



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN
CONTRA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS
CAUSADAS POR RAYOS EN UNA PLANTA
AGRÍCOLA INDUSTRIAL CON CARGAS
SENSIBLES**

TESINA

Que para obtener el título de

ESPECIALISTA EN ENERGÍA ELÉCTRICA

P R E S E N T A

ING. DANIEL ABRAHAM GONZÁLEZ ORELLANA

DIRECTOR DE TESINA

M.I. ALBERTO BRAULIO ALZATE DUQUE



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Amílcar González e Isabel Orellana por darme todo su cariño, amor y siempre creer en mí.

A mis hermanos Wilhem González y Loyoann González, por su ejemplo de paciencia y trabajo que los caracteriza.

A mi esposa Marcela Sánchez por ser mi compañera de vida y por darme el impulso cada día para lograr mis objetivos.

Al Dr. Héctor Aviña Jiménez por su amistad sincera además de ser un gran guía y ayudarme a ver que todo es posible, que no estamos solos en el día a día y compartirme su visión de éxito tan peculiar y brillante.

Al Ing. Luis Mora por su apoyo incondicional y su ejemplo en el desarrollo de proyectos con gran calidad.

Al Grupo iiDEA por todas las experiencias que poco a poco recolectamos como equipo y por ser un gran ejemplo para México y el mundo al ser un grupo de acción y no solo de palabras.

Al M.I. Alberto Braulio Alzate por su dedicación a la docencia que logra inspirar y me hizo redescubrir el encanto de la energía eléctrica a través de sus clases.

A la UNAM por la oportunidad de seguir adquiriendo invaluable conocimiento de ciencia y tecnología que nos enriquece y llena de un gran compromiso para con nuestro México.

RESUMEN EJECUTIVO

El riesgo eléctrico siempre estará presente en las instalaciones industriales y es una obligación para los profesionales proyectistas el mitigar estos riesgos a través de sistemas de protección que buscan salvaguardar la vida y en segundo término la propiedad.

El presente trabajo desarrolla el proyecto del sistema de puesta a tierras del sistema eléctrico y el sistema de protección contra sobretensiones transitorias causadas por tormentas eléctricas en una planta agrícola industrial.

Los proyectos eléctricos industriales desde su concepción deben incorporar todas las consideraciones básicas de diseño como lo son operatividad, flexibilidad, confiabilidad, seguridad, y mantenimiento. En el proyecto desarrollado en este trabajo, se realiza un diseño para la planta DGA de Nayarit para la mejora en sus aspectos de seguridad del sistema eléctrico.

El uso de componentes electrónicos en la industria es hoy en día un uso muy común, y para garantizar un buen funcionamiento es necesario realizar el proyecto eléctrico con un diseño acorde a las características de la instalación debido a que las cargas contienen mayor sensibilidad ante eventos de sobretensión. Con la ayuda de los estándares internacionales y nacionales es posible plantear cada uno de los aspectos importantes a considerar durante un diseño contra rayos, en este caso en particular, con pocas cargas eléctricas pero diversificado por el uso de tecnologías de control.

Los parámetros técnicos y de seguridad necesarios para el diseño de dichos sistemas, son solicitados por la normatividad oficial mexicana, los cuales determinan el valor de resistencia de los sistemas de puesta a tierra de $R \leq 25\Omega$ y el sistema de protección contra tormentas eléctricas de $R \leq 10\Omega$.

La memoria técnica incluye el cálculo de mallas de tierra en subestaciones eléctricas, resolviendo las ecuaciones planteadas por la metodología de la norma internacional IEEE-80.

El proyecto integra la información que corresponde a documentos de ingeniería básica como son los criterios de diseño y memorias técnicas, hasta llegar a la ingeniería de detalle con la selección de los componentes, planos constructivos y típicos de instalación.

Se realizan recomendaciones de seguridad ante eventos de falla y se indican medidas preventivas en las zonas de mayor riesgo de choque eléctrico.

Glosario y abreviaturas

Electrodo de puesta a tierra: Objeto conductor a través del cual se establece una conexión directa a tierra.

Conductor del electrodo de puesta a tierra: Conductor utilizado para conectar el conductor puesta a tierra del sistema o el equipo, al electrodo de puesta a tierra o a un punto en el sistema del electrodo de puesta a tierra.

Conductor de puesta a tierra de los equipos: Trayectorias conductoras utilizadas para conectar las partes metálicas, que normalmente no conducen corriente, de todos los equipos y al conductor del sistema puesta a tierra o al conductor del electrodo de puesta a tierra o a ambos.

Puente Unión: Conductor confiable, para asegurar la conductividad eléctrica requerida entre partes metálicas que deben estar conectadas eléctricamente.

Barra equipotencial: Elemento metálico de conexión de múltiples puntos que tendrán el mismo potencial.

SEPTE: Sistema externo de protección contra tormentas eléctricas.

SIPTE: Sistema interno de protección contra tormentas eléctricas.

SPT: Sistema de puesta a tierra.



DGA
Deshidratador Geotérmico
de Alimentos de Nayarit

San Pedro Lagunillas, Nayarit a 01 marzo del 2023

**ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE USO DE DATOS DEL SISTEMA
ELÉCTRICO DE LA PLANTA DGA DE NAYARIT**

A QUIEN CORRESPONDA.

Estimados señores(as):

Por medio de la presente se hace constar que al C. **Ing. Daniel Abraham González Orellana** se le otorga la autorización amplia y extendida para el uso de datos del sistema eléctrico y detalles arquitectónicos que se le han entregado por parte de la empresa Deshidratador Geotérmico de Alimentos de Nayarit S.A.P.I. de C.V. (DGA de Nayarit) para los fines de publicación académica que al interesado convengan.

Sin más por el momento y para cualquier asunto relacionado con dicho tema, quedo a su disposición.

Atentamente,

Ing. Luis Enrique Mora Guerrero
Representante Legal

Deshidratador Geotérmico de Alimentos de Nayarit S.A.P.I. de C.V.
RFC: DGA200713UF9

Carretera Federal #15 Chapalilla-Compostela km 12.5, San Pedro Lagunillas, Nayarit.
dga@ingenera.com.mx Tel. 311 111 6761

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Antecedentes y planteamiento del problema.....	11
1.2 Objetivo general	13
1.2.1 Objetivos específicos.....	13
1.3 Alcance.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Sobretensiones transitorias en el suministro eléctrico.....	14
2.1.1 Sobretensiones atmosféricas y formas de onda del impulso por rayo.....	15
2.2 Consideraciones de diseño para protección de cargas sensibles por sobretensiones transitorias	19
2.2.1 Sistema de puesta a tierra (Del SEPTTE).....	20
2.2.2 Red de conexión equipotencial	21
2.2.3 Blindaje magnético y canalización de líneas.....	23
2.2.4 Instalación de interfaz de aislamiento.	24
2.2.5 Coordinación de supresores de sobretensión transitorias.....	24
2.3 Requerimientos normativos de seguridad eléctrica para los sistemas de puesta a tierra y protección contra rayos en la infraestructura industrial	26
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS CAUSADAS POR RAYOS	31
3.1 Sistema de puesta a tierra para el suministro eléctrico a frecuencia industrial	32
3.1.1 Datos de campo	36
3.1.1.1 Condiciones Ambientales	37
3.1.1.2 Tipo de cargas en la instalación	37
3.1.1.3 Consideraciones para la prevención de corrientes indeseables en la coexistencia de dos regímenes de conexión.	38
3.1.1.4 Área disponible para la instalación del electrodo de puesta a tierra	38
3.1.1.5 Corriente de corto circuito y relación X/R	40
3.1.1.6 Resistividad del suelo.....	41
3.1.2 Tamaño del conductor.....	46
3.1.3 Análisis de seguridad por tensión de contacto y tensión de paso.....	48
3.1.4 Diseño inicial de la malla.....	50
3.1.5 Resistencia de la malla	52

3.1.6	Corriente de la malla	52
3.1.7	Evaluación de GPR y la tensión de contacto.....	54
3.1.8	Tensión de malla y tensión de paso.....	54
3.1.9	Comparación de tensión de malla y tensión de contacto	57
3.1.10	Comparación de la tensión de paso de la malla propuesta y la tensión máxima de paso permisible.....	58
3.1.5.7	Resultados del diseño del electrodo del sistema de tierras.....	59
3.2	Sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas	60
3.2.1	Sistema Externo de protección contra tormentas eléctricas	60
3.2.1.1	Valoración del riesgo.....	61
3.2.1.2	Diseño del sistema externo de protección contra tormentas eléctricas	66
3.2.1.2.1	Método de la esfera rodante y terminales aéreas.....	67
3.2.1.2.2	Conductores bajantes del SEPTE.....	69
3.2.1.2.3	Sistema de puesta a tierra (SPT)	71
3.2.2	Sistema Interno de protección contra tormentas eléctricas (SIPTe).....	77
4.	RESULTADOS	87
5.	CONCLUSIONES	88
6.	REFERENCIAS	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Cargas eléctricas en la planta DGA de Nayarit.....	12
Tabla 2	Formas de tensión normalizadas, tomado de [1].....	15
Tabla 3	Valores de probabilidad en función de la corriente de rayo [3].....	18
Tabla 4	Sección transversal mínima para los componentes de unión equipotencial [4].....	22
Tabla 5	Normas Internacionales de aplicación en protección contra tormentas eléctricas	30
Tabla 6	Parámetros de diseño del electrodo de puesta a tierra tipo malla [10].....	34
Tabla 7	Características meteorológicas de la planta DGA DE NAYARIT (Tomado de Grupo Dragón).....	37
Tabla 8	Especificaciones equipo telurómetro AEMC 6471	43
Tabla 9	Valores de resistividad obtenidos en mediciones de campo con aperturas de hasta 4m entre electrodos con el método Wenner	44
Tabla 10	Resultados del modelo de dos capas	45
Tabla 11	Constantes de materiales [10]	47
Tabla 12	Especificaciones de elementos de SPT	48
Tabla 13	Parámetros de la malla propuesta.....	51
Tabla 14	Valores típicos del factor de decremento (D_r) [10].....	53

Tabla 15 Comparación de GPR y tensión de contacto.....	54
Tabla 16 Comparativa de tensión de malla y tensión máxima de contacto	57
Tabla 17 Comparativa de tensión de paso de malla y tensión máxima permisible.....	59
Tabla 18 Resultados del diseño de Sistema de Puesta a Tierra.....	59
Tabla 19 Altura de las terminales aéreas verticales de acuerdo con el nivel de protección para el método de la esfera rodante [9].....	67
Tabla 20 Probabilidad de incidencia del rayo de las corrientes de rayo [9].....	68
Tabla 21 Eficiencia del SEPTE de acuerdo con el nivel de protección [9]	68
Tabla 22 Distancia promedio de separación entre los conductores de bajada contiguo de acuerdo con el nivel de protección [9].....	69
Tabla 23 Lista de componentes del SEPTE de la planta.....	75
Tabla 24 Resultados del diseño del SEPTE	76
Tabla 25 Medidas de protección contra sobretensiones atmosféricas en el DGA de Nayarit	77
Tabla 26 Clases en función de forma de onda 10/350uS [9]	81
Tabla 27 Tableros eléctricos y zonas de protección.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Planta agroindustrial DGA de Nayarit.....	11
Figura 2 Sobretensiones en función del tiempo	15
Figura 3 Mecanismo de descarga de un rayo que baja (izquierda) y de un rayo que sube (derecha) Tomado y modificado de [2].....	16
Figura 4 Componentes de un rayo descendente (dirección nube a tierra) tomado de [2]	16
Figura 5 Definición del impulso de corriente de rayo y sus parámetros (Normalmente $T_2 < 2\text{ms}$). [3]	17
Figura 6 Incremento de tensión causada por el impulso de corriente de rayo y su riesgo en instalaciones eléctricas al generarse sobretensiones en el sistema [2].....	17
Figura 7 Comportamiento de transitorio por conmutación (des energización) sin interrupción múltiple, transitorio de tensión.....	20
Figura 8 Sistema sin blindaje tomada de [4]	23
Figura 9 Reducción del campo magnético dentro de una zona con blindaje espacial tomada de [4]	23
Figura 10 Reducción de influencia del campo magnético sobre las líneas con blindaje de línea tomada de [4].....	23
Figura 11 Reducción de área del bucle de inducción magnética debido a una adecuada canalización de cableado tomada de [4].....	24
Figura 12 Principio general de la división de zonas de protección [4]	25
Figura 13 Protección coordinada contra sobretensiones transitorias por rayos. Equipo protegido contra sobretensiones por conducción de transitorios $U_2 \ll U_1 \ll U_0$ y contra radiación de campos magnéticos $H_2 \ll H_1 \ll H_0$ [4].....	26
Figura 14 Ley y normas para la regulación a nivel nacional en México relacionados a los sistemas de puesta a tierra en sistemas eléctricos	29
Figura 15 Procedimiento para el diseño del electrodo de puesta a tierra tipo malla [10]	33

