizar en unidad SIGMA y Cafetín.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura. A-6 Terminal aérea en base vertical, la conexión de cable es vertical.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura. A-7 Terminal aérea en base vertical, la conexión de cable es horizontal.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura. A-8 Terminal aérea en base vertical, en esquina y orientación horizontal de cable.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura. A-9 Terminal aérea sujeta con dos soportes.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura. A-10 Terminal aérea en estructura tipo “brazo de amigo”.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura. A-11 Terminal aérea instalada en mástiles.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura. A-12 Terminal aérea instalada en mástil (chimenea).....</i>	<i>118</i>
<i>Figura. A-13 Terminal aérea instalada en mástil (asta de bandera).....</i>	<i>118</i>
<i>Figura. A-14 Terminal aérea instalada en mástil (En antenas).....</i>	<i>119</i>
<i>Figura. A-15 Terminal aérea sobre poste de concreto.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura. A-16 Terminal aérea en poste de luminaria.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura. A-17 Levantamiento de un conductor a un nivel superior.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura. A-18 Base de mástil auto soportado.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura. A-19 Base metálica para instalar soporte de cable a estructuras que no tiene una superficie plana.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura. A-20 Base para instalar terminal aérea o accesorio para conexión de dos cables o más a estructuras que no tiene una superficie plana.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura. B-1 Arreglo de puesta a tierra.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura. B-2 Barra bus de equipotencialidad.....</i>	<i>125</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1 Algunos eventos de rayos en El Salvador y sus consecuencias. Fuente: portal Web del periódico matutino Salvadoreño La Prensa Gráfica.....</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 1.2 Algunos eventos internacionales de descargas atmosféricas y sus consecuencias.....</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 2.1 Parámetros de una descarga nube a tierra. Valores mínimos, típicos y máximos.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3.1 Radio de la esfera y su aplicación según la norma NFPA 780.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 3.2 Radio de la esfera rodante a utilizar, según la norma IEC 62305-3.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 3.3 Tamaños a utilizar en el método de mallas para la protección contra descargas atmosféricas. Según IEC - 62305.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.1 Mediciones de resistividad del terreno en la planta generadora.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4.2 Detalles de terminales aéreas y complementarios de unidad SIGMA.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4.3 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en unidad SIGMA</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 4.4 Presupuesto de estructuras metálicas a utilizar del SPCDA en unidad SIGMA</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 4.5 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en unidad SIGMA.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 4.6 Presupuesto total del SPCDA en unidad SIGMA.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 4.7 Detalles de terminales aéreas y complementarios de unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 4.8 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4.9 Presupuesto de estructuras metálicas del SPCDA en unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.10 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.11 Presupuesto total del SPCDA de unidad de enfriamiento uno.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.12 Detalles de terminales aéreas y complementarios de unidad de enfriamiento dos.</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 4.13 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.14 Presupuesto de estructuras metálicas del SPCDA en unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.15 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en unidad de enfriamiento dos</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.16 Presupuesto total del SPCDA en unidad de enfriamiento dos.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.17 Detalles de terminales aéreas y complementarios de tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 4.18 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4.19 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4.20 Presupuesto total del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4.21 Detalles de terminales aéreas y complementarios de tanques de lodo y tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>82</i>

<i>Tabla 4.22 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 4.23 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 4.24 Presupuesto total del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento dos</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 4.25 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en tanques de lodo.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 4.26 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en tanques de lodo.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 4.27 Presupuesto total del SPCDA en tanques de lodo.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 4.28 Detalles de terminales áreas y complementarios para edificio administrativo y área de calderas.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 4.29 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en edificio administrativo y calderas</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 4.30 Presupuesto estructuras metálicas del SPCDA en edificio administrativo y calderas.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 4.31 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en edificio administrativo y calderas.</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.32 Presupuesto total del SPCDA en edificio administrativo y calderas.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.33 Presupuesto total del SPCDA en la planta generadora térmica a vapor en Acajutla.....</i>	<i>98</i>

Glosario técnico

1. **SPCDA:** Sistema de Protección Contra Descargas Atmosférica. Compuesto por dispositivos de interceptación de descargas, conductores de interconexión, electrodos de puesta a tierra, conectores, accesorios y dispositivos de protección contra sobretensión requeridos para completar el sistema.
2. **Terminal aérea:** dispositivo de interceptación de descargas atmosféricas que actúa como receptor para la captación de los rayos.
3. **Equipotencialización ó bonding:** conexión eléctrica entre un objeto conductor de electricidad y el SPCDA, o entre componentes metálicos, cuyo fin es poner al mismo potencial las estructuras conectadas.
4. **Conductor principal:** conductor previsto para transportar corrientes de rayos entre terminales aéreas y electrodos de puesta a tierra.
5. **Volumen de protección:** espacio adyacente a un sistema de protección contra rayos que se encuentra protegido de un impacto directo de una descarga atmosférica.
6. **Transitorio de voltaje:** alteración en la forma de onda de la corriente alterna de un subciclo que se evidencia por medio de una discontinuidad aguda y breve de la forma de onda. Puede ser de cualquier polaridad y puede ser agregado a, o sustraído de, la forma de onda nominal.
7. **Supresor de sobretensión de voltajes transitorios:** Dispositivo protector cuyo fin es limitar voltajes transitorios mediante el desvío o la limitación de la corriente de sobretensión; también evita el flujo continuo de la corriente residual.
8. **Electrodo de puesta a tierra:** varilla, conductor o placa que tiene contacto físico con el plano de tierra y el SPCDA, su función principal es drenar a tierra la corriente de la descarga atmosférica.
9. **Nube cumulonimbus:** son nubes de gran desarrollo vertical, internamente formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva y se mueve en sentido contrario a las agujas del reloj. Su base suele encontrarse a menos de 2.000 m de altura mientras que la cima puede alcanzar unos 15.000 - 20.000 m de altura. Cumulo significa acumulado y nimbus tormenta.

10. **Ionosfera:** capa de la atmósfera localizada a unos 50 kilómetros y 500 kilómetros de altura. Posee una densidad sumamente baja y es atravesada por una fuerte radiación en forma de luz ultravioleta, la cual está a su vez altamente ionizada.
11. **SIGET:** Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.
12. **Unidad de Transacciones (UT):** sociedad dedicada a operar la transmisión y administrar el mercado mayorista de electricidad, en El Salvador.
13. **NFPA:** National Fire Protection Association
14. **API:** American Petroleum Institute
15. **MIL-HDBK:** Military Handbook
16. **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers
17. **IEC:** International Electrotechnical Commission.

Capítulo 1 : Generalidades del proyecto

1.1 Introducción.

Las descargas atmosféricas son un fenómeno natural que afecta en todo el planeta, ha ocurrido desde el inicio de los tiempos, y cada civilización ha tratado de comprenderlo según sus creencias.

Hoy en día, las descargas atmosféricas siguen siendo un objeto de estudio. Existen muchas personas alrededor del mundo que han recopilado información, mediante experimentos y haciendo observaciones del antes y después de un evento de rayo; con el objetivo de entender el fenómeno y poder desarrollar teorías analíticas que sean de utilidad, logrando describir algunas características de un rayo. Esta información es presentada en el capítulo dos de este documento, donde se abordan los diferentes tipos de descargas atmosféricas existen y se explica la forma en la que se generan. Así también se muestran algunas formas de poder cuantificar la probabilidad de impacto de una descarga atmosférica en determinada región.

En el capítulo tres se explican los diferentes tipos de terminales aéreas convencionales y no convencionales, y posteriormente los métodos para determinar las zonas de protección de un SPCDA.

Finalmente, a partir de las leyes nacionales que hacen referencia a estándares y normativas internacionales, en el capítulo cuatro se explica la metodología para desarrollar un SPCDA efectivo en las instalaciones de la planta generadora térmica a vapor en Acajutla. Se especifica el tipo de terminales aéreas a utilizar, la ubicación de las mismas, los materiales para su interconexión y un arreglo de red a tierra que drene con efectividad este fenómeno. Se realizan recomendaciones y observaciones para cada estructura o conjunto de estructuras considerados, lista de materiales y presupuesto para la realización del mismo. Se crea un conjunto de planos para cada edificación con especificaciones técnicas de montaje, que se proporciona a la planta generadora pero no se adjuntan al presente trabajo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Generales

- Diseñar un SPCDA confiable para la planta generadora térmica a vapor en Acajutla.

1.2.2 Específicos

- Aplicar normativas y estándares internacionales para proteger apropiadamente estructuras ordinarias y explosivas dentro de la planta generadora.
- Crear y mostrar zonas de protección del SPCDA según el método aplicado mediante software de dibujo asistido en computadora.
- Mostrar la ubicación de terminales aéreas sobre cada estructura donde se instalan.
- Ilustrar la forma de instalación de algunos accesorios como bases, terminales aéreas, mástiles y cables de guarda.
- Dimensionar cada elemento del SPCDA considerando el ambiente industrial y corrosivo de la planta generadora.
- Sugerir algunos criterios básicos para la equipotencialización entre el SPCDA y redes tierra existentes (de 60 Hz, telecomunicaciones, etc.), cimientos de edificios y elementos metálicos que no forman parte del SPCDA pero están expuestos a arcos eléctricos.

1.3 Antecedentes

En las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador se ha detectado la presencia de descargas atmosféricas. Esto ha dado lugar a iniciar estudios de la captación y drenaje de dicho fenómeno, así también se ha creado trabajos de grado sobre la protección de líneas de transmisión y monitoreo de la misma ante descargas directas o indirectas. Además, se ha podido recopilar información de evento de rayos que han ocurrido en diversas partes de El Salvador, causando lesiones y muertes a personas que estaban en los alrededores del lugar de los hechos. Algunos de estos casos se presentan en la tabla 1.1.

<i>Fecha</i>	<i>Lugar</i>	<i>Descripción de lo sucedido</i>
Sábado, 03 de mayo de 2014	Caserío Palo Blanco, Sauce, municipio de Santiago Nonualco, departamento de la Paz	Tres personas se encontraban en un árbol de mango cortando frutos, cuando una descarga de rayo impactó en el mismo. Causando la muerte de una persona de 28 años y dos lesionados de 42 y 43 años.
Jueves, 30 de mayo de 2013	Cantón El Espino, en San Pedro Perulapán, departamento de Cuscatlán.	Un joven de 17 años murió por una descarga de rayo, cuando este bajaba una ramada. Otro joven, no identificado, estaba cerca de la vivienda hablando por teléfono cuando el impacto sucedió, sufrió lesiones y fue llevado a un centro asistencial.
Jueves, 15 de septiembre de 2016	Isla Conchagüita, departamento de La Unión	Un rayo cayó sobre una embarcación con dos pescadores de nacionalidad hondureña en el golfo de Fonseca. Uno murió al instante, mientras que otro resultó con lesiones. El fallecido tenía 27 años y el lesionado 24 años
21 de septiembre de 2015	San José Villanueva, departamento de La Libertad	Persona del sexo masculino de 28 años de edad murió por una descarga de rayo. Este se encontraba podando un árbol en el momento de la descarga.
21 de septiembre de 2012	Cantón Cangrejera, departamento de La Libertad	Un joven de 17 años de edad falleció por una descarga de rayo en una tormenta eléctrica.

Tabla 1.1 Algunos eventos de rayos en El Salvador y sus consecuencias. Fuente: portal Web del periódico matutino Salvadoreño La Prensa Gráfica.

Siendo la descarga atmosférica un fenómeno mundial, existen registros de accidentes con consecuencias considerables en diversos países del globo terrestre. Algunos de estos accidentes se muestran a continuación en la tabla 1.2.

Fecha	Lugar	Descripción de lo sucedido
Miércoles 19 de septiembre de 2012	Refinería El Palito, Venezuela.	Un rayo ocasionó el incendio de los sellos de dos tanques de nafta. El incendio duró aproximadamente tres días. La refinería tenía una capacidad de procesar 146.000 barriles de crudo por día (Según la BBC. Este hecho se muestra en la figura 1.1)
Sábado 27 de abril de 2013	Condado Harris, Texas, Estados Unidos.	Un impacto de rayo en un tanque que almacenaba gas natural crudo ocasionó un incendio. Fue controlado horas después del siniestro. Este hecho se muestra en la figura 1.2 (Fuente: seminario de tecnología de transferencia de carga por Peter Carpenter, director de Lightning Protection.com)
Jueves 2 de mayo de 2013	Denham Springs, Los Angeles, Estados Unidos	Un rayo impacta en un tanque que almacenaba petróleo crudo en la refinería Denbury Resources Inc. Este hecho se muestra en la figura 1.3 (Fuente: seminario de tecnología de transferencia de carga por Peter Carpenter, director de Lightning Protection.com)
Domingo 13 de junio de 2010	Granja de tanques de gasolina, Carolina del Norte, Estados Unidos.	Un rayo provocó un gran incendio en la "granja de tanques" de una compañía de tuberías de gasolina en Carolina del Norte, afectando un tanque de aproximadamente 20,000 barriles de gasolina. (Según CNN).

Tabla 1.2 Algunos eventos internacionales de descargas atmosféricas y sus consecuencias.



Figura 1.1 Incendio en refinería El Palito, Venezuela; causado por una impacto de rayo.



Figura 1.2 Incendio en un tanque de gas natural en el Condado Harris, Texas, Estados Unidos, causado por una impacto de rayo.



Figura 1.3 Incendio en un tanque de la refinería Denbury que almacenaba petróleo crudo. Denham Springs, Los Angeles, Estados Unidos.

Se pueden seguir adicionando catástrofes atribuidas a descargas atmosféricas a nivel regional e internacional, como se puede observar este fenómeno ha causado estragos alrededor del mundo, haciendo evidente la necesidad de contar con estudios sobre este fenómeno, e implementar SPCDA no solo en zonas industriales, sino también en lugares comerciales, escuelas, iglesias, viviendas, etc.

1.4. Justificación

Los sistemas de generación de energía eléctrica en El Salvador deben abastecer la demanda energética del país, deben suministrar constantemente energía a las redes de transmisión; para ello la UT (Unidad de Transacciones) designa la hora de entrada y salida de equipos de generación y la potencia que estos inyectarán a la red eléctrica durante su intervención. Las generadoras deben coordinar con mucha anticipación el mantenimiento de sus equipos con la UT, para que esta tome las medidas pertinentes de forma que la salida de una generadora no afecte gravemente la red de suministro energético.

La planta generadora térmica contemplada, cuenta con la mayor capacidad de generación instalada en El Salvador, con 322.1 MW¹. Contribuyó con una generación neta de 442,826.3 MWh para una demanda neta nacional de 2899411.2 MWh, de enero al 30 de junio de 2017². Una falla dentro de la planta que detenga su proceso de generación podría afectar gravemente la red eléctrica, produciendo perturbaciones que puede ocasionar un evento en cascada y sacar a las demás generadoras al haber una desincronización en la red eléctrica. Una descarga atmosférica podría parar por completo las labores de generación, si este fenómeno llegara a dañar un equipo indispensable, la reparación del mismo puede que tarde mucho tiempo, inclusive pudiera requerir que el equipo sea reemplazado y para ello tener que importarlo, parando la planta generadora por varios días o meses, o podría tener consecuencias más graves como las mostradas en los antecedentes.

Las líneas de transmisión y subtransmisión son afectadas frecuentemente por descargas atmosféricas, ya sea de forma directa o indirecta; para su protección se instalan cables de guarda y descargadores de sobretensión a lo largo de las líneas, si las principales líneas eléctricas de nuestro país son equipadas para este tipo de fenómeno, con muchas más razón se deben de proteger las plantas de generación. Por lo tanto es indispensable contar con un SPCDA confiable, cuando se analizan estos posibles accidentes, lo que lleva a este equipo de trabajo a realizar una propuesta para proteger toda estructura que resguarde maquinaria, equipo u otros elementos que mantienen en funcionamiento la planta generadora.

¹ SIGET, boletín primer semestre de 2017, cuadro N° 01: capacidad instalada y disponible de las centrales generadoras de electricidad al 30 de junio de 2017 y gráfico N° 01: capacidad instalada por central al 30 de junio de 2017 (MW).

² SIGET, boletín primer semestre de 2017, cuadro N° 02: generación del sistema mayorista nacional al 30 de junio de 2017 (MWh).

1.5 Alcances y limitaciones

Alcances

Se diseña un SPCDA para proteger de un impacto directo de rayo a las instalaciones de la planta generadora en Acajutla, en la cual existen contenedores de sustancias inflamables en un ambiente corrosivo que podría afectar aquellos accesorios que se instalen en el lugar, no se sabe con exactitud el nivel de corrosión y tampoco se hace un estudio sobre este, pero como medida preventiva se recomienda instalar accesorios que se han dimensionado partiendo de lo que la NFPA-780 recomienda para un ambiente normal.

Limitaciones

- Debido a los acuerdos de confidencialidad firmados entre las autoridades de la planta generadora y la escuela de ingeniería eléctrica de la facultad de ingeniería y arquitectura; se omiten el conjunto de planos que se ha creado para cada estructura, donde se localizan y detallan las terminales aéreas, detalles de instalación, recomendaciones, etc.
- El diseño del SPCDA debería abarcar la instalación de supresores de tensión, para llevarlo a cabo es necesario conocer la distribución de tableros, subtableros y carga instalada; no se cuentan con este tipo de permisos dentro de la planta generadora y de obtenerlos se necesitaría más tiempo del asignado. Razón por la cual no se abarca en el presente trabajo de grado.
- Existe en la planta generadora una gran cantidad de elementos metálicos que se deben equipotenciar con el SPCDA, para ello es necesario saber si las estructuras metálicas aéreas y subterráneas son eléctricamente continuas o no, y si estos ya tiene una referencia a un sistema de tierra, lo cual no fue posible establecer, razón por la cual solamente se determinan algunos aspectos fundamentales sobre equipotencialidad de dichos elementos y demás sistemas existentes.

Capítulo 2 : Teoría de las descargas atmosféricas

Las civilizaciones, a lo largo del tiempo han tratado de explicar el fenómeno de una descarga atmosférica, sin embargo es Benjamín Franklin el científico pionero que cimienta los conocimientos de este fenómeno, hoy en día se sigue estudiando a través de observaciones y experimentos. En este capítulo se da una definición a este fenómeno, se habla sobre el proceso de formación y los tipos que existen.

2.1. Experimento de Benjamín Franklin

Benjamín Franklin fue un inventor, político y científico estadounidense. Nació en Boston el 17 de enero de 1706, y falleció en Filadelfia el 17 de abril de 1790. Es reconocido a nivel mundial por sus estudios relacionados a las descargas atmosféricas. El experimento de la cometa es el que dio inicio a sus descubrimientos, un día de tormenta de junio del año 1752, junto a su hijo se preparaba para elevar una cometa lo más cerca posible de una nube de tormenta, incrustó en ella un alambre grueso con punta afilada, le amarró un hilo de seda de muy alta calidad y al otro extremo del hilo ató una llave metálica de la época, pasó bastante tiempo esperando a que un rayo le impactara al cometa elevado debajo de la nube, según sus escritos, el que no pasara nada decepcionó a Benjamín, pero decidió tocar la llave y con cuidado acercó su dedo a ella; pero antes de tocarla observó un pequeño arco. Este descubrimiento despertó grandemente el interés del estudio del rayo, con sus estudios posteriores logró comprobar que el rayo era una descarga de tipo eléctrica. Por lo que tiempo después inventó la punta de interceptación (conocida en los tiempos actuales como punta Franklin, en su honor), con el objetivo de drenar esa corriente a tierra de manera segura y así proteger una edificación.



*Figura 2.1 Benjamín Franklin y el experimento de la cometa.*³

En el año de 1762, un habitante de Filadelfia que utilizaba la punta Franklin en su hogar, se quejó con Benjamín Franklin ya que los rayos luego de la instalación seguían impactando en su hogar. La solución propuesta por el inventor Estadounidense, luego de revisar sus cálculos y anotaciones, fue de enterrar más el terminal en el suelo, donde existiera humedad suficiente para hacer la punta más “atractiva” al rayo. Este principio de “enterrar” más la punta es lo que en los tiempos modernos se conoce como “puesta a tierra”. En sus escritos de investigación constató lo siguiente: *“La terminal deberá enterrarse más profundo, hasta que llegue al suelo húmedo por lo que será más adecuado para recibir el fluido eléctrico y disiparse”*⁴

³ Extraída de: Lightning Protection for People and Property por Marvin Fydenlund, Capítulo 2, figura 2.1.

⁴ Extraído del Manual Escrito por Benjamin Franklin en 1753: How To Secure Houses &C, From Lightning

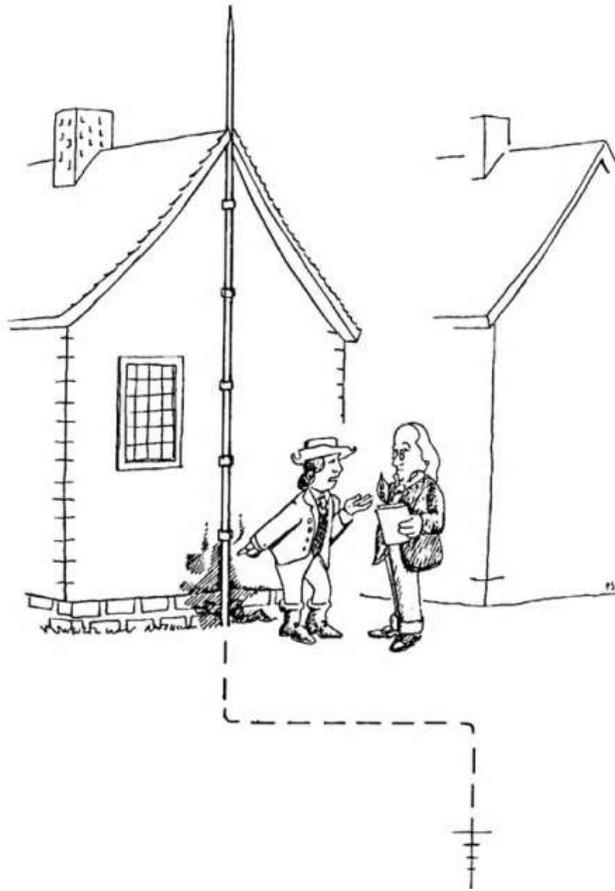


Figura 2.2 Benjamín Franklin inspecciona en 1752 el hogar del Señor West, un habitante de Filadelfia.⁵

Indiscutiblemente, Benjamín Franklin marcó la historia del desarrollo de la teoría del rayo, métodos de protección y normativas actuales a nivel mundial.

2.2. Definición y características de la descarga atmosférica

Las descargas atmosféricas o mejor conocidas como “rayos” son una poderosa descarga electrostática natural, causado por la separación de cargas eléctricas positivas y negativas producto de un proceso atmosférico que puede darse entre nubes, entre nube-tierra, y viceversa.

Son bastante difíciles de controlar y/o predecir. La forma, el lugar, el tipo de descarga, y el tiempo del fenómeno solo puede ser observadas o cuantificables (si es posible) en el momento en

⁵ Extraída de: Lightning Protection for People and Property por Marvin Fydenlund, Capítulo 2, figura 2.4

el cual ocurre, la diferencia de potencial entre las nubes y la tierra generan grandes descargas eléctricas, y se estima que el 80% de estas tienen un valor mayor a 20kA, y pueden alcanzar valores hasta de 200 kA. Generando potenciales de unos 200 millones de voltios en el suelo. La duración del evento es de aproximadamente 100 microsegundos.

La descarga atmosférica produce un pulso electromagnético que es acompañado por la emisión de luz (relámpago) causada por el paso de corriente eléctrica que ioniza las moléculas del aire. Seguida por el sonido característico del trueno que se produce por la onda de choque de la corriente eléctrica que pasa a través de la atmósfera, calienta y expande rápidamente el aire.

2.3. Tipos de descargas atmosféricas.

2.3.1 Descarga tipo nube-ionosfera

Las descargas del tipo nube-ionosfera, como su nombre lo indica, sucede entre una nube cargada y la ionosfera. Este tipo de descargas fueron observadas por primera vez en el siglo XIX por diversos observatorios en el mundo, pero no pudieron ser documentadas en imágenes; solamente existía el testimonio de personas que habían presenciado el fenómeno. Sin embargo, durante un programa de la universidad de Minnessota en Estados Unidos llamado “SKYFLASH”. En 1989 se logró documentar por primera vez imágenes de este fenómeno, utilizando una cámara diseñada por la universidad para tal fin. En la figura 2.3 se muestra el resultado obtenido.



Figura 2.3 Primera documentación de las descargas nube-ionosfera por la Universidad de Minnessota en 1989 en su observatorio O'Brien.

Las descargas de este tipo se dirigen desde la nube hasta la ionosfera al mismo tiempo que una descarga nube-tierra ocurre. En el año de 1994, una cámara de una aeronave logró captar una descarga de este tipo durante un viaje. La universidad de Alaska Farbia analizó las imágenes y observaron dos colores peculiares durante la descarga: azul y rojo.

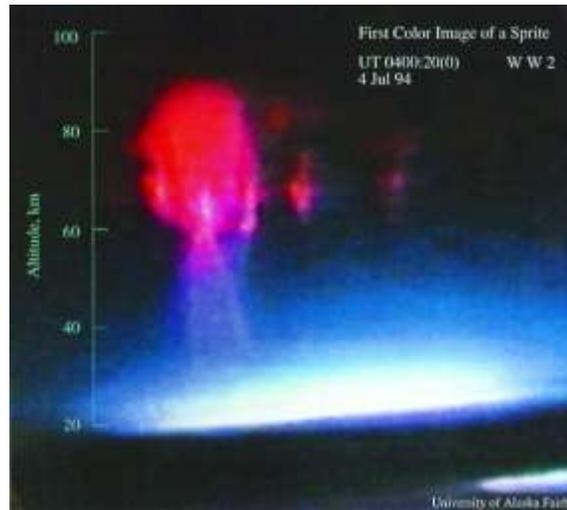


Figura 2.4 Descarga nube-ionosfera registrada por una aeronave y analizada por la Universidad de Alaska Farbia en el año de 1994.

Al componente de color rojo del fenómeno se le ha llamado “Sprites” (En español, duendes), y la de color azul se le denominó “elves” (En español, elfos). La teoría de la formación de las descargas nube-ionosfera es demasiado extensa, para fines prácticos; se presentan a continuación un resumen de las características esenciales de los componentes: “duendes” y “elfos”.

- Los elfos se originan a 90 km sobre una nube cargada eléctricamente, y se extiende unos 300 km desde su origen. Esto sucede aproximadamente 1 ms después de una descarga nube a tierra. Los colores característicos son rojizos claros o de color naranja. La corriente de esta componente ronda los 10 kA.
- Los duendes se originan a 70 km sobre una nube cargada eléctricamente, después de una descarga nube a tierra. El color característico de este componente es azul. Su corriente ronda los 5 kA.



Figura 2.5 Descarga nube-ionosfera registrado durante una lluvia de meteoros el 13 de agosto de 2016 en Shi-Keng Kong, China.

2.3.2 Descarga tipo nube-nube e intranube

Las descargas nube a nube o inter-nube son aquellas que ocurren entre zonas cargadas de polaridad opuesta entre dos nubes diferentes. Por lo general ocurren entre las partes más altas de las nubes, y pueden estar acompañadas de una descarga de nube-tierra.

Las descargas de tipo intranube ocurren entre centros de carga de una misma nube con cargas opuestas. Suelen observarse destellos luminosos dentro de la nube cuando este tipo de descarga ocurre. Al igual que una descarga nube a nube, estas pueden estar acompañadas de una descarga nube-tierra.

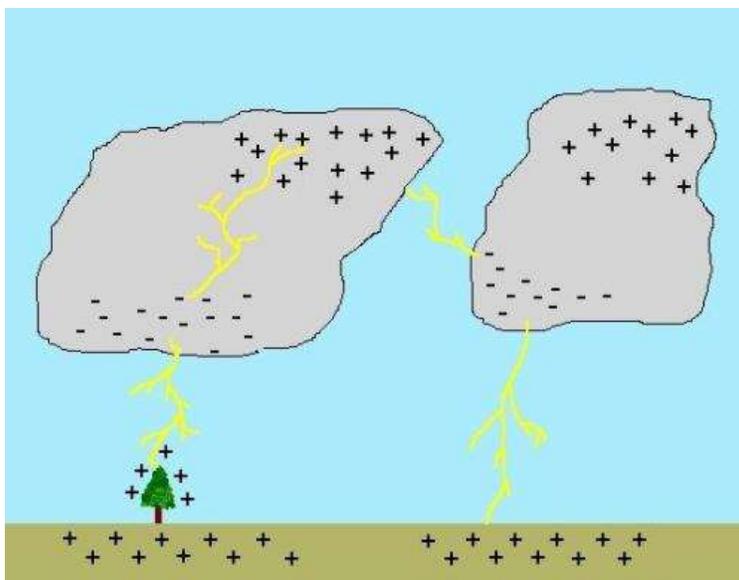


Figura 2.6 Descripción gráfica de las descargas: nube a nube e intranube.⁶

2.3.3 Descarga tipo nube-tierra (viceversa)

Según la norma IEC 62305-1 que evalúa los impactos de descargas atmosféricas, considera que las descargas más frecuentes son del tipo nube-tierra descendentes negativas en las cuales basaremos nuestro estudio⁷.

La mayoría se originan cerca del centro de carga negativo de la nube de tormenta y liberan la carga negativa hacia la tierra.

Las categorías de las descargas nube a tierra son las siguientes:

1. Rayo descendente negativo
2. Rayo ascendente negativo
3. Rayo descendente positivo
4. Rayo ascendente positivo

⁶ Extraída de artículo web del observatorio de Hong Konk. Enlace: http://www.hko.gov.hk/m/article_e.htm?title=ele_00018

⁷ Las descargas nube a nube, son también importantes y peligrosas. Un ejemplo de consideración de este tipo de descargas se da cuando tenemos torres de telecomunicaciones. Su altura hace que se encuentre en la zona de descarga y las corrientes pueden afectar gravemente el equipo instalado.

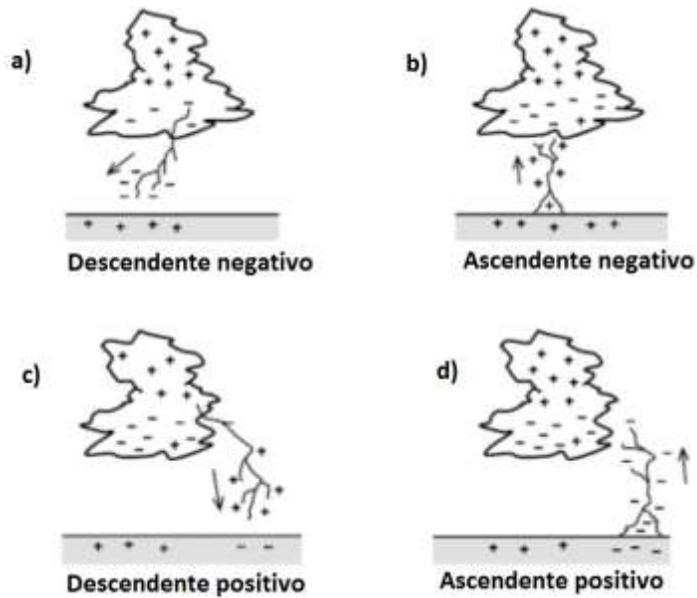


Figura 2.7 Tipos de descargas nube-tierra.⁸

Las cuatro categorías anteriores son el resultado de observaciones alrededor del mundo que se han registrado. Existe un porcentaje estadístico acerca del rayo nube-tierra y se ha llegado a la conclusión que:

- El 90% de las descargas ocurridas son de tipo descendentes negativas.
- El 10% restante de los fenómenos registrados son de tipo descendentes positivas.

Se cree que la descarga tipo ascendente ocurre solamente en estructuras con una altura igual o mayor a 100 metros y en lugares con una gran elevación sobre el nivel del mar. Sobre montañas por ejemplo.

⁸ Extraída de: A electromagnetic computation methods for lightning por Baba, Yoshiro, Rakov; Capitulo 2, sección 2.3.2 figura 2.3

2.4 Proceso de una descarga atmosférica nube-tierra descendente negativa

2.4.1 Física del rayo

La fuente principal de un rayo es casi siempre una nube de tormenta. La característica principal de este tipo de nubes es que ha adquirido una carga eléctrica producto del movimiento, interacción y reacciones químicas de las partículas de la nube. La nube busca neutralizarse y la forma de lograrlo es encontrar una fuente con una carga contraria a la de la nube, cuando la nube y el plano de tierra se encuentran cargados eléctricamente con cargas contrarias, la descarga atmosférica sucede. El intercambio de cargas conlleva a una corriente eléctrica de gran magnitud (en el orden de los 30 kA).

2.4.2 Electrificación de las nubes

El proceso de electrificación de una nube sigue en estos días en estudio y no se está completamente seguro de cómo este proceso eléctrico funciona, por lo que en la actualidad existen numerosas teorías que explican la electrificación de las nubes, pero hay diferentes conceptos en que los científicos concuerdan. En esta sección, se habla de la teoría más aceptada de manera concisa y clara.

Durante una tormenta eléctrica, existe una parte llamada “zona de electrificación” la cual ha sido localizada en el centro de la nube de tormenta, existen corrientes de aire bastantes altas que fluyen del centro de la nube hacia arriba. Estas corrientes hacen una mezcla de varios componentes: pequeñas gotas de nube (se les denominan así a pequeñas gotas de agua que se han congelado), pequeños cristales y granizos. Sólo dos de estos tres componentes tienden a seguir la trayectoria de la corriente de aire: las gotas de nube y los cristales, pero el granizo a ser menos denso que el aire tiende a estar flotando en el proceso y se queda virtualmente estático. Esta diferencia de movimiento hace colisiones, lo cual produce la electrificación de la nube. La polaridad resultante de cada componente es la siguiente.

- a) Los cristales y gotas de nube obtienen una carga positiva.
- b) El granizo se carga negativamente.

El movimiento de estos componentes continúa, la corriente transporta las cargas positivas en la punta de la nube mientras que en la parte de en medio se mantiene negativa (producto del granizo). Entonces, es válido afirmar que tanto en la punta de la nube como su parte media tienen polaridad positiva y negativa, respectivamente. También se ha observado que debido a las precipitaciones de la tormenta existe una pequeña cantidad de cargas positivas que se transportan al límite inferior de la nube. Obteniendo finalmente una nube de tormenta cargada. A este modelo de electrificación se le conoce como: “tripolo”. En la figura 2.8⁹ se muestra de manera esquematizada la nube polarizada, según el modelo mencionado.



Figura 2.8 Modelo del tripolo de la electrificación de una nube.

Existe un término en latín para este tipo de nube: **Cumulonimbus**, de donde “cumulo” se traduce a “acumulado” y nimbus “tormenta”. Estas nubes están asociadas con las tormentas eléctricas, granizo, nieve y descargas de rayo. En algunas regiones, están relacionados con la formación de tornados y vientos con altas velocidades. El término de esta nube nace de la descripción cualitativa del tamaño de la misma por observadores en tierra y es usado para definir las nubes de tormenta de una manera técnica.

⁹ Extraída de: A electromagnetic computation methods for lightning por Baba, Yoshiro, Rakov; Capitulo 2, seccion 2.2.1 figura 2.1



Figura 2.9 Nube cumulonimbus.

2.4.3 Sucesos luego de la electrificación de la nube

La figura 2.10¹⁰ muestra una línea del tiempo (sin escala) lo cual define todos los sucesos en orden de ocurrencia cuando un rayo se lleva a cabo:



Figura 2.10 Etapas resumidas de la formación de rayo con descargas subsecuentes.

Donde cada etapa se describe a continuación:

Etapa uno: Formación líder escalonado y el trazador de retorno (o descarga principal de retorno)

1. La carga presente en la nube hace un punto de quiebre aleatorio en ella misma, lo cual da origen a la ionización del aire circundante debajo de este punto.
2. Es aquí, donde aparecen los llamados “stepped leaders” o “líderes escalonados”. El término escalonado viene del hecho que estos se van creando en pasos discretos y de

¹⁰ Extraída de: A electromagnetic computation methods for lightning por Baba, Yoshiro, Rakov; Capitulo 2, seccion 2.3.3 figura 2.4a

manera aleatoria debajo del punto de quiebre. Las distancias que recorren cada paso rondan entre 10 a 80 metros. Estas trayectorias tienen propiedades conductivas, la función principal de los líderes escalonados es crear una trayectoria conductiva entre la nube cargada y la tierra. Existe circulación de corriente en este proceso, y rondan alrededor de los 100 A (pequeñas en comparación a las de la descarga de rayo final). La trayectoria que se va reproduciendo por cada paso va adquiriendo carga negativa.

3. Cuando el líder escalonado empieza a acercarse al suelo, la carga negativa de la trayectoria induce en éste una carga positiva (repulsión de cargas negativas en el suelo), lo cual va ionizando de manera positiva el aire y se van creando trayectorias similares a los líderes escalonados, pero estos se van formando desde tierra hacia la nube, es por eso que se le denomina líderes ascendentes (estas trayectorias se han medido experimentalmente de entre 30 a 50 metros de longitud). Todo con el objetivo de “conectarse” con el líder escalonado producido por la nube. La distancia que hay del líder ascendente al líder escalonado se le llama: distancia de impacto. En el siguiente paso que haga el líder escalonado se conectará con el líder ascendente más cercano y se cerrará el circuito entre la nube y tierra. Esta distancia es utilizada por muchas normativas actuales para el diseño de los sistemas de protección de descargas atmosféricas y se toma este radio para formar una “esfera” (como se observa en la figura 2.12¹¹), más adelante se retomará este punto.
4. En el instante cuando se juntan las dos trayectorias, se produce un movimiento de cargas extremadamente grandes, que fluyen de la tierra hacia la nube. En este momento, es lo que una persona observaría (figura 2.11), el ojo humano no es capaz de interpretar el sentido de la corriente, por lo que el cerebro traduce el evento como un parpadeo brillante. A esta corriente se le denomina: descarga de retorno (*return stroke*).
5. La magnitud de la corriente ronda en el orden de los 30 kA. La velocidad de transferencia de la corriente en este instante ronda como el 10% de la velocidad de la luz (30×10^6 m/s).

¹¹ Extraída y adaptada de: Curso online Atmo 989 por el Dr. E. Philip Krider de la Universidad de Arizona, Estados Unidos.

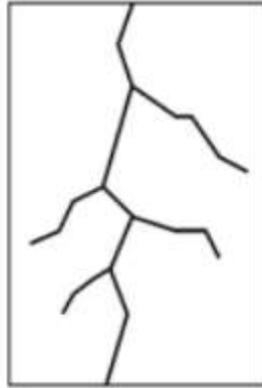


Figura 2.11 Esquema de un rayo de tipo negativo descendente (visto por un espectador)

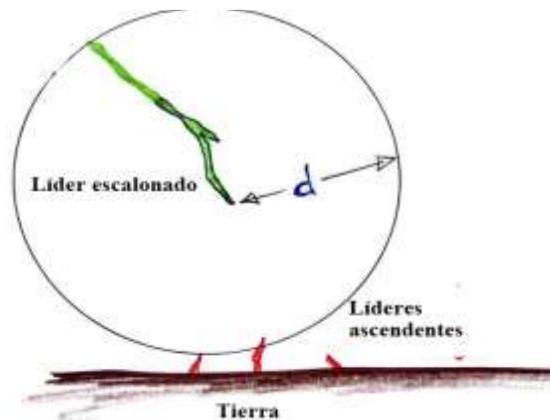


Figura 2.12 Ilustración de los componentes del rayo: líder escalonado y líderes ascendentes.

Etapa dos en adelante: Descargas posteriores

Es posible que después de la primera descarga de la etapa uno, la nube no se haya neutralizado y posea todavía regiones polarizadas dentro de ella. Esta existencia de carga remanente puede ser suficiente para que una descarga posterior tome lugar, y los sucesos para tal fin son los siguientes:

1. Se empiezan a desarrollar los denominados “dart leaders” o “líderes punzantes”. Que tienen el mismo objetivo que lo escalonados: crear una trayectoria conductiva entre la nube y tierra. La diferencia esencial es que la trayectoria que se va creando ya está definida por el líder escalonado de la descarga del paso 5.

2. Se produce el mismo efecto de inducción en el suelo para desarrollar el proceso de “conexión”. Y obteniendo como resultado otro movimiento de cargas. Y esto se repite mientras haya carga suficiente en la nube.

Varias descargas pueden suceder luego de la principal, en función de la cantidad de cargas que hay almacenada dentro de la nube, lo cual es bastante difícil de predecir y cuantificar. Sin embargo, se han podido documentar y observar rayos con varias descargas posteriores (tres descargas en promedio). Además, el pico de corriente en las descargas subsecuentes va disminuyendo en magnitud, y nunca sucede que una descarga posterior sea mayor a una principal.

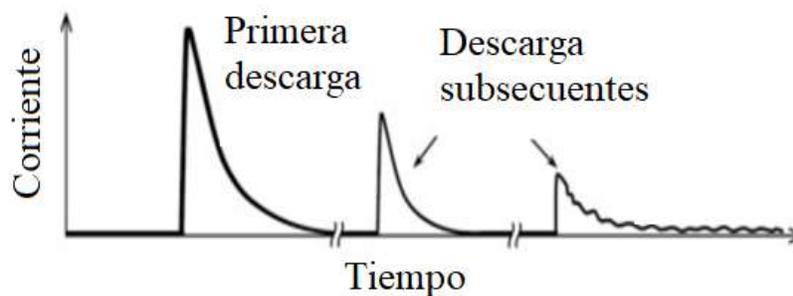


Figura 2.13 Línea del tiempo (sin escala) de varias descargas subsecuentes en un rayo.¹²

Una línea del tiempo promedio de un evento de rayo puede encontrarse en la figura 2.14¹³

¹² Extraída de: A electromagnetic computation methods for lightning por Baba, Yoshiro, Rakov; Capítulo 2, sección 2.3.3 figura 2.4c

¹³ Extraída y adaptada de: Art and Science of Lightning Protection por Martin A. Uman, sección 1.3 figura 1.6.

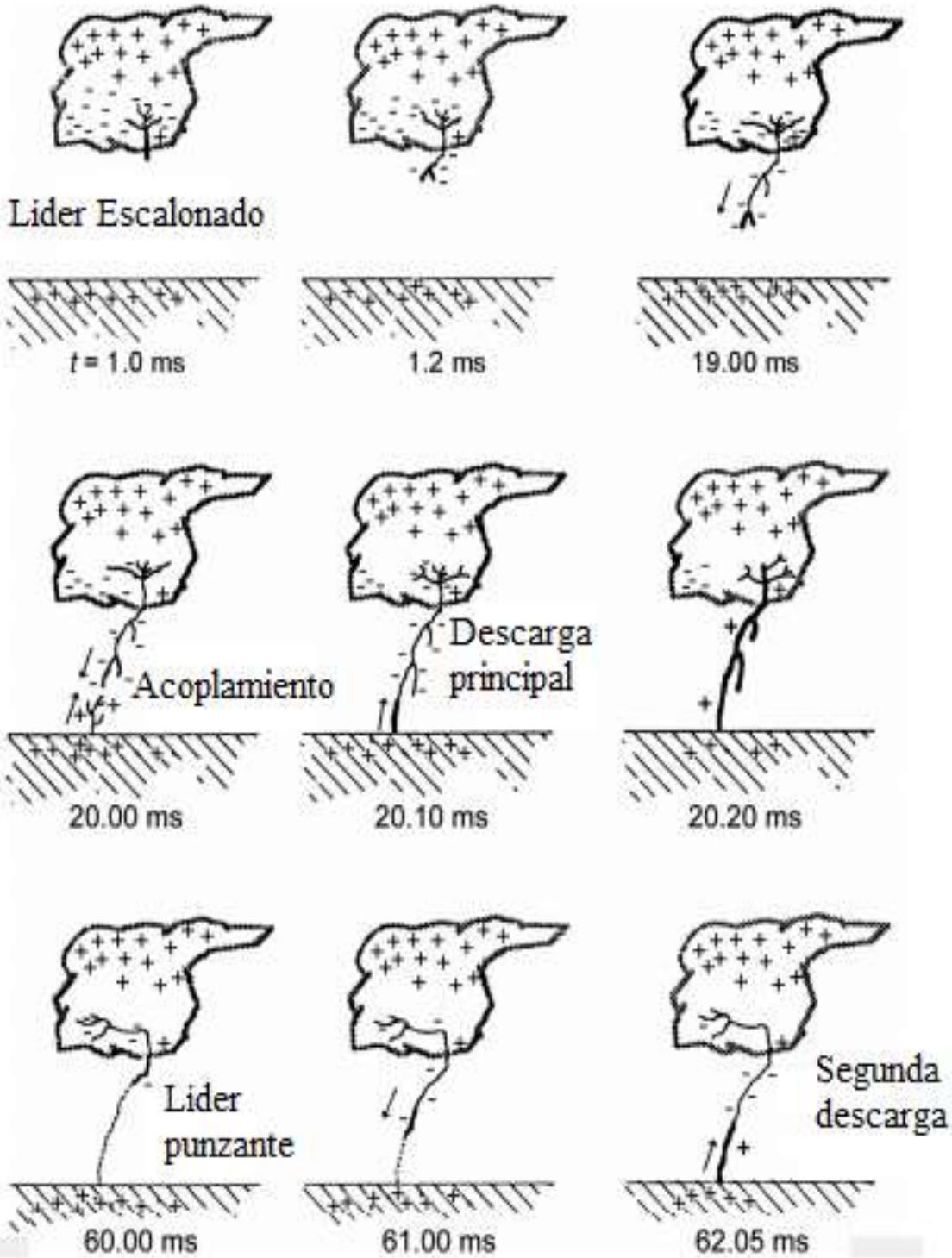


Figura 2.14 Línea del tiempo promedio de un evento de rayo.

2.4.4. Parámetros asociados a la descarga atmosférica nube-tierra

En la tabla 2.1¹⁴, se encontrarán las cantidades promedios de los parámetros más importantes de una descarga de rayo nube-tierra.

<i>Parámetro</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Típico</i>	<i>Máximo</i>
Número de descargas por evento	1	2 a 4	26
Tiempo entre descargas (ms)	3	40 a 60	100
Pico de corriente por descarga (kA)	1	10 a 20	250
Razón de cambio de la corriente (kA/μs)	< 1	20	210
Tiempo de corriente continua en una descarga (ns)	50	150	500
Pico de corriente continua (A)	30	150	1600
Frecuencia de la señal de corriente (Hz)	Entre 60 Hz y 100 MHz		

Tabla 2.1 Parámetros de una descarga nube a tierra. Valores mínimos, típicos y máximos.

Es posible resumir los datos de la tabla anterior en una línea de tiempo donde podemos dividir el evento de un rayo en cuatro componentes importantes:

- Descarga inicial
- Descarga intermedia
- Descarga continua o corriente continua
- Descarga subsiguientes

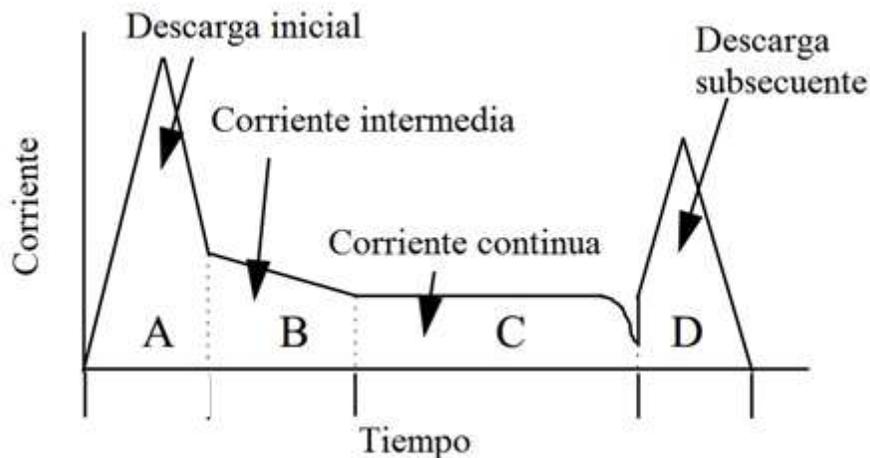


Figura 2.15 Línea del tiempo de un evento de rayo de manera resumida. Ejes sin escala.¹⁵

¹⁴ Extraída y adaptada de: Military Handbook 419 Volumen A; capítulo 3, tabla 3.1.

¹⁵ Extraída y adaptada de : Military Standard 464 ; capítulo 1, figura 1

2.5. Potencial de paso, potencial toque y descarga lateral

2.5.1. Potencial de paso

Cuando una corriente de rayo es inyectada en el suelo se desarrollaron diferentes gradientes de potencial alrededor del electrodo de puesta a tierra, tal como se muestra en la figura 2.16¹⁶

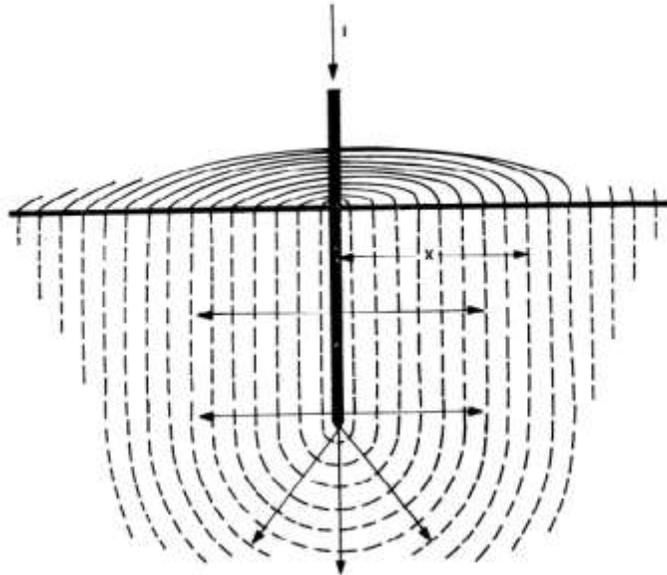


Figura 2.16 Gradientes de potencial desarrollados alrededor de un electrodo de puesta a tierra, cuando una corriente pasa por él

Estos gradientes adoptan la forma geométrica de hemisferios superpuestos, producen un potencial de paso cuando circula una corriente eléctrica por el terreno. Consideremos la figura 2.17¹⁷, cuando un individuo tiene un pie en el punto “a” y el otro en el punto “b”, ambos separados desde un electrodo de puesta a tierra (o donde haya impactado el rayo); habrá una diferencia de potencial llamada V_{ab} aplicado a la persona (de ahí el nombre de potencial de paso). Si se trata al cuerpo humano como una resistencia eléctrica y aplicando una diferencia de potencial, se espera que por ley de Ohm exista una circulación de corriente a través de la persona. Esta corriente puede causar lesiones o resultar mortal; y puede afectar también a animales, algo muy común cuando un rayo impacta en campos abiertos o granjas.

¹⁶ Extraída y adaptada de: Military Handbook 419 Volumen A; capítulo 2, figura 2-8

¹⁷ Extraída de: Art and Science of Lightning Protection por Martin A. Uman, sección 5.3 figura 5.3.

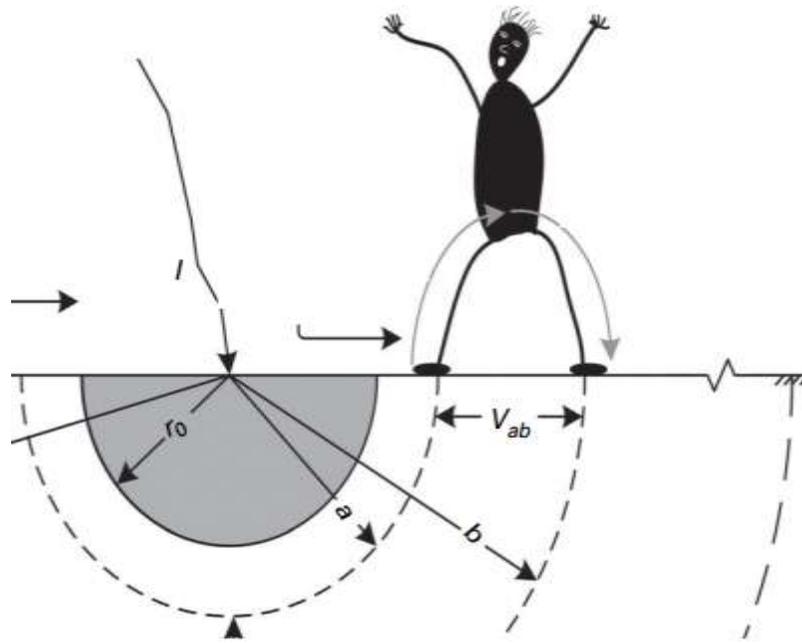


Figura 2.17 Potencial de paso desarrollado en una persona.

El potencial de paso V_{ab} es directamente proporcional a la distancia a y b así como también la corriente que circula en el terreno y su resistividad característica (Ωm).

2.5.2 Potencial de Toque

El potencial de toque es también una consecuencia de los gradientes desarrollados en el suelo por la circulación de una corriente. En este caso, la diferencia de potencial que se considera es la que existe entre alguna parte del cuerpo de una persona con un elemento del SPCDA y su pie. El riesgo del potencial de toque se considera más peligroso que el del potencial de paso, ya que comúnmente durante un potencial de toque la trayectoria de la corriente que se desarrolla en el cuerpo del individuo está muy cercana al corazón.

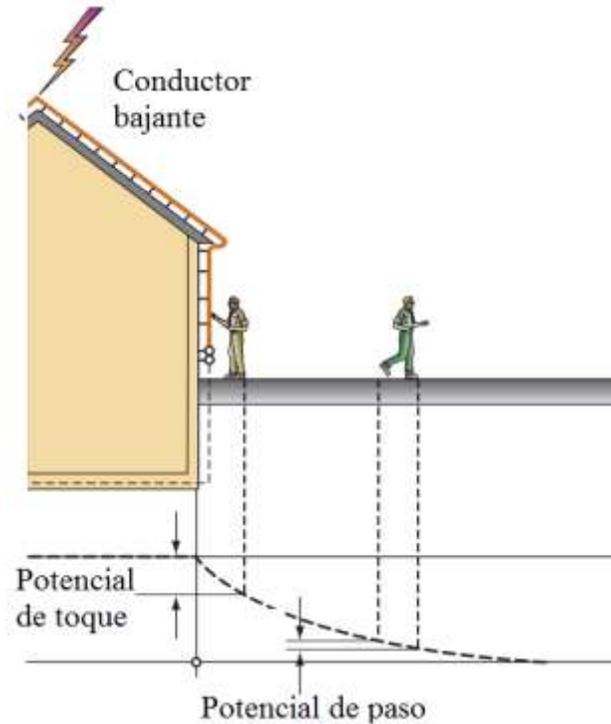


Figura 2.18 Potencial de toque y de paso desarrollado en una persona.¹⁸

El potencial de paso y de toque se puede reducir colocando capas aislantes sobre el terreno principal de la instalación, dentro de los tres metros alrededor de la puesta a tierra. Por ejemplo capas de grava de 150 mm. Además, una malla de plano equipotencial en la instalación reduce considerablemente ambos potenciales.

2.5.3. Descargas laterales

Las diferencias de potenciales causadas por una descarga atmosférica pueden ocasionar fallas a las máquinas eléctricas, daño físico a un operario y descargas laterales que pueden dañar infraestructura. Es por esto que es necesaria la equipotencialización entre cualquier elemento metálico, sistemas de red a tierra y el SPCDA. Según la NFPA 780 se debe equipotencial todo elemento metálico dentro de los 3.6m de un SPCDA, y para elementos metálicos subterráneos se deben equipotenciar si están dentro de los 7.6m de una bajante o red de tierra del sistema. La norma IEC 62305 es más detallada en este sentido, y brinda ecuaciones para calcular la distancia a las que se debe equipotenciar elementos metálicos cerca de un SPCDA. Martin A. Uman en su

¹⁸ Extraída de: Erico Lightning Protection Handbook Pentair, figura 10 página 16.

libro Art and Science of Lightning Protection explica el desarrollo de una descarga lateral de la siguiente manera:

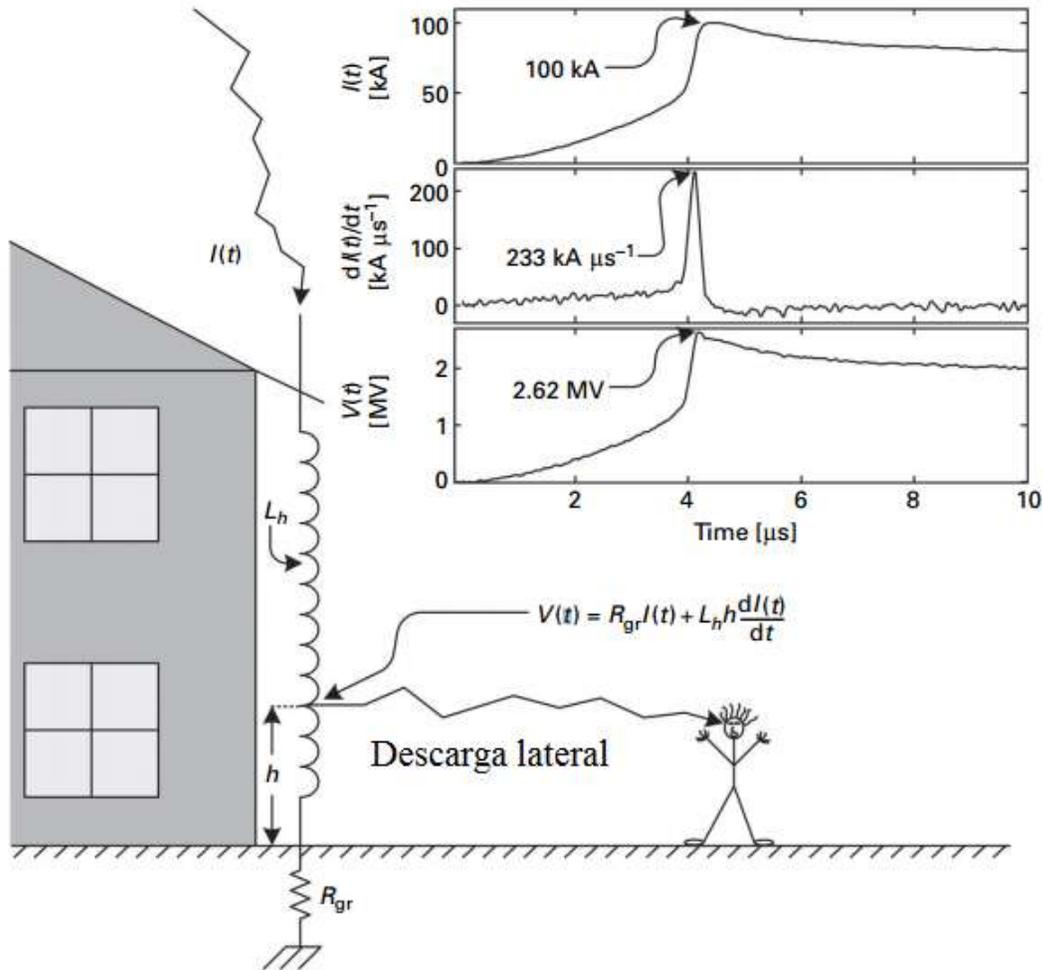


Figura 2.19 Descargas laterales en un SPCDA.¹⁹

Sea “h” el tramo de un conductor bajante medido desde el suelo que termina en un sistema de puesta a tierra, con una resistencia R_{gr} . Además, este conductor posee una inductancia por unidad de longitud L_h . Considerando lo anterior, es posible escribir la ecuación de la caída de potencia en el punto “h” del conductor, de la siguiente forma:

¹⁹ Extraída de: Art and Science of Lightning Protection por Martin A. Uman, sección 4.4 figura 4.11

$$V(t) = R_{gr}I(t) + L_h h \left[\frac{d}{dt} I(t) \right]$$

La caída de tensión debido a la resistencia del arreglo de puesta a tierra se considera constante, y se desprecia la resistencia propia del conductor; pero se toma en consideración la caída de potencial producto de la inductancia del cable. Para calcular la tensión V(t) pico se toman los siguientes valores asociados a los parámetros mencionados anteriormente.

$$h = 2 \text{ m}$$

$$R_{gr} = 25 \Omega$$

$$I(t) \text{ pico} = 100 \text{ kA}$$

$$L_h = 10 \mu \frac{H}{m}$$

$$\frac{d}{dt} I(t) = 2.33 \times 10^{11} \frac{A}{S}$$

Al sustituir los datos en la fórmula de V(t) se obtiene:

$$V(t) = 2.62 \text{ MV}$$

Por lo que si una persona de altura h=2m, se encuentra a una distancia de por lo menos 5 m de un conductor bajante donde circula una corriente con un pico máximo I=100 kA, sufrirá una descarga lateral. (Considerando un valor de tensión de ruptura para una descarga descendente negativa de 500 kV/m).

Se puede concluir del análisis anterior, que las descargas laterales son debido a la caída de tensión producto de la inductancia propia del cable y la tasa de cambio abrupta de la corriente que circula en el cable. El ejemplo anterior considera a una persona cerca de una bajante del SPCDA; debe entenderse que la descarga lateral también puede suceder entre un objeto y cualquier elemento de un SPCDA.

2.6. Probabilidad de impacto de una descarga atmosférica

Siendo el fenómeno del rayo un suceso aleatorio resultaría difícil desarrollar herramientas que permitan predecirlo de manera precisa. Sin embargo, debido a que el rayo es una amenaza natural que compromete la integridad de edificaciones y personas, fue necesario crear mecanismos que permitan conocer la probabilidad que tiene un rayo de impactar en una región determinada. Las siguientes unidades de medida son utilizadas por normativas actuales para la evaluación de riesgo de una descarga atmosférica.

2.6.1 Días -tormenta

Un día tormenta se define como un día calendario local, en el cual se escucha un impacto de rayo; ya sea en los alrededores o a la distancia. En un punto específico, la distancia promedio en la cual un trueno producto de una descarga atmosférica puede ser escuchado es aproximadamente 10 kilómetros. Por lo tanto, un día-tormenta significa que al menos una descarga ha sido percibida dentro de los 300 kilómetros cuadrados alrededor del punto de observación. Este tipo de información es generada por diferentes estaciones climatológicas localizadas estratégicamente para lograr reproducir los días tormentas en un país.

2.6.2 Mapa isoceráunico

Es aquel mapa de un país o zona geográfica que es utilizado para poder determinar el nivel de riesgo de impactos por rayos en una región específica. Para mostrar estos niveles de riesgo, el mapa utiliza las líneas isoceránicas que representan los días tormentas al año, por kilómetro cuadrado. En la figura 2.20, se muestra el mapa isoceráunico de El Salvador.

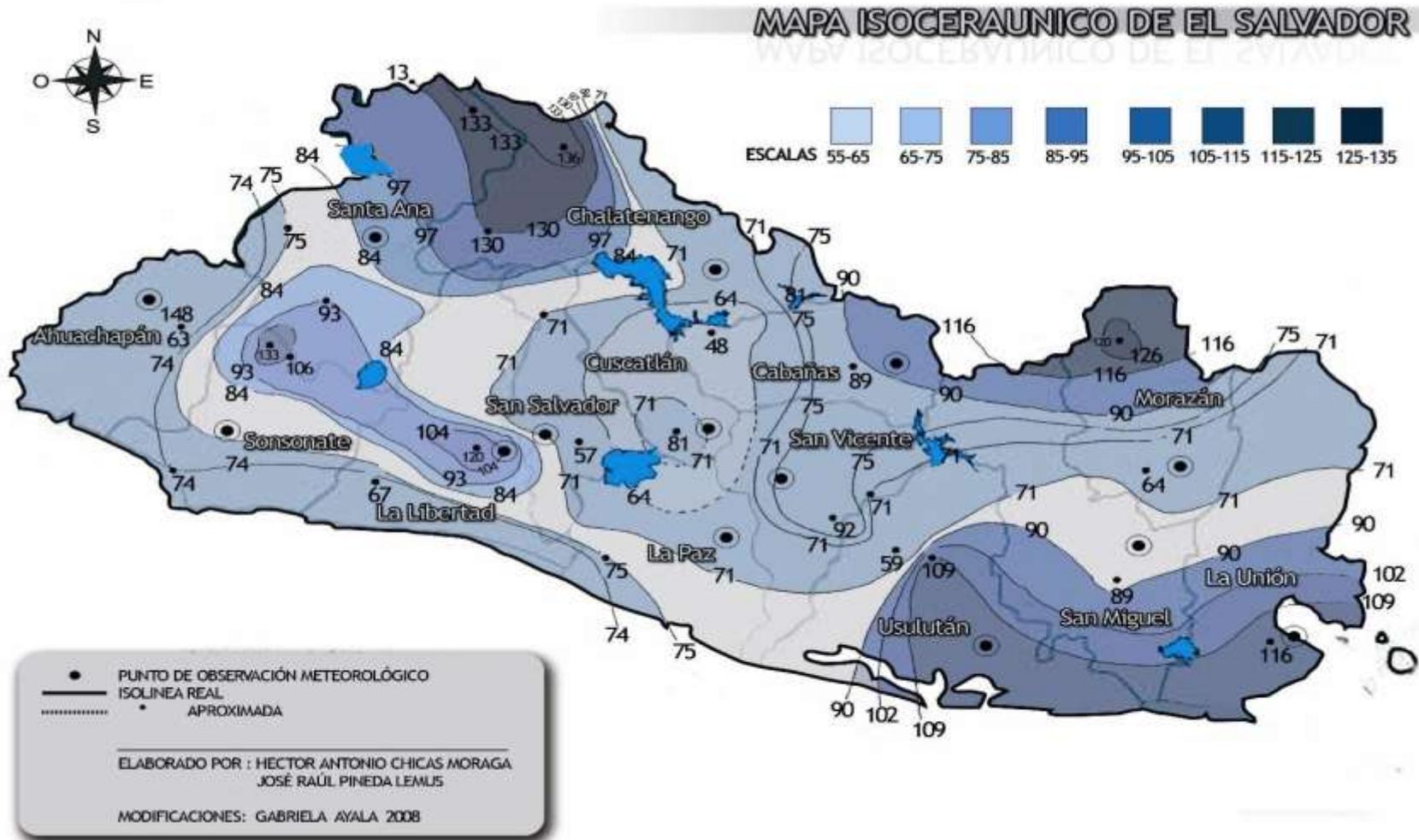


Figura 2.20 Mapa isoceráunico de El Salvador, proporcionado por la Unidad de Acceso a la Información y creado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de El Salvador.

El mapa isocerámico tiene aplicaciones importantes en la protección de sistemas de potencia y telecomunicaciones, ya que permite conocer los días tormentas en el lugar donde se llevará a cabo un proyecto y de acuerdo a esto dar especificaciones adecuadas a los equipos a instalar, de modo que estos no sufran daños irreversibles y tampoco sean tan robustos a tal punto de dimensionar más allá de los requerimientos necesarios.

Los métodos para la elaboración de las isolíneas en el mapa isocerámico son:

- Método con secciones transversales.
- Método con puntos aislados de configuración.

Para más información de este tema, consultar el proyecto de ingeniería realizado por estudiantes de la escuela de ingeniería eléctrica denominado: Elaboración de un mapa de niveles isocerámico de El Salvador. Bajo la coordinación del ing. Roberto Ramos.

Capítulo 3 : Tipos de terminales aéreas y métodos de diseño de un SPCDA

Cuando se habla de SPCDA suelen surgir muchas ofertas de empresas que aseguran tener terminales aéreas más eficientes a las convencionales, e incluso se pueden encontrar fabricantes asegurando que sus productos repelan los eventos de rayo, los cuales nos llevan a clasificar a las terminales aéreas en convencionales y no convencionales.

3.1. Terminales aéreas convencionales.

La punta franklin es la terminal aérea tradicional, aprobada por normativas internacionales como NFPA 780, UL 96 e IEC 62305. Su aspecto es simple, se trata de un captador fabricado en forma cilíndrica, sólido o hueco; de acero inoxidable, cobre, aluminio, o aleaciones de estos. Esta terminal aérea se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1 Punta Franklin.

Las puntas Franklin se pueden adquirir en diferentes longitudes, desde 0.25m (10") hasta 2m (79"); y diámetros de 3/8", 1/2", 5/8" y 3/4". Su punta comúnmente es afilada, pero también se pueden adquirir con punta roma, según las necesidades del diseño. A partir de la punta Franklin se ha creado otro modelo el cual consiste en varias puntas Franklin: una principal de mayor longitud, y otras más pequeñas alrededor de esta, con el fin de brindar mayor efectividad en descargas atmosféricas laterales a edificaciones mayores a 45 m. En la figura 3.2 se muestra este tipo de terminal aérea.



Figura 3.2 Terminales aéreas tipo Franklin tetrapuntal.

3.2. Terminales aéreas no convencionales.

Las terminales aéreas no convencionales son aquellas que según los fabricantes, son capaces de evitar la formación de un rayo o crear condiciones para provocar una descarga atmosférica temprana (ESE: Early Streamer Emission), es decir, el dispositivo crea líderes ascendentes que descargan paulatinamente una nube cargada eléctricamente, antes que un evento de rayo normal ocurra. En la figura 3.3 se muestra una terminal aérea no convencional.

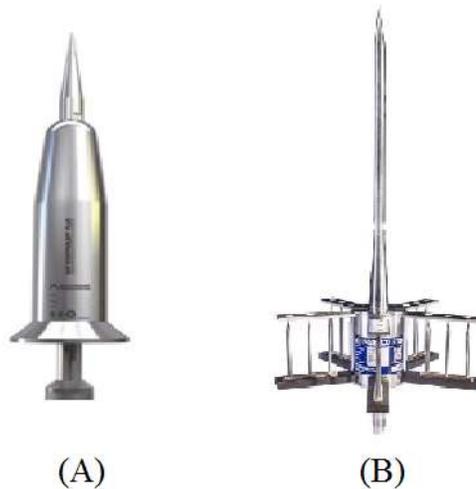


Figura 3.3 Terminal aérea no convencional. (A) Eliminación de rayos, (B) De cebado o ESE

Un sistema del tipo no convencional reciente en el mercado son los llamados DAS (de sus siglas en inglés, Dissipation Array System) o sistema de disipación mediante arreglos. La filosofía de este tipo es la misma que los dos anteriores mostrados; crear condiciones para evitar que un rayo impacte dentro de la zona de cobertura de este sistema. La

particularidad especial de un DAS es que redirige el impacto de rayo fuera de esa zona. Las figuras²⁰ 3.4 y 3.5 muestran el comportamiento esquemático de esta terminal aérea.



Figura 3.4 Funcionamiento del DAS antes de un evento de rayo.

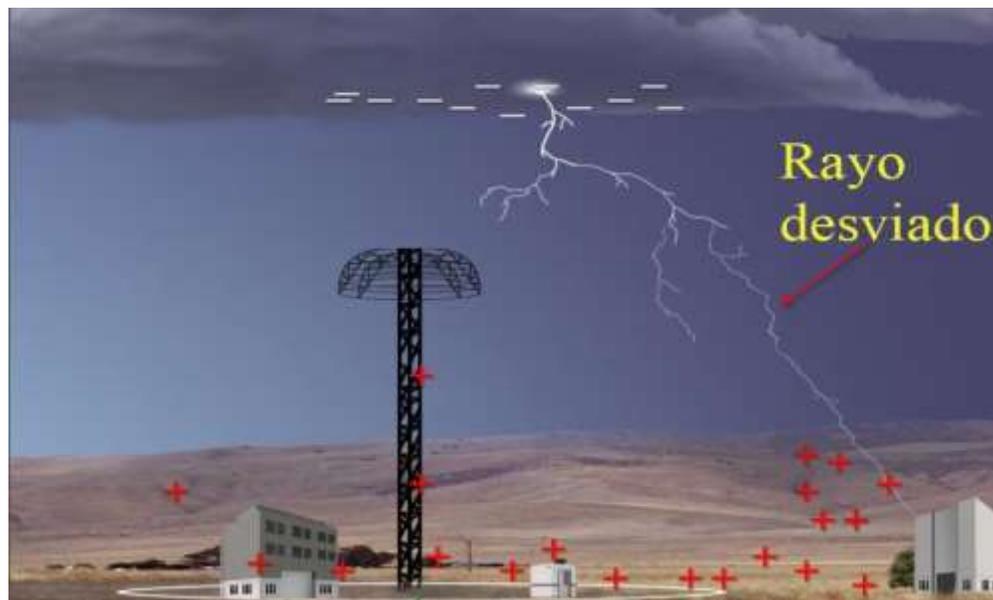


Figura 3.5 DAS desviando un rayo fuera de su zona de cobertura.