Figura 16 Régimen TN-S ante evento de falla.....	38
Figura 17 Área disponible para la instalación del electrodo de puesta a tierra del SPT a frecuencia industrial (Vista trasera de la planta).....	39
Figura 18 Propuesta de malla de 5 x 5 metros (área 25 m ²).....	39
Figura 19 Transformador trifásico tipo pedestal capacidad 112.5kVA 13800 / 220-127 V	40
Figura 20 Valores de Corto Circuito de la Red General de Distribución 2021 CFE	40
Figura 21 Arreglo tetra electródico método Wenner, A: separación entre electrodos, B: 1/20A [10]	41
Figura 22 Equipo telurómetro marca AEMC	42
Figura 23 Mediciones en dirección N-S y E-O realizadas con 4 electrodos a 4 distintos valores de A	43
Figura 24 Modelo de resistividad del suelo	44
Figura 25 Resultado de modelo de dos capas por método Wenner (Modelo de resistividad en rojo y modelo de capas en azul)	45
Figura 26 Malla propuesta inicial.....	51
Figura 27 Procedimiento SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS tomado de [9]	61
Figura 28 Evaluación del riesgo de daños por tormentas eléctricas	66
Figura 29 Método de la esfera rodante [9]	67
Figura 30 Propuesta de terminales aéreas en sección transversal de la planta con radio de 30m Nivel II de protección.....	68
Figura 31 Vista en planta con localización de 14 terminales aéreas verticales en color rojo (pararrayos) con distancia promedio o menor de 15m entre ellas.....	69
Figura 32 Terminales aéreas interconectadas con conductor SEPTE de estructura metálica estructural natural.....	70
Figura 33 a) Acero estructural de planta DGA DE NAYARIT que se emplearán como bajantes naturales, b) Detalle de soldadura en estructuras para un mejor acoplamiento eléctrico.....	71
Figura 34 Bajantes del sistema localizadas en acero estructural de la planta	71
Figura 35 Sistema de Puesta a Tierra del SEPTE	72
Figura 36 Detalle típico de conexión al acero de refuerzo (viga de acero). Tomado de [9]	72
Figura 37 Detalle típico de registro para electrodo de puesta a tierra. Tomado de [9]	73
Figura 38 Vista de planta del arreglo para formar el electrodo de puesta a tierra que conecta a cada conductor de bajada del SEPTE. Tomado de [9]	73
Figura 39 Perímetro del SPT del SEPTE de la planta.....	74
Figura 40 Zonas del SEPTE de la planta.....	79
Figura 41 Forma de onda del primer impacto por rayo (10/350 μ s)	80
Figura 42 Implementación de protección con SSTT en tres zonas de protección y tensiones residuales. Tomado de [4]	81
Figura 43 Diagrama Unifilar Sistema eléctrico de la planta	83
Figura 44 Localización de Dispositivos supresores de transitorios en la instalación eléctrica de la planta	84
Figura 45 Coordinación de SSTT desde Zona 0 hasta Zona 2 para cargas electrónicas sensibles ..	84
Figura 46 Equipo SPD del fabricante Dehn	85

Figura 47 Instalación de equipos SPD en régimen TN-S.....	86
Figura 48 SPD fabricante Dehn modelo Dehnguard y su diagrama de instalación en régimen TN-S	86
Figura 49 SPD clase III para equipo final sensible	86

1. INTRODUCCIÓN

El sector agrícola industrial según el INEGI presenta un alza de 2.7% anual al cierre del 2021, incorporando nuevas tecnologías para incrementar sus volúmenes de producción, así como para la optimización de sus procesos y para mejora de su eficiencia operativa. La mayoría de las agroindustrias incorporan equipamiento con cargas electrónicas para el manejo de los procesos, como los sistemas de control y automatización, la iluminación con tecnología LED y los sistemas de CCTV entre otras. Aunado a ello, se combina el uso de equipo eléctrico básico como cargas por motores para los procesos de transportación de insumos, bombeo de agua, bombeo de líquidos de proceso, máquinas pulverizadoras, etc. Ante la diversidad de cargas y los efectos transitorios que se suscitan por maniobras y perturbaciones externas, existe la necesidad de proteger la seguridad del personal operativo, así como de los componentes del sistema para garantizar un buen funcionamiento, por lo cual, es importante realizar un diseño óptimo para baja y alta frecuencia.

1.1 Antecedentes y planteamiento del problema

En la localidad de San Pedro Lagunillas en el Estado de Nayarit dentro de las instalaciones de la planta Geotérmica de generación eléctrica Domo de San Pedro, se encuentra la planta agroindustrial denominada Deshidratador Geotérmico de Alimentos de Nayarit (DGA de Nayarit), se muestra en fotografía aérea en la figura 1.



Figura 1 Planta agroindustrial DGA de Nayarit

La planta tiene una superficie construida de 1000 m² aproximadamente y se dedica al procesamiento de alimentos de una manera sustentable, aprovechando la energía geotérmica para calentar el aire con el cual se hace la deshidratación de los comestibles. Si bien, en la planta se utilizan diferentes frutas y verduras de la región, el mango deshidratado es el alimento que más se elabora al año. Para este proceso la planta opera con los siguientes equipos eléctricos descritos en la tabla 1.

Tabla 1 Cargas eléctricas en la planta DGA de Nayarit

<i>Equipo</i>	<i>Potencia [kW]</i>	<i>Horas en operación [hr]</i>	<i>Energía x día [kWh]</i>
Máquina lavadora de alimentos	9.6	4	38.4
Sistema de monitoreo y control	0.5	24	12
Bandas de línea de producción	1.5	10	15
Equipos de inspección	0.2	2	0.4
Sistemas de climatización de espacios	4	24	96
Sistema presurizador hidráulico	1	2	2
Suministro eléctrico áreas de oficina	5	8	40
Centro de control de motores para 3 módulos	39.16	24	939.84
Iluminación	6.03	10	60.3
TOTAL	66.99		1203.94

- Máquina lavadora de mango. (Incluye sistema de recepción y transporte con bandas motorizadas, lavado de mango con aspersores y bomba hidráulica y posteriormente sistema de transportación para la etapa de selección de producto por madurez).
 - Sistema computarizado para la clasificación de producto por color.
 - Sistema de monitoreo y control de módulos de intercambio de calor en toma geotérmica, consta de PLC, Interfase Humano-Máquina (HMI), sensores y transductores de corriente y voltaje para los parámetros de temperatura, humedad y presión, así como entradas y salidas digitales para el control de actuadores del sistema.
 - Máquinas para línea de producción con bandas motorizadas.
 - Sistema computarizado de inspección de metales.
 - Sistemas de climatización para zona de oficinas, área de despegue y empaque y cuarto frío
 - Sistema presurizador de líneas de agua (Bombas hidráulicas)
 - Sistema hidroneumático para lavado de charolas y carritos
 - Oficina principal con equipos de cómputo
 - Centro de control de motores con equipos variadores de frecuencia para ventiladores de las cámaras de secado

Para su funcionamiento, la infraestructura de la planta cuenta con una subestación eléctrica conformada por un transformador de capacidad de 112.5 kVA sin respaldo eléctrico auxiliar.

La planta está localizada en una zona geográfica al pie de un volcán en donde se tienen registros de impactos por rayo, hechos registrados durante la construcción de las instalaciones de la planta geotérmica en sus etapas de perforación de pozos teniendo registros de al menos 3 incidentes en el año 2011 siendo más frecuentes en los meses de julio a septiembre. Lo anterior motiva el

garantizar una operación continua de la planta y la protección de los trabajadores, con el debido cumplimiento de las normas nacionales, es por ello, que surge la necesidad de revisar las condiciones particulares de la planta deshidratadora, evaluar el riesgo por impactos de rayo y diseñar un sistema de protección contra tormentas eléctricas, empleando lineamientos técnicos de calidad exigidos por el sector industrial.

1.2 Objetivo general

Diseñar el sistema de protección contras sobretensiones transitorias causadas por rayos de la planta agroindustrial DGA de Nayarit bajo la normatividad nacional.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Revisar los aspectos característicos de los tipos de sobretensiones y en particular de las sobretensiones provocadas por tormentas eléctricas
2. Presentar los requerimientos para la mitigación de riesgos por sobretensiones causadas por rayos para una planta industrial con cargas sensibles
3. Presentar las obligaciones en materia eléctrica dictadas por la normatividad nacional para sistemas de tierras y la protección contra sobretensiones causadas por tormentas eléctricas.
4. Desarrollar la memoria técnica en una planta industrial con cargas sensibles para el sistema de tierras y sistema de protección contra tormentas eléctricas.

1.3 Alcance

Realizar la ingeniería básica y de detalle del sistema de puesta a tierra y de protección contra descargas eléctricas de la planta DGA de Nayarit para la protección contra sobretensiones transitorias causadas por rayos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Sobretensiones transitorias en el suministro eléctrico

En las redes eléctricas se pueden presentar solicitaciones que son variables en el tiempo y cuyo valor máximo excede el valor cresta de la tensión nominal de un elemento eléctrico. A dichas solicitaciones se le conocen como sobretensiones. La existencia de sobretensiones en una red eléctrica puede provocar:

- Daños en el aislamiento
- Interrupción del servicio
- Provocar apagones (blackout) generando pérdidas económicas
- Daños en los equipos
- Daños a las personas

Existen distintas causas que provocan las sobretensiones y para su estudio pueden ser clasificados en función de su origen o por el proceso transitorio que generan.

Por su origen, pueden clasificarse en externo a la red, cuando son provocadas principalmente por impactos por rayo, también conocidas como sobretensiones atmosféricas, y de origen interno al ser causadas por el propio sistema eléctrico y se clasifican como temporales o de maniobra.

La clasificación por el proceso transitorio que genera las sobretensiones nos indica sus características principales como lo son valores de cresta, duración, frecuencia, direccionalidad, etc.

Sobretensiones temporales: De larga duración y de frecuencia igual o similar a la frecuencia de operación.

Sobretensiones de frente lento: Originadas generalmente por maniobras, tienen una corta duración (ms) y se presentan en una banda de frecuencias de 2 a 20kHz.

Sobretensiones de frente rápido: Causadas generalmente por rayo son de duración muy corta y con amplitud muy superior a la tensión de cresta nominal.

Sobretensiones de frente muy rápido: Originadas generalmente por fallas y maniobras en subestaciones tipo SF₆, su duración es de pocos microsegundos (μs) y su frecuencia es superior a 1 MHz

En la tabla 1 se presentan las clases y formas de sobretensiones, formas de tensión normalizadas y pruebas de aguante de tensión normalizadas según [1]

Tabla 2 Formas de tensión normalizadas, tomado de [1]

Clase	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Continuo	Temporal	Frente Lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de tensión					
Rango de frecuencia	$f = 50$ o 60 Hz $T_1 \geq 3600$ s	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_1 \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p < 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0.1 \mu\text{s} < T_1 < 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Forma de tensión normalizada	 $f = 50 \text{ Hz}$ o 60 Hz T_1^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	No especificada por el comité técnico
Prueba de aguante normalizada	No especificada por el comité técnico	Prueba de corta duración a la frecuencia del sistema	Prueba de impulso por maniobra	Prueba de impulso por rayo	No especificada por el comité técnico

Los diferentes tipos de sobretensiones en el tiempo pueden observarse en la figura 2, donde se distinguen las sobretensiones de frente rápido por rayo como las más peligrosas por sus valores pico de tensión y el riesgo de causar daños importantes en las instalaciones eléctricas.

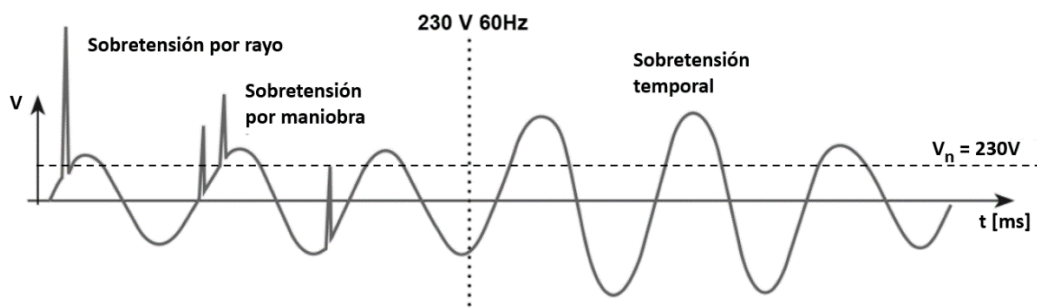


Figura 2 Sobretensiones en función del tiempo

Para el presente trabajo se analizarán las sobretensiones externas o de frente rápido que son causadas por impacto directo o indirecto de rayo.