²⁰ Extraídas de: Seminario Charge Transfer Technology por Peter Carpenter, director de lightningprotection.com Mayo 2013

3.3. Terminales aéreas convencionales vs. no convencionales.

Actualmente en el mercado de los sistemas de “pararrayos” circula mucha información acerca de los dispositivos no convencionales, argumentando que son mucho más efectivos y que económicamente son la mejor opción debido a su gran cobertura frente a las terminales aéreas convencionales, sin embargo, la principal crítica de estos sistemas no convencionales es la escasez de argumentos teóricos válidos y de laboratorio que se han realizado a los distintos elementos del sistema. Dentro de este conflicto se pueden encontrar lecturas como “A critical review of nonconventional approaches to lightning protection del Dr. M. A. Uman y V. A. Rakov” quienes dan una crítica acertada y convincente de las comparaciones entre estos dos sistemas, las cuales se resumen a continuación:

Eliminación de rayos

- Este tipo de protección se define como aquel que es capaz de crear condiciones en las cuales un rayo no puede ocurrir o impactar la zona bajo protección. Esta visión se opone a la convencional, ya que estos le ofrecen al rayo un paso a la corriente sin causar daños.
- El principio de operación de este tipo de protección es neutralizar la nube cargada por encima del dispositivo (se elimina la posibilidad de una descarga de rayo en esa nube), y también impidiendo la creación de los líderes ascendentes (que se encuentran con el líder escalonado para realizar el acople que originara la descarga de rayo)
- Este sistema tiene los siguientes elementos básicos: a) ionizador: en la punta del dispositivos se colocan otros cientos de puntos pequeños, lo cual realizarán el llamado efecto corona para descargar la nube de tormenta. b) Un colector de corriente a tierra, esencialmente es un sistema de puesta a tierra. c) Conductores, llamados cables de servicios, que ayudan a neutralizar la tierra para impedir la creación de los líderes ascendentes.
- Existen la posibilidad que estos sistemas fallen y que se comporte como un sistema convencional, algunas de las razones: el sistema ionizador no crea la suficiente carga para neutralizar las nube y por lo tanto este se convierte como una punta normal de pararrayos, también si la rapidez de propagación del líder escalonado es alta puede evadir el arreglo del ionizador, y de nuevo, comportarse como una punta

de sistema convencional (ya que el líder escalonado logra inducir en el suelo el líder ascendente para conectarse con él y completar la trayectoria conductiva para la corriente de rayo).

Sistemas de descarga temprana (ESE: Early Streamer Emission)

- Son sistemas que utilizan puntas aéreas similares a las de los sistemas convencionales, con la única diferencia que estas se diseñan para lograr lo siguiente: inducir un líder ascendente y lanzarlo al aire, con el fin de encontrarse con el líder escalonado que proviene de la nube, para lograr así una descarga temprana del rayo. Con esto, el parámetro striking distance se aumenta por lo que si se utiliza el método de la esfera rodante, el área de protección aumenta también (hasta cierto punto).
- El diseño de estos equipos se basan en asumir parámetros de las etapas de rayo (lo que no concuerdan con los valores promedio experimentales, medidos por diversas personas alrededor del mundo).
- Las instalaciones de laboratorios que desarrollan estos dispositivos, no logran simular las condiciones del rayo en su forma natural, por lo que la prueba de estas puntas especiales tenderían a funcionar solamente en las condiciones que el laboratorio crea. Pero en la práctica, los resultados no son los esperados
- Personas que han estudiado el desempeño de estas puntas especiales en instalaciones reales, han llegado a conclusiones bastante similares, entre ellas es la comparación directa entre los sistemas convencionales y los de tipo ESE. El diseño y comportamiento bajo descargas de rayo es el mismo, y el funcionamiento es igual que uno convencional.

Si bien es cierto, las protecciones convencionales basa su credibilidad y buena aceptación por su historial de éxito en sus aplicaciones (y no en argumentos teóricos, debido al no completo entendimiento del fenómeno del rayo), el uso de los sistemas no convencionales involucra una instalación siempre de uno convencional. Esto quiere decir que el diseño completo de un sistema no convencional utiliza las mismas técnicas y métodos que uno convencional. No hay ninguna innovación o métodos nuevos para el diseño de estos sistemas.

3.4 Métodos de protección

3.4.1 Método del ángulo fijo

Este método es, aparentemente, uno de los más fáciles de implementar en sistemas de protección de pararrayos. En el año 1777, una edificación que resguardaba materiales inflamables en Purfleet, Inglaterra, fue partícipe de uno de los primeros sistemas de pararrayos registrados en la historia con este tipo de protección de ángulo fijo. Este diseño fue realizado por Benjamín Franklin. La punta instalada tenía una altura de 7.3 metros sobre una estructura de 4.3 metros. Se creía que el diseño resguardaba todo lo que estuviera a 11.6 metros alrededor de la terminal aérea, por lo que la relación de protección fue de 11.58 a $4.3 \approx 1.6:1$ m. Los registros de este caso muestran que la edificación fue impactada por un rayo, pero se consideró en ese tiempo que el daño fue mínimo ya que resguardaba materiales inflamables. La figura 3.6²¹ muestra la aplicación del método de manera ilustrativa:

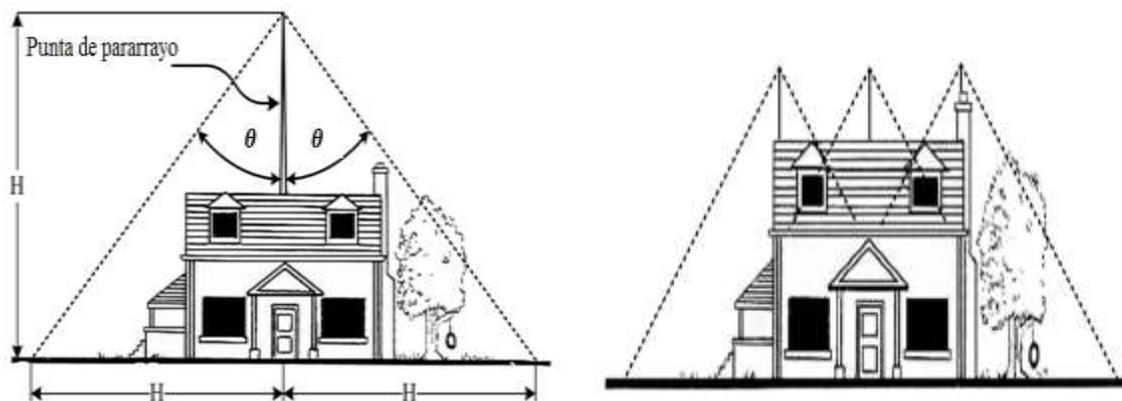


Figura 3.6 Método del ángulo fijo. A la derecha volumen de protección determinado por ángulo θ . A la izquierda, aplicando varias terminales aéreas para abarcar mayor área de protección, siempre utilizando un ángulo θ

La elección del ángulo de protección θ ha venido decreciendo con el pasar de los años. Primeramente, Benjamín Franklin aseguraba que el ángulo debería ser aproximadamente 30° a ambos lados de la punta de interceptación; dando un ángulo total de 60° . Luego, el ángulo total se redujo a 30° . La NFPA 780, en su edición del año 2008, en el artículo **4.7.2 Techos de niveles múltiples** acepta sistemas de protección bajo este método. Este artículo establece los lineamientos y consideraciones a tomar en cuenta para diseñar la protección.

²¹ Extraída de: Art and Science of Lightning Protection por Martin A. Uman, sección 3.4 figura 3.8.

Las relaciones de protección consideradas son de 1:1 y 1:2. La elección de las relaciones está en función del tipo de techo de la estructura a proteger así como también de su altura. Además, la norma acepta la combinación del método de la esfera rodante y ángulo fijo bajo ciertas condiciones; tal como se expresa en el artículo anterior. En resumen, según la NFPA 780 se puede aplicar el método del ángulo fijo a estructuras que cumplan con el artículo 4.7.2; por ejemplo si la edificación tiene una altura menor a quince metros.

3.4.2 Método de la esfera rodante

El método de la esfera rodante es de lo más utilizados cuando se desea diseñar la protección de una estructura. El principio es el siguiente: hacer rodar en todas direcciones una esfera imaginaria de radio “d” sobre la estructura a proteger. Durante este proceso, todo aquello que sea tocado por la esfera es propenso a ser impactado por una descarga de rayo, y todo elemento que quede por debajo de la esfera sin hacer contacto con esta durante su rodamiento debe considerarse protegido. La aplicación de este método es simple, pero puede complicarse cuando las edificaciones a proteger poseen complejidad en su construcción. La figura 3.7²² muestra la aplicación de este método de manera general:

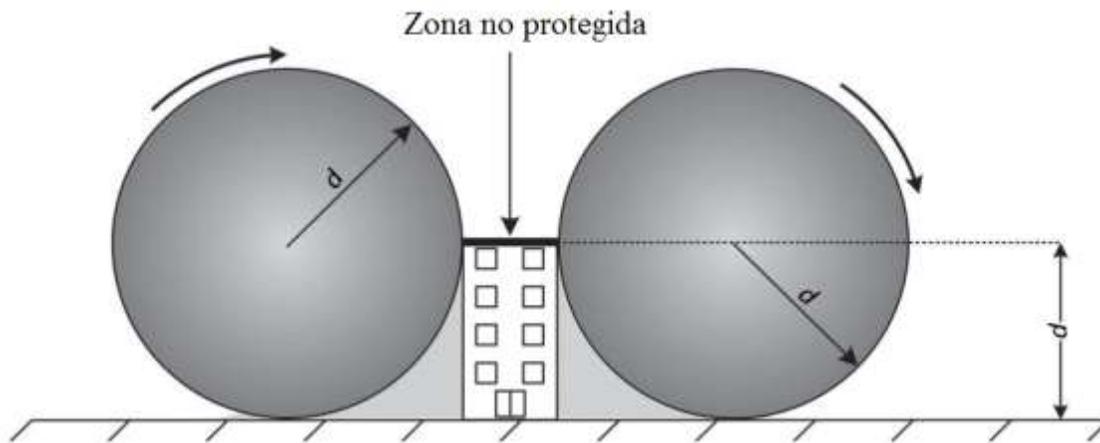


Figura 3.7 Método de la esfera rodante con radio “d”.

²² Extraída de: Art and Science of Lightning Protection por Martin A. Uman, sección 3.4 figura 3.9a

Cuando la altura del edificio es igual al radio de la esfera se considera un caso crítico, ya que si esta altura es mayor al radio la esfera empezará a rodar sobre los costados de la estructura a considerar. Según el método, los costados son vulnerables a una descarga de rayo. Para alturas de edificaciones menores al radio, la esfera rueda en los bordes de su parte más alta sin tocar los costados de la edificación. El rodamiento de la esfera para edificaciones con alturas mayores a su radio, se puede observar en la figura 3.8²³. En cualesquiera que sean los casos, las áreas que toca la esfera deben protegerse con la instalación de terminales aéreas espaciadas entre sí, de tal forma que la esfera no toque en ningún momento la edificación.

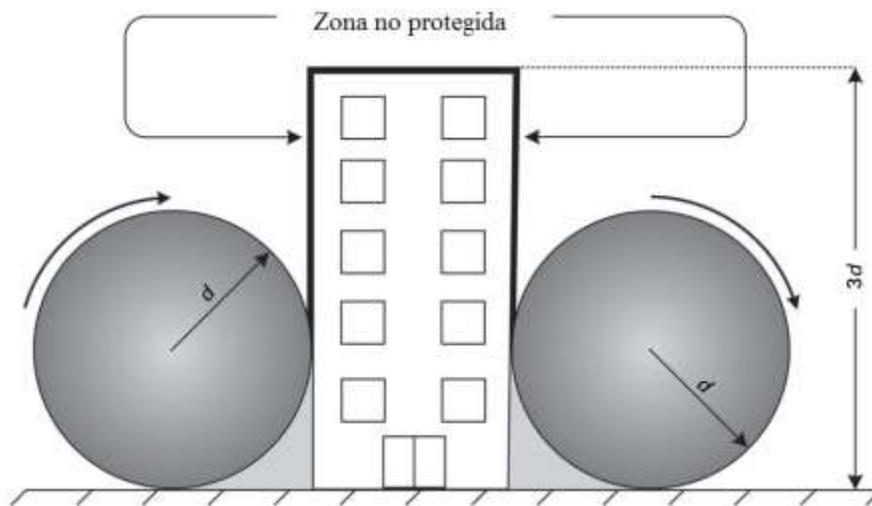


Figura 3.8 Método de la esfera rodante. Movimiento de la esfera en edificaciones mayores a su radio “d”.

Radio de la esfera rodante

La determinación del radio de la esfera rodante se basa en la distancia de impacto mostrada en la figura 2.12. La distancia de impacto es una longitud no constante. Esto se debe a que los parámetros de los rayos registrados y documentados alrededor del mundo son muy variables (corriente, duración, frecuencia, etc.) por lo que resultaría inadecuado utilizar una distancia de impacto *general* para el diseño de un sistema de protección. Sin embargo, las normativas actuales designan una distancia de impacto según el tipo de estructura a proteger y posibilidad de drenaje segura de una descarga atmosférica. Ha quedado demostrada la confiabilidad del uso de estas distancias a través de los diseños de protección

²³ Extraída de: Art and Science of Lightning Protection por Martin A. Uman, sección 3.4 figura 3.9b.

realizados con el pasar de los tiempos, y en donde se aplican estas recomendaciones de la norma en cuanto al radio de la esfera. En la tabla 3.1 se muestra los radios de las esferas a considerar según la norma NFPA 780.

Radio de la esfera	Aplicación
Radio de 46 m	Protección para estructuras ordinarias: es aquella estructura que es utilizada para fines comerciales, industriales, agrícolas, institucionales o residenciales.
Radio de 30 m	Protección para estructuras que albergan explosivos, agentes químicos y protección para embarcaciones.

Tabla 3.1 Radio de la esfera y su aplicación según la norma NFPA 780.

A manera de comparación, se muestra en la tabla 3.2 los radios considerados según la norma IEC 62305-3. Esta normativa clasifica los radios de las esferas en función de las magnitudes de los parámetros principales de un rayo (picos de corriente, tiempo, frecuencia); así como también la probabilidad de éxito en interceptar una descarga y manejar su drenaje a tierra. Es así que se tienen cuatro niveles o clases de protección:

Nivel de protección	Probabilidad de éxito	Radio de la esfera
I	99%	20 m
II	97%	30 m
III	91%	45 m
IV	84%	46 m

Tabla 3.2 Radio de la esfera rodante a utilizar, según la norma IEC 62305-3.

3.4.3. Método del cable de guarda (o apantallamiento)

El método de protección mediante cables de guarda consiste en un cable que se extiende sobre la estructura a proteger, lo cual servirá para interceptar una descarga de rayo, y ser drenada de manera segura a tierra. Para definir las zonas de protección del cable de guarda se puede aplicar el método del ángulo fijo o el de la esfera rodante. La NFPA 780 recomienda utilizar el cable de guarda aplicando el método de la esfera rodante en estructuras que contengan gases, vapores, o químicos inflamables, por ejemplo tanques de almacenamiento de combustible. La aplicación del cable de guarda también se puede

observar en subestaciones, en líneas de transmisión y subtransmisión, embarcaciones, etc. La figura 3.9 ilustra este método la cual ha sido tomada de la NFPA 780.

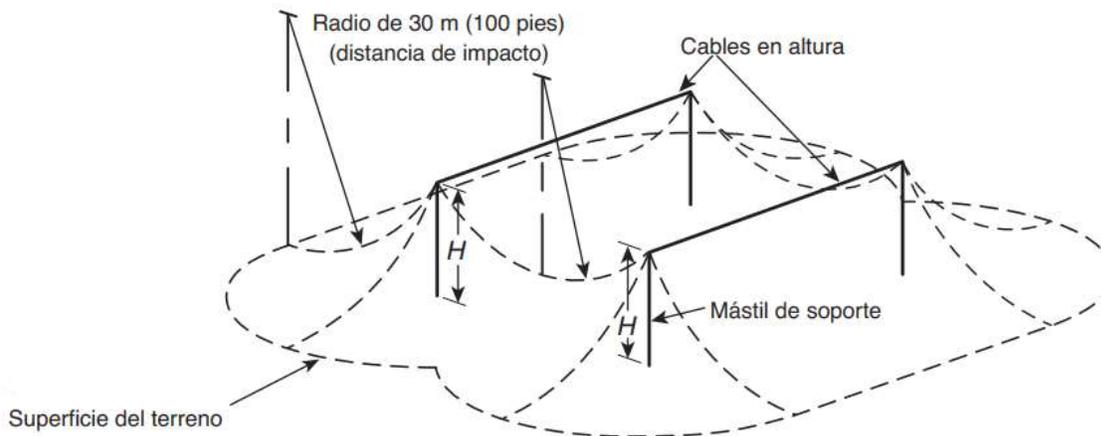


Figura 3.9 Método de protección del cable de guarda según la norma NFPA 780.

3.4.4. Método de las mallas

El método de las mallas es usado únicamente para estructuras que tengan techos planos y no debe utilizarse en techos curvos en ninguna circunstancia. Además, si el techo plano posee equipo, por ejemplo: compresores de aires acondicionados, antenas, etc., se permite utilizar puntas de interceptación en combinación con las mallas para proteger ese equipo existente. El método de las mallas es tratado por la norma europea de protección contra rayos IEC 62305 y establece que todo lo que se encuentre dentro de una malla está protegido, siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Los cables de las mallas más exteriores deben estar en el perímetro de la superficie del techo a proteger.
- Las mallas deben tener el siguiente tamaño, según el nivel de protección considerado:

Nivel de protección	Tamaño de la malla
I	5m x 5m
II	10m x 10m
II	15m x 15m
IV	20m x 20m

Tabla 3.3 Tamaños a utilizar en el método de mallas para la protección contra descargas atmosféricas. Según IEC-62305

La aplicación general mediante el uso del método de la malla para una protección de un edificio se encuentra de manera ilustrativa en la figura 3.10²⁴.

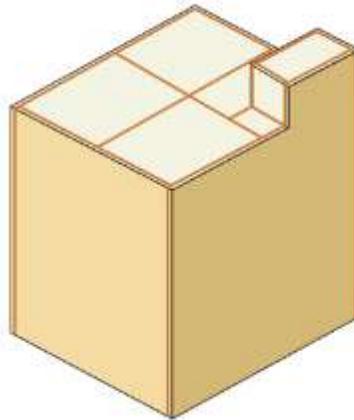


Figura 3.10 Protección de una edificación mediante el método de mallas.

La protección resultante adyacente a la edificación puede determinarse de dos formas: aplicando el método de la esfera rodante (utilizando los radios de la tabla 3.2 según sea el nivel de protección) o utilizando el método del ángulo fijo. La figura 3.11²⁵ describe lo anterior descrito.

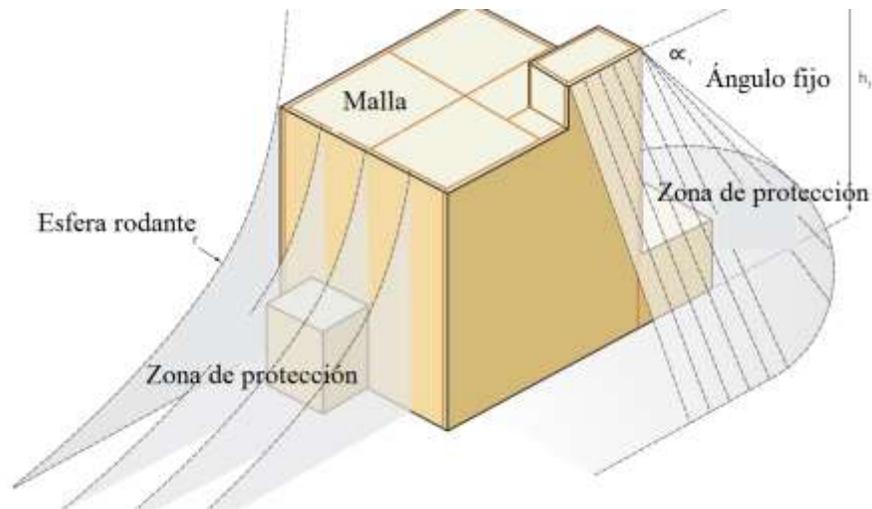


Figura 3.11 Método de mallas. Formas de calcular las zonas de protección adyacentes a la edificación considerada.

²⁴ Extraída de: Erico Lightning Protection Handbook Pentair, figura 31 página 38

²⁵ Extraída y adaptada de: Erico Lightning Protection Handbook Pentair, figura 33 página 38

Capítulo 4 : Diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas

4.1. Método de diseño y normativa a utilizar

Debido a que la ubicación geográfica del proyecto es en territorio salvadoreño, es de suma importancia cumplir con las regulaciones nacionales. Para ello, se debe tomar en consideración lo establecido por la Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET) en el acuerdo N° 294-E-2011, romano cinco y seis donde reconoce y adopta por referencia el Código Eléctrico Nacional (NEC) de los Estados Unidos de América en su edición 2008 publicado por la National Fire Protection Association (por sus siglas en inglés NFPA), de aplicación nacional como norma de instalaciones eléctricas que contiene las exigencias de seguridad y calidad, para todas las personas naturales o jurídicas que tengan relación con trabajos de diseño, construcción, supervisión, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas, incluyendo sus mejoras, ampliaciones e instalaciones provisionales o temporales.

De conformidad a lo establecido por SIGET, se consulta al NEC 2008 acerca de la protección contra descargas atmosféricas, el cual en su artículo 250.106 hace referencias a NFPA 780-2008: Norma para la instalación de sistemas de protección contra rayos.

El artículo 1.1.2 de la NFPA 780 edición 2008, establece que esta no abarca los requisitos de instalación de protección contra rayos para sistemas de generación, transmisión y distribución eléctrica. Sin embargo, podemos encontrar que en el estándar IEEE 665-1995: Guide for Generating Station Grounding, establece en múltiples apartados referencias a la NFPA 780-1992 para información adicional acerca de protección contra descargas atmosféricas.

Como referencias adicionales, las siguientes normativas remiten a NFPA 780:

- API RP-2003: Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning and Stray Currents

- MIL-HDBK-419 Volume 1 and 2: Grounding, bonding and shielding for electronic equipments and facilities.
- MIL-HDBK-1004/6: Lightning Protection.
- U.S. Army Training and Doctrine Command. Guide for Lightning Protective Measures for Personnel. January 2002.
- UL-96 A: Installation Requirements for Lightning Protection Systems.
- Standard Air Force Instruction 32-1065.

Debido a que el sistema de generación se encuentra dentro de las edificaciones, es posible aplicar la norma NFPA 780 para el diseño contra descargas atmosféricas, y junto a las referencias anteriores, se justifica la implementación de la norma NFPA 780 en su edición 2008, como normativa base para este diseño dentro de la cual se pueden aplicar dos métodos de diseño:

1. El método del ángulo fijo, o conocido también como “Cono de Protección”, para ello se tiene dos relaciones, una relación de uno a uno o un ángulo de 45 grados desde la vertical para estructuras con un altura menor a 15m de techos múltiples, y una relación dos a uno o un ángulo de 63 grados desde la vertical para estructuras que no excedan los 7.6m de altura.
2. El método de la esfera rodante al cual abarcado de manera más amplia a lo largo de la norma, dentro del cual se considera una esfera de 46 m (150 pies) para estructuras ordinarias y una esfera de 30m (100 pies) para protección de estructuras que contienen vapores y gases inflamables.

Siguiendo las recomendaciones de la norma, la esfera rodante es el método a utilizar para el diseño, dado que las condiciones de la planta generadora involucran componentes inflamables (combustibles, químicos etc.) se utiliza un radio de 30 m (100 pies) para todas las estructuras a considerar para el diseño.

4.2. Levantamiento tridimensional de la planta

Una vez seleccionado el método de la esfera rodante y debido a la naturaleza gráfica del mismo, se desarrolló un levantamiento tridimensional de todas las edificaciones y estructuras a proteger; con el objetivo de observar los volúmenes de protección resultantes cuando la esfera se haga rodar en diferentes sentidos sobre cada estructura.

Se utilizó el software de diseño AutoCAD, partiendo de un plano arquitectónico proporcionado por la empresa generadora, a este se le agregó estructuras metálicas, civiles, equipos eléctricos y otras que no estaban contempladas en el plano arquitectónico en forma de cubos y/o cilindros dado que se está interesado en la altura y volumen de estos para su protección y de esta manera limitar información técnica que es deseable mantener resguardada del acceso público, esto es necesario para obtener un plano actualizado de la planta y lograr una visión más completa de la misma.

4.3. Posicionamiento de terminales aéreas y volumen de protección

Para determinar el número de terminales aéreas a instalar y la localización de ellas, se toma la longitud de las cubreras y perímetros de techos y/o plafones (utilizando la vista de planta de la estructura) y se divide entre seis, si el resultado es fraccionario, se aproxima a su entero superior, para cumplir con los artículos 4.8.2.1 y 4.8.2.2 de la norma NFPA 780; la cual expresa que la separación máxima entre terminales aéreas sobre los bordes y esquinas no debe de exceder de 6m (20'). Excepto cuando la longitud de la terminal aérea sobrepase 0.6m (24'') del objeto o estructura a proteger en conformidad al artículo 4.8.2.2 de la norma NFPA 780 que expresa en este caso un espaciamiento máximo de 7.6 m (25').

Si cualquiera de los lados de la estructura sobrepasa los 15 m (50') de longitud, se deberá agregar terminales aéreas intermedias espaciadas cada 15 m (50') máximo de los bordes sobre plafones, superficies planas o techos ligeramente inclinados, según el artículo 4.8.2.4 de la norma NFPA 780.

Teniendo un número inicial de terminales aéreas, se separan a igual distancia en los techos y bordes de la estructura, siempre y cuando la separación entre ellas no exceda los 6 m

(20'), y estas a su vez se colocan a una distancia no mayor a 0.6m (2') de los bordes y esquinas para dar cumplimiento al artículo 4.8.2.4 de la norma NFPA 780, se procede a realizar la primera zonas de protección. Se hace rodar una esfera de 30 metros en diferentes direcciones sobre la estructura, y se considera protegido todo elemento debajo del volumen de la esfera, de lo contrario, se deberá agregar una terminal aérea sobre este y realizar nuevamente la zona de protección resultante de rodar la esfera de 30 metros con la nueva terminal.

4.4. Número de bajantes y diseño de puesta a tierra

La buena conducción y drenaje de la corriente proveniente de una descarga atmosférica es fundamental para un SPCDA, para ello se establecen un número mínimo de bajantes a tierra que debe tener el sistema, y cada bajante debe terminar en un arreglo de red a tierra que conduzca la corriente del rayo hacia afuera de la estructura y provea un rápido drenaje de esta, evitando daños a la estructura.

4.4.1. Selección del número de bajantes

El artículo 4.9.10 de la norma NFPA 780 establece los requerimientos del número de bajantes para cualquier SPCDA. Si el perímetro del edificio es igual o menor a 76 metros (250 pies), las bajantes mínimas permitidas son dos. Para estructuras que exceden un perímetro de 76 metros (250 pies), es necesario agregar una bajante adicional por cada 30 metros o fracción de este. Para ello, se puede aplicar la siguiente fórmula, y aproximar su resultado al entero superior si este fuere fraccionario.

$$N_{BAJANTES} = 2 + \frac{P_u - 76}{30}$$

Dónde:

Pu: Perímetro a utilizar en metros

El perímetro a utilizar se calcula a partir de una vista de planta del techo de la estructura protegida, y pueden existir los siguientes casos:

1. Para una estructura de techos al mismo nivel, el perímetro a utilizar es medido a partir de una vista de planta del edificio.

2. Para estructuras de techos a diferentes niveles, se toma el perímetro del techo de mayor nivel y a este se le suma el perímetro del techo del nivel inmediato inferior sin tomar en cuenta la zona protegida por terminales aéreas del techo superior y así sucesivamente.

Para cualquiera de los casos las bajantes deben de estar separadas lo máximo posible entre sí.

4.4.2. Mediciones de resistividad del terreno

La resistencia de cualquier arreglo de puesta a tierra es directamente proporcional a la resistividad del terreno donde se instala, se tiene disponible una serie de mediciones de resistividad del terreno de la planta generadora, utilizando un telurómetro y aplicando el método de Wenner. Las mediciones se llevaron a cabo en puntos estratégicos con el objetivo de tener un valor aproximado de la resistividad del terreno a utilizar para las bajantes a tierra del sistema de protección. En la planta generadora existen pocos espacios para realizar mediciones de resistividad sin que sean afectadas por sistemas de puesta a tierra cercanos, tuberías metálicas subterráneas, etc. Por ello se tomaron lecturas en espacios tales como la cancha de fútbol, y áreas verdes, con el fin de obtener un valor de resistividad promedio que caracterice a la planta, sin embargo para el cálculo de red a tierra se considera el valor máximo de resistividad obtenido para evaluar el escenario más crítico. En la tabla 4.1 se muestran los valores de resistividad obtenidos en la campaña de medición en la planta generadora.

Medición	$\rho(\Omega m)$
M1	6.35
M2	4.84
M3	6.11
M4	9.22
M5	32.8
M6	18.6

Tabla 4.1 Mediciones de resistividad del terreno en la planta generadora.

4.4.3. Selección del arreglo de puesta a tierra

El artículo 4.13 de la norma NFPA 780 dicta los requerimientos generales que se deben de cumplir para los electrodos a utilizar en el sistema de puesta a tierra de un diseño de protección contra descargas atmosféricas, los cuales se describen a continuación:

1. Cada bajante de un sistema de protección debe terminar en un electrodo o arreglo de electrodos exclusivos para el sistema.
2. Los electrodos a utilizar deben cumplir lo siguiente: el material debe ser de acero revestido de cobre, cobre sólido o acero inoxidable. Los tipos de electrodos permitidos son: varillas, placa, anillos de tierra, y conductores radiales. Se podrá utilizar un sólo tipo o la combinación de estos.

Para el sistema de puesta a tierra de este diseño, se hará uso de arreglos de electrodos tipo varilla y conductores radiales. Las varillas deben tener una longitud no inferior a 3 m (10 pies), ni tener un diámetro inferior a 1/2 pulg. Se ha considerado también las condiciones mínimas que dicta la norma, y se ha tenido en cuenta la corrosión existente en la zona de la planta generadora, es por ello que se recomienda que las varillas sean de 5/8" x 10 pies, los conductores radiales sean de cobre desnudo con revestimiento para la corrosión y poseer un calibre de 1/0 AWG para sistemas de clase I, y 3/0 AWG para sistemas de clase II. La norma NFPA 780 en el artículo 4.13 establece una distancia mínima de 0.6 m (2') entre los cimientos de un edificio y la red de tierra. Teniendo en cuenta el requerimiento anterior, se opta por utilizar 1.0 metro para dicha separación

La figura 4.1 muestra los arreglo de puesta a tierra involucrando varillas y electrodos radiales, los cuales se hacen referencias en el libro "Soluciones prácticas para la puesta a tierra de sistemas eléctricos de distribución del autor Pablo Díaz", y la normativa UL-96A en el artículo 10.2

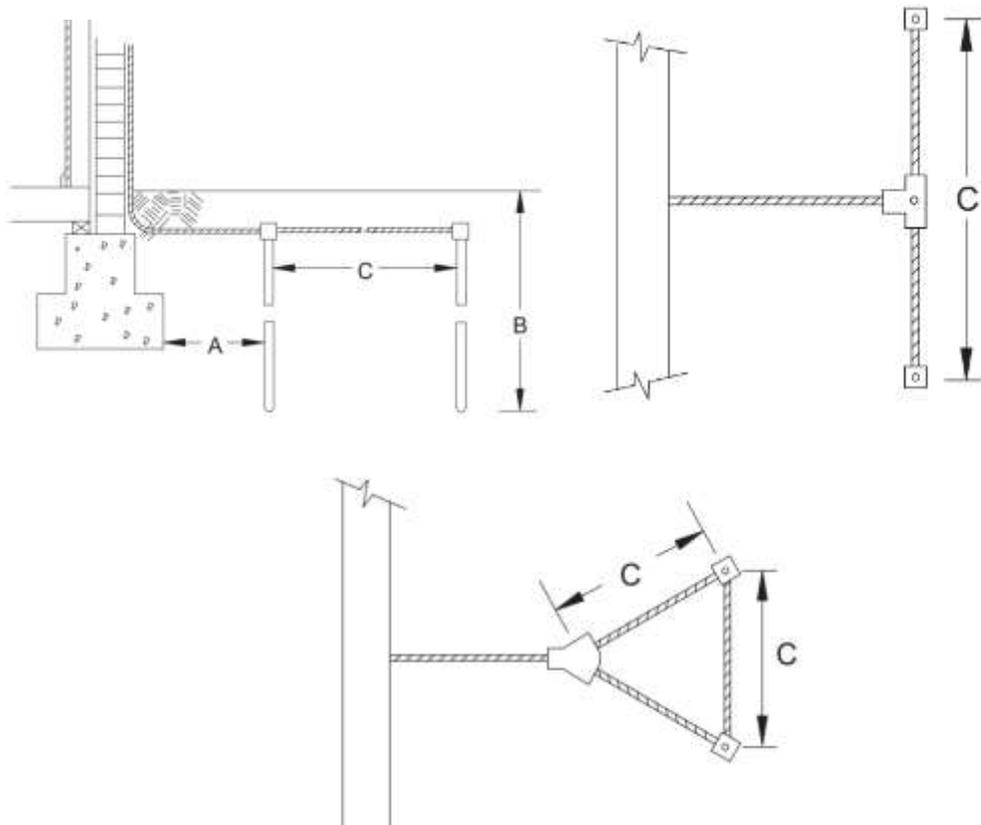


Figura 4.1 Arreglos de puesta a tierra permitidos utilizando conductores radiales y varillas.

Donde las distancias mínimas son: 2 pies para A, 10 pies para B y la sumatoria de las longitudes de cada varilla utilizada para C.

Se ha seleccionado un arreglo de red a tierra formado por electrodos radiales que según el artículo 4.13.5 de la NFPA 780 debe de tener una longitud de 3.6 m (12 pies), y deben de divergir en un ángulo no mayor a 90 grados, la forma de esta se puede encontrar en el anexo F de la misma norma, donde en su artículo 4.13.7 también permite la combinación de electrodos de puesta a tierra, por lo que dicha combinación se realiza con los electrodos tipo varillas de un diámetro de 5/8^{cc} y una longitud de 3m (10 pies) enterradas verticalmente, el resultado de este arreglo y sus especificaciones para el diseño de red a tierra del SPCDA en la planta generadora se muestra en la figura 4.2.

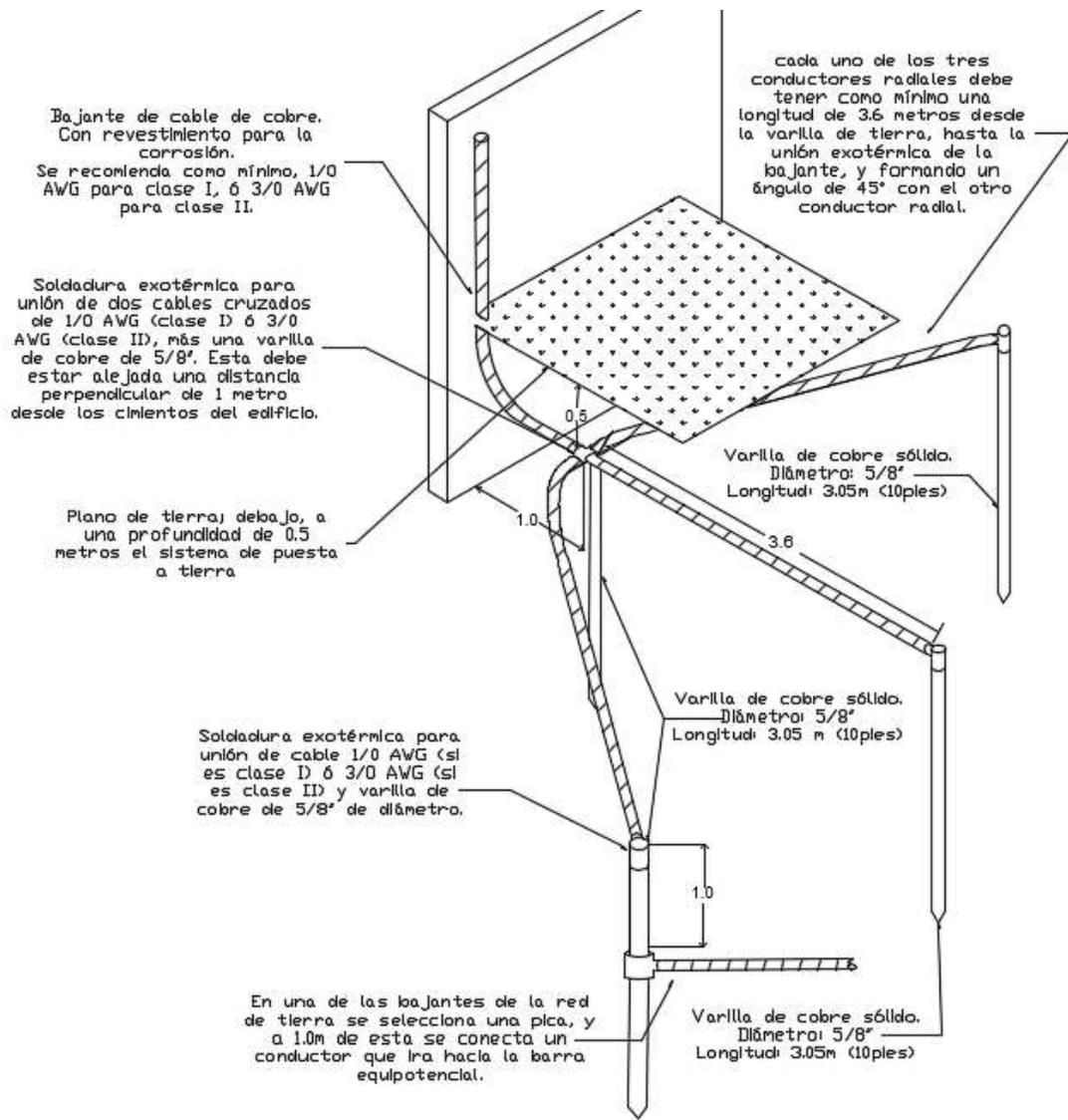


Figura 4.2 Arreglo de puesta a tierra a utilizar en el diseño.