2.1.1 Sobretensiones atmosféricas y formas de onda del impulso por rayo

Las nubes de tormenta son originadas por procesos meteorológicos que provocan la carga de sus moléculas de agua debido a la fricción existente en los movimientos de la nube, creando una concentración de cargas negativas en la parte inferior y de cargas positivas en la parte superior. Las nubes a su vez por inducción generan una polarización del espacio entre el suelo y las nubes, concentrando cargas positivas en el suelo y creando un campo eléctrico. Al contener una alta

densidad de carga e incrementarse la humedad en el aire, se crean caminos en los que una densidad de tensión de varios cientos de kV/m logran vencer la rigidez dieléctrica del aire para lograr un equilibrio de cargas en la nube por medio de la descarga por rayo desde la nube al suelo, tal y como se observa en la Figura 3. A este fenómeno meteorológico de descarga eléctrica lo conocemos como rayo y su sentido es positivo desde la nube hacia el suelo. Sin embargo, también existe la creación de rayos con sentido negativo, del suelo a la nube, provocado por estructuras altas en el terreno y la concentración excesiva de cargas positivas en la nube [2]

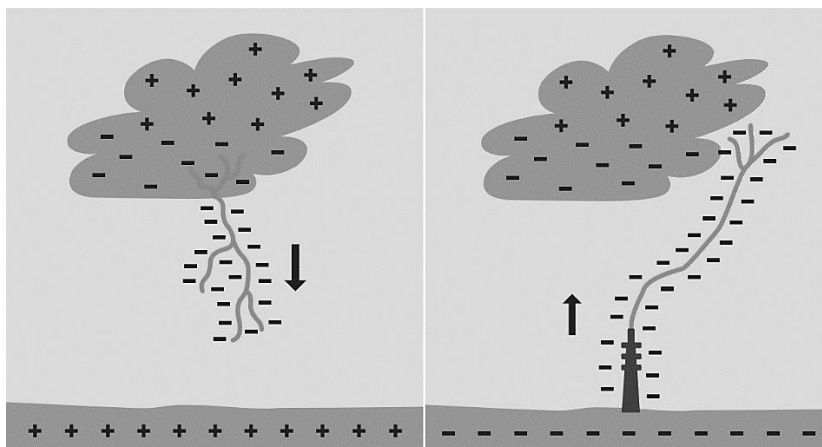


Figura 3 Mecanismo de descarga de un rayo que baja (izquierda) y de un rayo que sube (derecha) Tomado y modificado de [2]

Dependiendo de cada caso de ocurrencia, las descargas por rayos consisten en uno o más impactos parciales de rayo, y por su duración pueden ser de tipo corto o largo como se observa en la figura 4.

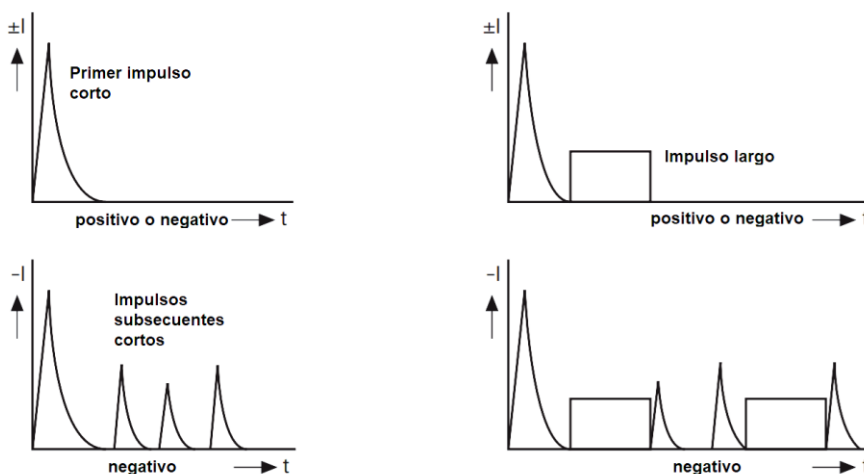


Figura 4 Componentes de un rayo descendente (dirección nube a tierra) tomado de [2]

La norma IEC62305-1 [3] describe la función de tiempo de la corriente de rayo y sus parámetros principales. Podemos observar en la figura 5 los primeros impulsos cortos de rayo que es donde se originan los máximos valores pico de corriente.

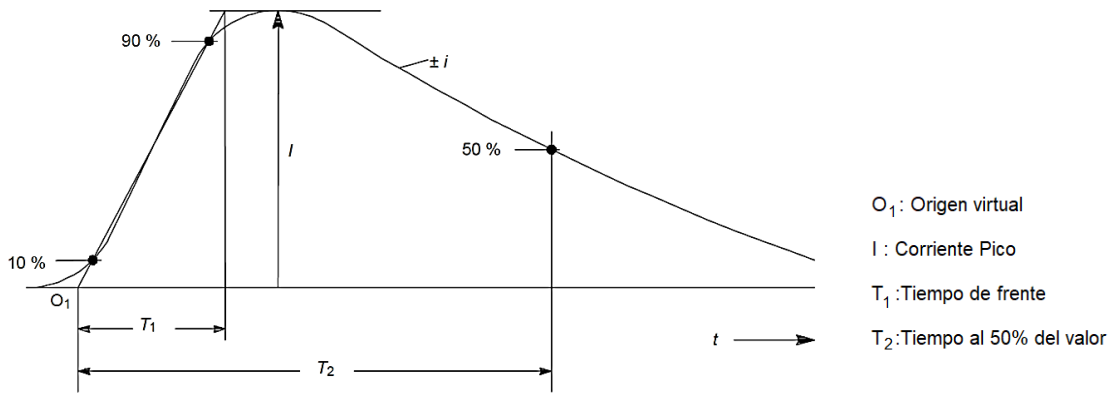


Figura 5 Definición del impulso de corriente de rayo y sus parámetros (Normalmente $T_2 < 2ms$). [3]

De una forma simple, las sobretensiones por rayo son las generadas a partir del impulso de corriente de rayo que impacta en un sistema de protección contra tormentas eléctricas y que genera una tensión proporcional a la resistencia del sistema de puesta a tierra, como se observa en la figura 6 [2].

$$U = I \times R_E$$

U : Tensión transitoria generada por rayo

I : Corriente Pico de Impulso de Rayo

R_E : Resistencia del sistema de puesta a tierra

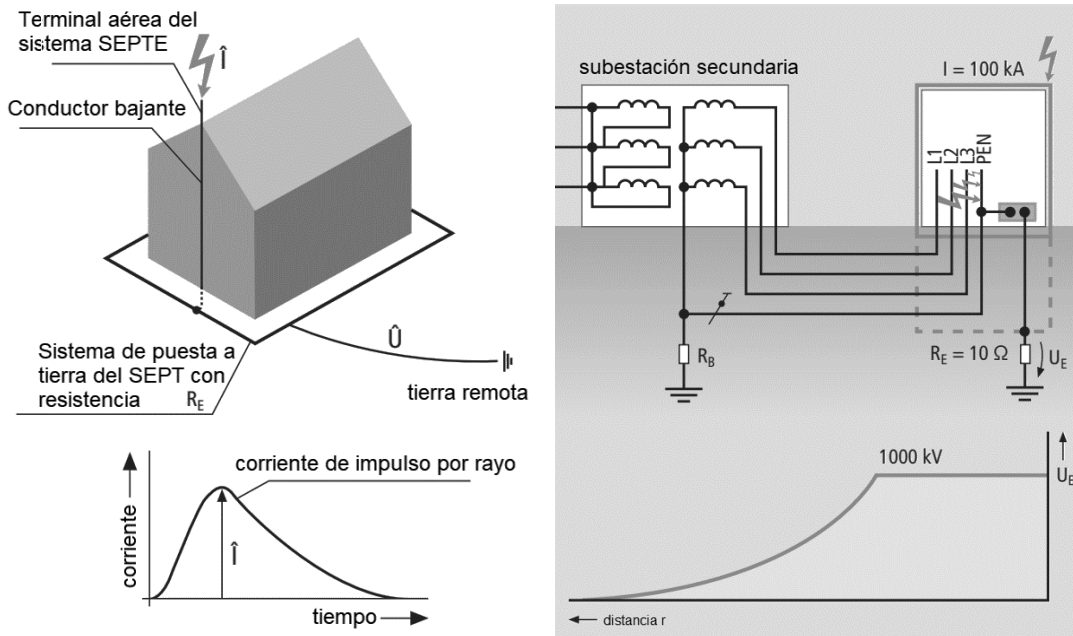


Figura 6 Incremento de tensión causada por el impulso de corriente de rayo y su riesgo en instalaciones eléctricas al generarse sobretensiones en el sistema [2]

Los impactos por rayo provocan fallas en el sistema eléctrico por efectos de tipo:

- **Mecánico** – Relacionado con el valor pico de corriente del primer impulso positivo **I [kA]** y de la energía específica **W/R [MJ/Ω]**
- **Térmico** – Relacionado con la energía específica **W/R [MJ/Ω]** cuando se involucra el acople resistivo y a la carga **Q [C]** cuando se genera un arco eléctrico en la instalación.
- **Sobretensión y generación de chispas** – Relacionado con la pendiente de ascenso de la corriente **di/dt [kA/μs]** del frente de corriente del rayo.

Los rangos de valores típicos de los parámetros de rayo son tomados de la base de datos del *International Council on Large Electrical Systems (CIGRE)*, en donde se realizan cálculos estadísticos para determinar la probabilidad de ocurrencia de cualquier valor en cada parámetro [3].

En la Tabla 2 se reportan los valores de probabilidad como función de la corriente de rayo.

Tabla 3 Valores de probabilidad en función de la corriente de rayo [3]

(kA)	P
0	1
3	0.99
5	0.95
10	0.9
20	0.8
30	0.6
35	0.5
40	0.4
50	0.3
60	0.2
80	0.1
100	0.05
150	0.02
200	0.01
300	0.005
400	0.002
600	0.001

2.2 Consideraciones de diseño para protección de cargas sensibles por sobretensiones transitorias

Las cargas sensibles son sistemas compuestos por componentes electrónicos tales como equipos de telecomunicación, computadoras, impresoras, controladores lógicos programables, variadores de frecuencia, etc.

Los equipos electrónicos sensibles son susceptibles a problemas de funcionamiento y daños, provocados por fenómenos en el sistema eléctrico como lo son las variaciones de tensión (sobretensiones y sub-tensiones), las distorsiones de la forma de onda (armónicos) y la interferencia electromagnética. Para la prevención de fallas en equipos sensibles existen soluciones particulares a cada perturbación, sin embargo, para el alcance del presente documento se abordarán consideraciones de protección contra sobretensiones transitorias por impacto de rayos directo e indirecto a las instalaciones, útiles incluso para algunas sobretensiones transitorias causadas por maniobras de interrupción. Si bien, los transitorios pueden ser analizados por su característica de tipo sustractiva o aditiva (sub-tensión o sobretensión), solo se considerará los transitorios de tipo aditivo (sobretensiones).

Una industria con la combinación de cargas eléctricas como motores y equipos electrónicos, pueden presentar transitorios de sobretensión por las siguientes causas principales:

- Conmutación de circuitos eléctricos
- Impacto directo o indirecto de rayo

Los transitorios por conmutación son asociados con cambios rápidos en los flujos de corriente (di/dt) dentro de un sistema eléctrico y la propagación del frente de onda de tensión asociado. Los transitorios por conmutación más comunes incluyen:

- a) Energización y desenergización de cargas
- b) Arcos eléctricos asociados a relevadores, contactores e interruptores manuales mecánicos, conexiones flojas y fallas a tierra.
- c) Conmutación de capacitores

La figura 7 presenta un ejemplo de transitorio por des energización de carga:

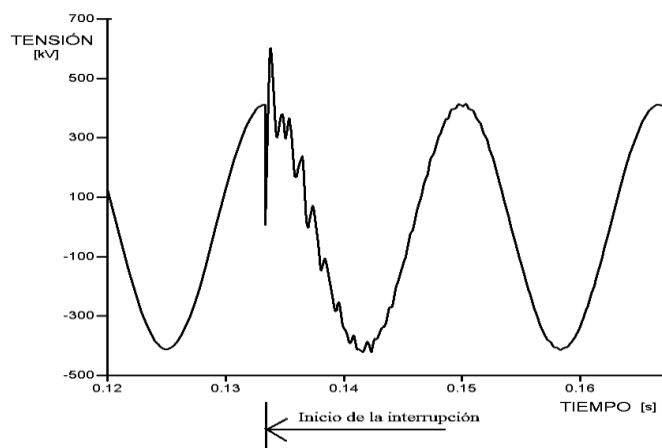


Figura 7 Comportamiento de transitorio por conmutación (des energización) sin interrupción múltiple, transitorio de tensión

Las sobretensiones por impacto directo o indirecto por rayo se analizan en el capítulo 2.1.1.

La norma IEC 62305-4 considera para el diseño de un sistema de protección contra transitorios por sobretensiones a causa de impactos por rayo en cargas sensibles, las siguientes Medidas de Protección contra Sobretensiones.

- Sistema de puesta a tierra (Del SEPTE)
- Red de conexión equipotencial (Estructuras para la referencia de señales)
- Blindaje magnético y canalización de líneas de señales analógicas y de comunicación
- Instalación de interfases de aislamiento
- Coordinación de supresores de sobretensión transitorias (Sistema Interno de protección contra tormentas eléctricas)

2.2.1 Sistema de puesta a tierra (Del SEPTE)

El sistema de puesta a tierra conduce y dispersa las corrientes de rayo hacia la tierra. Se utilizan dos tipos de arreglos del sistema de puesta a tierra:

Tipo A: Arreglo que se integra por electrodos verticales u horizontales instalados por fuera de la estructura a ser protegida, conectados con cada uno de los elementos bajantes del sistema de protección contra tormentas eléctricas, o a los electrodos que forman parte de los cimientos. Este arreglo no crea un bucle cerrado alrededor de la estructura a proteger.

Tipo B: Arreglo que se integra por un anillo conductor externo a la estructura a proteger, en contacto con el suelo en al menos un 80% de su longitud total, formando un bucle cerrado. Dicho arreglo deberá ser conectado en forma de malla a los bajantes del SEPTE, y que deberá ser como mínimo de dos.

Las medidas de protección contra sobretensiones de equipos sensibles recomiendan que se implementen sistemas de puesta a tierra del SEPTE tipo B.

2.2.2 Red de conexión equipotencial

La mayoría de los equipos electrónicos se emplean para realizar procesamiento de datos, así como para operaciones de control y monitoreo. Estos sistemas funcionan a partir de lógica binaria, por lo que es de suma importancia mantener una referencia sólida de tierra entre los dispositivos durante su comunicación. La implementación de mallas con distancias menores a 5 m en las zonas de instalación de equipos sensibles, así como su interconexión minimizará las diferencias de potencial y reducirá la magnitud de campos magnéticos inducidos [4].

La red de conexión equipotencial se compone del mallado e interconexión integral de partes conductoras de las estructuras, o partes de los sistemas internos y al unir partes metálicas o instalaciones conductoras de servicios como el suministro de agua de las fronteras de cada zona de protección directamente o por medio de dispositivos supresores de sobretensiones transitorias. Para equipos sensibles es recomendable instalar mallas conductoras (malla estructural como acero de refuerzo para concreto armado) con separación entre conductores de $\leq 1\text{m}$ [4].

La red equipotencial deberá incluir los elementos que componen el sistema de protección contra tormentas eléctricas, como lo son las terminales aéreas, bajantes y electrodo de puesta a tierra. En la norma IEC 62305-4 se muestran las posibles combinaciones de tipos de redes equipotenciales, indicando las configuraciones de tipo malla, estrella y sus combinaciones. Estas uniones se realizan de la red equipotencial a los equipos a través de los conductores de unión en un punto común en la configuración en estrella o en configuración tipo malla por punto en estrella.

Los materiales y dimensiones para los componentes de unión se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Sección transversal mínima para los componentes de unión equipotencial [4]

Componente de unión		Material ^a	Sección transversal ^b mm²
Varillas de unión (cobre, acero recubierto de cobre o acero galvanizado)		Cu, Fe	50
Conexión de conductores desde las varillas de unión hacia el sistema de tierra o a otras varillas de unión (llevando por completo o una parte significativa de la corriente de rayo)		Cu Al Fe	16 25 50
Conexión de conductores desde las instalaciones internas metálicas hacia las varillas de unión (llevando una fracción de la corriente de rayo)		Cu Al Fe	6 10 16
Conductores de tierra para el dispositivo supresor de sobretensiones transitorias (llevando por completo o una parte significativa de la corriente de rayo)	Clase I	Cu	16
	Clase II		6
	Clase III		1
	Otros SPDs ^d		1
^a Otro uso de material deberá tener secciones transversales asegurando la resistencia equivalente. ^b En algunos países, menores tamaños de conductor pueden ser utilizados, asegurando que cumplen con los requerimientos térmicos y mecánicos necesarios – Ver anexo D de la norma IEC 62305-1:2010 ^c Para dispositivos supresores de sobretensiones transitorias en aplicaciones de potencia, se entrega información adicional para la conexión de conductores en IEC 60364-5-53 y IEC 61643-12 ^d Otros dispositivos supresores de sobretensiones transitorias usados en sistemas de telecomunicación y de señales			

2.2.3 Blindaje magnético y canalización de líneas

El blindaje magnético puede ayudar a reducir el campo electromagnético, así como transitorios internos inducidos. Una canalización adecuada puede también minimizar la magnitud de transitorios internos [4].

El blindaje puede ser diseñado para un espacio determinado, empleando mallas y objetos estructurales metálicos para protección zonificada. Otra forma de blindaje es a través de cables con malla protectora, o con canales metálicos, empleada principalmente para señales analógicas o de comunicación [4]. En la Figura 8, Figura 9 , y Figura 11 observamos las diferencias de un sistema sin blindaje, con blindaje espacial, blindaje de línea y área de bucle reducida.

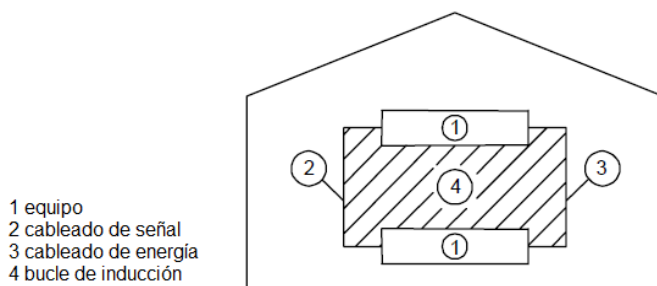


Figura 8 Sistema sin blindaje tomada de [4]

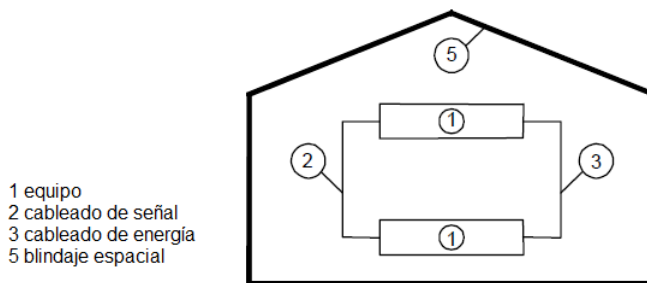


Figura 9 Reducción del campo magnético dentro de una zona con blindaje espacial tomada de [4]

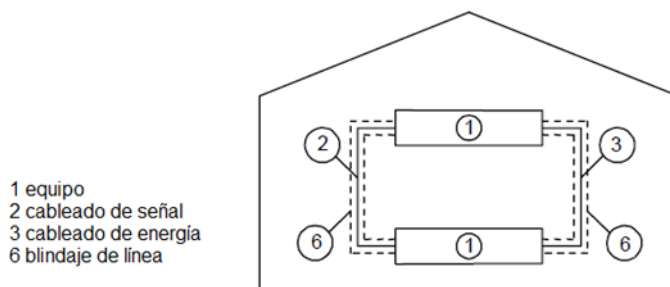


Figura 10 Reducción de influencia del campo magnético sobre las líneas con blindaje de línea tomada de [4]

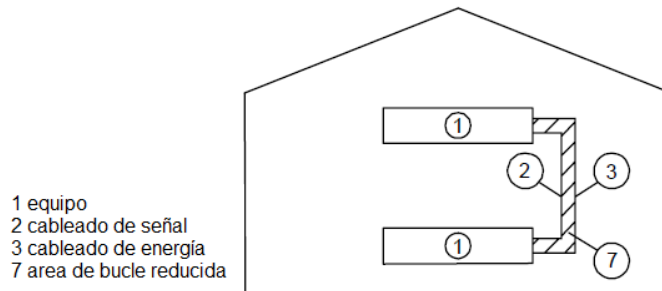


Figura 11 Reducción de área del bucle de inducción magnética debido a una adecuada canalización de cableado tomada de [4]

2.2.4 Instalación de interfaz de aislamiento.

Las interfases de aislamiento son aquellos elementos que permiten reducir los transitorios sobre las líneas de entrada a la infraestructura protegida. Estos pueden ser producidos por corrientes de interferencia del sistema eléctrico a frecuencia industrial, a través de los equipos y las líneas de señal, lo que puede provocar grandes bucles de tierra o la falta de baja impedancia en la red equipotencial. Para prevenir dichas interferencias (existentes principalmente en sistemas con régimen de tierra tipo TN-C), se requiere realizar una separación adecuada entre instalaciones empleando interfases de aislamiento como lo son [4]:

- Equipo de aislamiento clase II (Por ejemplo, equipos con doble aislamiento sin conductor de protección a tierra)
- Transformadores de aislamiento
- Cables de fibra óptica libres de metal
- Optoacopladores

2.2.5 Coordinación de supresores de sobretensión transitorias

La protección contra impulsos por rayo de los sistemas electrónicos o cargas sensibles en estructuras se basa en el concepto de las zonas de protección como se observa en la Figura 12. De acuerdo con este principio, la estructura a ser protegida tiene que ser dividida en múltiples zonas internas de protección en función del nivel de riesgo impuesta por el impulso de corriente de rayo. Con esto, se logra adaptar áreas con diferentes niveles de riesgo de impulso de corriente de rayo para el nivel de inmunidad de los sistemas electrónicos. Con este concepto, se pueden definir zonas de protección adecuados en función del número, tipo y sensibilidad de los dispositivos electrónicos, esto incluyendo desde pequeñas zonas localizadas hasta grandes zonas integradas para abarcar toda la estructura a proteger como se observa en la Figura 13 [4].

A continuación, se presenta la división por Zonas de protección.

Zonas externas → Zona 0: Zona en donde la amenaza del campo magnético por rayo es inminente debido a que no existen elementos para su atenuación, y en donde los sistemas internos pueden ser impactados de manera total o parcial por la corriente de rayo.

La Zona 0 se subdivide en dos:

Zona 0_A: Zona sin protección con riesgo de impacto indirecto por medio del campo magnético total por rayo. Los sistemas internos pueden presentar impacto de manera directa y total por la corriente de rayo.

Zona 0_B: Zona protegida por impacto directo por rayo, pero con riesgo de impacto indirecto del campo magnético total por rayo. Los sistemas internos pueden presentar impacto parcial de las corrientes de rayo.

Zonas internas → Zona 1: Zona donde las sobretensiones por corriente de rayo son limitadas por la distribución de corrientes y por las interfases de aislamiento y/o por supresores de sobretensión transitoria en las fronteras. El blindaje espacial puede atenuar el campo electromagnético de rayo.

Zona 2, ..., n: Zona donde las sobretensiones por corriente de rayo pueden ser limitada a un mayor grado debido a la distribución de corrientes y por las interfases de aislamiento y/o por supresores de sobretensión transitoria en las fronteras. El blindaje espacial adicional puede ser usado para un mayor grado de atenuación del campo electromagnético de rayo.

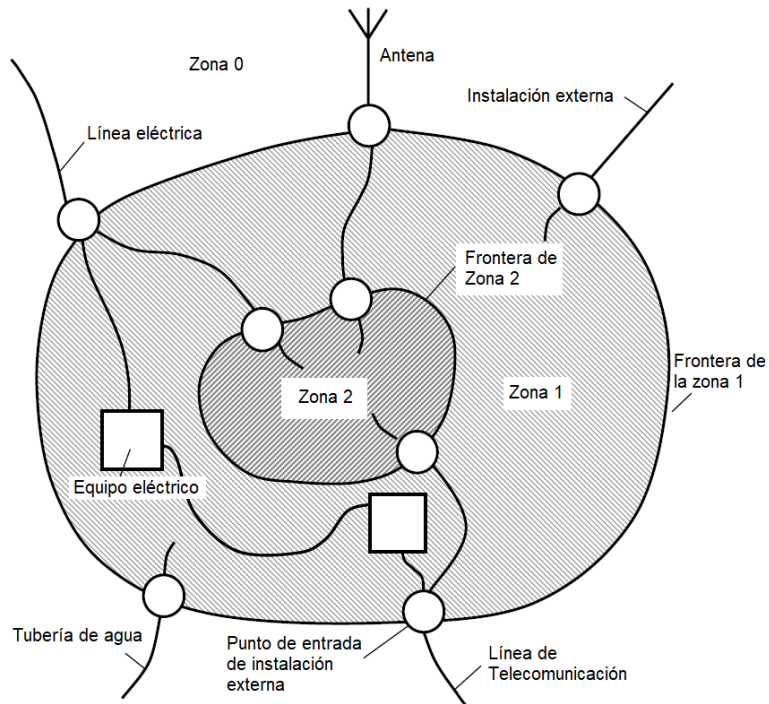


Figura 12 Principio general de la división de zonas de protección [4]