Para la selección de arreglo de red a tierra resultante se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

1. Por la naturaleza del rayo: debido a que este fenómeno es destructivo por sus altos niveles de corriente, se debe procurar que dicha corriente sea despejada del sistema lo más rápido posible. Con un arreglo de este tipo, la corriente de rayo tiene varios caminos a tierra y se drena rápidamente; debido a los electrodos radiales y al número de varillas instaladas. Además, se ha podido documentar casos reales donde se ha observado la distribución radial de la corriente de rayo en el terreno donde circula, como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3 Distribución de la corriente de rayo en un campo de golf.²⁶

2. Por recomendaciones de diseñadores e instaladores, quienes han tenido resultados satisfactorios en el drenaje de las corrientes de rayo al implementar el arreglo de red a tierra antes descrito.

²⁶ Extraída de: Art and Science of Lightning Protection (Uman), Capítulo 5.

4.4.4. Resistencia a tierra del arreglo a utilizar.

La normativa NFPA 780 no establece el valor de resistencia a tierra que se debe cumplir, su anexo B.4.4 únicamente expresa que la resistencia baja es aconsejable para dichos sistemas. Sin embargo la normativa europea IEC 62305-3 en el artículo 5.4, recomienda un valor de resistencia del sistema de puesta a tierra menor a 10Ω . Tomando en cuenta estas dos referencias, el arreglo seleccionado debe tener un valor de resistencia a tierra máximo de 10Ω .

Para el cálculo de la resistencia de la red a tierra de la figura 4.2 se utilizaron procedimientos encontrados en normativas internacionales y simulación por computadora. A continuación se presentan los valores de resistencia para cada caso.

1. Siguiendo lineamiento de IEEE Std. 142, el valor del arreglo despreciando el efecto de los conductores radiales que los une es de:

$$R_g = 3.68 \Omega$$

2. Siguiendo lineamiento de BS 7430 el valor del arreglo obtenido despreciando el efecto de los conductores radiales es de:

$$R_g = 3.26 \Omega$$

3. Utilizando el Software ETAP, el valor del arreglo incluyendo el efecto de los conductores radiales es de:

$$R_g = 2.921 \Omega, \text{ con conductores radiales clase I}$$

$$R_g = 2.909 \Omega, \text{ con conductores radiales clase II}$$

Por lo tanto para los dos casos teóricos y el simulado, utilizando aún el máximo de resistividad del terreno obtenido durante la campaña de medición, se concluye que el valor de R_g del arreglo “Crow’s Foot” o “pata de ganso” es menor en todos los casos a 10Ω ; cumpliendo así con los requisitos de diseño.

4.5 Recomendaciones para equipotencialización (Bonding)

Dentro de un SPCDA, es de suma importancia la equipotencialización, entre el sistema mismo y las estructuras metálicas a su alrededor, así como entre las redes de tierra existentes; con el fin de evitar descargas laterales y diferencias de potencial que se pueden convertir en pérdidas humanas y/o económicas.

La norma UL 96-A, en su artículo 23 recomienda los siguientes lineamientos para la equipotencialización:

1. Las estructuras metálicas localizadas dentro de los 1.8 m (6 pies) del SPCDA, se debe interconectar al sistema.
2. Se debe interconectar cualquier estructura metálica que esté a 1.8 m (6 pies) o más de un conductor del SPCDA, sólo si esta se encuentra a 1.8 m (6 pies) o menos de otra estructura con una equipotencialización existente.
3. El área de contacto del accesorio de equipotencialización sobre la estructura metálica a equipotenciar, no debe ser menos de 3 pulg² (19 cm²).

La norma NFPA 780 en el artículo 4.20 presenta las siguientes recomendaciones para la equipotencialización del sistema:

1. Toda estructura metálica subterránea dentro de los 7.6 m de una red a tierra de descargas atmosféricas se debe conectar eléctricamente con la red de tierra del sistema.
2. Conectar al cableado del SPCDA cualquier estructura metálica que se encuentre a 3.6 metros del mismo.
3. Las estructuras metálicas deben ser eléctricamente continuas, de no ser así, instalar puentes entre los dos puntos separados por el medio aislante.
4. El área de contacto del accesorio de equipotencialización sobre la estructura metálica a considerar, no debe ser menos de 3 pulg² (19 cm²).
5. Todos los sistemas de puesta a tierra de la estructura a proteger (red de 60 Hz, telecomunicaciones, rayos, etc.) deben de interconectarse eléctricamente mediante una barra bus de equipotencialización. (El detalle del arreglo de red a tierra de la figura 4.2 específica la forma recomendada para equipotenciar el sistema de tierra

del SPCDA). La barra bus de equipotencialización debe estar eléctricamente aislada de la estructura que la soporta (consultar figura B-2).

6. Los cimientos de la edificación deben tener una unión eléctrica a tierra, de lo contrario se debe realizar una conexión eléctrica de los cimientos hacia la barra bus de equipotencialización.

El estándar de la fuerza aérea norteamericana AFI32-1065, en su anexo A, muestra la forma recomendada a utilizar para el diseño, con lo que concierne a la equipotencialización de equipos o estructura metálicas al SPCDA; esto se muestra en la figura 4.4:

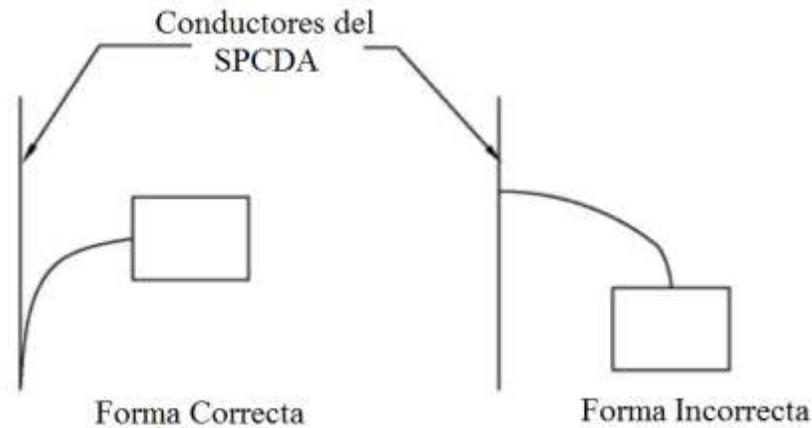


Figura 4.4 Forma de realizar las conexiones de equipotencialización recomendada para el diseño.

La forma correcta de realizar cualquier equipotencialización en el sistema involucra que el conductor que va hacia la estructura o equipo a equipotenciar realice un recorrido ascendente desde el punto de unión al SPCDA, como lo muestra el lado izquierdo de la figura 4.4. Se recomienda que dicho recorrido tenga la mayor cantidad de curvas cerradas posibles. El objetivo de estas curvas es crear una alta impedancia entre el SPCDA y la estructura metálica a equipotenciar; de este modo, cuando en el conductor del SPCDA circule una corriente de rayo, esta se ramifique lo menos posible en la estructura metálica; debido a la alta impedancia generada por la curvatura intencional del cable y su recorrido ascendente.

Para la equipotencialización, se debe de conocer todo aquella estructura ya sea subterránea o sobre el terreno que se encuentre alrededor de un elemento del SPCDA, ya sea esta una

bajante, sistema de puesta a tierra, conductor de interconexión, etc. Dentro de la planta generadora, existen muchas estructuras metálicas (tuberías superficiales y subterráneas, armazones, maquinaria, etc.), conocer con certeza la cantidad de todas estas estructuras, si estas son eléctricamente continuas o no y su localización dentro de la zona del proyecto fue un impedimento para el grupo diseñador; debido a su complejidad y acceso a la información.

Todos los sistemas mencionados anteriormente pueden conectarse eléctricamente entre ellos utilizando una barra de bus de equipotencialidad; mostrada en la figura 4.5. Donde la red de tierra del SPCDA ya se encuentra a igual potencial con las estructuras metálicas ya descritas.

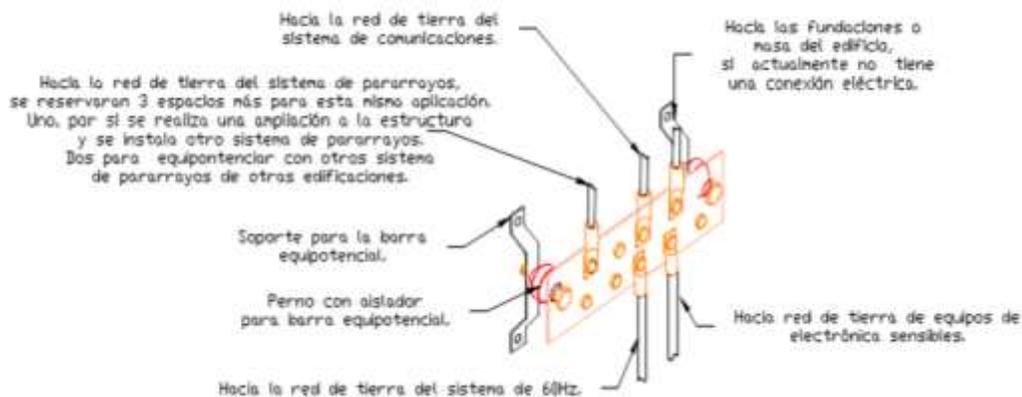


Figura 4.5 Barra bus de equipotencialidad.

4.6 Supresores de sobretensión

El diseño desarrollado protege a una estructura de un impacto directo de una descarga atmosférica, y la guía con eficiencia a tierra donde la corriente es despejada rápidamente, sin embargo existen efectos indirectos de este fenómeno, como las tensiones inducidas por los campo magnéticos que pueden ocasionar daños en equipos eléctricos generando un alto costo económico, si una línea eléctrica se encuentra cerca de un elemento del SPCDA al ocurrir una descarga atmosférica interceptada por el sistema, este generara una sobretensión en la línea eléctrica, lo que hace necesario detallar e instalar equipos descargadores de

sobretensión, si la línea eléctrica es una acometida, o si la línea tiene un cambio significativo de impedancia (como pasar de una línea aérea a subterránea), si esta línea alimenta uno o varios transformadores se debe instalar descargadores de sobretensión lo más cerca posible de los transformadores. Se debe dimensionar correctamente los aisladores que la soportan, las líneas eléctricas y equipos.

Adicionalmente se debe instalar supresores de transientes en los tableros principales y subtableros de carga sensible, así como a toda carga especial dentro de la instalaciones, esto requiere de un estudio detallado de las líneas que alimentan cada edificio o estructura, identificar el recorrido de estas, así también sus niveles de tensión, ubicar el tablero eléctrico general como subtableros dentro de la planta. Es necesario detallar el equipo eléctrico con todas las características (potencia, voltaje, niveles de tensión máximos y mínimos permitidos, etc.), conocer la ubicación y determinar el camino que los conductores toman para alimentarlo, etc.

Para el presente trabajo de grado no se cuenta con los permisos necesarios para realizar el levantamiento de equipo eléctrico antes descrito, y de haberlos tenido, no se podría plasmar en este trabajo por razones de confidencialidad. Dicho estudio debe considerar la coordinación de protección de toda la planta generadora, lo cual escapa de las manos del grupo diseñador por la complejidad misma de la empresa generadora y por el tiempo disponible para culminar, sin embargo, debe evaluarse la instalación de supresores en caso de llevarse a cabo el diseño.

4.8. Diseño del SPCDA en la planta generadora

El diseño del SPCDA en la planta generadora se presenta para cada edificio y/o estructura, mostrando una vista de los volúmenes de protección, la planta arquitectónica con la distribución de terminales aéreas, cuadro de especificaciones de terminales aéreas contenidas en la vista arquitectónica, y detalles complementarios. Finalmente se presenta el presupuesto para la ejecución de los mismos. De esta manera se podrá ejecutar el proyecto por etapas o parcialmente según las necesidades de la planta generadora. Debido a los acuerdos de confidencialidad entre el grupo diseñador y la planta generadora, en las siguientes secciones se muestran únicamente los resultados obtenidos.

Tabla de detalles de terminales aéreas y complementarios.

Unidad SIGMA						
Código	Tipo de base	Tipo de punta a instalar				Detalle de instalación
		Díámetro	Largo	Material	Clase	
SG-001	Base para cumbrera	5/8 pulg	18 pulg (0.46m)	Cobre	I	Figura A-5
SG-002	Base horizontal (parapeto)	1/2 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	I	Figura A-1
SG-003	Base horizontal (parapeto)	1/2 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	I	Figura A-2
SG-004	Base horizontal (parapeto)	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-1
SG-005	Base horizontal (parapeto)	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-1
SG-006	Base horizontal (parapeto)	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-2
SG-007	Mástil acero inoxidable auto soportado $\varnothing=2$ pulg(h=4m) y Mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-8
SG-008	Mástil acero inoxidable auto soportado $\varnothing=2$ pulg(h=3.5m) y Mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-8
DETALLES COMPLEMENTARIOS.						
SG-A01	Parámetros bajo norma para el levantamiento de un cable de interconexión					Figura A-14
SG-A04	Detalles de la base para los mástiles: SG-007 y SG-008					Figura A-15
SG-T01	Detalle a puesta tierra del sistema					Figura B-1

Tabla 4.2 Detalles de terminales aéreas y complementarios de unidad SIGMA.

Volumen de protección

El volumen de protección resultante con la distribución propuesta se muestra en la figura 4.7. Donde se observa que la edificación considerada y equipos están protegidos.

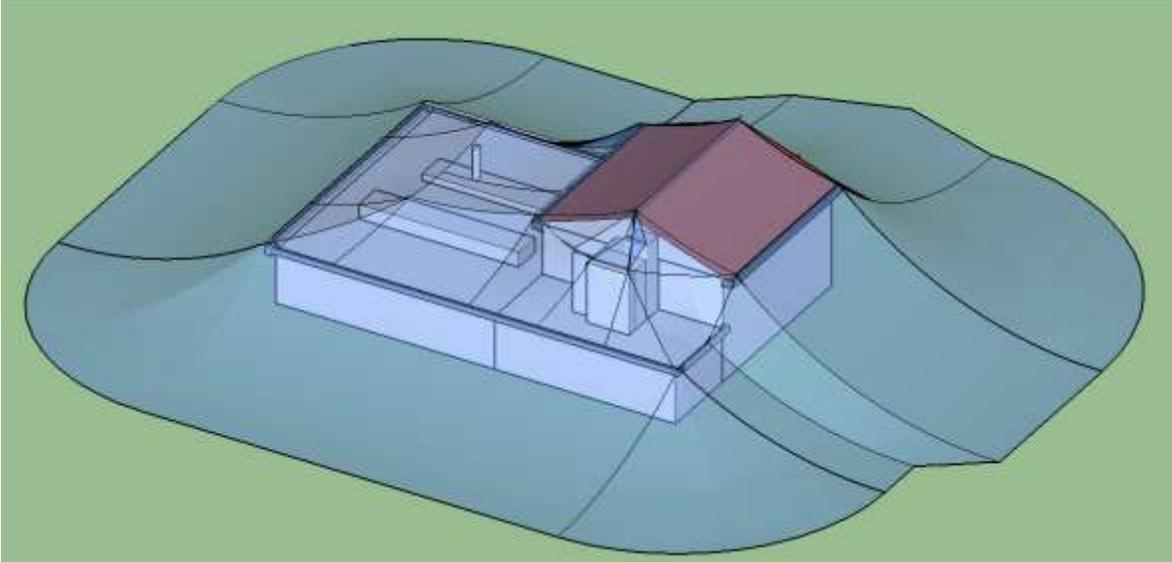


Figura 4.7 Volumen de protección resultante para unidad SIGMA

Consideraciones de diseño especiales para unidad SIGMA

1. El número de bajantes calculado es de cuatro.
2. El diseño del SPCDA para la unidad SIGMA involucró la instalación de dos mástiles (SG-007 y SG-008) con el objetivo de proteger estructuras varias que sobresalen del plafón.

Presupuesto

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 1/2" x 10"	19	\$9.25	\$175.75
Punta de interceptación de cobre 1/2" x 12"	8	\$10.42	\$83.36
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 10"	2	\$16.28	\$32.56
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 18"	4	\$22.86	\$91.44
Base horizontal (parapeto) de cobre con rosca 1/2"	27	\$19.80	\$534.60
Anclaje para cumbrera para punta de 5/8 "	4	\$27.00	\$108.00
Pieza de adaptación de terminal aérea 5/8" a mástil 1 1/2"	2	\$29.00	\$58.00
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable de cobre desnudo 1/0 AWG	346 m	\$5.57	\$1,927.22
Abrazadera para cable 1/0 AWG en mástil de 2"	7 m	\$23.28	\$162.96
Grapa de latón para cable 1/0 AWG con arandela de neopreno (para techo)	16 m	\$4.60	\$73.60
Grapa para cable 1/0 AWG	393	\$5.12	\$2,012.16
Conector de interconexión para cable 1/0 AWG	11	\$6.01	\$66.11
Conector en T para cable 1/0 AWG	8	\$15.34	\$122.72
Electrodo de puesta a tierra. Cobre sólido de 5/8" x 10'	16	\$17.00	\$272.00
Abrazadera de bonding para tubo de 1 1/2" con conector para cable	2	\$18.97	\$37.94
Barra bus de equipontencialidad de cobre, con aisladores y soportes (7 bornes mínimo)	1	\$23.55	\$23.55
Bolsa de cemento	3	\$8.23	\$24.69
Arena	0.5 m ³	\$17.94	\$8.97
SUB TOTAL			\$5,815.63
IMPUESTO (13% IVA)			\$756.03
TOTAL MATERIALES			\$6,571.66

Tabla 4.3 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en unidad SIGMA

ESTRUCTURAS METÁLICAS (PRECIO INCLUYE MATERIALES E INSTALACIÓN)			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Mástil autosoportado de 2", longitud 4 m de acero inoxidable (Ver Anexo A, figura A-11 y A-18)	1	\$944.32	\$944.32
Mástil autosoportado de 2", longitud 3.5 m de acero inoxidable (Ver Anexo A, figura A-11 y A-18)	1	\$919.96	\$919.96
SUB TOTAL:			\$1,864.28
IMPUESTOS (13% IVA)			\$242.36
TOTAL ESTRUCTURAS METÁLICAS:			\$2,106.64

Tabla 4.4 Presupuesto de estructuras metálicas a utilizar del SPCDA en unidad SIGMA

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Instalación y cableado de terminal aérea en techos	52.85 m	\$3.00	\$158.55
Instalación y cableado de terminal aérea en alturas	19 m	\$3.00	\$57.00
Instalación y cableado de terminal aérea en parapeto	110.66 m	\$0.50	\$55.33
Instalación y cableado de terminal aérea en estructuras varias	2 m	\$2.00	\$4.00
Instalación de conductor hacia red de tierra	22.93 m	\$3.00	\$68.79
Soldadura exotérmica (4 conductores 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	4	\$25.00	\$100.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	13	\$25.00	\$325.00
Instalación de varillas de red a tierra	16	\$15.00	\$240.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	12	\$4.00	\$48.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	4	\$1.00	\$4.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$1,060.67

Tabla 4.5 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en unidad SIGMA.

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$6,571.66
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:	\$2,106.64
TOTAL MANO DE OBRA	\$1,060.67
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$3,895.59
DISEÑO DEL SPCDA	\$800.00
IMPREVISTOS	\$1,443.46
TOTAL	\$15,878.01

Tabla 4.6 Presupuesto total del SPCDA en unidad SIGMA.

4.8.2. Unidad de enfriamiento uno.

Vista de planta: localización de terminales aéreas, red de tierra y conductores de interconexión.

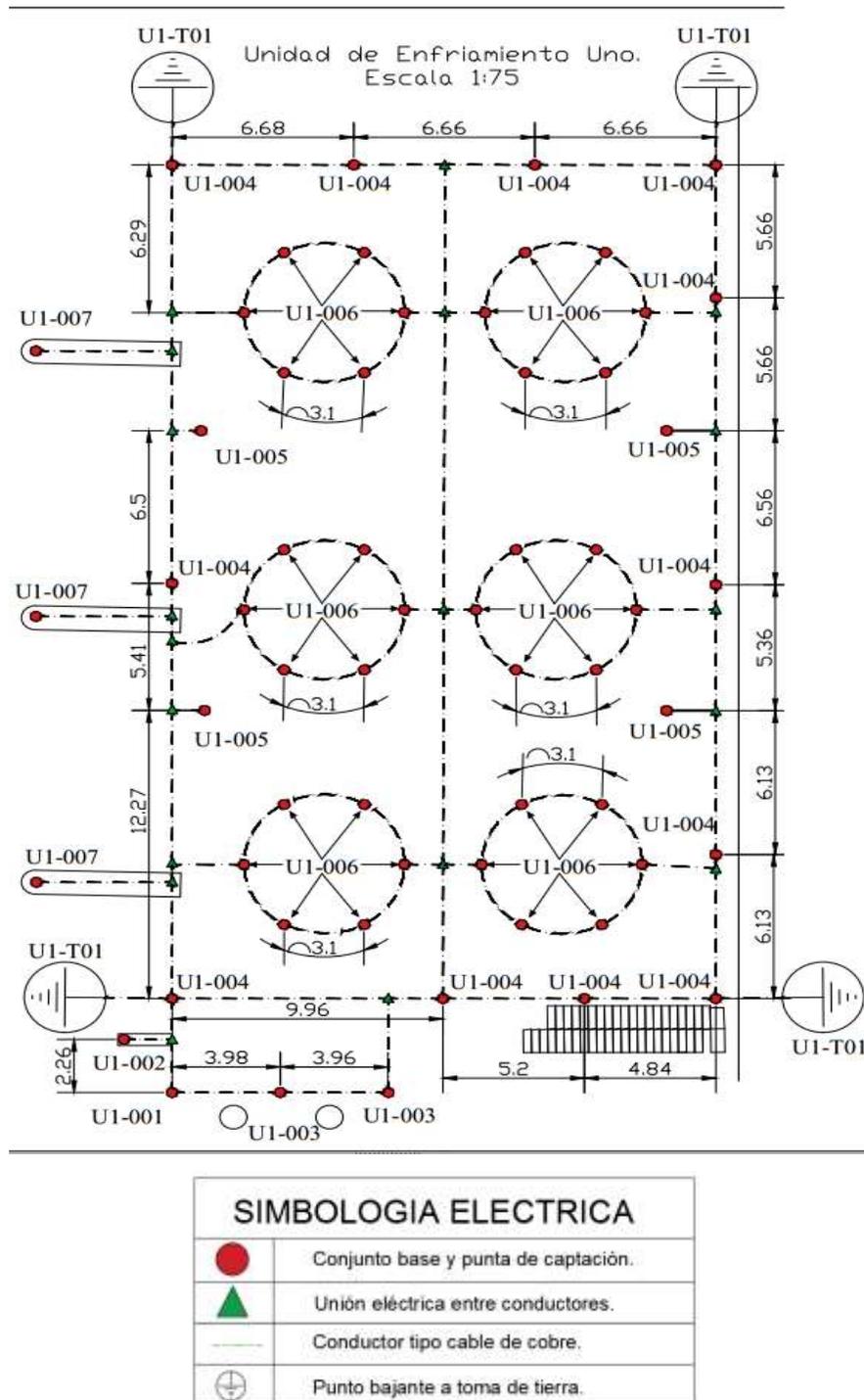


Figura 4.8 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puestas a tierra de unidad de enfriamiento uno.

Tabla de detalles de terminales aéreas y complementarias

Unidad de Enfriamiento Uno						
Código	Tipo de base	Tipo de punta a instalar			Clase	Detalle de instalación
		Diámetro	Largo	Material		
U1-001	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-3
U1-002	Base para poste (tubería)	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-16
U1-003	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-3
U1-004	Mástil acero galvanizado auto soportado Ø=2 pulg con altura de 2 m y mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-11
U1-005	Base para poste alumbrado (tubería)	1/2 pulg	24 pulg (0.6m)	Cobre	I	Figura A-16
U1-006	Base vertical	5/8 pulg	24 pulg (0.6m)	Acero inoxidable	I	Figura A-7
U1-007	Base horizontal (parapeto) más base	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-20
DETALLES COMPLEMENTARIOS						
U1-T01	Detalle para la puesta a tierra del sistema.					Figura B-1
U1-T02	Detalle de barra bus de cobre aislada para punto de unión de tomas a tierra.					Figura B-2
U1-A01	Detalle base para mástil en U1-004					Figura A-18

Tabla 4.7 Detalles de terminales aéreas y complementarios de unidad de enfriamiento uno.

Volumen de protección

El volumen de protección resultante con la distribución propuesta se muestra en la figura 4.9. Donde se observa que la edificación considerada y equipos están protegidos.

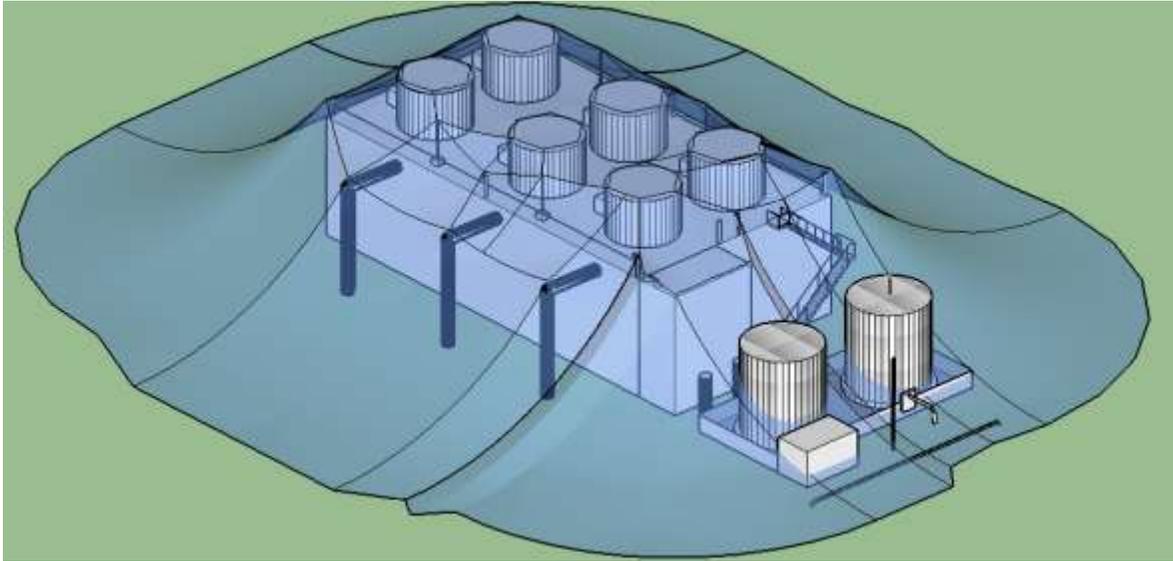


Figura 4.9 Volumen de protección resultante para unidad de enfriamiento uno.

Consideraciones de diseño especiales para unidad de enfriamiento uno

1. El número de bajantes calculado es de cuatro.
2. El diseño del SPCDA considera a un operario sobre el plafón de la estructura. El volumen de protección abarca una altura máxima de 2 metros sobre el plafón.
3. Para la instalación de terminal aérea U1-007, consultar estructura metálica en anexo-A, figura A-17.
4. El diseño de protección para los tanques diarios de la unidad de enfriamiento uno se trató por separado. Consultar sección 4.8.4.

Presupuesto

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 1/2" x 10"	7	\$9.25	\$64.75
Punta de interceptación de cobre 1/2" x 24"	4	\$19.10	\$76.40
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 10"	12	\$16.28	\$195.36
Punta de interceptación de acero inoxidable 5/8" x 24"	36	\$51.50	\$1,854.00
Base horizontal adhesiva de acero inoxidable con rosca de 1/2"	3	\$25.37	\$76.11
Base horizontal (parapeto) de cobre o bronce con rosca de 1/2 "	3	\$19.80	\$59.40
Base horizontal de acero inoxidable para tubo (luminaria) con rosca de 1/2 "	5	\$21.35	\$106.75
Base vertical de acero inoxidable con rosca de 5/8" para orientación horizontal de cable	36	\$17.97	\$646.92
Pieza de adaptación de terminal aérea 5/8" a mástil 1 1/2"	12	\$29.00	\$348.00
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable de cobre desnudo 1/0 AWG	548.856	\$5.57	\$3,057.13
Abrazadera para cable 1/0 AWG en mástil de 2"	12	\$23.28	\$279.36
Conector en T para cable 1/0 AWG	23	\$15.34	\$352.82
Conector en cruz para cable 1/0 AWG	3	\$15.34	\$46.02
Grapa para cable 1/0 AWG	361	\$5.12	\$1,848.32
Conector de interconexión para cable 1/0 AWG	16	\$6.01	\$96.16
Soporte para bajada de cable 1/0 AWG en luminarias	18	\$10.82	\$194.76
Soporte adhesivo de acero inoxidable para cable 1/0 AWG	12	\$5.66	\$67.92
Electrodo de puesta a tierra. Cobre sólido de 5/8" x 10'	16	\$17.00	\$272.00
Abrazadera de bonding para tubo de 1 1/2" con conector para cable	12	\$18.97	\$227.64
Barra bus de equipotencialidad de cobre, con aisladores y soportes (7 bornes mínimo)	1	\$23.55	\$23.55
Bolsa de cemento	3	\$8.23	\$24.69
Arena	0.5 m ³	\$17.94	\$8.97
Adhesivo estructural (10.1 oz)	2	\$34.05	\$68.10
SUB TOTAL			\$9,995.13
IMPUESTO (13% IVA)			\$1,299.37
TOTAL MATERIALES			\$11,294.49

Tabla 4.8 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en unidad de enfriamiento uno

ESTRUCTURAS METALICAS.			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Mástil autosoportado de 2", longitud 2 m de acero inoxidable, precio incluye instalación. (Ver Anexo A, figura A-11 y A-18)	12	\$846.85	\$10,162.20
Estructura metálica para base de terminal aérea (Ver Anexo A, Figura A-19)	3	\$144.27	\$432.81
Estructura metálica para base soporte de conductor (Ver Anexo A, Figura A-18)	15	\$50.13	\$751.95
SUB TOTAL:			\$11,346.96
IMPUESTOS (13% IVA)			\$1,475.10
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:			\$12,822.06

Tabla 4.9 Presupuesto de estructuras metálicas del SPCDA en unidad de enfriamiento uno.

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Instalación y cableado de terminal aérea en alturas	245	\$3.00	\$735.00
Instalación y cableado de terminal aérea en parapeto	172	\$0.50	\$86.00
Instalación y cableado de terminal aérea en estructuras varias	12	\$2.00	\$24.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	4	\$25.00	\$100.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	13	\$25.00	\$325.00
Instalación de varillas de red a tierra	16	\$15.00	\$240.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	12	\$4.00	\$48.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	4	\$1.00	\$4.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$1,562.00

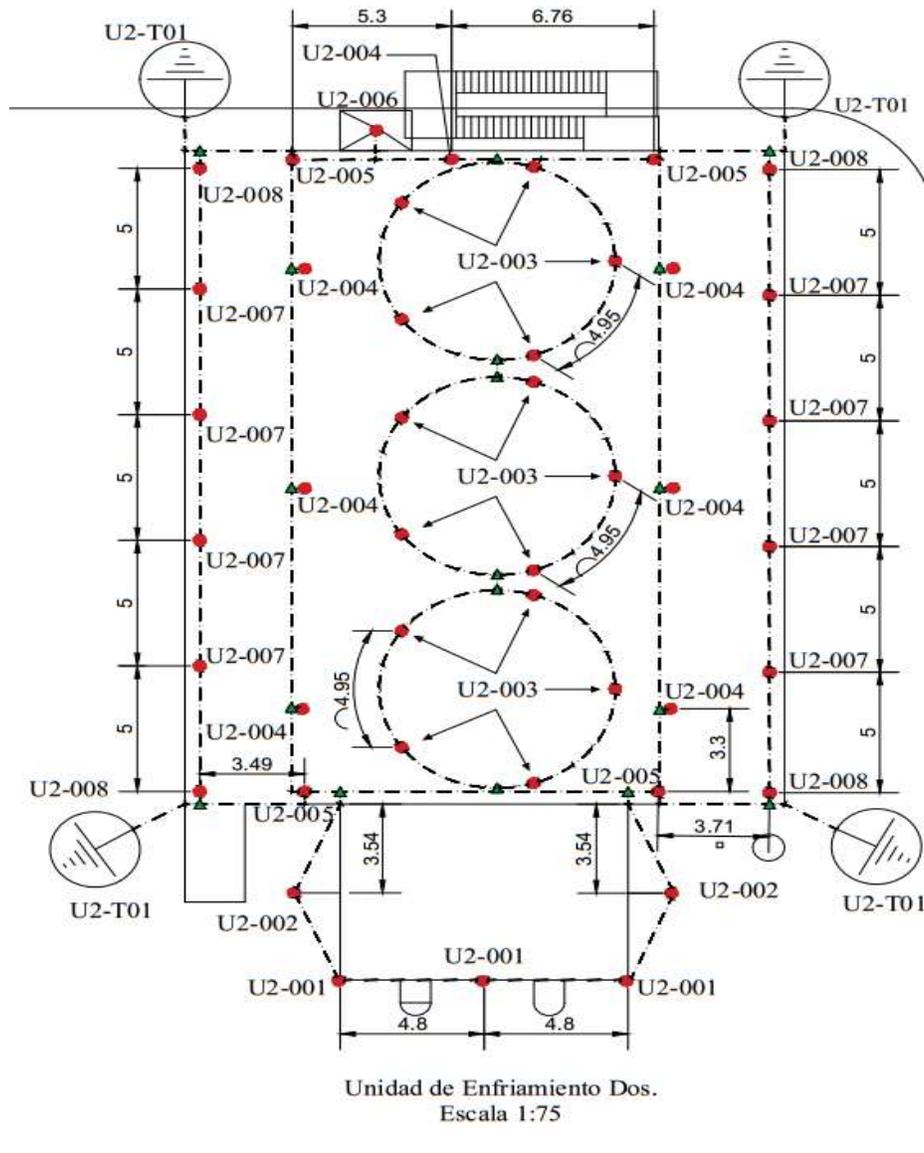
Tabla 4.10 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en unidad de enfriamiento uno.

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$11,294.49
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:	\$12,822.06
TOTAL MANO DE OBRA	\$1,562.00
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$10,271.42
DISEÑO DEL SPCDA	\$1,500.00
IMPREVISTOS	\$3,745.00
TOTAL	\$41,194.98

Tabla 4.11 Presupuesto total del SPCDA de unidad de enfriamiento uno.

4.8.3. Unidad de enfriamiento dos

Vista de planta: localización de terminales aéreas, red de tierra y conductores de interconexión.



SIMBOLOGIA ELECTRICA	
●	Conjunto base y punta de captación.
▲	Unión eléctrica entre conductores.
—	Conductor tipo cable de cobre.
⊕	Punto bajante a toma de tierra.

Figura 4.10 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puestas a tierra de unidad de enfriamiento dos.

Tabla de detalles de terminales aéreas y complementarios

Unidad De Enfriamiento Dos						
Código	Tipo de base	Tipo de punta a instalar				Detalle de instalación
		Diámetro	Largo	Material	Clase	
U2-001	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-3
U2-002	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	24 pulg (0.6m)	Cobre	I	Figura A-3
U2-003	Soporte de terminal aérea con conexión para cable, dos soportes verticales que separan la punta de la estructura	5/8 pulg	24 pulg (0.6m)	Acero Inoxidable	I	Figura A-9
U2-004	Base para postes de alumbrado (tubería).	1/2 pulg	24 pulg (0.60m)	Cobre	I	Figura A-16
U2-005	Mástil de acero inoxidable auto soportado Φ 2 pulg con altura de 3m y Mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador.	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-11
U2-006	Base horizontal adhesiva*	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-3
U2-007	Adaptador de punta a mástil de 1 1/2 pulg	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-10
U2-008	Adaptador de punta a mástil de 1 1/2 pulg	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-10
* Ver información adicional y de interés sobre esta punta de interceptación en detalle en plano: U2-006						
DETALLES COMPLEMENTARIOS						
U2-T01	Detalle para la puesta a tierra del sistema.					Figura B-1
U2-T02	Detalle de barra bus de cobre aislada para punto de unión de tomas a tierra.					Figura B-2
U2-A01	Detalle de la base para mástil en U2-005					Figura A-18

Tabla 4.12 Detalles de terminales aéreas y complementarios de unidad de enfriamiento dos.

Volumen de protección

El volumen de protección resultante con la distribución propuesta se muestra en la figura 4.11. Donde se observa que la edificación considerada y equipos están protegidos

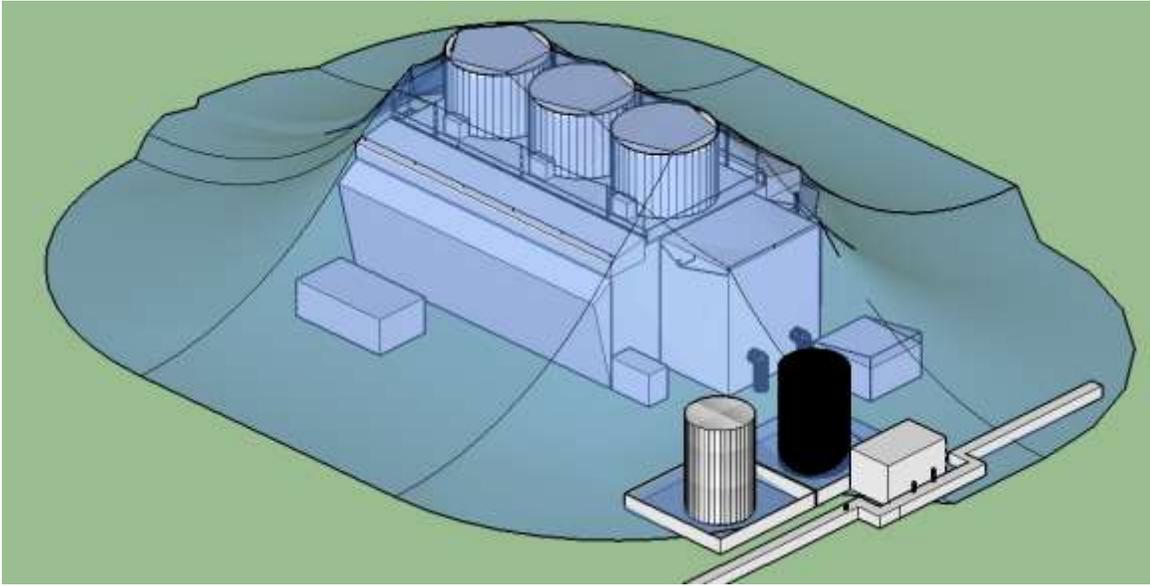


Figura 4.11 Volumen de protección resultante para unidad de enfriamiento dos.

Consideraciones de diseño especiales para unidad de enfriamiento dos

1. El número de bajantes calculado es de tres pero considerando la arquitectura del edificio y teniendo en cuenta que el cálculo da el número mínimo de bajantes, se diseñó la estructura con 4 bajantes.
2. El diseño del SPCDA considera a un operario sobre el plafón de la estructura. El volumen de protección abarca una altura máxima de 2 metros sobre el plafón.
3. El diseño de protección para los tanques diarios de la unidad de enfriamiento dos se trata por separado. Consultar sección 4.8.5.

Presupuesto

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 1/2" x 10"	4	\$9.25	\$37.00
Punta de interceptación de cobre 1/2" x 24"	9	\$19.10	\$171.90
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 10"	16	\$16.28	\$260.48
Punta de interceptación de acero inoxidable 5/8" x 24"	15	\$51.50	\$772.50
Base horizontal de acero inoxidable para tubo (luminaria) con rosca de 1/2 "	7	\$21.35	\$149.45
Base horizontal adhesiva de acero inoxidable con rosca de 1/2"	6	\$25.37	\$152.22
Pieza de adaptación de terminal aérea 5/8" a mástil 1 1/2"	16	\$29.00	\$464.00
Pieza de adaptación de terminal aérea 5/8" a cable 1/0 AWG	15	\$18.10	\$271.50
Par de soporte de acero inoxidable para terminal aérea de 5/8"	15	\$15.00	\$225.00
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable de cobre desnudo 1/0 AWG	416 m	\$5.57	\$2,317.12
Conector de interconexión para cable 1/0 AWG	8 m	\$15.34	\$122.72
Conector en T para cable 1/0 AWG	48	\$15.34	\$736.32
Soportes para bajada de cable 1/0 AWG en luminarias	28	\$18.61	\$521.08
Soportes adhesivos de acero inoxidable para cable 1/0 AWG	21	\$5.66	\$118.86
Grapa para cable 1/0 AWG	387	\$4.60	\$1,780.20
Abrazadera de bonding para tubo de 1 1/2" con conector para cable	4	\$18.97	\$75.88
Abrazadera para cable 1/0 AWG en mástil de 2"	4	\$23.28	\$93.12
Electrodos de puesta a tierra de cobre 5/8" x 10'	16	\$17.00	\$272.00
Barra bus de equipotencialidad de cobre, con aisladores y soportes (7 bornes mínimo)	1	\$23.55	\$23.55
Bolsa de cemento	3	\$8.23	\$24.69
Arena	0.5 m ³	\$17.94	\$8.97
Adhesivo estructural (10.1 oz)	1	\$34.05	\$34.05
SUB TOTAL			\$8,632.61
IMPUESTO (13% IVA)			\$1,122.24
TOTAL MATERIALES			\$9,754.85

Tabla 4.13 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en unidad de enfriamiento dos

ESTRUCTURAS METALICAS.			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Mástil autoportado de 2", longitud 2 m, de acero inoxidable; precio incluye instalación. (Ver Anexo A, figura A-11 y A-18)	4	\$846.85	\$3,387.40
Estructura metálica para base de terminal aérea (Ver Anexo A, Figura A-19)	3	\$144.27	\$432.81
Estructura metálica para base soporte de conductor (Ver Anexo A, Figura A-18)	15	\$50.13	\$751.95
Brazos de amigo de acero inoxidable (Ver Anexo A, figura A-9)	12	\$110.00	\$1,320.00
SUB TOTAL:			\$5,892.16
IMPUESTOS (13% IVA)			\$765.98
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:			\$6,658.14

Tabla 4.14 Presupuesto de estructuras metálicas del SPCDA en unidad de enfriamiento dos

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Instalación y cableado de terminal aérea en alturas	245	\$3.00	\$735.00
Instalación y cableado de terminal aérea en parapeto	75	\$0.50	\$37.50
Instalación y cableado de terminal aérea en estructuras varias	4	\$2.00	\$8.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	4	\$25.00	\$100.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	17	\$25.00	\$425.00
Instalación de varillas de red a tierra	16	\$15.00	\$240.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	12	\$4.00	\$48.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	4	\$1.00	\$4.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$ 1,597.50

Tabla 4.15 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en unidad de enfriamiento dos

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$9,754.85
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:	\$6,658.14
TOTAL MANO DE OBRA	\$1,597.50
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$7,204.20
DISEÑO DEL SPCDA	\$1,000.00
IMPREVISTOS	\$2,621.47
TOTAL	\$28,836.15

Tabla 4.16 Presupuesto total del SPCDA en unidad de enfriamiento dos.

4.8.4. Tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín

Distribución de terminales aéreas, volumen de protección y número de bajantes de puesta a tierra

El diseño para los tanques diarios de unidad uno y tratamiento de agua involucra la instalación de un cable de guarda sobre cada una de ellas y terminales aéreas. Para el cafetín, se utiliza el diseño convencional de terminales aéreas para su protección únicamente. Los cables de guarda son sostenidos mediante postes de concreto, cada uno de ellos posee diferentes alturas según la edificación considerada. Se instala una terminal aérea en la cúspide de cada poste de concreto, junto a una bajante hacia la red de tierra. Finalmente, el cafetín se diseña con la cantidad de bajantes a puesta a tierra mínimo que son dos.

En la figura 4.12, se muestra la distribución de terminales aéreas para los tanques diarios de enfriamiento uno y tratamiento de agua (parte 1).

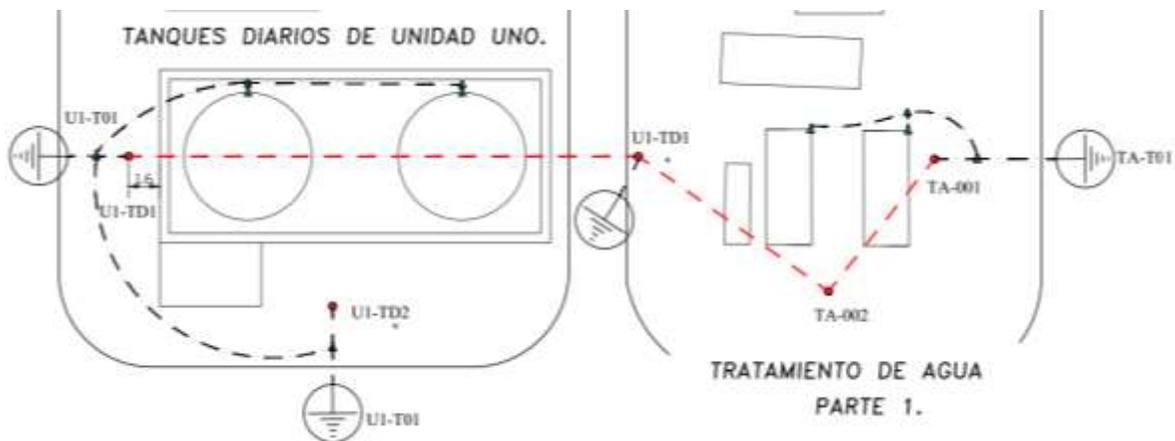


Figura 4.12 Distribución de terminales aéreas, cable de guarda y bajantes de puestas a tierra de tanques diario de unidad uno y tratamiento de agua (parte 1).

En la figura 4.13, se muestra la distribución de terminales aéreas para tratamiento de agua (parte 2) y cafetín.

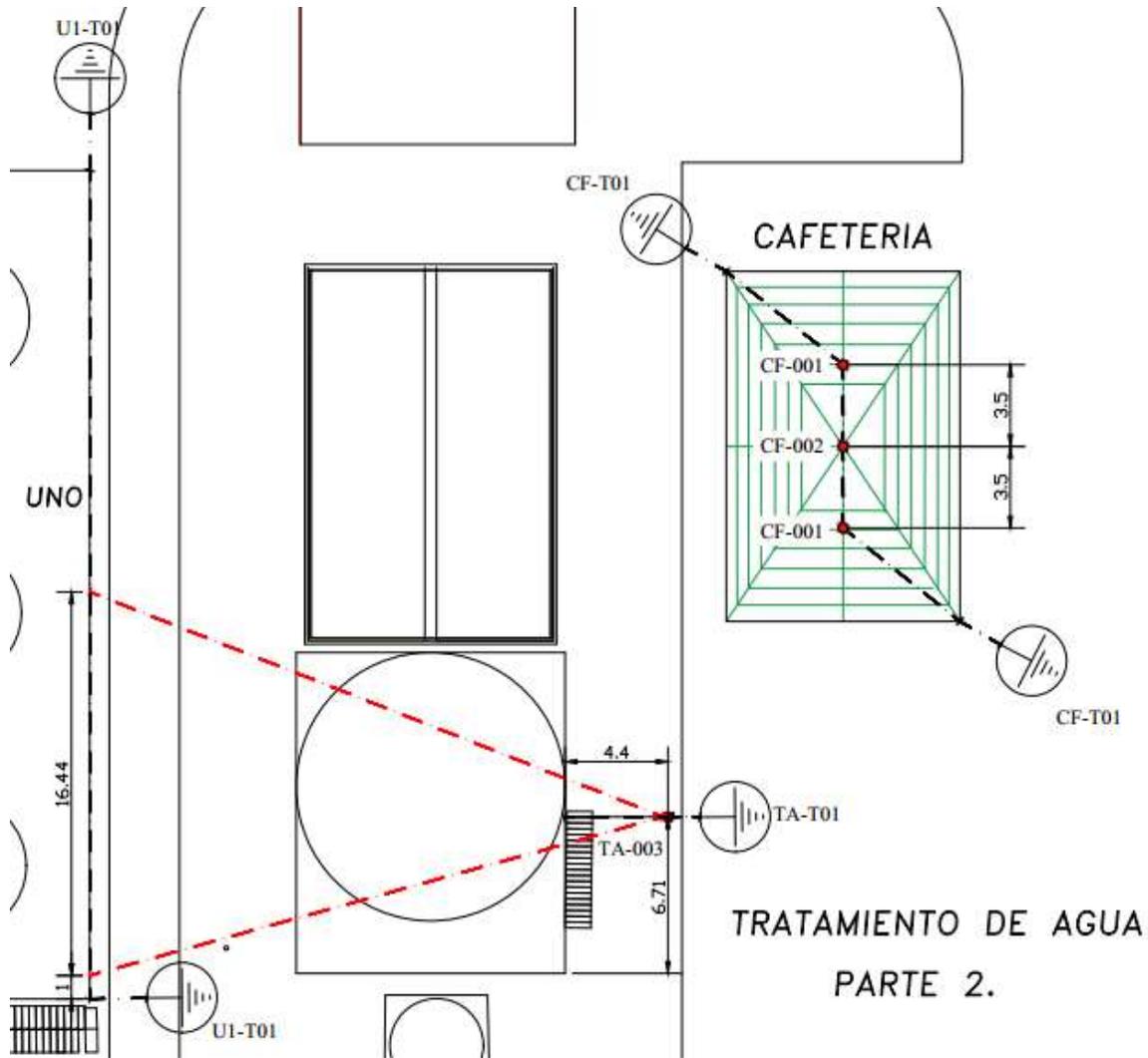


Figura 4.13 Distribución de terminales aéreas, cable de guarda y bajantes de puestas a tierra de tratamiento de agua (parte 2) y cafetín.

La simbología de las dos figuras anteriores que contiene a los tanques diarios de enfriamiento uno, tratamiento de agua, y cafetín; es la siguiente:

SIMBOLOGIA ELECTRICA	
	Conjunto base y punta de captación.
	Unión eléctrica entre conductores.
	Conductor tipo cable de cobre.
	Conductor cable de guarda
	Punto bajante a toma de tierra.

Figura 4.14 Simbología utilizada en planos de tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua, y cafetín.

Tabla de detalles de terminales aéreas y complementarios

Tanques Diarios Unidad Uno Tratamiento de Agua Cafetín						
Código	Tipo de base	Tipo de punta a instalar			Clase	Detalle de instalación
		Díámetro	Largo	Material		
U1-TD1	Base horizontal (sobre la cumbrera del poste de concreto)	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-15
U1-TD2 TA-001 TA-002	Base para postes de alumbrado (tubería).	5/8 pulg	24 pulg (0.60m)	Cobre	II	Figura A-16
TA-003	Base horizontal (sobre la cumbrera del poste de concreto)	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-15
CF-001 CF-002	Base para cumbrera	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-5
DETALLES COMPLEMENTARIOS						
CF-T01 U1-T01	Detalle para la puesta a tierra del sistema.					Figura B-1
U1-T02	Detalle de barra bus de cobre aislada para punto de unión de tomas a tierra.					Figura B-2

Tabla 4.17 Detalles de terminales aéreas y complementarios de tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.

Volumen de protección

En las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se muestra el volumen de protección para los tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, y tratamiento de agua; respectivamente.

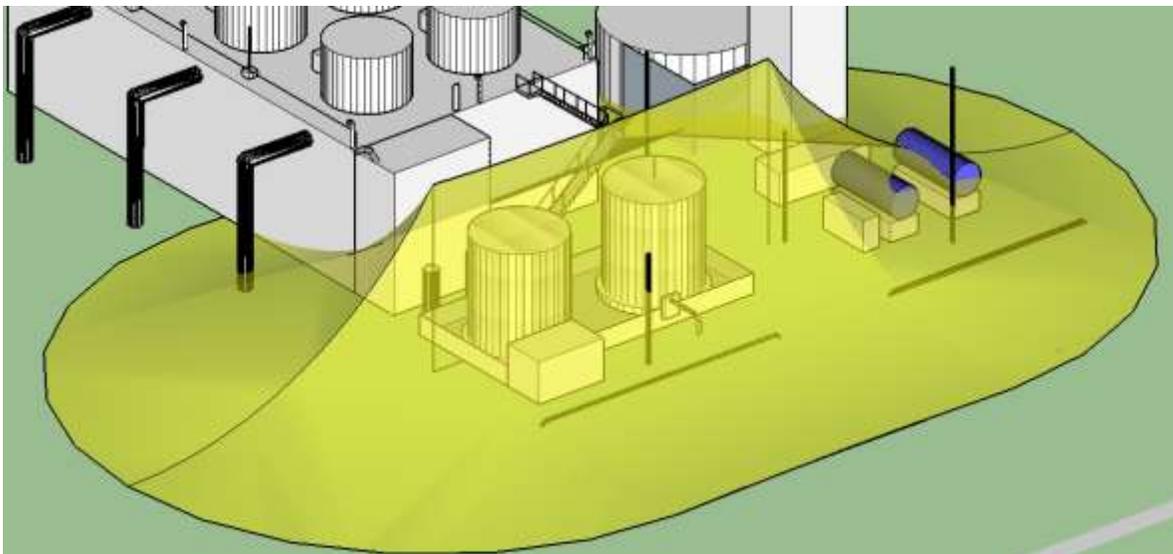


Figura 4.15 Volumen de protección resultante para tanques diarios de unidad de enfriamiento uno.

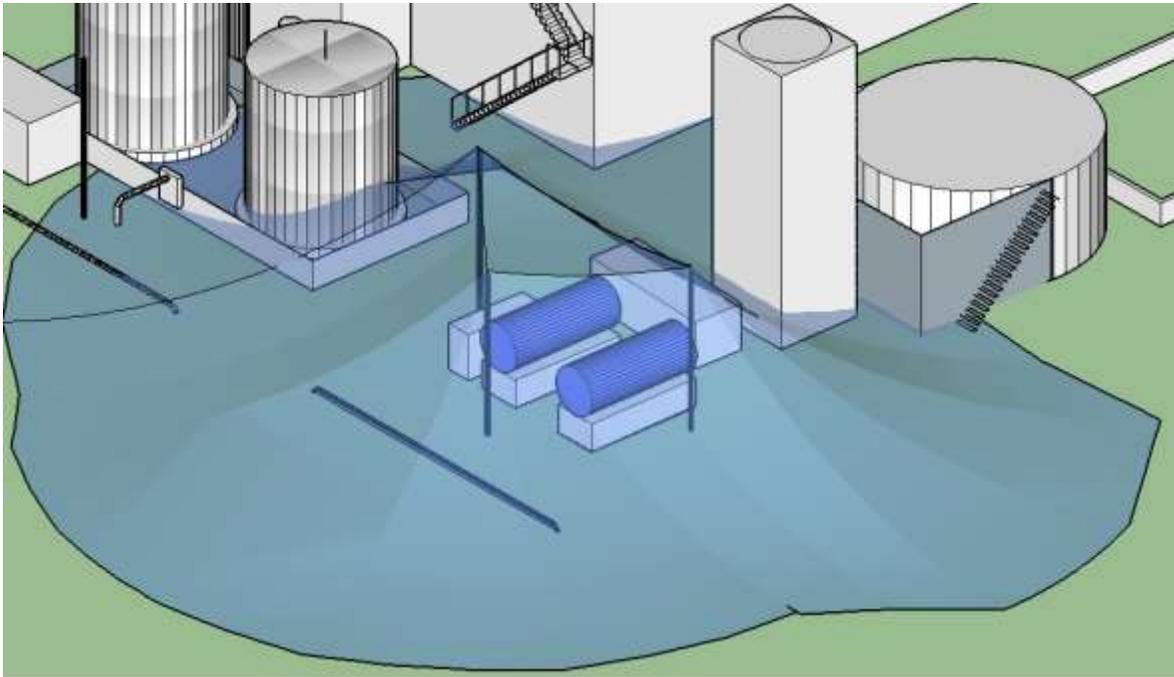


Figura 4.16 Volumen de protección resultante de parte uno de tratamiento de agua.

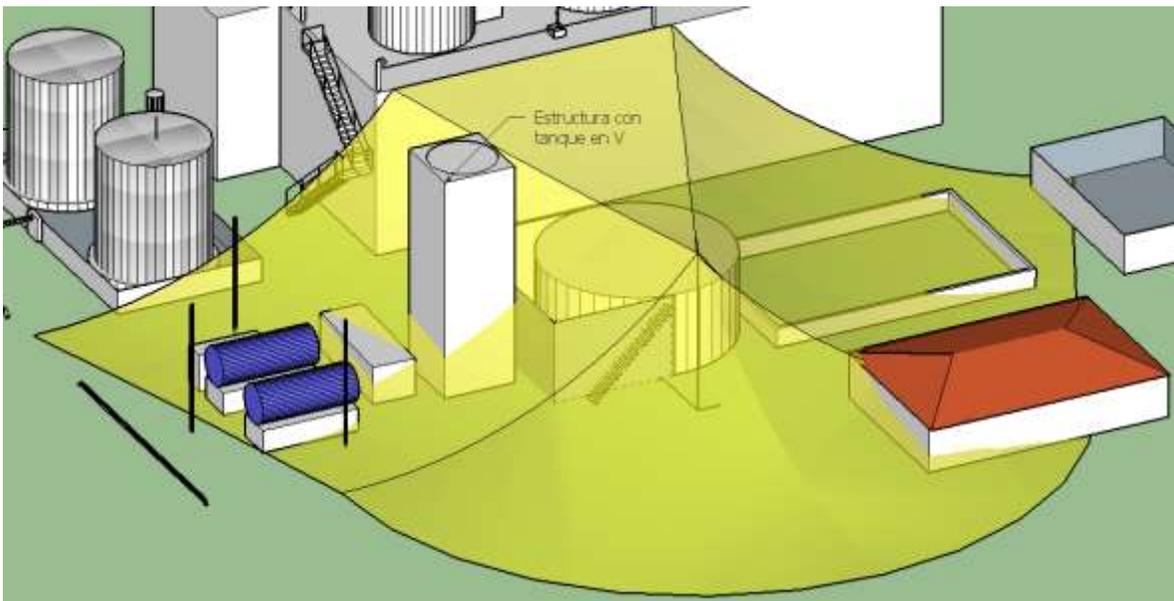


Figura 4.17 Volumen de protección resultante de parte dos de tratamiento de agua.

Consideraciones de diseño especiales para tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua (parte 1 y 2) y cafetín

1. El cable de guarda se instala de manera que la parte más baja tenga una distancia vertical mínima de 3 m sobre el plano saliente de la estructura a proteger y a una distancia no menor de 0.2m desde la cresta del poste.
2. Para tratamiento de agua parte 2, se considera que la unidad de enfriamiento uno tiene instalado el SPCDA que se ha presentado en la sección 4.8.3, y se conecta a este para utilizar las bajantes y red a tierra del mismo. De no ser así, en la unidad de enfriamiento uno se debe instalar una terminal aérea por encima de los puntos donde instala el cable de guarda al edificio, realizar al menos una bajante y sistema de red a tierra que una los dos cables de guarda que llegan al edificio.
3. La estructura con tanque en “V” de la figura 4.17, no se ha protegido debido a su estado actual, por lo tanto se recomienda su demolición.
4. Se debe equipotenciar los contenedores con sustancias explosivas al SPCDA que lo protege.
5. Todos los SPCDA deben conectarse entre sí, para ser equipotenciales. Por lo que se recomienda utilizar una barra bus como la descrita en Anexo B, figura B-2.
6. El volumen de protección para el cafetín no se muestra porque la estructura cumple los requisitos del artículo 4.8.2.3 de la norma NFPA 780. La instalación de terminales aéreas en la cumbrera es suficiente para su protección.

Presupuesto

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 10"	6	\$16.28	\$97.68
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 24"	3	\$30.89	\$92.67
Base horizontal (parapeto) de cobre con rosca de 5/8"	3	\$15.60	\$46.80
Base horizontal de acero inoxidable para tubo (luminaria) con rosca de 5/8 "	3	\$24.50	\$73.50
Anclaje para cumbrera para punta de 5/8 "	3	\$27.00	\$81.00
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable de cobre desnudo 3/0 AWG	202m	\$7.29	\$1,472.58
Cable de cobre desnudo 1/0 AWG	55m	\$5.57	\$306.35
Cable ACSR 4/0 penguin	113m	\$3.10	\$350.30
Grapa de acero inoxidable para cable 1/0 AWG con arandela de neopreno (para techo)	24	\$4.60	\$110.40
Conector bimetalico de interconexión para cable 4/0 ACSR penguin.	13	\$2.35	\$30.55
Conector equipotencial para superficie plana	4	\$8.10	\$32.40
Grapa para cable 3/0 AWG	50	\$10.82	\$541.00
Soporte para bajada de cable 3/0 AWG en luminarias	30	\$12.77	\$383.10
Poste de concreto de 16 m.	2	\$680.00	\$1,360.00
Poste de concreto 12 m.	1	\$353.60	\$353.60
Arandela curva para perno de 5/8"	4	\$0.50	\$2.00
Arandela de presión para perno de 5/8"	4	\$0.17	\$0.68
Abrazadera con pernos para poste de 5" a 7" (incluye perno con longitud de 2")	3	\$9.50	\$28.50
Abrazadera con pernos para poste de 3" a 4" (incluye perno con longitud de 2")	3	\$8.45	\$25.35
Alambre desnudo para amarre #4 AWG	1 m	\$0.54	\$0.54
Perno 5/8" con longitud de 2" con tuerca cuadrada	1	\$1.07	\$1.07
Tuerca argolla de 5/8"	5	\$2.98	\$14.90
Preformada para cable 4/0 ACSR	8	\$3.51	\$28.08
Perno máquina de 5/8"x12"	2	\$1.15	\$2.30
Aislador de campana	5	\$9.42	\$47.10
Clevis de remate S/R	5	\$15.81	\$79.05
Clevis con aislador de porcelana	4	\$4.53	\$18.12
Electrodo de puesta a tierra de cobre 5/8" x 10'	28	\$17.00	\$476.00
Barra bus de equipotencialización de cobre, con aisladores y soportes (7 bornes mínimo)	1	\$23.55	\$23.55
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Bolsa de cemento	3	\$8.23	\$24.69

Arena	0.5 m ³	\$17.94	\$8.97
SUB TOTAL			\$6,112.83
IMPUESTO (13% IVA)			\$794.67
TOTAL MATERIALES			\$6,907.50

Tabla 4.18 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Instalación y cableado de terminal aérea en techos	19.8 m	\$3.00	\$59.40
Bajantes a red de tierra	63 m	\$3.00	\$189.00
Instalación de poste de concreto	3 m	\$20.00	\$60.00
Instalación de cable de guarda	100 m	\$0.50	\$50.00
Instalación de herrajes en estructuras	5 m	\$20.00	\$100.00
Zanja para cable de bonding	48	\$1.00	\$48.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	5	\$25.00	\$125.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	2	\$25.00	\$50.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	7	\$25.00	\$175.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	18	\$25.00	\$450.00
instalación de varillas de red a tierra	28	\$15.00	\$420.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	21	\$4.00	\$84.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	7	\$1.00	\$7.00
Alquiler de grúa 3toneladas	-	Día	\$700.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$ 2,517.40

Tabla 4.19 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$6,907.50
TOTAL MANO DE OBRA	\$ 2,517.40
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$3,489.96
DISEÑO DEL SPCDA	\$1,000.00
IMPREVISTOS	\$1,321.49
TOTAL	\$ 15,614.34

Tabla 4.20 Presupuesto total del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento uno, tratamiento de agua y cafetín.

4.8.5. Tanques diarios unidad de enfriamiento dos y tanques de lodo

El diseño para los tanques diarios de unidad dos y tanques de lodo involucra la instalación de un cable de guarda sobre cada una de ellas y terminales aéreas. Los cables de guarda son sostenidos mediante postes de concreto, cada uno de ellos posee diferentes alturas según la edificación considerada. Se instala una terminal aérea en la cúspide de cada poste de concreto, junto a una bajante hacia la red de tierra

La figura 4.18 muestra la distribución de las terminales aéreas y sistemas de puesta a tierra para los tanques diarios de unidad de enfriamiento dos



Figura 4.18 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra de tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.

La figura 4.19 muestra la distribución de las terminales aéreas y sistemas de puesta a tierra para los tanques de lodo:

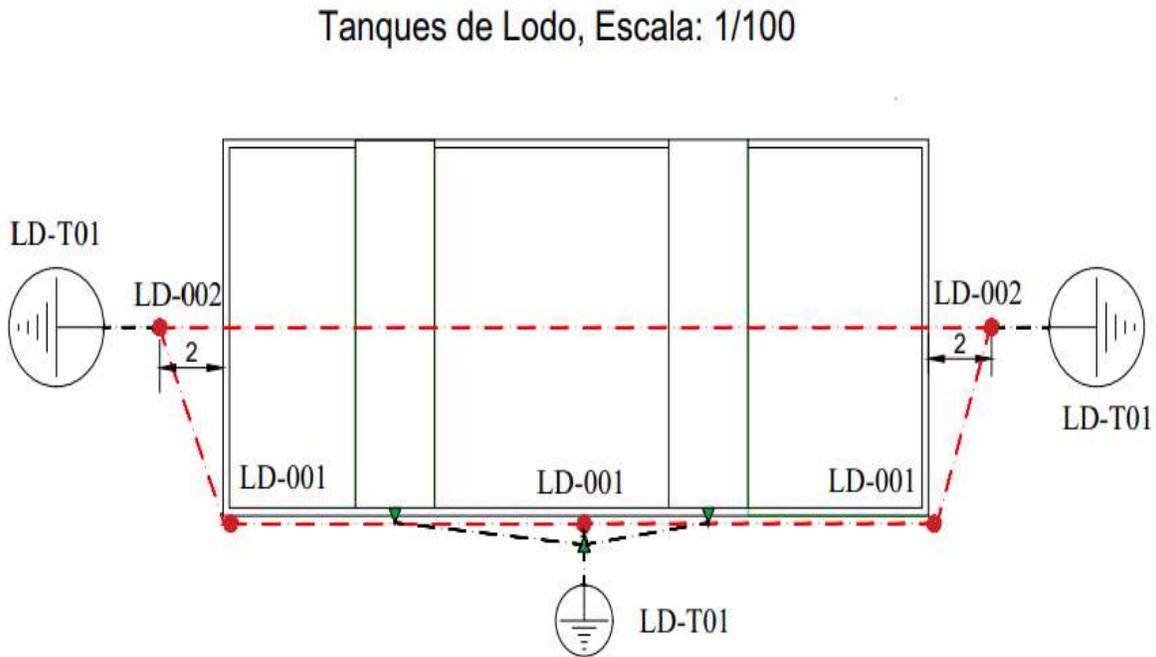


Figura 4.19 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra de tanques de lodo.

La simbología de las dos figuras anteriores que contiene a los tanques diarios de unidad de enfriamiento dos y tanques de lodo; es la siguiente:

SIMBOLOGIA ELECTRICA	
●	Conjunto base y punta de captación.
▲	Unión eléctrica entre conductores.
— —	Conductor tipo cable de cobre.
- - -	Conductor cable de guarda
⊕	Punto bajante a toma de tierra.

Figura 4.20 Simbología utilizada en planos de tanques diarios de unidad de enfriamiento dos y tanques de lodo.

Tabla de detalles de terminales aéreas y complementarios

Tanques de Lodo y Tanques Diarios Unidad Dos.						
Código	Tipo de base	Tipo de punta a instalar			Clase	Detalle de instalación
		Diámetro	Largo	Material		
LD-001	Base para postes de alumbrado (tubería).	5/8 pulg	24 pulg (0.60m)	Cobre o acero inoxidable	II	Figura A-16
LD-002	Base horizontal (sobre la cumbrera del poste de concreto)	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre ó acero inoxidable	II	Figura A-15
U2-TD1						
DETALLES COMPLEMENTARIOS.						
LD-T01	Detalles de conexión a tierra que deberá de tener cada poste de concreto o metálico.					Figura B-1
U2-TD2						

Tabla 4.21 Detalles de terminales aéreas y complementarios de tanques de lodo y tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.

Volumen de protección

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestran los volúmenes de protección resultantes luego de hacer rodar la esfera sobre el SPCDA perteneciente a tanques diarios de unidad de enfriamiento dos, y tanques de lodo.

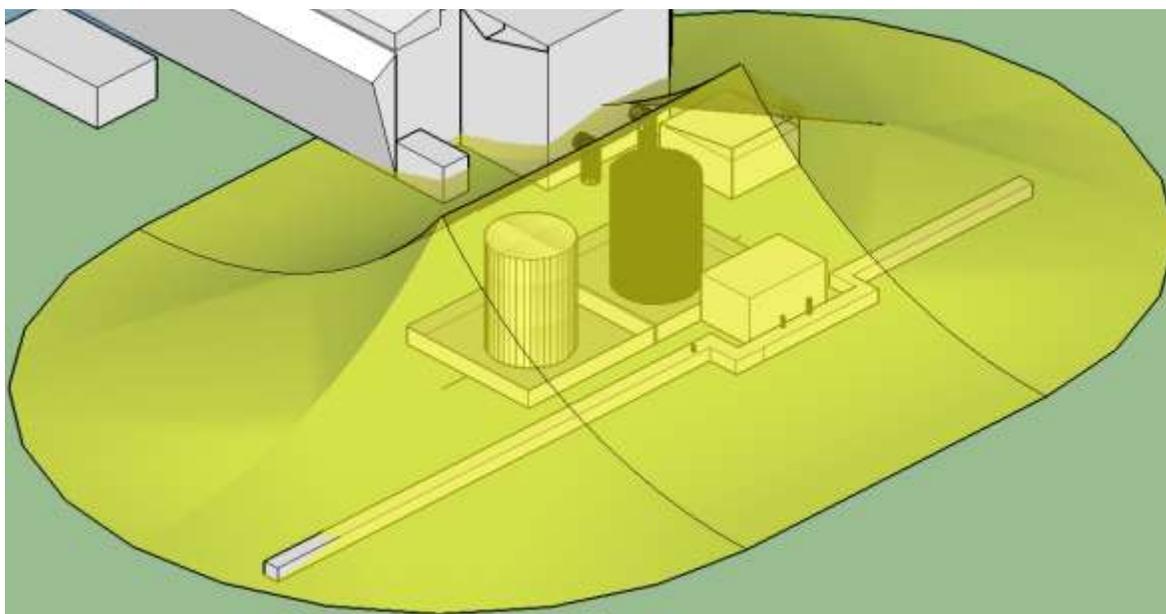


Figura 4.21 Volumen de protección resultante para tanques diarios de unidad de enfriamiento dos.