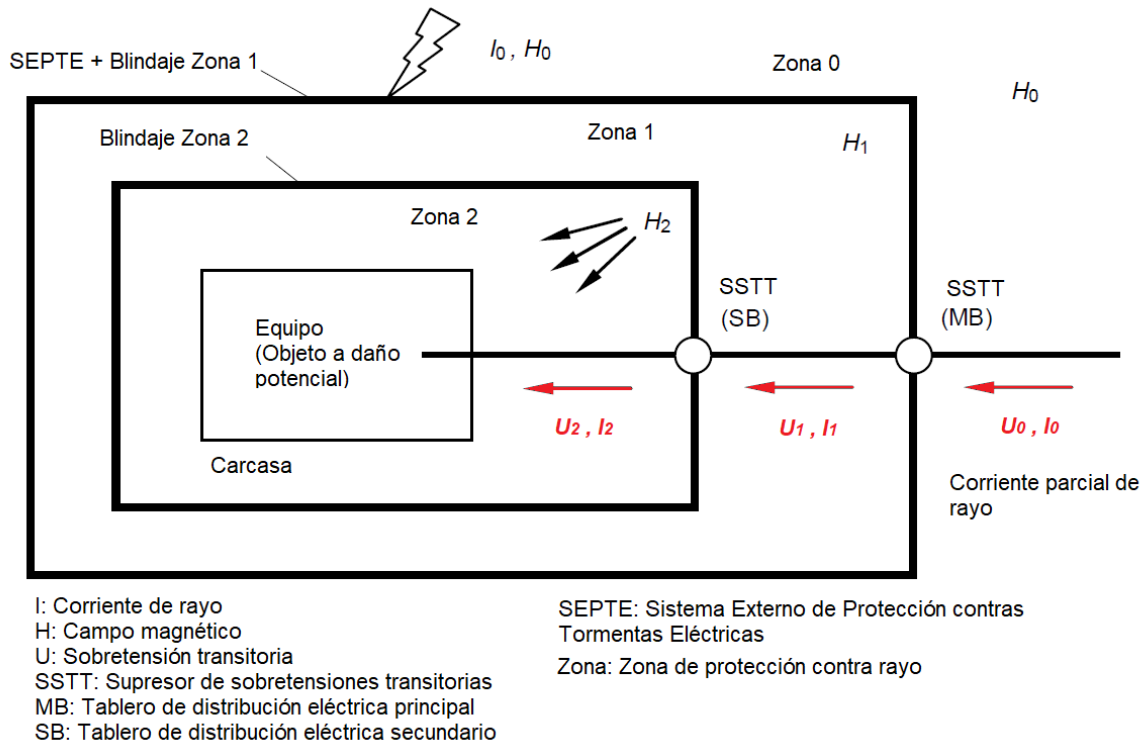


Figura 13 Protección coordinada contra sobretensiones transitorias por rayos. Equipo protegido contra sobretensiones por conducción de transitorios $U_2 \ll U_1 \ll U_0$ y contra radiación de campos magnéticos $H_2 \ll H_1 \ll H_0$ [4]

2.3 Requerimientos normativos de seguridad eléctrica para los sistemas de puesta a tierra y protección contra rayos en la infraestructura industrial

La Ley de infraestructura de la calidad, publicada el 1º de julio del 2020, tiene por objeto fijar y desarrollar las bases de la política industrial en el ámbito del Sistema Nacional de Infraestructura de la Calidad, a través de las actividades de normalización, estandarización, acreditación, evaluación de la conformidad y metrología a fin de ampliar la capacidad productiva y el mejoramiento continuo en las cadenas de valor, fomentar el comercio internacional y proteger los objetivos legítimos de interés público. Una de sus finalidades es la observancia de las normas oficiales mexicanas y los estándares [5].

Las industrias son centros de trabajo donde se realizan actividades productivas para el desarrollo económico del país. La infraestructura industrial se rige bajo las normas oficiales mexicanas, y en materia de infraestructura eléctrica, deben asegurarse dos aspectos en particular, la seguridad de la vida y la preservación de la propiedad.

Es importante resaltar que toda entidad privada o pública debe apearse de manera obligatoria a las normas oficiales mexicanas, las cuales son regulaciones técnicas que contienen información, requisitos, especificaciones, procedimientos y metodologías que deben cumplir bienes y servicios que se comercializan y consumen en el país. Por otra parte, las normas mexicanas NMX son

instrumentos de referencia para determinar la calidad de los productos y servicios, de carácter voluntario. Sin embargo, en caso de ser referidas por una NOM adquieren el carácter de obligatorio.

En este contexto, son de principal relevancia las siguientes normas nacionales:

NOM-002-STPS-2010 Condiciones de seguridad - prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo, en el artículo 7.5 indica:

Establecer y dar seguimiento a un programa anual de revisión a las instalaciones eléctricas de las áreas del centro de trabajo, con énfasis en aquellas clasificadas como de riesgo de incendio alto, a fin de identificar y corregir condiciones inseguras que puedan existir, el cual deberá comprender, al menos, los elementos siguientes:

- a) Tableros de distribución;
- b) Conductores;
- c) Canalizaciones, incluyendo los conductores y espacios libres en éstas;
- d) Cajas de conexiones;
- e) Contactos;
- f) Interruptores;
- g) Luminarias;
- h) Protecciones, incluyendo las de cortocircuito -fusibles, cuchillas desconectadoras, interruptor automático, dispositivos termomagnéticos, entre otros-, en circuitos alimentadores y derivados, y
- i) Puesta a tierra de equipos y circuitos. [6]

NOM-022-STPS-2015 Electricidad estática en los centros de trabajo-Condición de seguridad. En particular establece los requerimientos mínimos que debe de contener las industrias en su infraestructura eléctrica para garantizar las condiciones de seguridad. Como obligaciones del patrón en su sección 5, podemos resaltar las siguientes:

- Establecer las condiciones de seguridad para controlar la generación y/o acumulación de las cargas eléctricas estáticas en las áreas del centro de trabajo.
- Instalar un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas en las áreas o instalaciones de los centros de trabajo donde se almacenen, manejen o transporten sustancias inflamables o explosivas.
- Medir la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra, comprobar la continuidad en los puntos de conexión a tierra, y en su caso, medir la humedad relativa cuando ésta sea una medida para controlar la generación y acumulación de cargas eléctricas estáticas.
- Registrar los valores de la resistencia de la red de puesta a tierra, la comprobación de la continuidad eléctrica y, en su caso, de la humedad relativa.

En su artículo 7.2 indica: Para controlar la generación o acumulación de electricidad estática se deberán adoptar, según apliquen, las medidas de seguridad siguientes:

- a) Instalar sistemas de puesta a tierra, dispositivos o equipos para controlar la electricidad estática, en función de los tipos de procesos e instalaciones con que se cuente, tales como: ionizadores; neutralizadores o eliminadores de electricidad estática; dispositivos con conexión a

tierra; cepillos mecánicos conectados a tierra; barras de disipación de electricidad estática, o mediante la aplicación de tratamientos a bandas, entre otros;

b) Asegurar la unión eléctrica o conexión equipotencial entre máquinas, equipos, contenedores y componentes metálicos;

c) Realizar la medición de la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra, conforme a lo señalado por el Capítulo 9 de la presente Norma, y la comprobación de la continuidad en los puntos de conexión a tierra, al menos cada doce meses. Los valores deberán cumplir con lo siguiente:

1) Tener un valor menor o igual a 10Ω , para la resistencia a tierra del (los) electrodo(s) en sistemas de pararrayos o sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas;

2) Tener un valor menor o igual a 25Ω , para la resistencia a tierra de la red de puesta a tierra, y

3) Existir continuidad eléctrica en los puntos de conexión a tierra del equipo que pueda generar o almacenar electricidad estática [7].

NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones eléctricas (utilización). El objetivo de esta NOM es establecer las especificaciones y lineamientos de carácter técnico que deben satisfacer las instalaciones destinadas a la utilización de la energía eléctrica, a fin de que ofrezcan condiciones adecuadas de seguridad para las personas y sus propiedades, en lo referente a la protección contra:

- Las descargas eléctricas,
- Los efectos térmicos,
- Las sobrecorrientes,
- Las corrientes de falla y
- Las sobretensiones.

En relación con el presente documento, se debe poner especial atención al Artículo 250 Puesta a tierra y unión, donde se encuentran los requisitos específicos de:

- a) Sistemas, circuitos y equipos en los que se exige, se permite o no se permite que estén puestas a tierra.
- b) El conductor del circuito que debe ser puesta a tierra en sistemas puestas a tierra.
- c) Ubicación de las conexiones de puesta a tierra.
- d) Tipos y tamaños de los conductores de unión y de puesta a tierra y electrodos de puesta a tierra.
- e) Métodos de puesta a tierra y unión.
- f) Condiciones bajo las cuales los protectores, la separación o el aislamiento eléctrico pueden ser sustituidos por la puesta a tierra. [8]

NMX-J-549-ANCE-2005 Sistemas de protección contra tormentas eléctricas – Especificaciones, materiales y métodos de medición.

Norma nacional de relevancia para disminuir el riesgo de daño por la causa de impactos por descargas atmosféricas en tormentas eléctricas. [9]

Podemos sintetizar como se observa en la Figura 14 el mandato por ley que nos exige para la infraestructura eléctrica la seguridad de la vida y preservación de la propiedad, así como las obligaciones de cumplir las normas oficiales para garantizar un sistema de puesta a tierra del suministro eléctrico a frecuencia industrial con una resistencia menor o igual a 25Ω así como incluir el sistema externo de protección contra tormentas eléctricas, y diseñar en su sistema de puesta a tierra con una resistencia menor o igual a 10Ω , aunado al cumpliendo con los requerimientos técnicos de la NOM-001 para el dimensionamiento de conductores e indicaciones de implementación, incluyendo el seguimiento de los lineamientos de calidad indicados en la NMX-J-549-ANCE-2005 para el SEPTE y SIPTE, además del seguimiento en el tiempo a través de revisiones y mantenimientos periódicos a las instalaciones como lo pide la NOM-002-STPS-2021.

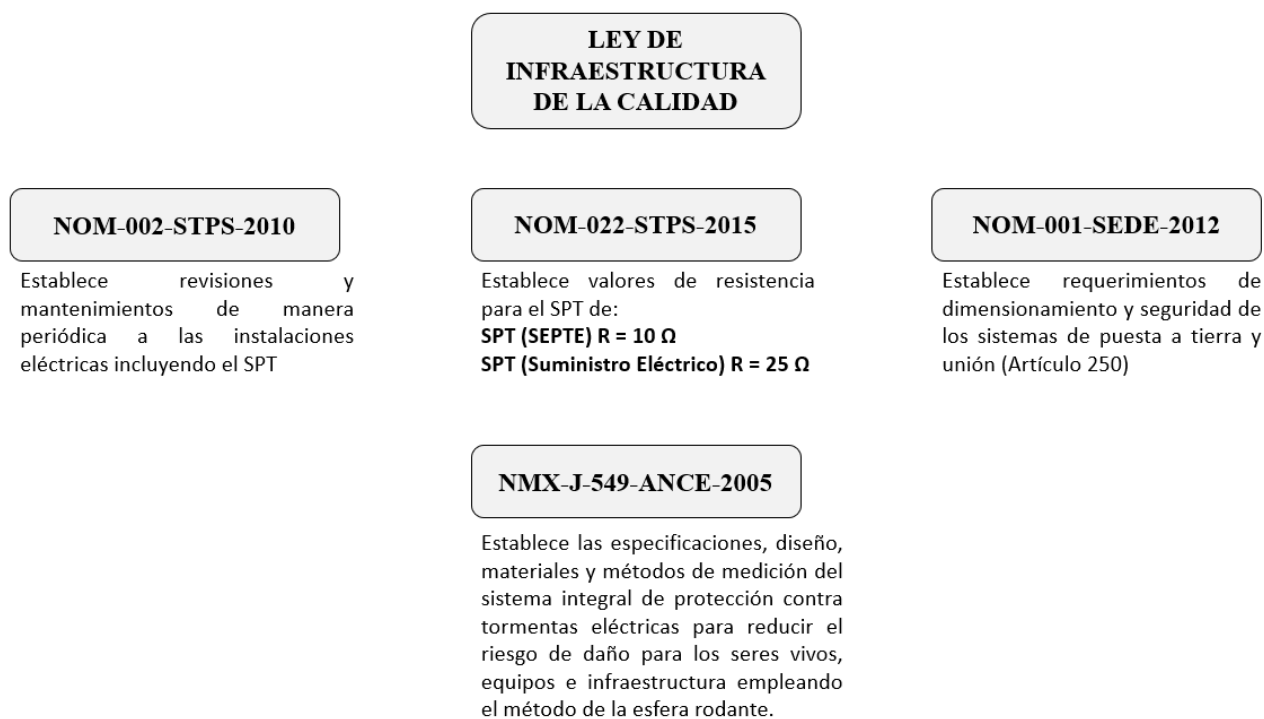


Figura 14 Ley y normas para la regulación a nivel nacional en México relacionados a los sistemas de puesta a tierra en sistemas eléctricos

El marco normativo nacional queda establecido y se logra puntualizar claramente las obligaciones para los industriales mexicanos en materia de infraestructura eléctrica. Sin embargo, para lograr los requerimientos necesarios en el desarrollo de los sistemas eléctricos, es necesario incorporar normas internacionales que abonen a la calidad del sistema para lograr un estándar aceptado en cualquier parte del mundo. Ante esto y para temas específicos en el análisis, memorias de cálculo, y recomendaciones, se emplean en el desarrollo del trabajo las siguientes normas internacionales:

Tabla 5 Normas Internacionales de aplicación en protección contra tormentas eléctricas

<i>NORMA</i>	<i>Título</i>	<i>Aplicación en esta tesina</i>
IEC 60071-1	Insulation coordination –Part 1. Definitions, principles and rules, 2019	Normalización para las sobretensiones
IEC 62305-1	Protection against lightning – Part 1 General principles	Parametrización de las corrientes de rayo, medidas de protección para sistemas electrónicos
IEC 62305-3	Protection against lightning – Part 3 Physical damage to structures and life hazard	Uso como complemento teórico a la NMX-J-549-ANCE-2005
IEC 62305-4	Protection against lightning – Part 4 Electrical and electronic systems within structures	Consideraciones para la protección de las cargas sensibles
IEEE 80	IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding	Memoria de cálculo para medición de resistividad del terreno por método Wenner. Memoria de cálculo del electrodo del sistema de puesta a tierra en frecuencia industrial, estableciendo límites para tensiones de paso y de contacto.

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA Y DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS CAUSADAS POR RAYOS

Las instalaciones industriales por seguridad y confiabilidad requieren de un sistema de puesta a tierra el cual debe ser dimensionado en función de las características eléctricas particulares de la instalación, así como de las características de la acometida, como lo son las corrientes de corto circuito. Para la planta DGA de Nayarit se plantearon los siguientes criterios de diseño para el sistema de puesta a tierra:

- Utilizar el método descrito por la norma internacional IEEE-80.
- El valor de corriente de falla en el nodo de conexión a la subestación de la planta correspondiente al valor máximo, que se indica en el documento “Valores de corto circuito de las redes generales de distribución 2022”, publicados por el CENACE.
- Condiciones ambientales de la planta
- Resistencia de tierra mínimo para el cumplimiento de la NOM-022-STPS-2015, empleando mediciones de resistividad conforme al modelo de dos capas de la IEEE-80
- Las especificaciones de los elementos del sistema de puesta a tierra deben de cumplir con las siguientes características:
 - Ser elementos con conductividad suficiente para no generar caídas de potencial significativas
 - Homogeneizar el tipo de material en todo el sistema de puesta a tierra para evitar al máximo la generación de potencial por par galvánico
 - Tener resistencia térmica y mecánica apropiadas para soportar una situación altamente adversa ante escenario de falla por magnitud y duración
 - Considerar aspectos mecánicos para dar una mayor confiabilidad al sistema
 - Ser capaces de mantener sus funciones incluso ante problemas de corrosión

Y los siguientes criterios de diseño para el sistema de protección contra sobretensiones transitorias causadas por rayos:

- Elegir un Nivel de protección adecuado para el giro de la industria conforme a lo establecido en la norma NMX-J-549-ANCE-2005
- Implementar acciones recomendadas para protección de equipos sensibles
- Las especificaciones de los elementos del sistema de protección contra tormentas eléctricas deberán cumplir con:
 - Características que mitiguen los factores mecánicos por impacto de rayo
 - Ser elementos que resistan el efecto térmico generado en el tiempo de duración del impacto de rayo
 - Considerar conductores con baja reactancia debido a las altas frecuencias

3.1 Sistema de puesta a tierra para el suministro eléctrico a frecuencia industrial

La norma NOM-022-STPS-2015 define un sistema de tierras como el conjunto de conductores y conexiones, electrodo o electrodos, accesorios y otros elementos metálicos enterrados que interconectados entre sí tienen por objeto drenar a tierra las corrientes de un rayo y las generadas por las cargas eléctricas estáticas [7].

La función del sistema de tierras en una instalación eléctrica es:

- Controlar la diferencia de potencial respecto a tierra, o al suelo, dentro de límites predecibles
- Proveer un camino para un flujo de corriente que permita su detección por una conexión indeseada entre los conductores de fase y tierra. Dicha detección, permitirán la operación de las protecciones del sistema para eliminar las tensiones de alimentación de esos conductores.

El objetivo es el establecer límites de seguridad ante diferencias de potencial que pueden existir bajo un régimen de falla entre puntos que puedan estar en contacto con el cuerpo humano, con la finalidad de proteger a las personas, así como proteger a los equipos eléctricos contra corrientes de falla.

Los elementos del sistema de Tierra son:

1. Electrodo de puesta a tierra
2. Conductor del electrodo de puesta a tierra (CEPT)
3. Conductor de puesta a tierra de los equipos (CPTE)
4. Barra equipotencial
5. Puente Unión
6. Accesorios de interconexión de tipo soldables, mecánicos o a compresión aprobados por la IEEE.

Para su diseño, nos guiaremos de la norma internacional IEEE-80-2013 [10]. El procedimiento para seguir se describe a continuación y se presenta en la Figura 15.

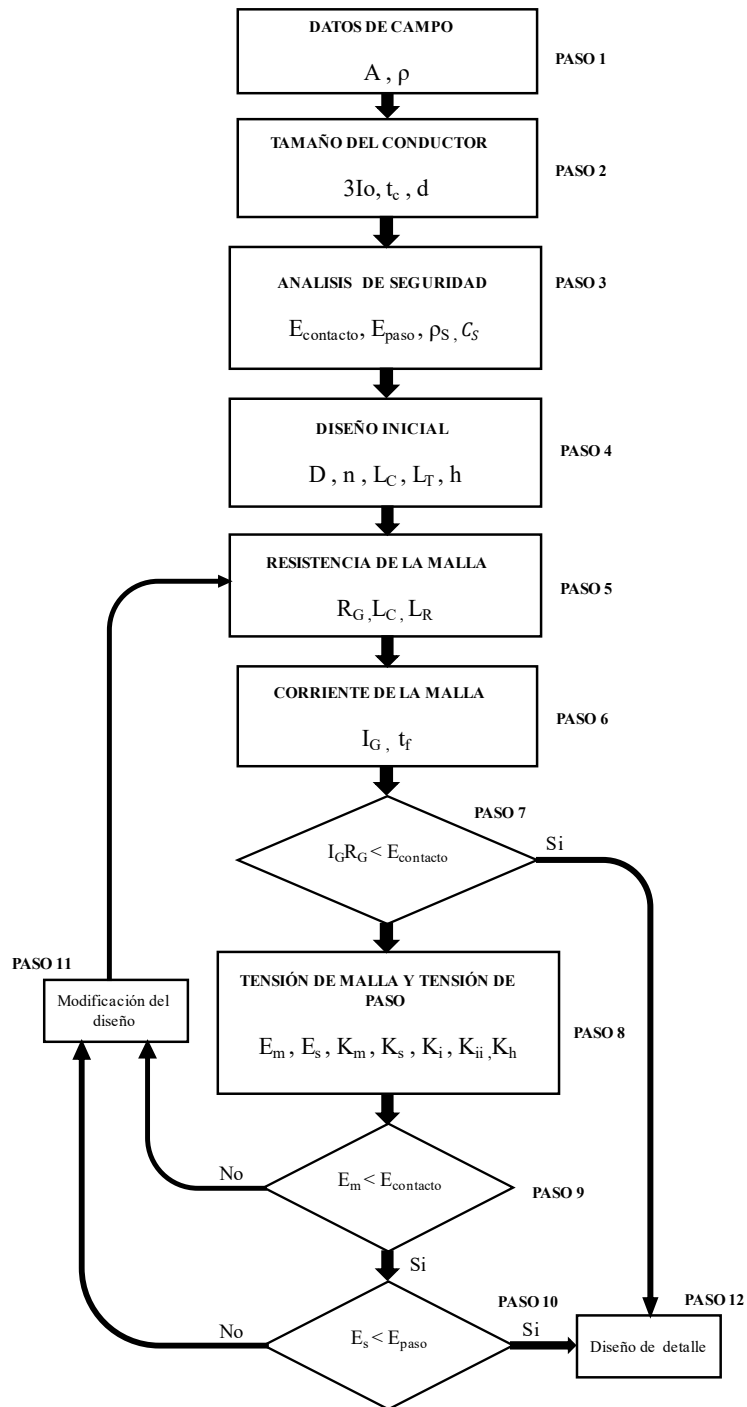


Figura 15 Procedimiento para el diseño del electrodo de puesta a tierra tipo malla [10]

Tabla 6 Parámetros de diseño del electrodo de puesta a tierra tipo malla [10]

Símbolo	Descripción
ρ	Resistividad del suelo [$\Omega \cdot m$]
ρ_s	Resistividad de la capa en superficie [$\Omega \cdot m$]
$3I_0$	Corriente simétrica de corto circuito en la subestación [A]
A	Área total de la malla [m ²]
C_s	Factor de corte “derating” de la capa superficial [1]
d	Diámetro del conductor de malla [m]
D	Espaciamiento entre conductores paralelos de la malla [m]
D_f	Factor de decremento para calcular I_G [1]
D_m	Distancia máxima entre cualesquiera puntos de la malla [m]
E_m	Tensión al centro de la malla para el método simplificado [V]
E_s	Tensión de paso entre un punto sobre la esquina superior de la malla y un punto a 1 metro fuera de la malla [V]
$E_{contacto}$	Tensión de contacto para 50 kg o 70 kg [V]
E_{paso}	Tensión de paso para 50 kg o 70 kg [V]
h	Profundidad de instalación de la malla [m]
h_s	Espesor de la capa superficial [m]
I_G	Máxima corriente de malla que fluye entre la malla de tierra y la tierra alrededor (incluyendo la componente en DC) [A]
I_g	Corriente de malla simétrica [A]
K	Factor de reflexión entre diferentes resistividades [1]
K_h	Factor correctivo que enfatiza el efecto de la profundidad de malla [1]
K_i	Factor de corrección para la geometría de la malla [1]
K_{ii}	Factor correctivo de ajuste para los efectos de los conductores interiores de malla en las esquinas
K_m	Factor de espaciamiento para la tensión de malla
K_s	Factor de espaciamiento para la tensión de paso
L_c	Longitud total del conductor de malla [m]
L_M	Longitud efectiva de la tensión de malla [m] $L_c + L_R$
L_R	Longitud total de las varillas de tierra [m]
L_T	Longitud de la varilla de tierra en cada ubicación [m]
L_s	Longitud efectiva de la tensión de paso [m] $L_c + L_R$
L_T	Longitud efectiva total incluyendo los conductores de malla y las varilla a tierra [m]
L_x	Longitud máxima del conductor de malla en dirección x [m]
L_y	Longitud máxima del conductor de malla en dirección y [m]
n	Factor geométrico que está en compuesto de los factores n_a , n_b , n_c y n_d [1]
n_R	Numero de varillas puestas en el área [1]
R_G	Resistencia del sistema de tierra [Ω]
S_f	Factor de división de corriente de falla
t_c	Tiempo de duración de la corriente para dimensionar el conductor de malla [s]
t_f	Duración de la corriente de falla para un determinado factor de decremento [s]
t_s	Duración del choque para determinar la corriente que en el cuerpo [s]

El procedimiento basado en [10] consiste en los siguientes pasos:

- 1er paso: Generar una estimación del área que será empleada para la instalación de la malla de tierra a partir de los planos arquitectónicos y de la infraestructura existente. Además, se deberá realizar los ensayos geofísicos para determinar la resistividad del suelo incluyendo el modelo de suelo necesario.
- 2º paso: Calcular el tamaño adecuado del conductor considerando los efectos térmicos y mecánicos ante un evento de falla con la Ecuación 4. La máxima corriente futura de falla esperada en los conductores deberá ser la falla simétrica $3I_0$, y el tiempo t_c deberá determinar el máximo tiempo de despeje de falla (incluyendo los mecanismos de respaldo).
- 3er paso: La determinación de las tensiones de contacto y de paso con base en la Ecuación 5, Ecuación 6, Ecuación 7 y Ecuación 8. La opción del tiempo t_s será basado a criterio del diseñador considerando los estudios y efectos de fibrilación ventricular del corazón causados por el tiempo de exposición del cuerpo humano ante una corriente de falla, y a los límites técnicos de los mecanismos de liberación de falla.
- 4º paso: Crear un diseño preliminar de malla que incluya un conductor alrededor de toda el área de aterrizado, además de conductores cruzados para proveer un acceso conveniente hacia los equipos a aterrizar. El diseño preliminar deberá considerar la geometría con respecto a la corriente I_G y el área de aterrizado.
- 5º paso: Realizar un cálculo para la estimación de resistencia de la malla en suelo uniforme a partir de la Ecuación 10 de Sverak o la ecuación de Schwarz. Para el diseño final es deseable emplear programas por computadora para lograr una estimación más certera de la resistencia, siempre y cuando se tenga un modelo adecuado del suelo.
- 6º paso: Calcular la corriente I_G con la Ecuación 12. Para prevenir sobredimensionamiento de la malla, se debe considerar solo una porción de la corriente $3I_0$ que fluye de la malla a la tierra.
- 7º paso: Comparar la magnitud de tensión del crecimiento de potencial del suelo GPR y la tensión de contacto, debiendo ser menor la tensión de GPR para no requerir mayor análisis al diseño planteado. En caso contrario se deberá continuar al siguiente paso del procedimiento.
- 8º paso: Calcular la tensión de la malla y de paso (de la malla) en función del diseño planteado empleando las técnicas de análisis aproximadas descritas en la Ecuación 14 y en la Ecuación 22 para suelo uniforme.
- 9º paso: Comparar la magnitud de la tensión de malla con la tensión de contacto, debiendo ser menor la tensión de malla para satisfacer el criterio de seguridad y finalizar el análisis del diseño propuesto y continuar con el siguiente paso. En caso contrario, se deberá modificar el diseño propuesto de malla.
- 10º paso: Evaluar si las tensiones de contacto y de paso de la malla están debajo de los límites máximos tolerables, se terminará el análisis y solo faltaran algunas consideraciones para la conexión de los equipos en superficie con la malla. En caso

contrario se deberá de revisar y rediseñar la malla para satisfacer las condiciones de seguridad.