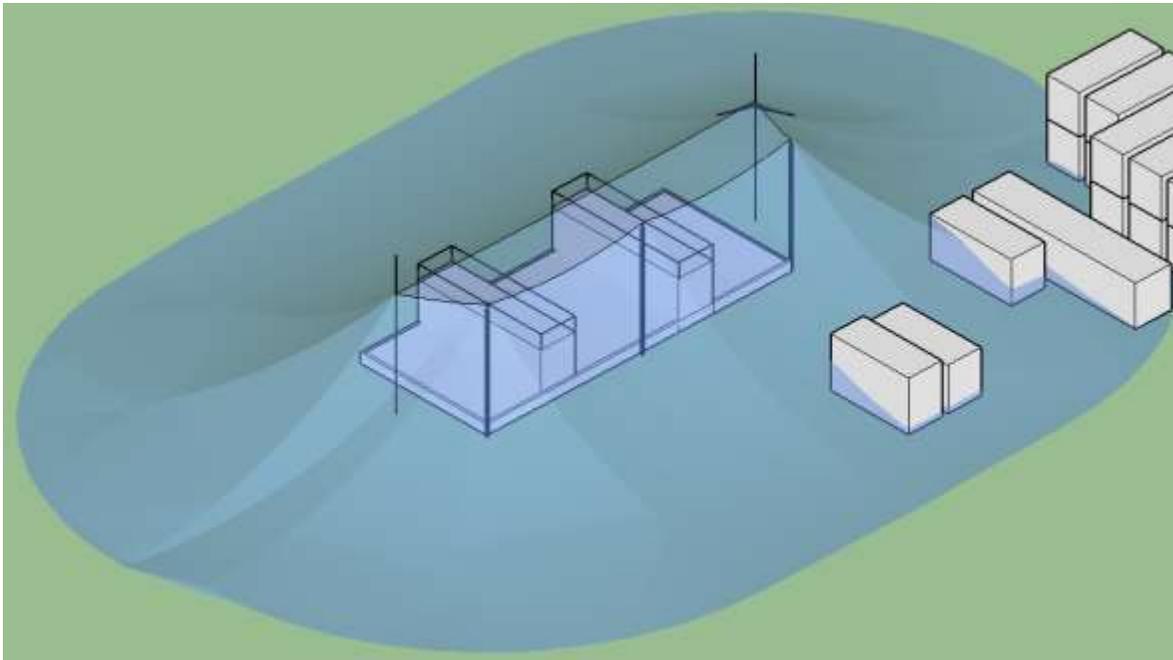


Figura 4.22 Volumen de protección resultante para tanques de lodo.

Consideraciones de diseño especiales para tanques diarios de unidad de enfriamiento dos, y tanques de lodo.

1. El cable de guarda se instala de manera que la parte más baja tenga una distancia vertical mínima de 3 m sobre el plano saliente de la estructura a proteger y a una distancia no menor de 0.2m desde la cresta del poste.
2. Se debe equipotenciar los contenedores de sustancias explosivas al SPCDA que lo protege.
3. Todos los SPCDA deben conectarse entre sí, para ser equipotenciales. Por lo que se recomienda utilizar una barra bus como la descrita en Anexo B, figura B-2.
4. La altura para los postes que conforman el SPCDA de los tanques diarios de unidad de enfriamiento dos, son de 15 metros y para los tanques de lodo 10.6m. La profundidad de enterramiento recomendada es de 2.2m y 1.7m, respectivamente.

Presupuesto tanques diarios de unidad dos

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 10"	2	\$16.28	\$32.56
Base horizontal (parapeto) de cobre con rosca de 5/8"	2	\$15.60	\$31.20
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable cobre desnudo 3/0 AWG desnudo	105.6 m	\$7.29	\$769.82
Cable ACSR 4/0 Penguin	29.7 m	\$3.10	\$92.07
Conector bimetálico de interconexión para cable 4/0 ACSR Penguin.	4	\$2.35	\$9.40
Grapa para cable 3/0 AWG	28	\$10.82	\$302.96
Conector equipotencial para estructura plana	2	\$8.10	\$16.20
Preformada para cable 4/0 ACSR	2	\$3.51	\$7.02
Perno máquina de 5/8"x12"	2	\$1.15	\$2.30
Aislador de campana	2	\$9.42	\$18.84
Tuerca argolla de 5/8"	2	\$2.98	\$5.96
Clevis de remate S/R	2	\$15.81	\$31.62
Arandela curva	4	\$0.50	\$2.00
Arandela de presión	4	\$0.17	\$0.68
Electrodos de puesta a tierra de cobre 5/8" x 10'	8	\$17.00	\$136.00
Poste de concreto de 15 m	2	\$580.00	\$1,160.00
Bolsa de cemento	2	\$8.23	\$16.46
Arena	0.5 m ³	\$17.94	\$8.97
SUB TOTAL			\$2,644.06
IMPUESTO (13% IVA)			\$343.73
TOTAL MATERIALES			\$2,987.79

Tabla 4.22 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento dos

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Instalación de bajantes a tierra.	30 m	\$3.00	\$90.00
Instalación de poste de concreto	2	\$20.00	\$40.00
Instalación de cable de guarda	24 m	\$0.50	\$12.00
Instalación de herrajes en poste.	2	\$20.00	\$40.00
Zanja para cable de bonding	43	\$1.00	\$43.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	2	\$25.00	\$50.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	9	\$25.00	\$225.00
Instalación de varillas de red a tierra	8	\$15.00	\$120.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	6	\$4.00	\$24.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	2	\$1.00	\$2.00
Alquiler de grúa de 3 toneladas	Día	\$700.00	\$700.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$1,346.00

Tabla 4.23 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento dos

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$2,987.79
TOTAL MANO DE OBRA	\$1,346.00
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$1,733.52
DISEÑO DEL SPCDA	\$450.00
IMPREVISTOS	\$651.73
TOTAL	\$7,169.04

Tabla 4.24 Presupuesto total del SPCDA en tanques diarios de unidad de enfriamiento dos

Presupuesto tanques de lodo

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 10"	2	\$16.28	\$32.56
Punta de interceptación de cobre 5/8" x 24"	3	\$30.89	\$92.67
Base horizontal de acero inoxidable para tubo (luminaria) con rosca de 5/8 "	3	\$24.50	\$73.50
Base horizontal (parapeto) de cobre con rosca de 5/8"	2	\$15.60	\$31.20
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable de cobre desnudo 3/0 AWG	76.4 m	\$7.29	\$556.96
Cable ACSR 4/0 Penguin	65 m	\$3.10	\$201.50
Conector bimetalico de interconexión para cable 4/0 ACSR penguin.	4	\$2.35	\$9.40
Conector en T para cable 3/0 AWG	10	\$13.92	\$139.20
Grapa para cable 3/0 AWG	18	\$10.82	\$194.76
Soporte para bajada de cable 3/0 AWG en luminarias	27	\$12.77	\$344.79
Conector equipotencial para estructura plana	2	\$8.10	\$16.20
Preformada para cable 4/0 ACSR	4	\$3.51	\$14.04
Arandela curva para perno de 5/8"	4	\$0.50	\$2.00
Arandela de presión para perno de 5/8"	4	\$0.17	\$0.68
Perno máquina de 5/8"x12"	2	\$1.15	\$2.30
Aislador de campana	4	\$9.42	\$37.68
Tuerca argolla de 5/8"	4	\$2.98	\$11.92
Clevis con aislador de porcelana	3	\$4.53	\$13.59
Abrazadera con pernos para poste de 5" a 7" (incluye perno con longitud de 2")	2	\$9.50	\$19.00
Abrazadera con pernos para poste de 3" a 4" (incluye perno con longitud de 2")	3	\$8.45	\$25.35
Alambre desnudo para amarre #4 AWG	1.5 m	\$0.54	\$0.81
Clevis de remate S/R	4	\$15.81	\$63.24
Perno 5/8" con longitud de 2" con tuerca cuadrada	3	\$1.07	\$3.21
Electrodos de puesta a tierra de cobre 5/8" x 10'	12	\$17.00	\$204.00
Poste de concreto de 10.6 m	2	\$280.00	\$560.00
Bolsa de cemento	2	\$8.23	\$16.46
Arena	0.5 m ³	\$17.94	\$8.97
SUB TOTAL			\$2,675.99
IMPUESTO (13% IVA)			\$347.88
TOTAL MATERIALES			\$3,023.86

Tabla 4.25 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en tanques de lodo.

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Instalación de bajantes a tierra.	28 m	\$3.00	\$84.00
Instalación de poste de concreto	2	\$20.00	\$40.00
Instalación de cable de guarda	58 m	\$0.50	\$29.00
Instalación de herrajes en poste.	2	\$20.00	\$40.00
Zanja para cable de bonding	10	\$1.00	\$10.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	3	\$25.00	\$75.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	11	\$25.00	\$275.00
Instalación de varillas de red a tierra	12	\$15.00	\$180.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	9	\$4.00	\$36.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	3	\$1.00	\$3.00
Alquiler de grúa de 3 toneladas	Día	\$700.00	\$700.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$ 1,472.00

Tabla 4.26 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en tanques de lodo.

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$3,023.86
TOTAL MANO DE OBRA	\$1,472.00
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$1,798.35
DISEÑO DEL SPCDA	\$450.00
IMPREVISTOS	\$674.42
TOTAL	\$7,418.63

Tabla 4.27 Presupuesto total del SPCDA en tanques de lodo.

4.8.6. Edificio administrativo y área de calderas

Distribución de terminales aéreas, volumen de protección y número de bajantes de puesta a tierra

El diseño para el edificio administrativo y área de calderas involucra la instalación de cables de guarda y terminales aéreas. Los cables de guarda son sostenidos mediante postes de concreto, cada uno de ellos posee diferentes alturas según la edificación considerada. Se instala una terminal aérea en la cúspide de cada poste de concreto, junto a una bajante hacia la red de tierra

En el cálculo del número de bajantes para el edificio administrativo se utiliza un perímetro útil de:

$$P_u = 248.54 \text{ m}$$

Para el número de bajantes se tiene:

$$N_{BAJANTES} = 2 + \frac{248.54 - 76}{30}$$

$$N_{BAJANTES} = 7.75$$

$$N_{BAJANTES} \cong 8$$

A este número de bajantes se agregan las de la calderas, poste de concreto, y chimeneas; la caldera uno y dos tiene un perímetro menor a 76 metros por lo que solamente requieren de dos bajantes por caldera. El diseño para la protección del área de calderas consta de cuatro cables de guarda, dos de ellos se han colocado desde cada caldera hasta su chimenea e interconectándolos a las bajantes de estas estructuras; los dos cables de guarda restantes están sujetos entre uno de los postes de concreto existentes y el edificio administrativo, conectando el cable de guarda al cable principal de interconexión del edificio, por lo que sólo se requiere una bajante adicional en el poste de concreto. Cada chimenea consta de dos bajantes hacia la red de tierra. Al aplicar el método de la esfera rodante sobre el área de calderas, existía una parte que no se lograba proteger por lo que fue necesario agregar dos terminales aéreas (CA-005) y una bajante adicional, para que una descarga sobre éstas tenga dos trayectorias a tierra. Se necesitan en total 12 redes de tierra para el SPCDA del edificio administrativo y área de calderas. En las figuras 4.23 y 4.24 se muestra la distribución de terminales aéreas y bajantes para el edificio administrativo y área de calderas.

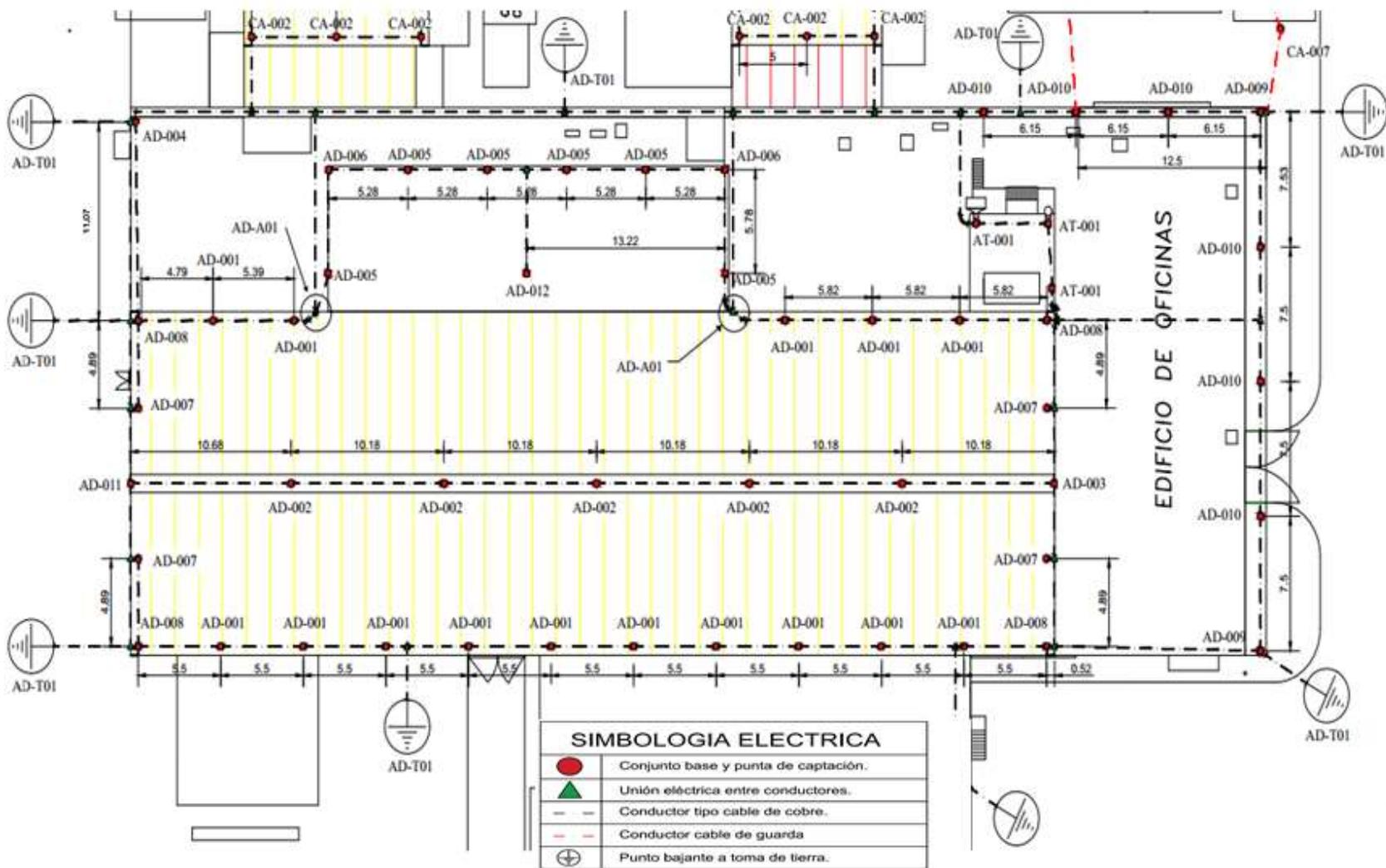


Figura 4.23 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra del edificio administrativo.

SIMBOLOGIA ELECTRICA	
	Conjunto base y punta de captación.
	Unión eléctrica entre conductores.
	Conductor tipo cable de cobre.
	Conductor cable de guarda
	Punto bajante a toma de tierra.

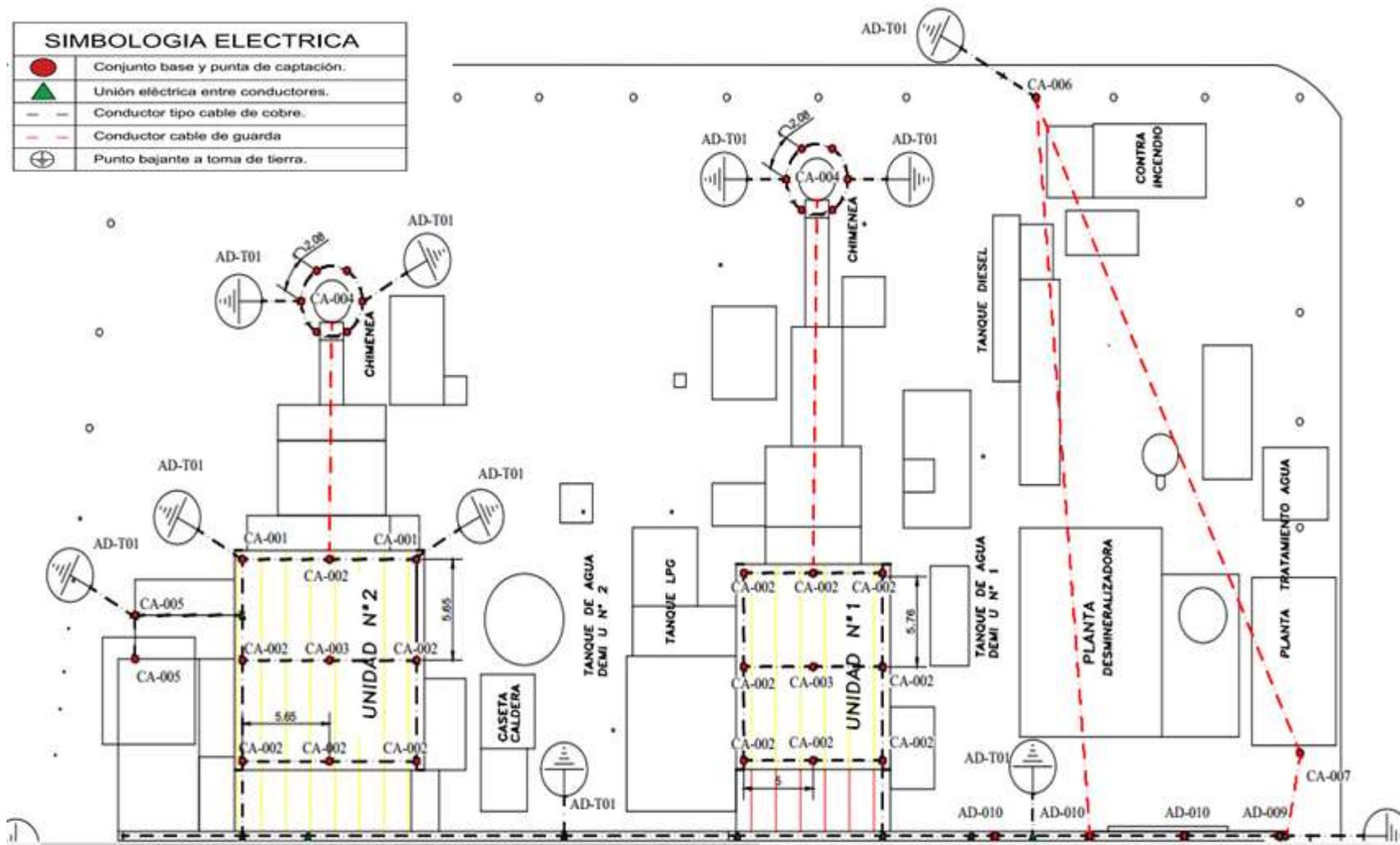


Figura 4.24 Distribución de terminales aéreas y bajantes de puesta a tierra del área de calderas.

Tabla de detalles de terminales aéreas y complementarios

Edificio Administrativo Unidad de Calderas Uno y Dos						
Código	Tipo de base	Tipo de punta a instalar				Detalle de instalación
		Diámetro	Largo	Material	Clase	
AD-001	Adaptador de punta a mástil de 1 1/2 pulg	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-10
AD-002	Base horizontal adhesiva	5/8 pulg	24 pulg (0.60m)	Cobre	II	Figura A-3
AD-003	Mástil 1 1/2" x 0.30m de acero inoxidable acoplado en asta de de bandera para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-13
AD-004	Mástil acero inoxidable auto soportado $\Phi=2"$ (h=2m) y Mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-11
AD-005	Base vertical	5/8 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	II	Figura A-7
AD-006	Base vertical	5/8 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	II	Figura A-8
AD-007	Base vertical	5/8 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	II	Figura A-6
AD-008	Base vertical	5/8 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	II	Figura A-6
AD-009	Mástil acero inoxidable auto soportado $\Phi=2$ pulg(h=2m) y Mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-11
AD-010	Mástil acero inoxidable auto soportado $\Phi=2$ pulg(h=2m) y Mástil de 1 1/2 pulg acoplado para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-11
AD-011	Base horizontal adhesiva	5/8 pulg	24 pulg (0.60m)	Cobre	II	Figura A-4
AD-012*	-----	5/8 pulg	-----	Acero Inoxidable	II	-----
CA-001	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	I	Figura A-3

CA-002	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	12 pulg (0.30m)	Cobre	I	Figura A-3
CA-003*	----	5/8 pulg	-----	Acero Inoxidable	II	-----
CA-004	Mástil de acero inoxidable de 1 1/2 pulg de diámetro para colocar punta en adaptador	5/8 pulg	24 pulg (0.60m)	Acero inoxidable	II	Figura A-12
CA-005	Base horizontal adhesiva	1/2 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	I	Figura A-3
CA-006	Base horizontal (parapeto)	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-15
CA-007	Base horizontal (parapeto)	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-15
AT-001	Mástil de acero inoxidable con altura de 2.4 m de 1 1/2 pulg. Adherido a estructura de soporte de antena mediante una pletina de 6 mm de espesor.	5/8 pulg	10 pulg (0.25m)	Cobre	II	Figura A-14
* Área sobre la que existen instaladas tuberías de "escape", pero no se conocen sus dimensiones (altura, diámetro, espesor) por lo que el instalador deberá agregar uno o varios terminales aéreos sobre mástil, para una completa protección de estos.						
Detalles Complementarios						
AD-T01	Detalle para la puesta a tierra del sistema. Usando cable 1/0 AWG					Figura B-1
AD-T02	Detalle para la puesta a tierra del sistema. Usando cable 3/0 AWG					Figura B-1
AD-T03	Detalle de barra bus de cobre aislada para punto de unión de tomas a tierra.					Figura B-2

Tabla 4.28 Detalles de terminales áreas y complementarios para edificio administrativo y área de calderas.

Volumen de protección

En la figura 4.25, se muestran los volúmenes de protección resultantes luego de hacer rodar la esfera sobre el SPCDA perteneciente a edificio administrativo y área de calderas.

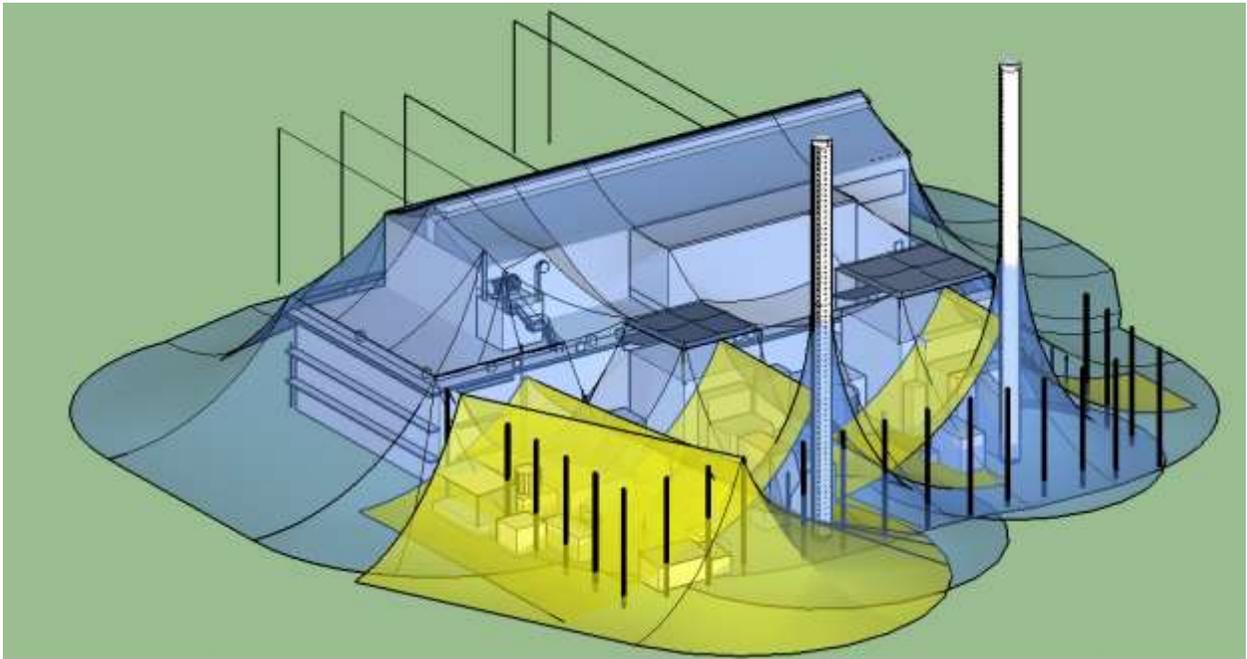


Figura 4.25 Volumen de protección de edificio administrativo y área de calderas.

Consideraciones de diseño especiales para edificio administrativo y calderas.

1. El diseño del SPCDA considera a un operario sobre el plafón de la estructura. El volumen de protección abarca una altura máxima de 2 metros sobre el plafón.
2. El cable de guarda se instala de manera que la parte más baja tenga una distancia vertical mínima de 3 m sobre el plano saliente de la estructura a proteger y a una distancia no menor de 0.2m desde la cresta del poste.
3. Se debe equipotenciar los contenedores con sustancias explosivas al SPCDA que lo protege.
4. Todos los SPCDA deben conectarse entre sí, para ser equipotenciales. Por lo que se recomienda utilizar una barra bus como la descrita en Anexo B, figura B-2.
5. El diseño del SPCDA considera un anillo a una altura intermedia del edificio administrativo.

6. En los detalles AD-012 y CA-003 se debe de instalar al menos una terminal aérea que proteja a las estructuras metálicas al rodar sobre esta una esfera con radio de 100 pies (30m), esta no es posible detallar dado que no se pudo acceder a estas áreas.
7. La distancia entre bajantes de red a tierra se adaptaron a las condiciones actuales del edificio, ya que se encuentra rodeada de otras estructuras que impiden llevar a cabo la red de tierra seleccionada.
8. Existe un SPCDA que se extiende desde ETESAL al edificio administrativo, desde el cual debería de equipotenciar con el SPCDA a instalar, sin embargo esta decisión queda sujeta a un análisis de falla que debe de contemplar como una falla del lado de ETESAL y como esta puede repercutir en los equipos instalados en la planta, sin embargo se recalca que todo SPCDA debe ser equipotencial para evitar arcos o descargas laterales y daños derivados de los mismos.

Presupuesto

TERMINALES AÉREAS Y BASES			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Punta de interceptación de cobre 1/2 " x 10"	2	\$9.25	\$18.50
Punta de interceptación de cobre 1/2 " x 12"	16	\$10.42	\$166.72
Punta de interceptación de cobre 5/8 " x 10"	30	\$16.28	\$488.40
Punta de interceptación de cobre 5/8 " x 12"	16	\$19.35	\$309.60
Punta de interceptación de cobre 5/8 " x 24"	6	\$30.89	\$185.34
Punta de interceptación de acero inoxidable 5/8 " x 24"	12	\$51.50	\$618.00
Base horizontal adhesiva de acero inoxidable con rosca de 1/2"	18	\$25.37	\$456.66
Base horizontal adhesiva de acero inoxidable con rosca de 5/8"	6	\$17.15	\$102.90
Base horizontal (parapeto) de cobre con rosca de 5/8"	2	\$15.60	\$31.20
Base vertical de cobre, bronce o acero inoxidable para punta de 5/8" para orientación vertical de cable	8	\$14.87	\$118.96
Base vertical de cobre, bronce o acero inoxidable para punta de 5/8" para orientación horizontal de cable	8	\$17.97	\$143.76
Pieza de adaptación de terminal aérea 5/8" a mástil 1 1/2"	40	\$29.00	\$1,160.00
CONDUCTORES Y ACCESORIOS			
DESCRIPCIÓN	CANT.	PU [\$]	SUB TOTAL [\$]
Cable de cobre desnudo 1/0 AWG	614.35 m	\$5.57	\$3,421.93
Cable de cobre desnudo 3/0 AWG	842 m	\$7.29	\$6,138.54
Cable ACSR 4/0 Penguin	117 m	\$3.10	\$362.70
Abrazadera de acero inoxidable para cable 1/0 AWG en mástil de 2"	10	\$23.28	\$232.80
Conector en T para cable 3/0 AWG	42	\$13.92	\$584.64
Grapa para cable 3/0 AWG	757	\$10.82	\$8,187.13
Grapa para cable 1/0 AWG	270	\$5.12	\$1,382.40
Conector en cruz para cables 3/0 AWG	10	\$18.33	\$183.30
Conector de interconexión para cable 1/0 AWG	16	\$6.01	\$96.16
Conector de interconexión para cable 3/0 AWG	22	\$7.81	\$171.82
Conector bimetalico de interconexión para cable 4/0 ACSR Penguin.	14	\$2.35	\$32.90
Sujetador adhesivo de acero inoxidable para cable 3/0 AWG.	66	\$3.95	\$260.70
Electrodo de puesta a tierra. Cobre sólido de 5/8" x 10'	68	\$17.00	\$1,156.00
Abrazadera de bonding para tubo de 1 1/2" con conector para cable	13	\$18.97	\$246.61
Barra bus de equipontencialidad de cobre, con aisladores y soportes (7 bornes mínimo)	1	\$23.55	\$23.55
Abrazadera con pernos para poste de 5" a 7" (incluye perno con longitud de 2")	3	\$9.50	\$28.50
Abrazadera con pernos para poste de 3" a 4" (incluye perno con longitud de 2")	3	\$8.45	\$25.35
Tuerca argolla de 5/8"	3	\$2.98	\$8.94

<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>CANT.</i>	<i>PU [\$]</i>	<i>SUB TOTAL [\$]</i>
Preformada para cable 4/0 ACSR	8	\$3.51	\$28.08
Aislador de campana	3	\$9.42	\$28.26
Clevis de remate S/R	3	\$15.81	\$47.43
Clevis con aislador de porcelana	5	\$4.53	\$22.65
Perno 5/8" con longitud de 2" con tuerca cuadrada	5	\$1.07	\$5.35
Bolsa de cemento	13	\$8.23	\$106.99
Arena	2 m ³	\$17.94	\$35.88
Adhesivo estructural (10.1 oz)	5	\$34.05	\$ 170.25
<i>SUB TOTAL</i>			\$ 26,788.91
<i>IMPUESTO (13% IVA)</i>			\$ 3,482.56
<i>TOTAL MATERIALES</i>			\$ 30,271.47

Tabla 4.29 Presupuesto de terminales aéreas, bases, conductores y accesorios del SPCDA en edificio administrativo y calderas.

<i>ESTRUCTURAS METALICAS</i>			
<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>CANT.</i>	<i>PU [\$]</i>	<i>SUB TOTAL [\$]</i>
Mástil auto soportado de 2", longitud 2 m de acero inoxidable. Precio incluye instalación. (Ver Anexo A, figura A-11 y A-18)	9	\$846.85	\$7,621.65
Mástil de 1 1/2", longitud 1.5 m de acero inoxidable (Ver Anexo A, figura A-13)	1	\$3.00	\$3.00
Mástil de 1 1/2", longitud 2.5 m de acero inoxidable (Ver Anexo A, figura A-12)	12	\$5.00	\$60.00
Mástil de 1 1/2", longitud 2.4 m de acero inoxidable (soldado a pletina de 4mm y antena), incluye instalación (Ver Anexo A, figura A-14)	3	\$40.00	\$120.00
Brazos de amigo de acero inoxidable (Ver Anexo A, figura A-9)	15	\$110.00	\$1,650.00
Abrazadera para anclaje de mástil de 1 1/2"	26	\$20.00	\$520.00
Estructura metálica para base de terminal aérea (Ver Anexo A, Figura A-19)	18	\$144.27	\$2,596.86
Estructura metálica para base soporte de conductor (Ver Anexo A, Figura A-18)	248	\$50.13	\$12,432.24
<i>SUB TOTAL:</i>			\$25,003.75
<i>IMPUESTOS (13% IVA)</i>			\$3,250.49
<i>TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:</i>			\$28,254.24

Tabla 4.30 Presupuesto estructuras metálicas del SPCDA en edificio administrativo y calderas.

MANO DE OBRA			
DESCRIPCIÓN	CANT	PU [\$/]	SUB TOTAL [\$/]
Instalación y cableado de terminal aérea en techos	292 m	\$3.00	\$876.00
Instalación y cableado de terminal aérea en alturas	332 m	\$3.00	\$996.00
Instalación y cableado de terminal aérea en parapeto	166 m	\$0.50	\$83.00
Instalación y cableado de terminal aérea en chimeneas.	250 m	\$6.00	\$1,500.00
Instalación y cableado de terminal aérea en estructuras varias	40 m	\$2.00	\$80.00
Instalación de cable de guarda	117	\$0.50	\$58.50
Instalación de aisladores a estructuras	7	\$20.00	\$140.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	8	\$25.00	\$200.00
Soldadura exotérmica (4 conductores 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	9	\$25.00	\$225.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 1/0 AWG + 1 varilla 5/8")	28	\$25.00	\$700.00
Soldadura exotérmica (1 conductor 3/0 AWG + 1 varilla 5/8")	27	\$25.00	\$675.00
Instalación de varillas de red a tierra	68	\$15.00	\$1,020.00
Radiales de 3.6m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	51	\$4.00	\$204.00
Radiales de 1m a una profundidad de 0.5m embebidos en una mezcla de cemento pobre	17	\$1.00	\$17.00
TOTAL MANO DE OBRA			\$6,774.50

Tabla 4.31 Presupuesto de mano de obra del SPCDA en edificio administrativo y calderas.

PRESUPUESTO TOTAL	
TOTAL MATERIALES	\$30,271.47
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:	\$28,254.24
TOTAL MANO DE OBRA	\$6,774.50
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$26,120.08
DISEÑO DEL SPCDA	\$3,000.00
IMPREVISTOS	\$9,442.03
TOTAL	\$103,862.31

Tabla 4.32 Presupuesto total del SPCDA en edificio administrativo y calderas.

4.8.7. Presupuesto total

Finalmente se presenta el presupuesto total para la ejecución de los conjuntos SPCDA propuesto en cada estructura, este presupuesto es la suma de los presupuestos individuales antes desglosado, y pretende mostrar el monto total de la ejecución del proyecto.

El precio de los materiales corresponden al promedio de los obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, los materiales pueden ser comprados en la región o ser importados. Al precio promedio se les ha aplicado un 13% de impuestos (IVA).

Al ser importados tienen un precio significativamente menor debido a que la compra se hace de manera más directa hacia los fabricantes, sin embargo, el precio proporcionado por estos no incluye el envío, estos tiene diferentes tasas según el peso total de los materiales el cual no fue proporcionado. El arancel de Derechos Por Tratados Internacionales (DAI) es de 0%.

El costo total del proyecto se estima en \$219,973.47. Se debe de tener en cuenta que al llevarse a cabo todos los SPCDA mostrados, el instalador puede optimizar el tiempo de trabajo y disminuir costos de mano de obra o alquiler de maquinaria como grúas.

<i>PRESUPUESTO TOTAL DEL DISEÑO</i>	
TOTAL MATERIALES	\$70,811.63
TOTAL ESTRUCTURAS METALICAS:	\$49,841.08
TOTAL MANO DE OBRA	\$16,330.07
SUPERVISIÓN Y EJECUCIÓN DE LA OBRA	\$54,793.11
DISEÑO DEL SPCDA	\$8,200.00
IMPREVISTOS	\$19,997.59
<i>TOTAL</i>	<i>\$219,973.47</i>

Tabla 4.33 Presupuesto total del SPCDA en la planta generadora térmica a vapor en Acajutla

Recomendaciones

- Se recomienda que bajo ninguna circunstancia se utiliza materiales de aluminio como parte del SPCDA que esté expuesto a la intemperie debido al ambiente corrosivo en la planta generadora.
- Todas las puntas de interceptación deben ser tipo Franklin (sólidas) de cobre o acero inoxidable; de ser posible con revestimiento para la corrosión.
- El cable de interconexión de terminales aéreas, bajantes, y red de tierra del sistema será de cobre desnudo con revestimiento para la corrosión. Se recomienda un tamaño mínimo de 1/0 AWG (Clase I) ó 3/0 AWG (Clase II).
- El cable de guarda en postes y paredes será fijado a la estructura utilizando aisladores y preformadas o cualquier herraje que evite el daño del cable debido a fricciones y/o movimientos a los cuales está sometido, como los causados por el viento.
- El cable de guarda en poste debe interconectarse con la punta de interceptación instalada, la bajante de red a tierra y la estructura que lo sostiene. El cable de guarda debe fijarse a una distancia no menor de 20cm de la cresta del poste.
- En los bordes del edificio, las puntas no deben estar a más de 0.6 metros (2') de este. A excepción de los mástiles, los cuales deben estar lo más cercano posible de los bordes.
- Las puntas presentadas en todos los diseños poseen el tamaño mínimo recomendado. Se podrá instalar puntas de mayor longitud, pero menor o igual a 0.6 m (24"). Para puntas mayores a 24" (0.6 m) deben ser soportadas en estructura tipo trípode.

- La curvatura de todos los conductores no debe ser menor a 90° ni tener un radio menor a 8" (0.203 m).
- Los soportes de los cables se deben instalar a intervalos no mayores a 0.9 m.
- No debe permitirse que cualquier elemento del SPCDA posea capas de pintura.
- La red de tierra es de tipo radial y no deben divergir en un ángulo mayor a 90°. Además, deben estar 1.0 m separada del edificio. Para fines de protección contra la corrosión, se recomienda que los conductores radiales sean embebidos en una capa de 10 cm de arena-cemento con una relación de 5:1.
- Desde una bajante a tierra, se debe extender un conductor hacia una barra tipo bus de equipotencialidad. Esta debe estar aislada eléctricamente de la estructura que lo soporte. El propósito de la barra bus es interconectar todo los sistemas de puesta a tierra de la edificación (red de 60Hz, telecomunicaciones, rayos, etc.)
- Los cimientos de la edificación deben tener una unión eléctrica a tierra, de lo contrario se debe realizar una conexión eléctrica de los cimientos hacia la barra bus.
- Toda estructura metálica subterránea (tuberías en general) dentro de los 7.6 m de una red a tierra de descargas atmosféricas se deben conectar eléctricamente con la red de tierra del sistema. Las estructuras metálicas deben ser eléctricamente continuas, de no ser así, realizar puentes entre los dos puntos separados por el medio aislante.
- Conectar al cableado del SPCDA cualquier estructura metálica que se encuentre a 3.6 metros del mismo. Esta debe ser eléctricamente continua.

- El SPCDA debe inspeccionarse cada cierto tiempo como la empresa lo considere, debido a la corrosión existente, pero es necesario realizar un mantenimiento correctivo y/o preventivo por lo menos una vez al año, y después que un evento de rayo sea detectado en la zona que abarca el sistema de protección.

Conclusiones

- La normativa NFPA 780 es la indicada en el diseño de un SPCDA en El Salvador, no sólo por su efectividad durante años en diferentes países, sino también abordado desde el punto de vista legal, donde SIGET en el acuerdo No. 294-E-2011, reconoce al NEC 2008 como la normativa a aplicar en el ámbito eléctrico en nuestro país, y esta última reconoce a la NFPA 780 como normativa a aplicar para la protección contra descargas atmosféricas.
- La esfera rodante es el método seleccionado para definir las zonas de protección. El radio de dicha esfera podría ser hasta de 46 metros, pero por el contenido de sustancias inflamables y el grado de protección que se requiere fue necesario utilizar una esfera con un radio de 30 metros, para definir las zonas de protección y el diseño del SPCDA.
- La NFPA 780 establece los requerimientos mínimos que deben cumplir los elementos (de cobre y aluminio) de un SPCDA para clase I y clase II, para terminales aéreas, conductores de interconexión de terminales, y conductores de bonding. Sin embargo se opta por utilizar materiales con dimensiones mayores al mínimo recomendado porque el ambiente en la planta generadora es corrosivo.
- Habiendo realizado un levantamiento tridimensional a escala de la planta generadora, es posible aplicar el método de la esfera rodante utilizando software de dibujo como SketchUp, y crear un sólido de protección bajo el rodamiento de la esfera, y garantizar la protección de todos los elementos dentro del sólido, cumpliendo con los requerimientos de la NFPA 780.
- Los tanques con contenido de productos inflamables o químicos son catalogados como clase II y se han protegido con cables de guarda ACSR 4/0 AWG que se extienden por encima de los tanques que se desea proteger, y en cada extremo se instala una bajante con su respectiva red de tierra para permitirle dos caminos a la corriente de una descarga, la bajante y cable para la red de tierra es de cobre 3/0

AWG. Para evitar descargas laterales se instala el cable de guarda de manera que sobrepase 3m como mínimo por encima de la estructura. En una de las redes de tierra se conecta un cable que se extiende subterráneamente hasta los tanques, o a una barra bus de equipotencialidad, este conductor puede ser tres calibres inferior al de la red de tierra.

- Para que el sólido de protección de cada estructura considerada sea efectiva, se adjuntan al presente trabajo de grado una serie de planos para cada estructura donde se especifica la localización, e instalación de las terminales aéreas, detallando los requerimientos mínimos que estas deben de cumplir para lograr tal fin. La estructura de los planos fue desarrollada para brindar una lectura clara y detallada de la instalación del SPCDA, además se agregan recomendaciones de materiales a utilizar e instalación del mismo para cada diseño.
- El precio del proyecto se estima en \$219,973.47, la probabilidad de que una descarga atmosférica dañe un equipo o saque de operación a la planta generadora, justifica su implementación, además de contar con antecedentes ocurridos en otros países donde este fenómeno ha afectado a tanques de almacenamiento de sustancias inflamables. Si las redes de transmisión y subtransmisión eléctrica cuentan con un sistema de protección para este fenómeno, con mucha más razón de deben de proteger las unidades generadoras que alimentan estas líneas.

Referencias bibliográficas

Libros y publicaciones

- ABB Power T&D Company Inc. (1997). Electrical Transmission and Distribution Reference book. En C. W. McCann, *Ligthning Phenomena* (págs. 542-577).
- Baba, Y., & Rakov, V. A. (2016). *Electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies*. IEEE PRESS.
- Bazeylan, E. M., & Raizer, Y. P. (200). *Lightning Physics and Lightning Protection*. Philadelphia: Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.
- Frydenlund, M. M. (1993). *Lightning Protection for People and Property*. New York: Van nostrand reinhold.
- Füllekrug, M., Mareev, E. A., & Rycroft, M. J. (2006). *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. Netherlands: Springer.
- Martin Uman, V. R. (2002). *A critical review of nonconventional approaches to lightning protection*. American meteorological society.
- Torres, H., Perez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montana, J., & Herrera, J. (2015). *Review of Ground Flash Density and Keraunic Levels Reported in Tropical Regions*. IEEE Press.
- Uman, M. A. (2008). *The Art and Science of Lightning Protection*. New York: Cambridge University Press
- Moraga, H. A., & Lemus, J. R. (1997). *Elaboración de un mapa de niveles isoceraunico de El Salvador*. San Salvador: Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de El Salvador.

Normativas.

- Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET). (2011). *Acuerdo No. 294-E-2011*. San Salvador.
- American Petroleum Institute (API). (2003). *API-RP-2003 Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents*. Washington D.C.: CSS1NFO.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) . (2007). *IEEE Std 142-2007 Grounding for Industrial and Commercial Power Systems*. New York.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2000). *IEEE std 80-2000: Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2006). *IEC 62305-4 Electrical and electronic systems within structures*. Gineva 20, Switzerland.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2006). *IEC 62306-3 Physical damage to structures and life hazard*. Geneva 20, Switzerland.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2008). *IEC 62305-1 Protection against lightning* . Geneva 20, Switzerland.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2008). *IEC 62305-2 Risk Management*. Geneva 20, Switzerland.
- Lightning Protection Institute (LPI). (2007). *LPI-175-S-2007: Standard de buena práctica para la instalación de pararrayos contra descarga atmosféricas*.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2008). *Norma para la instalación de sistemas de protección contra rayos*. 1 Batterymarch Park.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2014). *Norma para la instalación de sistemas de protección contra rayos*. 1 Batterymarch Park.
- Underwriters Laboratories Inc. (UL). (2007). *UL 96A: Standard for Safety for Installation Requirements for Lightning Protection Systems*.
- British Standards (BSi). (1998). *BS 7430: Code of practice for Earthing*.
- Department of Defense. (1982). *MIL-HDBK-419A: Grounding, bonding and shielding for electronic equipments and facilities*. Washington D.C.
- Department of Defense. (1988). *MIL-HBDBK-1004/6 Lightning Protection*. Washington D.C.

Department of Defense. (1997). *MIL-STD-464 Electromagnetic environmental effects requirements for systems*. Washington D.C.

Department of transportation federal aviation administration standard. (2002). *FAA-STD-019d: Lightning and surge protection, grounding, bonding and shielding requirements for facilities and electronic equipment*. Washington D.C.

U.S. Army Training and Doctrine Command. (2002). *Guide for Lightning Protective Measures for Personnel*. Washington D.C.

Manuales de fabricantes

PENTAIR. (2009). *ERICO Lightning Protection Handbook*.

PENTAIR. (2010). *ERICO Grounding, Bonding and Erico CADWELD*.

Paginas web

BBC. (Miércoles de Septiembre de 2012). *Rayo ocasiona incendio en la refinería*

venezolana El Palito. Obtenido de

http://www.bbc.com/mundo/ultimas_noticias/2012/09/120919_ultnot_incendio_refineria_el_palito_msd

CNN. (Domingo de Junio de 2010). *Lightning suspected in fire at North Carolina gasoline 'tank farm'*. Obtenido de

<http://edition.cnn.com/2010/US/06/13/north.carolina.gas.fire/index.html>

Krider, E. P. (s.f.). *Atmo 489 Online Atmospheric Electricity*. Obtenido de

http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/ATMO489_online/CONTENTS.html

Lap-shun, L. (s.f.). *What is cloud-to-cloud lightning?* Obtenido de

http://www.hko.gov.hk/m/article_e.htm?title=ele_00018

National Oceanic . (Jueves de Mayo de 2015). *Lightning Strike Density Product Description*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration:

http://www.opc.ncep.noaa.gov/lightning/lightning_pdd.php

Anexos

ANEXO A. *DETALLES DE INSTALACIÓN DE TERMINALES AÉREAS.*

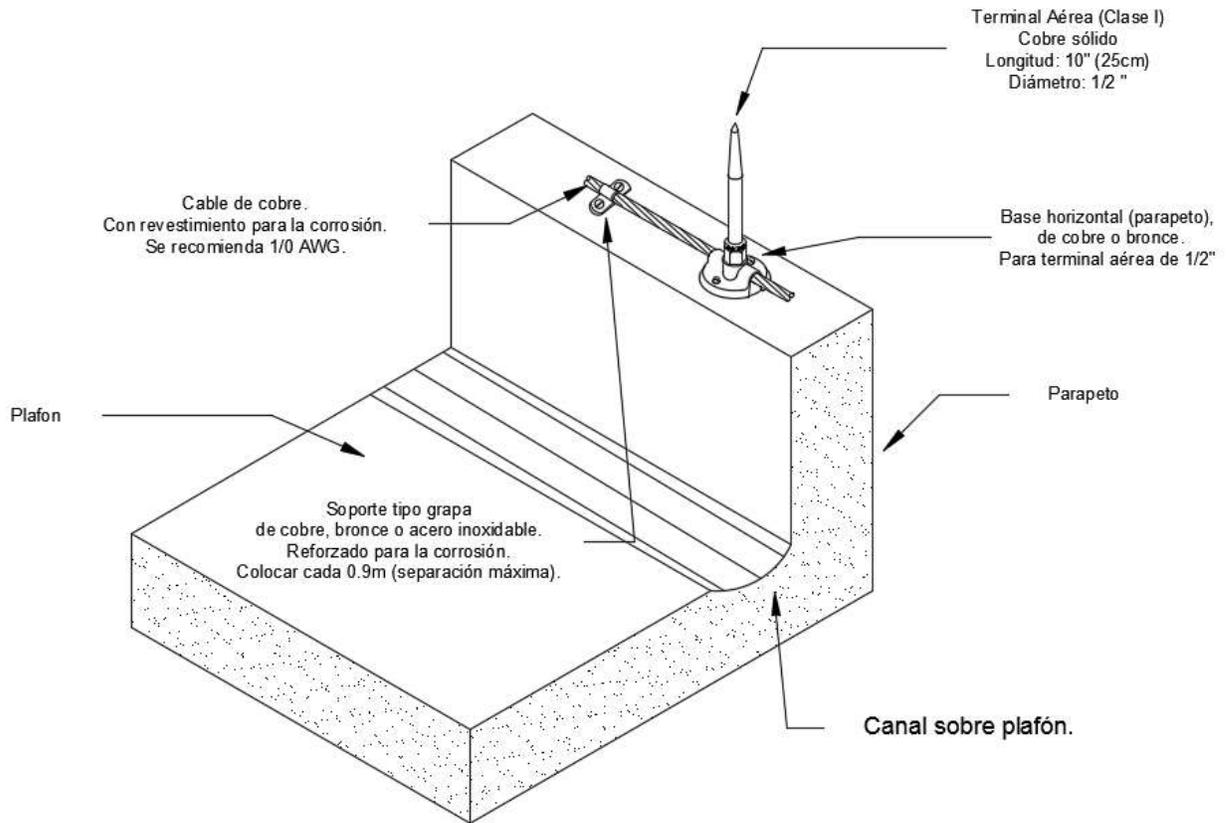


Figura. A-1 Terminal aérea en parapeto.

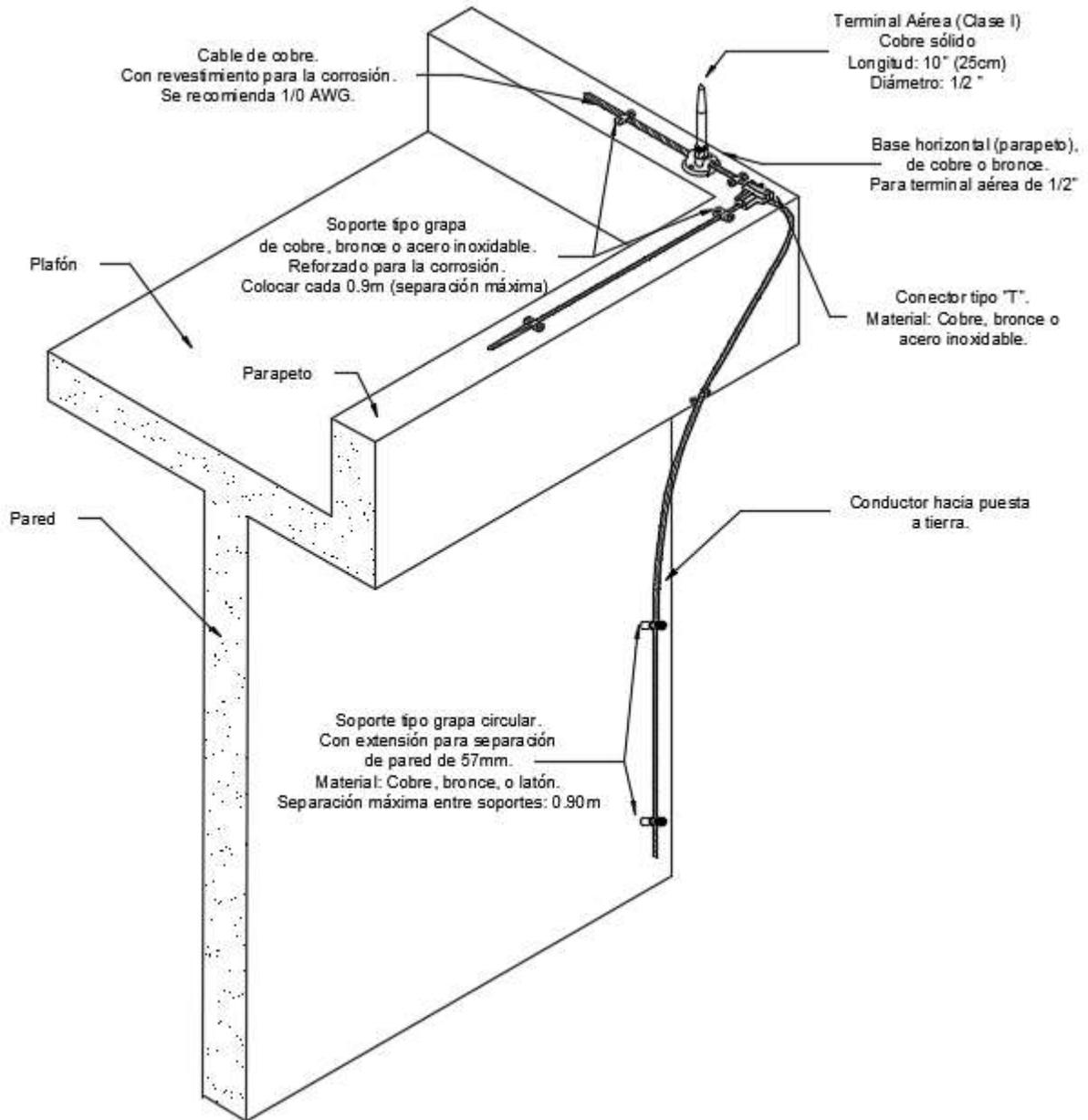


Figura. A-2 Terminal aérea en parapeto (esquina).

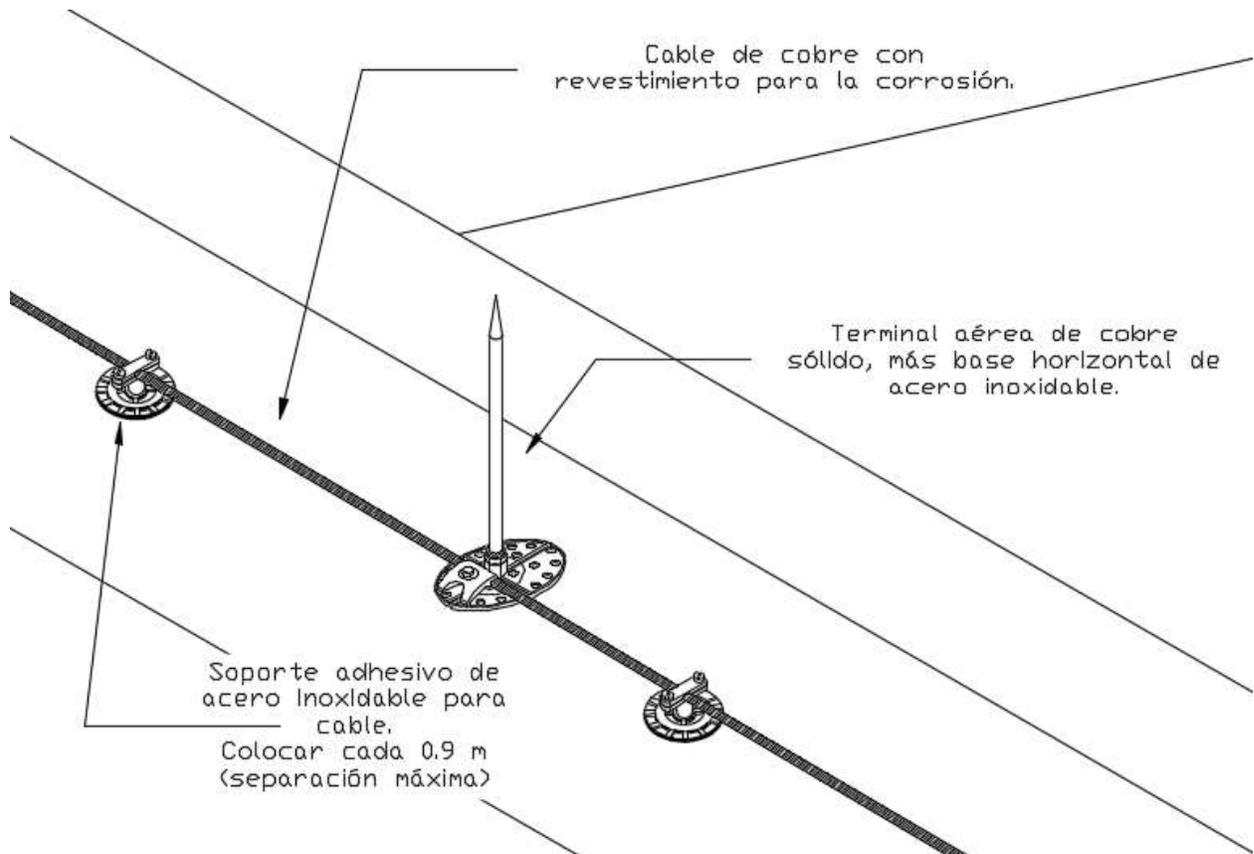


Figura. A-3 Terminal aérea en base horizontal adhesiva.

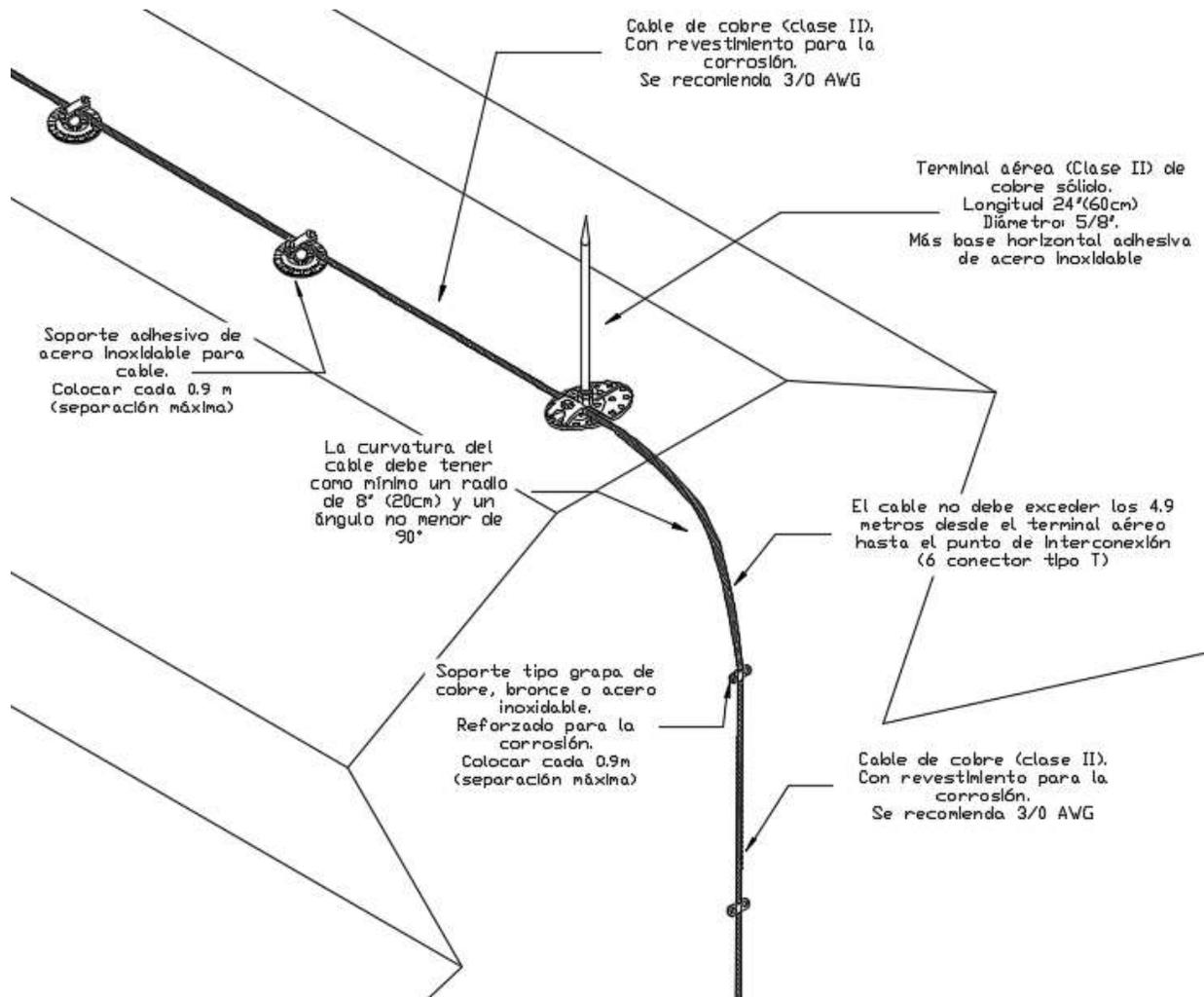


Figura. A-4 Terminal aérea en base horizontal adhesiva (esquina).

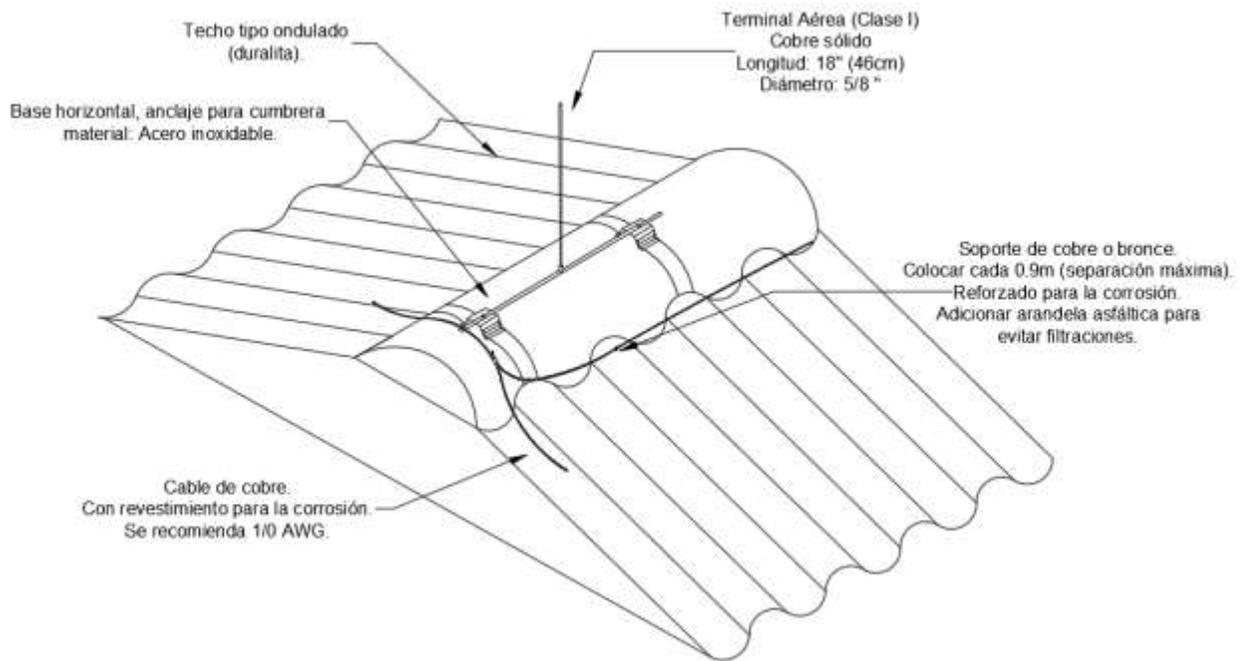


Figura. A-5 Terminal aérea en cumbrera a utilizar en unidad SIGMA y Cafetín.

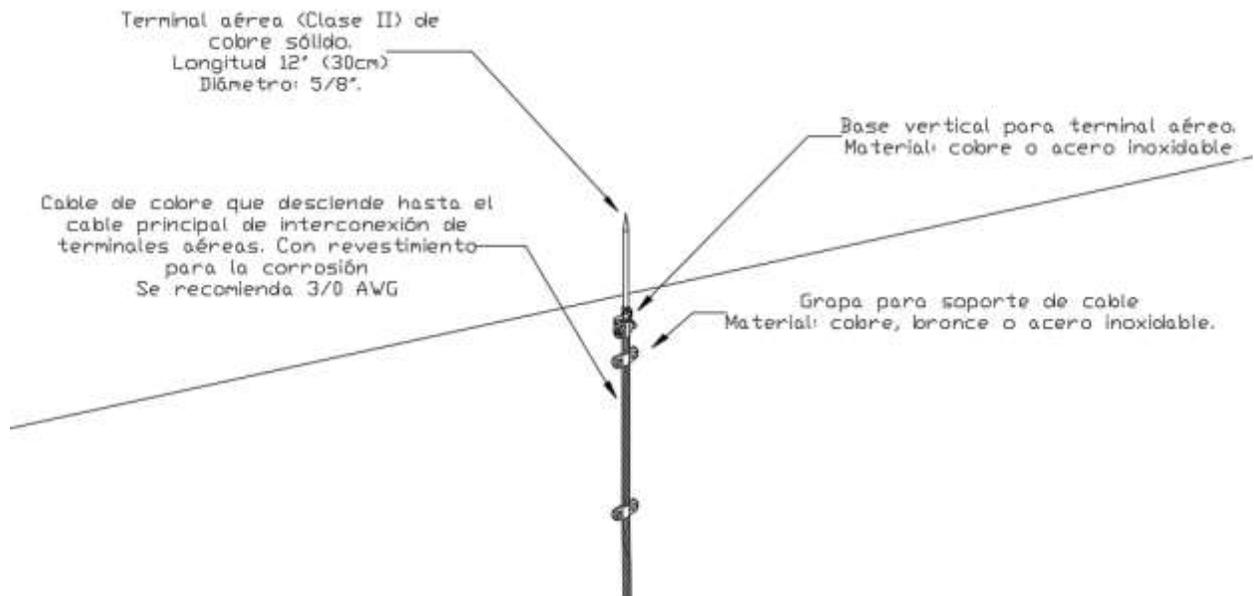


Figura. A-6 Terminal aérea en base vertical, la conexión de cable es vertical.

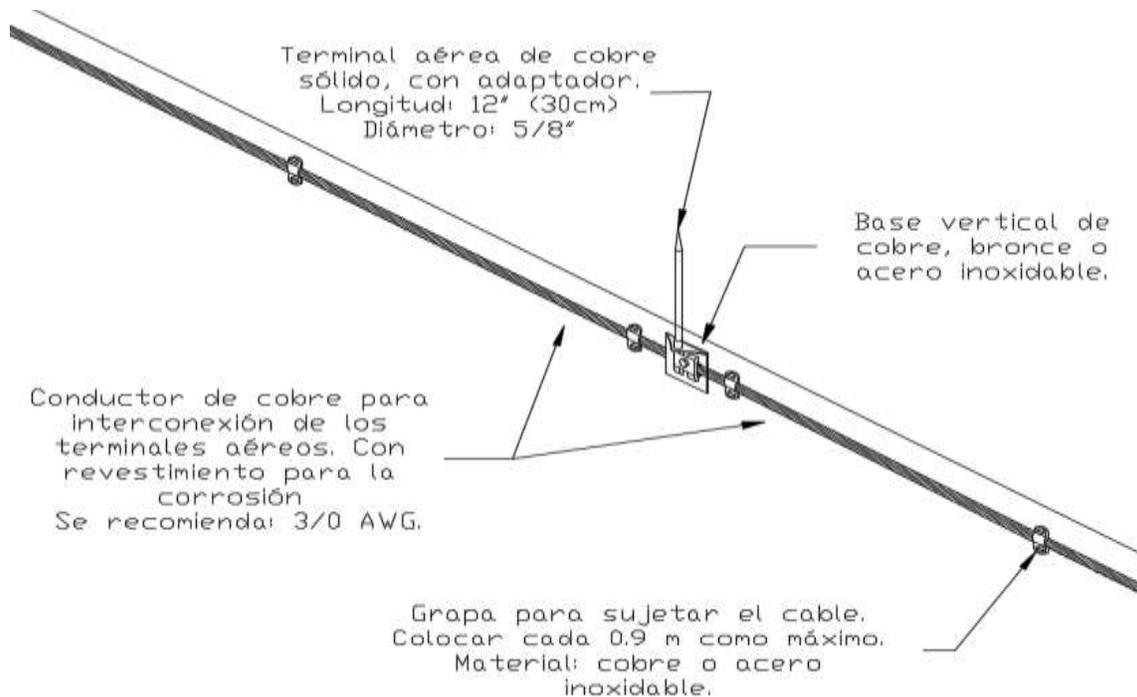


Figura. A-7 Terminal aérea en base vertical, la conexión de cable es horizontal..

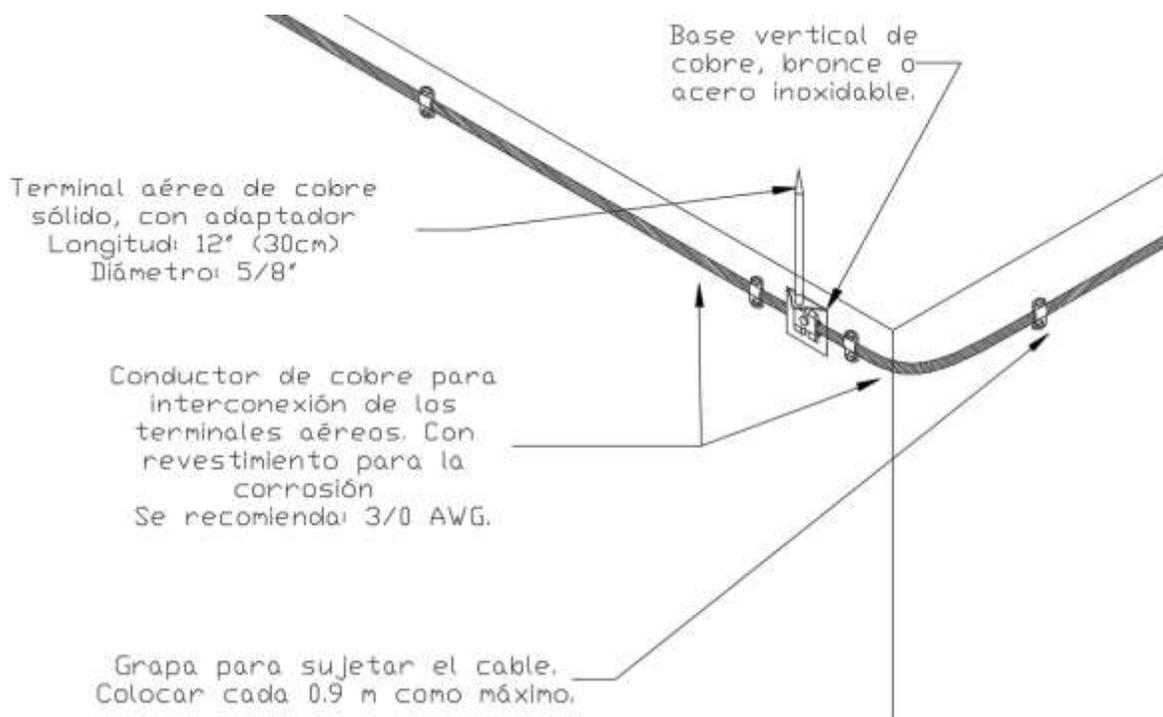


Figura. A-8 Terminal aérea en base vertical, en esquina y orientación horizontal de cable.

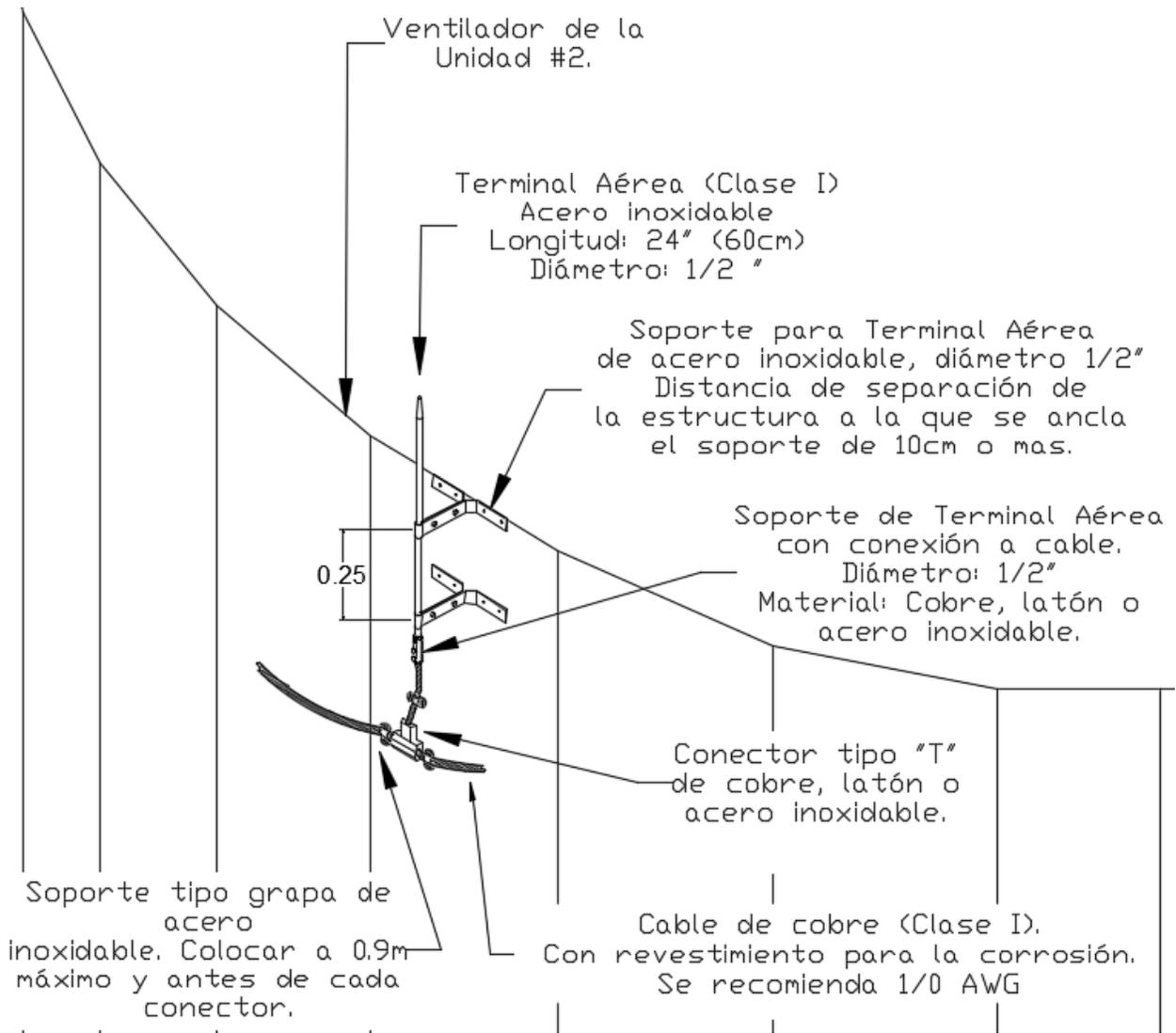


Figura. A-9 Terminal aérea sujeta con dos soportes.