- 11° paso: Si los límites de tensión de paso o de contacto son excedidos, se tiene que revisar y rediseñar la geometría y componentes de la malla, incluyendo una menor separación entre conductores, varillas adicionales en la malla, etc.
- 12° paso: Después de haberse cumplido las condiciones de seguridad de tensión de paso y de contacto, se requerirán varillas y conductores adicionales. Los conductores adicionales se incluirán en los equipos que no están cercanos a la malla y que deben de ser aterrizados, además de varillas adicionales en elementos como apartarrayos y en la terminal del neutro de los transformadores.

3.1.1 Datos de campo

Existen algunos datos importantes a considerar que se deben de recolectar de campo y que son propios del tipo de producción de la planta. Estos incluyen:

- Condiciones ambientales
- Tipos de carga de la instalación
- Consideraciones para la prevención de corrientes indeseables en la coexistencia de dos regímenes de conexión

Una vez recaba esta información, se debe de recolectar la información correspondiente para el cálculo directo del electrodo tipo malla de puesta a tierra. Esto es:

- Área disponible para la malla de puesta a tierra
- Corriente de corto circuito y relación X/R en el nodo de conexión a cargo del suministrador
- Resistividad del suelo

3.1.1.1 Condiciones Ambientales

En la Tabla 7 se muestran los valores climatológicos del sitio donde está la planta DGA de Nayarit, los cuales provienen de la estación meteorológica del campo geotérmico Domo de San Pedro.

Tabla 7 Características meteorológicas de la planta DGA DE NAYARIT (Tomado de Grupo Dragón)

PARÁMETRO	PUNTO DE DISEÑO
Altitud	1300 msnm
Presión atmosférica	87,500 Pa
Humedad relativa	
Máxima normal	98.4 %
Promedio	65 %
Mínima normal	5.3 %
Temperatura de bulbo seco	
Máxima normal	35.6 °C
Promedio	21 °C
Mínima normal	8.9 °C
Precipitación	
Máxima normal	1055 mm
Intensidad de lluvia máxima	75 mm/hr
Velocidad del viento	
Máxima	13.6 m/s
Promedio	3.43 m/s
Dirección dominante del viento	Noroeste

3.1.1.2 Tipo de cargas en la instalación

La aplicación ya sea residencial, comercial o industrial condicionará las características del tipo de cargas, así como su prioridad para mantener el servicio constante o intermitente. No es el mismo nivel de prioridad en la continuidad del servicio eléctrico para un hospital que una industria textil. Ante esto, se puede tomar decisiones en el régimen de conexión a tierra del sistema de tierras, con base en el arreglo con mayores ventajas en sus características operativas como económicas.

Uno de los puntos importantes del sistema de puesta tierra, es el régimen de conexión a tierra o a neutro al cual estará diseñado. El objetivo del régimen de conexión a tierra es el de controlar los efectos de una falla en el aislamiento. En el caso de la planta DGA tiene las siguientes características:

- Planta con actividades de procesamiento agrícola para la industria alimentaria
- Manejo de equipos sensibles con autómatas tipo PLC y señales de instrumentación y control
- En su mayoría cargas de tipo inductivo por motores de inducción

- La consideración del régimen de conexión a Tierra se resuelve primeramente por las ventajas y desventajas entre cada uno de los regímenes posibles en función del tipo de instalación. Indicaremos las premisas de la planta para un mejor análisis:
 - No existe manejo de fluidos o materiales peligrosos con riesgo de explosión
 - Se tienen trabajos con contacto directo a mesas de acero inoxidable con muchas personas trabajando en ellas.
 - No existe un proceso crítico dentro del proceso productivo que pueda generar pérdidas significativas en caso de un corte de suministro eléctrico
- Ante estas consideraciones, se priorizará la seguridad de las personas para el diseño del régimen de la instalación.

Se determinó que las cargas en la planta DGA no pueden ser consideradas como críticas y por lo tanto la continuidad del servicio no es una prioridad. En caso de falla, es recomendable incrementar el nivel de seguridad de la instalación incorporando un conductor adicional al neutro que permita aumentar la probabilidad de que las protecciones se activen de manera efectiva, dado que se incluye un nuevo camino de conducción de corriente de falla hasta las protecciones. Con esto se recomienda un régimen de tierra tipo TN-S como se presenta en la Figura 16.

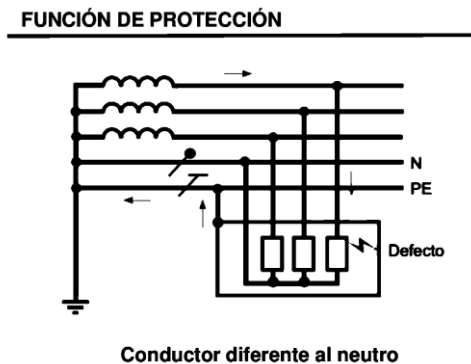


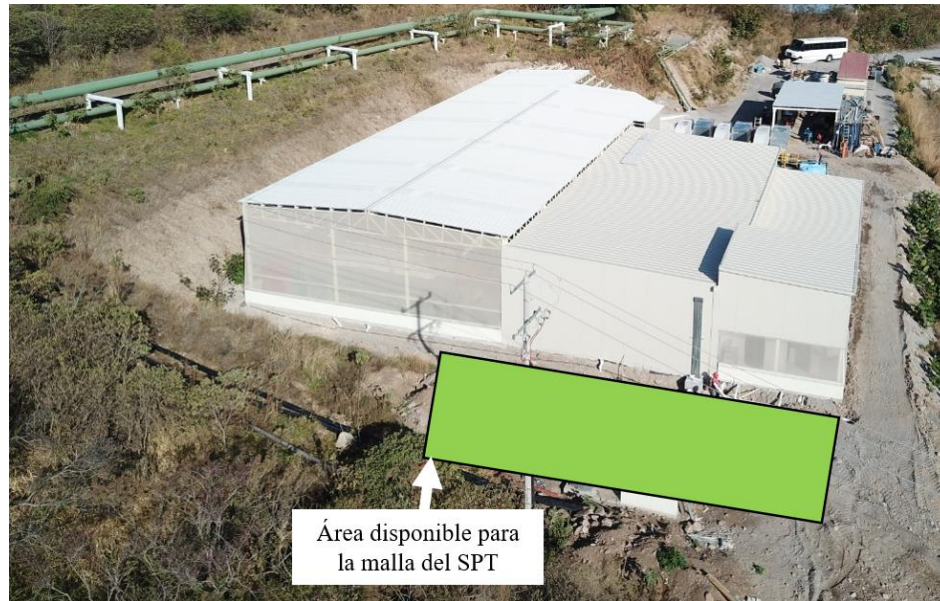
Figura 16 Régimen TN-S ante evento de falla

3.1.1.3 Consideraciones para la prevención de corrientes indeseables en la coexistencia de dos regímenes de conexión.

La planta DGA no cuenta con un diseño de redundancia para el suministro eléctrico, además de no tener un sistema de emergencia a combustible. Sin embargo, se debe considerar en casos de reformas al sistema o de usos de plantas de emergencia auxiliar, el no generar corrientes indeseables definidos en la NOM-001 [8] artículo 250-6.

3.1.1.4 Área disponible para la instalación del electrodo de puesta a tierra

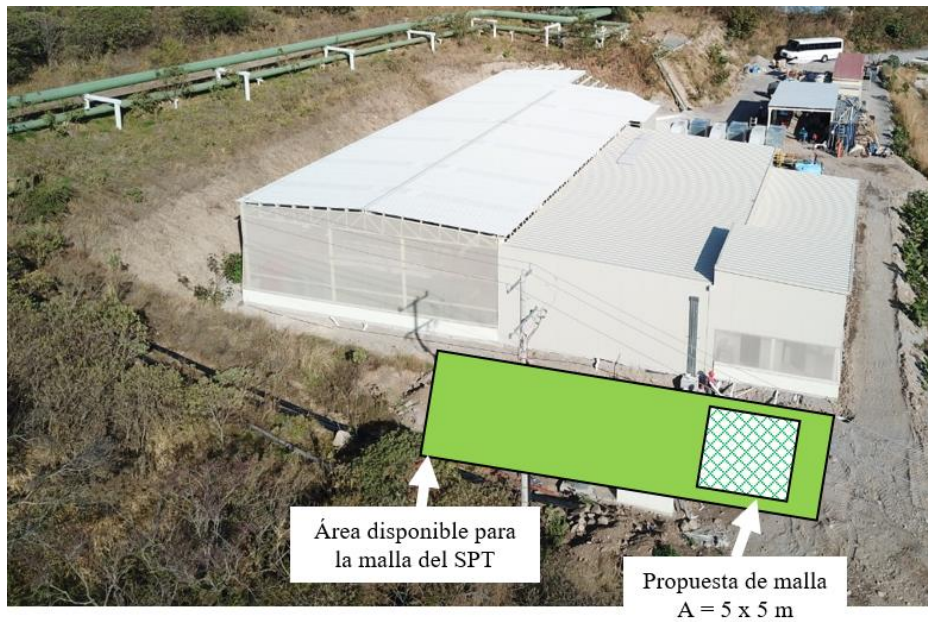
Con base en la revisión de la información y disponibilidad de la planta, se determina el área propuesta para la instalación de la malla de tierra, como se indica en la Figura 17.



Área disponible para la malla del SPT

Figura 17 Área disponible para la instalación del electrodo de puesta a tierra del SPT a frecuencia industrial (Vista trasera de la planta)

Con base en la disponibilidad se propone una malla con un área de 25 m^2 en una configuración de 5×5 metros localizado en la Figura 18.



Área disponible para la malla del SPT

Propuesta de malla
 $A = 5 \times 5 \text{ m}$

Figura 18 Propuesta de malla de 5×5 metros (área 25 m^2)

3.1.1.5 Corriente de corto circuito y relación X/R

La planta industrial opera con una subestación tipo pedestal (Figura 19) de capacidad nominal de 112.5 kVA a tensiones de 13800 Δ / 220Y-127 en conexión radial.



Figura 19 Transformador trifásico tipo pedestal capacidad 112.5kVA 13800 / 220-127 V

La acometida de media tensión con magnitud de 13,800V, proviene de la subestación eléctrica Chapalilla, localizada en la división de distribución Jalisco.

Como dato de entrada y para los cálculos se empleará la información de potencia y corto circuito en nodos de la red correspondiente a la Subestación Eléctrica Chapalilla (Figura 20).