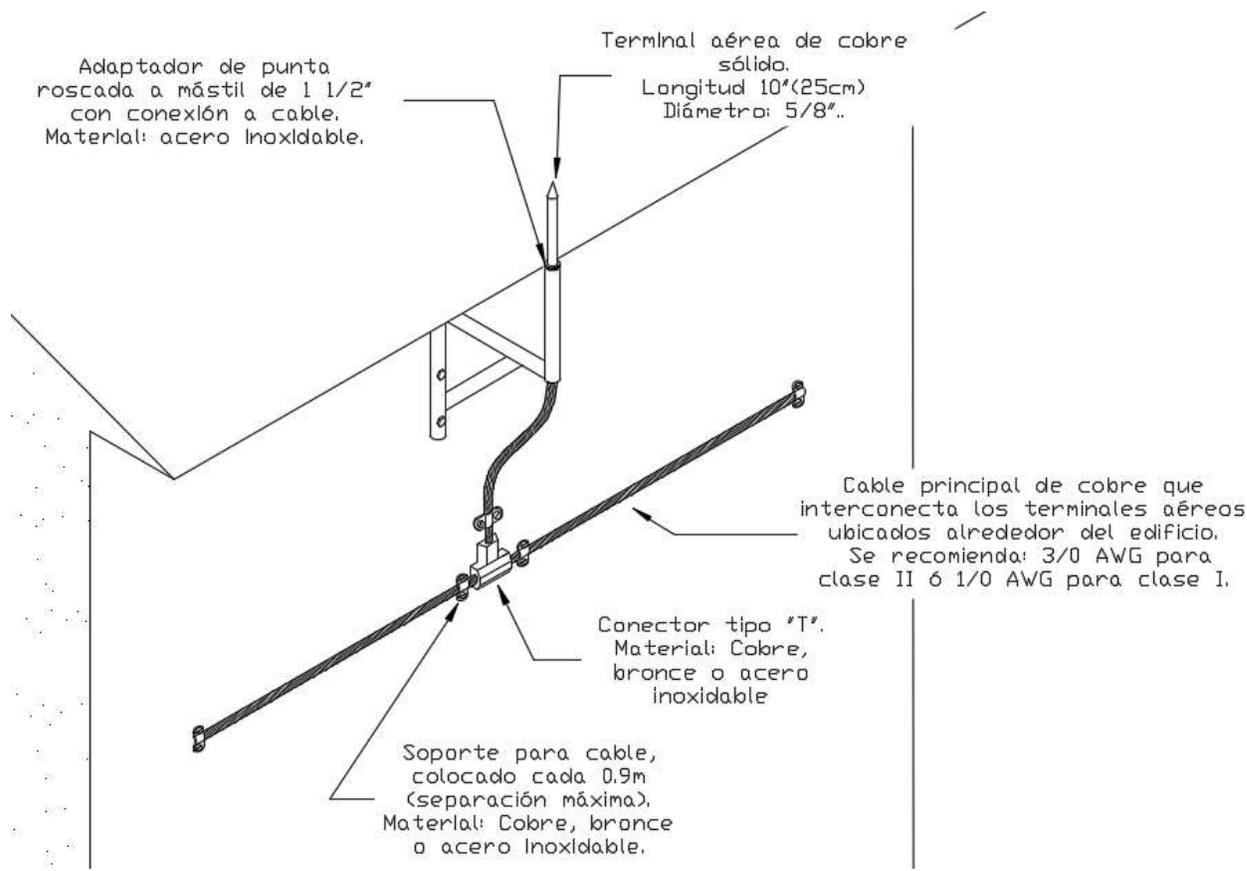


Figura. A-10 Terminal aérea en estructura tipo "brazo de amigo".

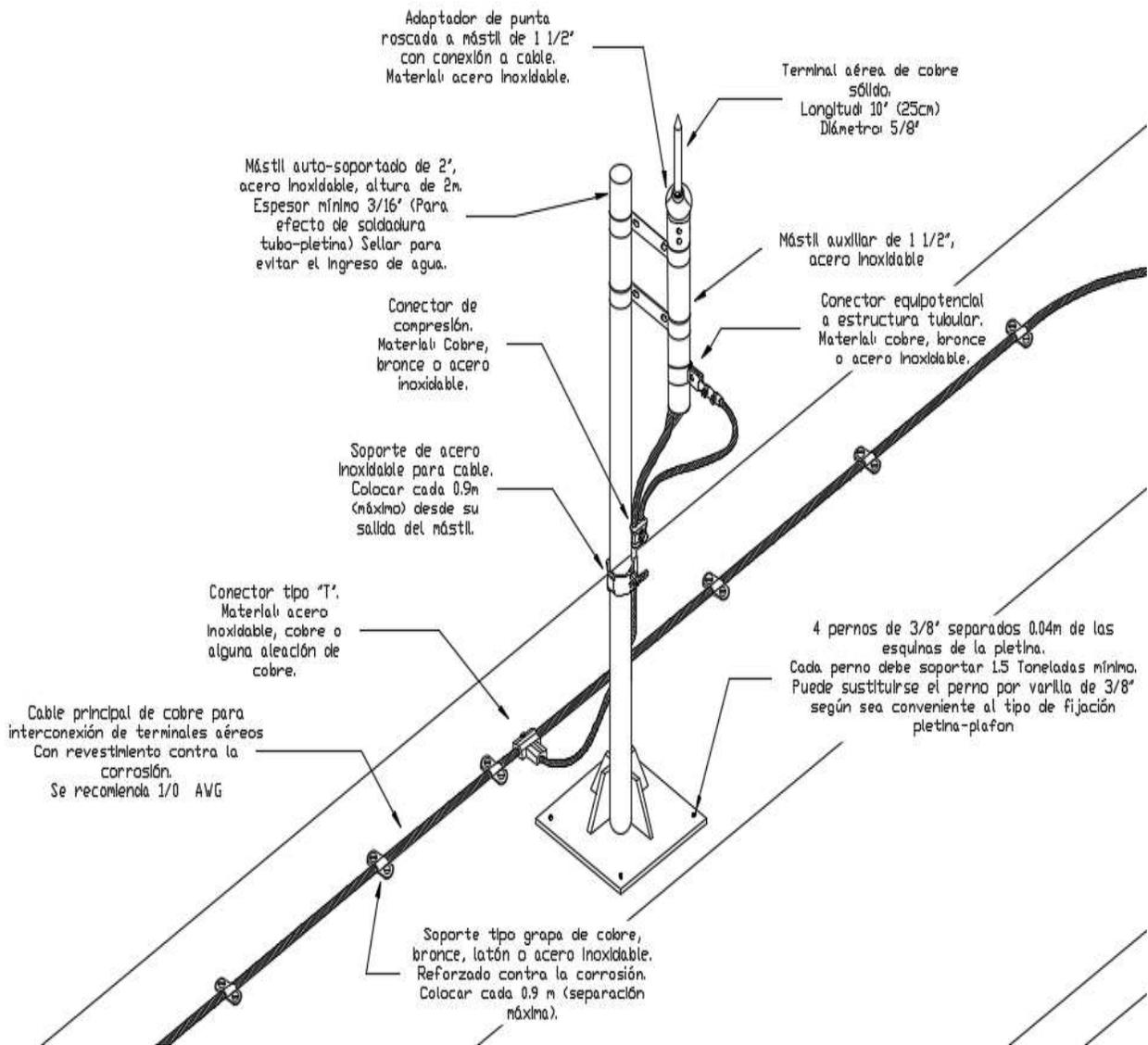


Figura. A-11 Terminal aérea instalada en mástiles.

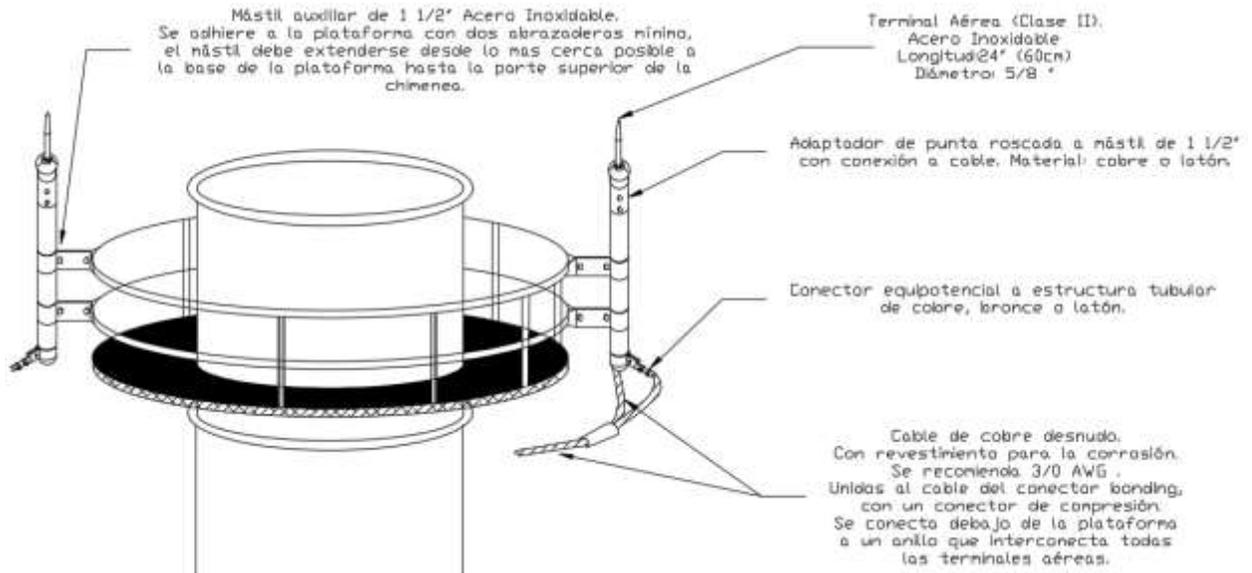


Figura. A-12 Terminal aérea instalada en mástil (chimenea).

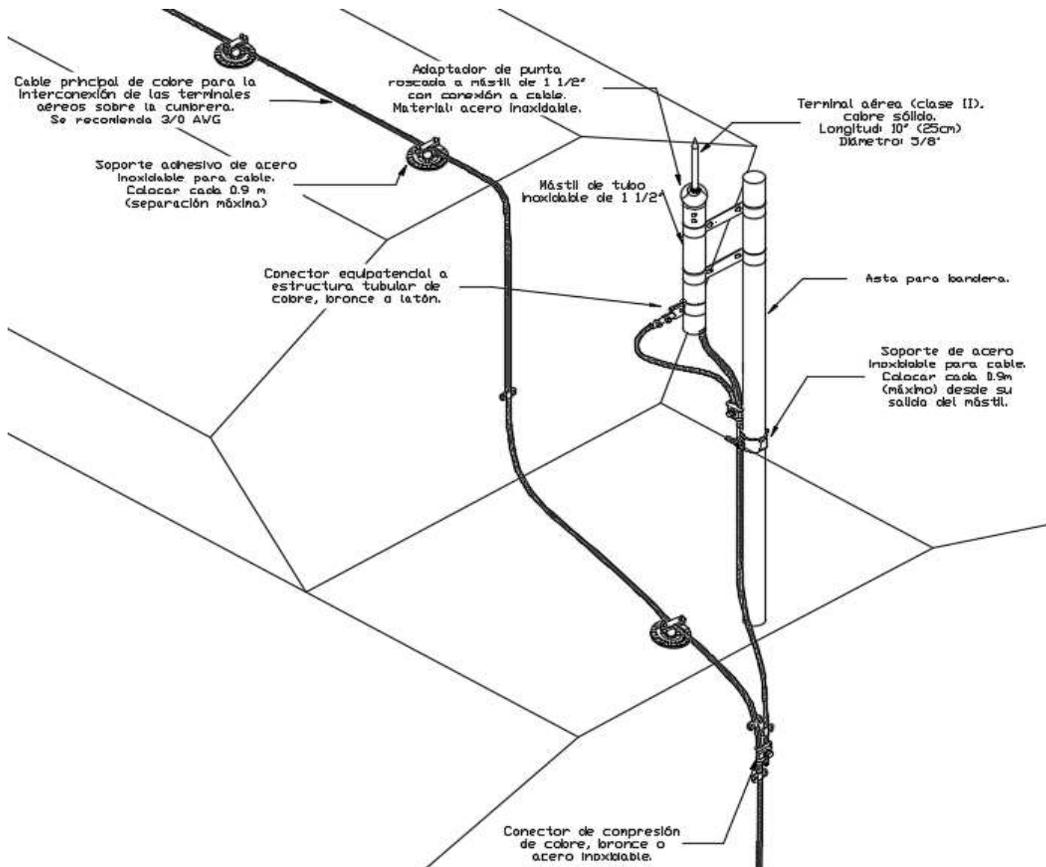


Figura. A-13 Terminal aérea instalada en mástil (asta de bandera).

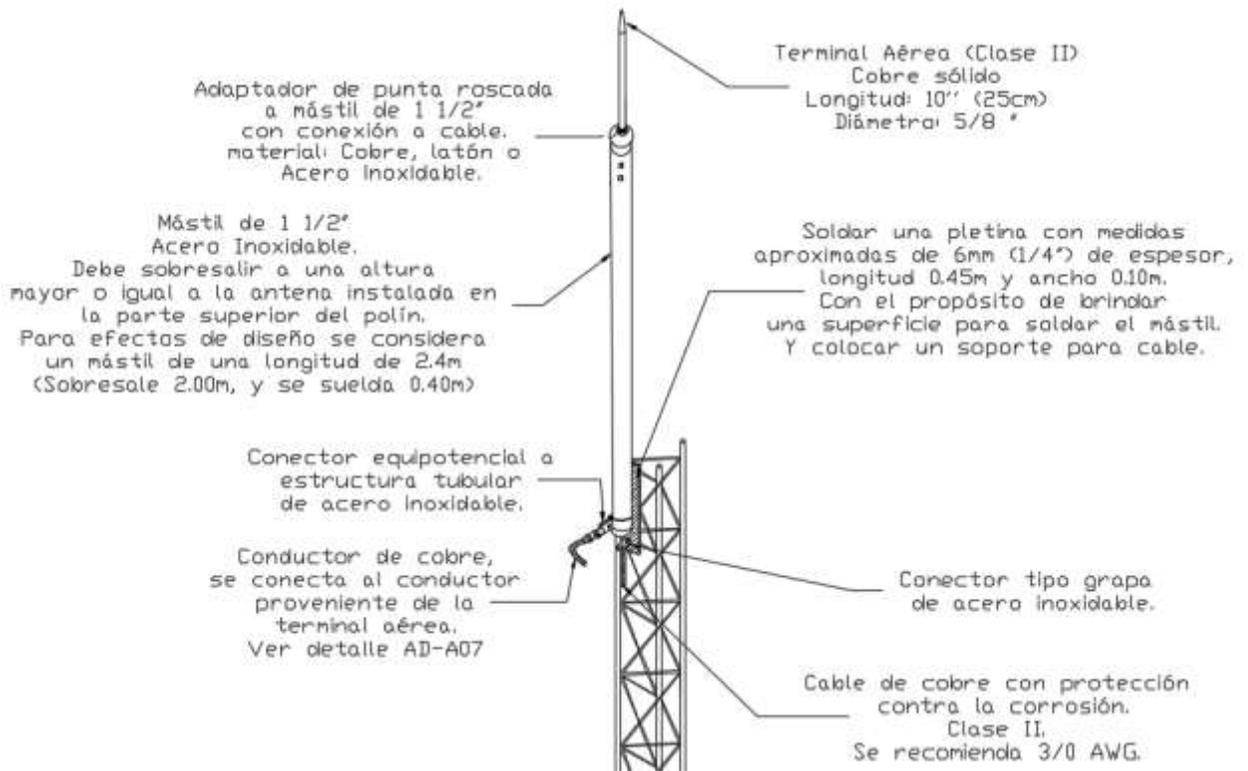


Figura. A-14 Terminal aérea instalada en mástil (En antenas).

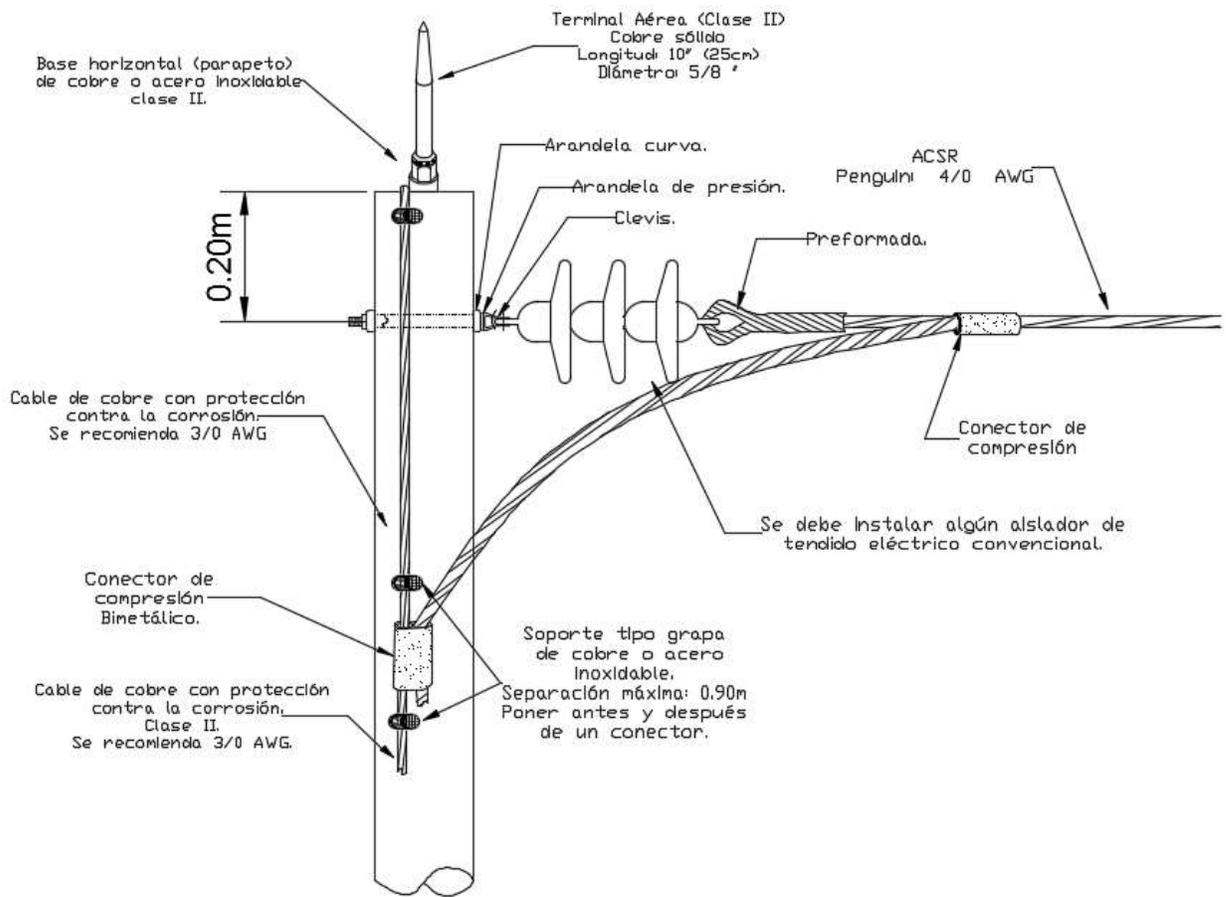


Figura. A-15 Terminal aérea sobre poste de concreto.

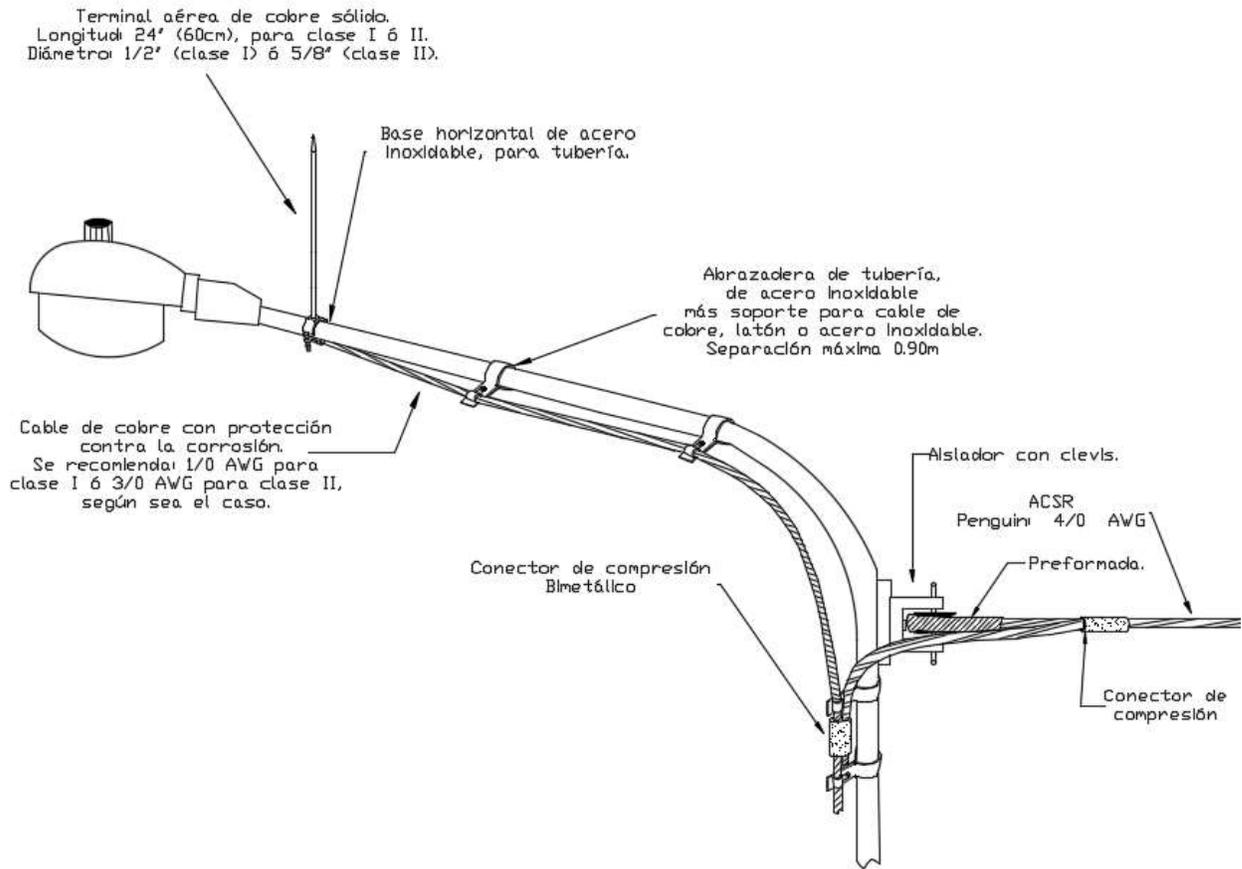


Figura. A-16 Terminal aérea en poste de luminaria.

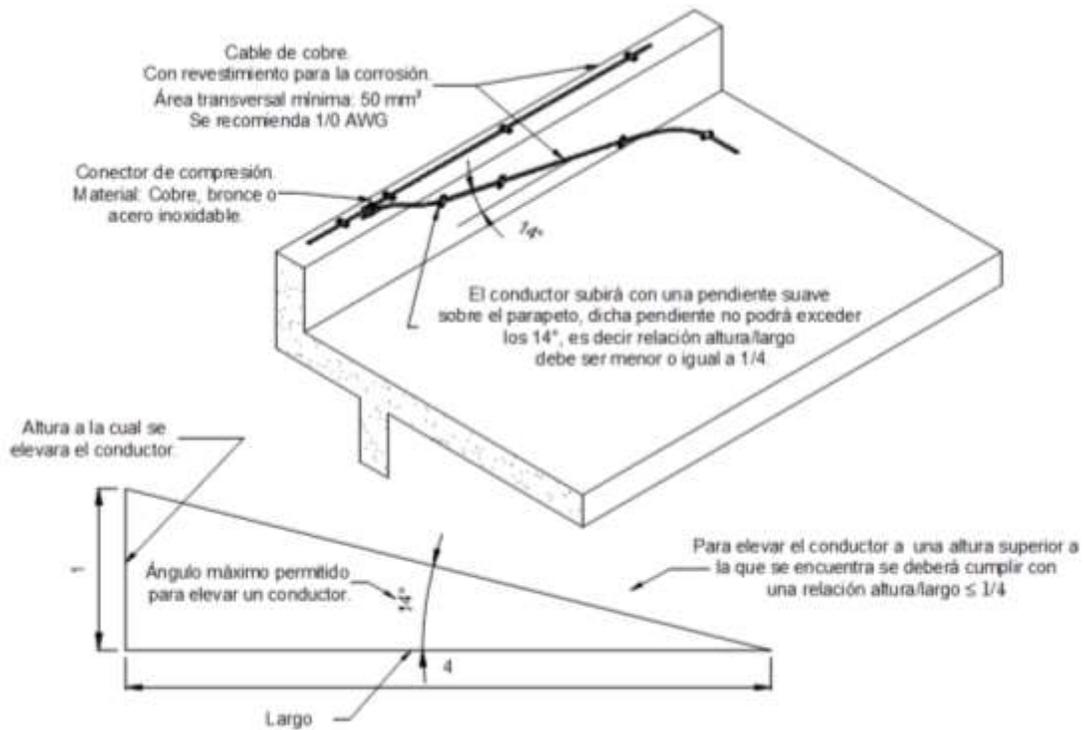


Figura. A-17 Levantamiento de un conductor a un nivel superior.

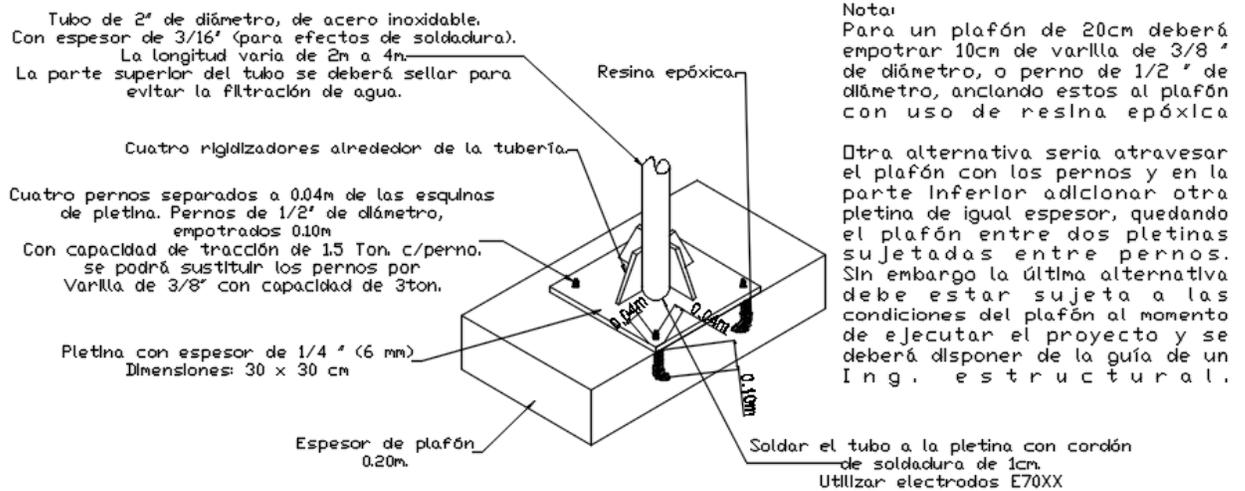


Figura. A-18 Base de mástil auto soportado.

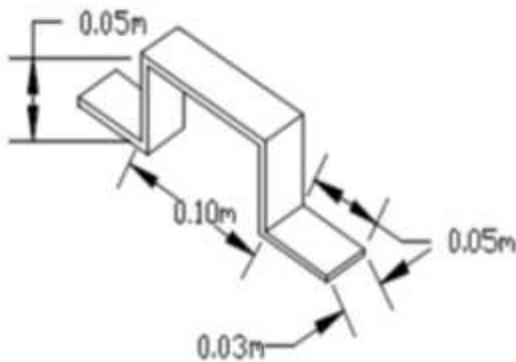


Figura. A-19 Base metálica para instalar soporte de cable a estructuras que no tiene una superficie plana

- El espesor recomendado es de 2mm o su equivalente comercial o superior.
- Las medidas se pueden aproximar a su equivalente comercial o superior.
- Material: Acero Inoxidable.

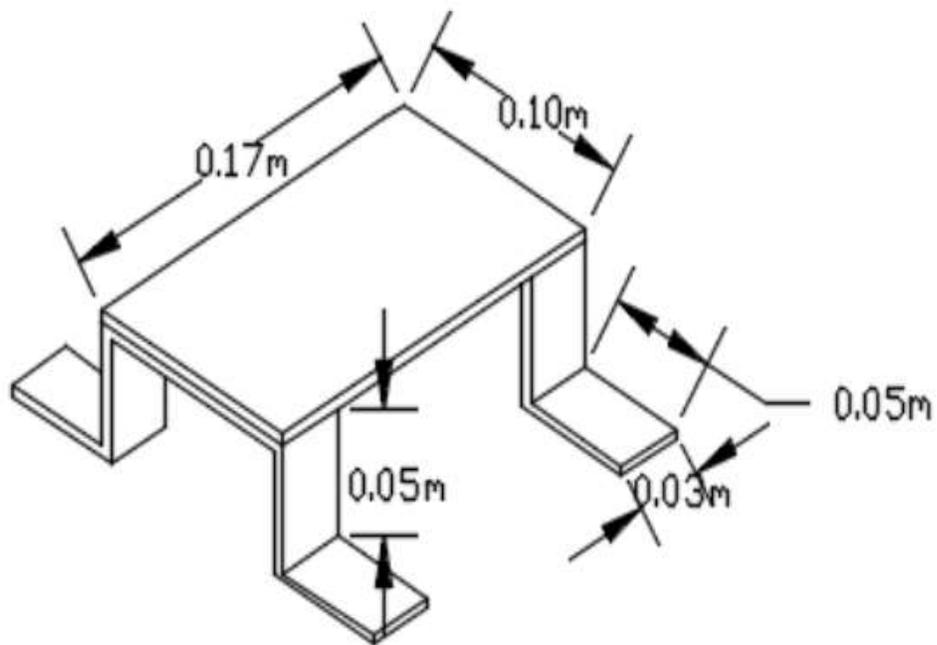


Figura. A-20 Base para instalar terminal aérea o accesorio para conexión de dos cables o más a estructuras que no tiene una superficie plana.

- Se realiza a base de dos estructuras metálicas (A-19) y se adhiere una lámina de 10cm x 17cm aproximadamente.
- Las medidas se pueden aproximar a su equivalente comercial o superior.
- El espesor recomendado es de 2mm o su equivalente comercial o superior.
- Material: Acero Inoxidable.

ANEXO B. *DETALLES DE INSTALACIÓN PARA SISTEMA DE PUESTA A TIERRA*

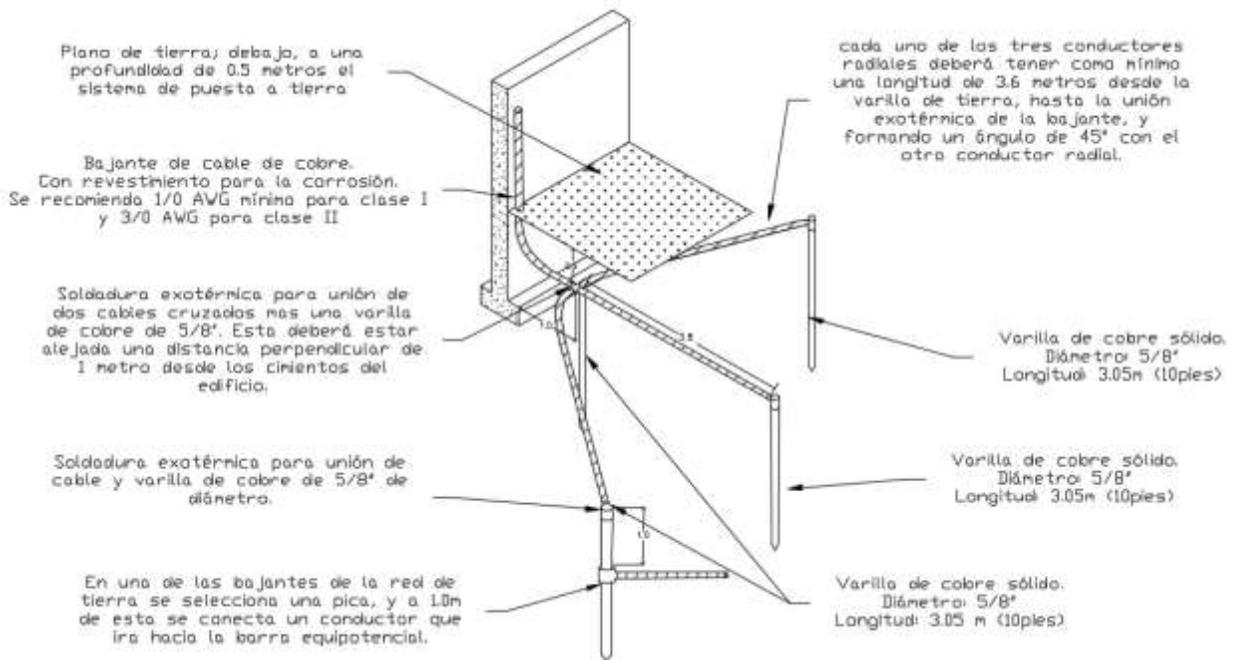


Figura. B-1 Arreglo de puesta a tierra.

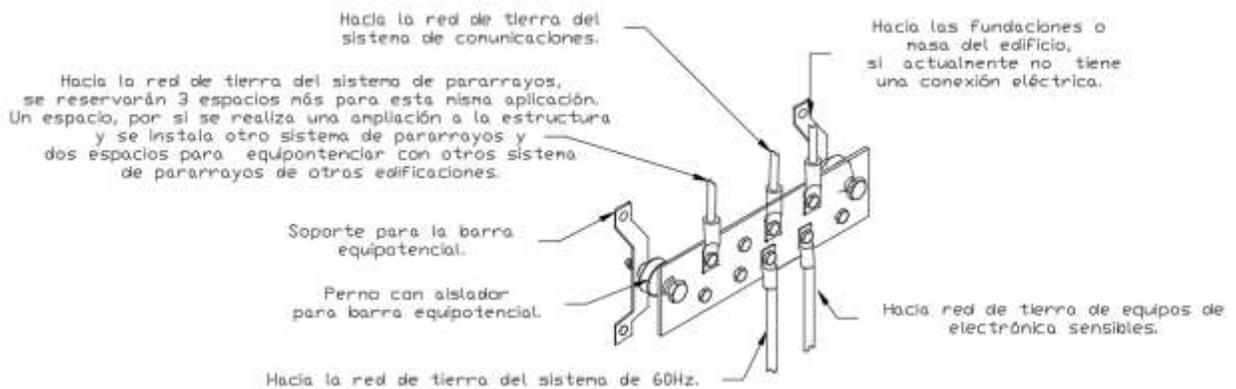


Figura. B-2 Barra bus de equipotencialidad.