CFE Distribución. Valores de corto circuito de media tensión en las RGD, correspondientes al año 2021 División de Distribución Jalisco																
Número	División	Zona	Acrónimo	Subestación	Banco	Tensión AT (kV)	Tensión MT (kV)	Capacidad en MVA	Corriente de corto circuito (KA), y relación X/R							
									Nivel de CC mínimo 2021			Nivel de CC máximo 2021				
									3F	X/R	1F	X/R	3F	X/R	1F	X/R
95	Jalisco	Sector Juárez	03-MIL-69	MIRAVALLE	03-MIL-69-2	69	23	25	6.22	11.29	6.48	13.02	6.23	11.70	6.49	13.40
96	Jalisco	Sector Juárez	03-MIL-69	MIRAVALLE	03-MIL-69-1	69	23	40	7.02	10.68	7.36	12.43	7.04	11.10	7.37	12.83
97	Jalisco	Sector Juárez	03-NHE-230	NINOS HEROES	03-NHE-230-1	230	23	60	7.26	15.86	7.45	16.97	7.32	17.21	7.49	18.00
98	Jalisco	Sector Juárez	03-NHE-230	NINOS HEROES	03-NHE-230-2	230	23	60	6.26	15.86	7.45	16.97	7.32	17.21	7.49	18.00
99	Jalisco	Sector Juárez	03-SAG-69	SAN AGUSTIN	03-SAG-69-1	69	23	25	5.93	11.58	6.27	13.22	5.95	12.03	6.28	13.64
100	Jalisco	Sector Juárez	03-SAG-69	SAN AGUSTIN	03-SAG-69-2	69	23	40	7.47	10.43	8.02	12.08	7.50	10.90	8.04	12.82
101	Jalisco	Sector Juárez	03-SOL-69	SOL	03-SOL-69-2	69	23	40	6.18	13.07	6.44	14.61	6.20	13.70	6.46	15.16
102	Jalisco	Sector Juárez	03-SOL-69	SOL	03-SOL-69-3	69	23	40	6.54	12.81	6.84	14.38	6.57	13.46	6.86	14.94
103	Jalisco	Sector Juárez	03-SOL-69	SOL	03-SOL-69-1	69	23	40	6.91	12.56	7.24	14.14	6.94	13.21	7.26	14.72
104	Jalisco	Sector Libertad	03-CQO-115	CUQUIO	03-CQO-115-1	115	23	20	2.54	8.75	2.77	10.34	2.54	8.87	2.77	10.46
105	Jalisco	Sector Libertad	03-HUN-69	HUENTITAN NUEVA	03-HUN-69-1	69	23	40	5.70	10.93	6.06	12.60	5.78	11.76	6.12	13.39
106	Jalisco	Sector Libertad	03-HUN-69	HUENTITAN NUEVA	03-HUN-69-2	69	23	40	5.81	10.84	6.18	12.50	5.89	11.67	6.24	13.30
107	Jalisco	Sector Libertad	03-OBL-69	OBLATOS	03-OBL-69-1	69	23	40	5.90	12.11	6.24	13.70	5.98	13.23	6.31	14.71
108	Jalisco	Sector Libertad	03-PNL-69	PENAL	03-PNL-69-2	69	23	40	6.03	11.28	6.48	12.87	6.05	11.78	6.50	13.34
109	Jalisco	Sector Libertad	03-PNL-69	PENAL	03-PNL-69-1	69	23	40	6.03	11.28	6.49	12.87	6.06	11.78	6.50	13.33
110	Jalisco	Sector Reforma	03-AGZ-230	AGUA AZUL	03-AGZ-230-1	230	23	60	7.30	16.03	7.47	17.10	7.34	17.12	7.51	17.94
111	Jalisco	Sector Reforma	03-AGZ-230	AGUA AZUL	03-AGZ-230-2	230	23	60	7.30	16.03	7.47	17.10	7.34	17.12	7.51	17.94
112	Jalisco	Sector Reforma	03-ALS-230	ALAMOS 230/23 KV	03-ALS-230-2	230	23	60	7.30	16.04	7.48	17.11	7.35	17.15	7.51	17.96
113	Jalisco	Sector Reforma	03-ALS-230	ALAMOS 230/23 KV	03-ALS-230-3	230	23	60	7.30	16.04	7.48	17.11	7.35	17.15	7.51	17.96
114	Jalisco	Sector Reforma	03-GUI-230	GUADALAJARA INDUSTRIAL	03-GUI-230-1	230	23	60	7.39	16.34	7.54	17.35	7.44	17.48	7.57	18.21
115	Jalisco	Sector Reforma	03-PQI-69	PARQUE INDUSTRIAL	03-PQI-69-1	69	23	40	6.18	13.09	6.45	14.63	6.20	13.58	6.46	15.06
116	Jalisco	Sector Reforma	03-PQI-69	PARQUE INDUSTRIAL	03-PQI-69-2	69	23	40	6.37	12.95	6.65	14.50	6.39	13.45	6.67	14.94
117	Jalisco	Sector Reforma	03-GPR-69	SAN GASPAR	03-GPR-69-1	69	23	40	6.85	15.76	7.09	16.86	6.89	16.89	7.11	17.75
118	Jalisco	Sector Reforma	03-SMR-230	SAN MARTIN	03-SMR-230-1	230	23	60	7.32	16.21	7.49	17.24	7.37	17.35	7.52	18.11
119	Jalisco	Sector Reforma	03-ZLT-69	ZALATITAN	03-ZLT-69-2	69	23	40	6.35	12.65	6.71	14.19	6.37	13.30	6.73	14.76
120	Jalisco	Sector Reforma	03-ZLT-69	ZALATITAN	03-ZLT-69-1	69	23	40	6.55	12.51	6.93	14.06	6.57	13.16	6.95	14.63
121	Jalisco	Tepic	03-AGM-115	AGUAMILPA	03-AGM-115-1	115	13.8	9.375	2.94	12.30	3.09	13.90	2.98	13.40	3.12	14.88
122	Jalisco	Tepic	03-CPI-115	CHAPALILLA	03-CPI-115-1	115	13.8	6.25	2.30	14.86	2.38	16.14	2.30	14.85	2.38	16.13
123	Jalisco	Tepic	03-CMP-115	COMPOSTELA	03-CMP-115-1	115	13.8	9.375	3.95	18.29	4.00	18.80	3.97	18.81	4.01	19.17

Figura 20 Valores de Corto Circuito de la Red General de Distribución 2021 CFE

Se utilizan los valores máximos indicados de Corto Circuito de fase a tierra siguientes:

- Nivel Corto Circuito máximo: 2.38 kA
- X/R: 16.13

3.1.1.6 Resistividad del suelo

La instalación de la planta DGA se encuentra a pie de un volcán llamado Domo de San Pedro, por lo que su suelo es predominante de tipo volcánico y rocoso. Debido a estas características se deberá realizar las consideraciones en el diseño de la malla de tierra de la planta.

Se realizaron mediciones de resistividad del suelo con equipo telurómetro, con el objetivo de modelar la resistividad conforme a la normatividad IEEE80.

Para ello se utilizó el método Wenner, el cual consiste en un arreglo tetra-eléctrodico que se usa para medir la resistividad del suelo por medio de la instalación de electrodos espaciados en línea recta, con una distancia A entre cada par de los electrodos, y enterrados a una profundidad B , y cumpliendo la relación: $A > 20B$ [10], como se muestra en la Figura 21.

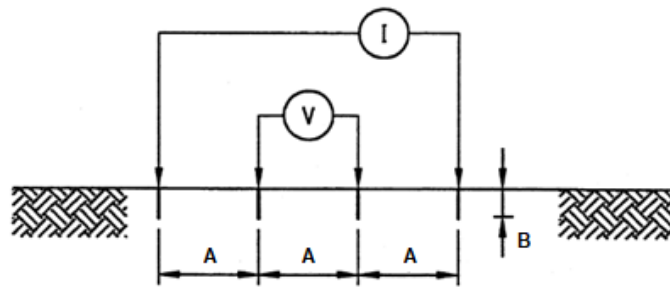


Figura 21 Arreglo tetra electródico método Wenner, A : separación entre electrodos, B : $1/20A$ [10]

El principio de funcionamiento se da de la siguiente manera: al introducir una intensidad de corriente “ I ” en el terreno a través de los electrodos “ $C1$ ” y “ $C2$ ”, aparecerá en los electrodos de tensión “ $P1$ ” y “ $P2$ ” una diferencia de potencial “ V ” que mediremos con el aparato.

El medidor tiene una resistencia variable en su interior que es la que varía la intensidad de corriente “ I ” que se introduce en el terreno. El medidor también registra la tensión “ V ” que se detecta entre los bornes de tensión.

La relación entre la “ V ” y la “ I ” (Ley de Ohm), es el valor de la resistencia variable que se registra en el medidor como sigue en la Ecuación 1:

$$R = \frac{V}{I}$$

Ecuación 1 Ley de Ohm

Para conocer el valor de la resistividad aparente para un estrato de terreno, se debe resolver la Ecuación 2:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{\left(1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}\right)}$$

Ecuación 2 Resistividad aparente para un estrato de terreno

Si se tiene una relación aproximada de $A > 20 \cdot B$ se puede utilizar la Ecuación 3 para encontrar la resistividad del suelo.

$$\rho = 2\pi AR$$

Ecuación 3 Resistividad aparente simplificada por ser $A > 20B$

En donde:

ρ = Resistividad promedio en ohmios por metro [$\Omega \times m$].

A = Distancia de separación entre electrodos [m].

R = Lectura del telurómetro en ohmios [Ω].

$\pi = 3.1416$

Para las mediciones de campo se empleó el equipo de marca AEMC Instruments (Figura 22) con las especificaciones mostradas en la Tabla 8:



Figura 22 Equipo telurómetro marca AEMC

Tabla 8 Especificaciones equipo telurómetro AEMC 6471

MODELO	6471
<i>Medición de resistividad del suelo por el método de los 4 puntos</i>	
Método de medición	Wenner o Schlumberger (seleccionable)
Rango	0.1 a 99.99 k Ω ; $\rho_{\text{máx}}$: 999 k Ω m
Resolución	0.001 a 10 Ω
Tensión de prueba	16 o 32 V (seleccionable)
Frecuencia	De 41 a 128 Hz (seleccionable)
<i>Medición de tensión externa</i>	
Rango (Conmutación automática de escalas)	0.1 a 65 V_{CA}/V_{CC} a 440Hz
Precisión de la lectura	+/- 2% de la lectura

Se realizó el Método Ortogonal (Figura 23) que consiste en el arreglo en 4 distancias A, realizando direcciones N-S y E-O con la finalidad de descartar efectos por la anisotropía del suelo, obteniendo promedios de la resistividad obtenida.

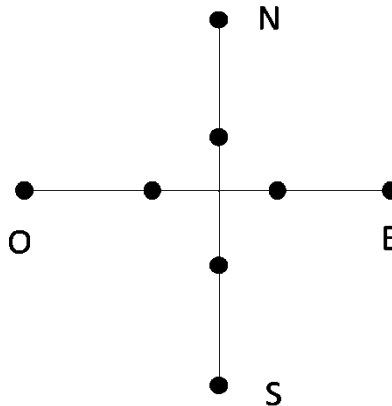


Figura 23 Mediciones en dirección N-S y E-O realizadas con 4 electrodos a 4 distintos valores de A

La Tabla 9 presenta los resultados de las mediciones de resistividad en dirección N-S y E-O con distancias de A indicadas:

Tabla 9 Valores de resistividad obtenidos en mediciones de campo con aperturas de hasta 4m entre electrodos con el método Wenner

A	ρ_{N-S}	ρ_{E-O}	$\bar{\rho}$
1m	98.4	97	97.75
2m	131.1	146.3	138.7
3m	169	155.6	162.3
4m	187	181	184

Una vez obtenidos los datos de resistividad eléctrica, es necesario realizar un modelo de estratos¹ del suelo que entregue una respuesta equivalente al modelo de resistividad obtenido. Para esto, primeramente, graficaremos el modelo de resistividad que contiene los datos medidos a cada valor de A de distancia como se indica en la Figura 24.

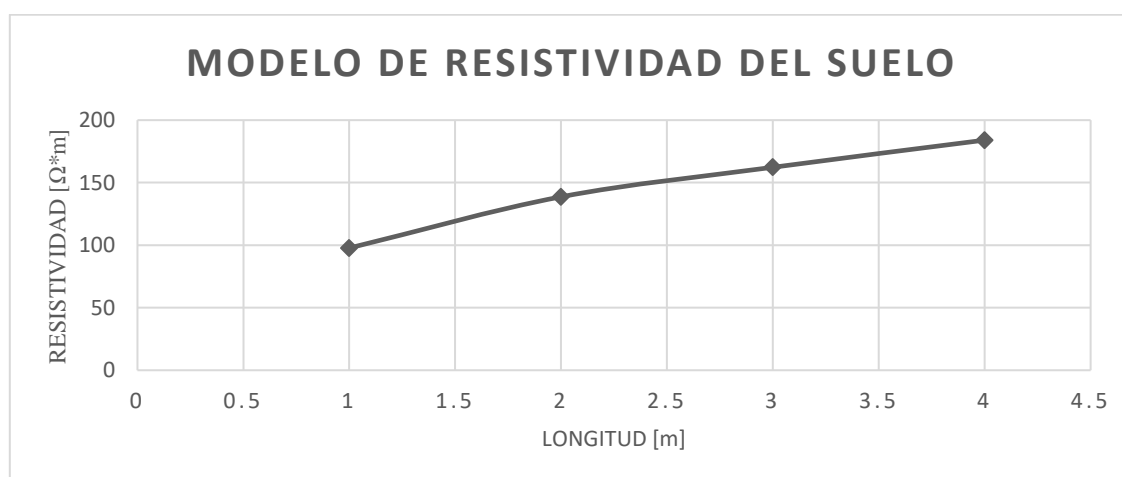


Figura 24 Modelo de resistividad del suelo

El modelo de dos capas de suelo se representa con una capa superior con una profundidad finita y con una capa inferior con profundidad infinita [10].

Para la creación del modelo de dos capas de suelo, se implementa una técnica de inversión² de datos de resistividad, en nuestro caso emplearemos el algoritmo creado por William Occam, el cual consiste en la generación de un modelo suave que se ajusta a un conjunto de datos con ciertas tolerancias.

Para su cálculo se emplea el software libre desarrollado por la Universidad Estatal de Moscú, facultad de geología, departamento de geofísica, de nombre “IPI2Win” versión 3.0.1, publicada en

¹ Masa de sedimentos, de espesor más o menos uniforme y escaso, extendida en sentido horizontal y separada de otras por capas paralelas.

² Un proceso matemático por el cual los datos se utilizan para generar un modelo consistente con éstos; se trata del proceso de resolución del problema inverso.

la página oficial de la Universidad <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>, para la interpretación de sondeos eléctricos verticales, con el cual es posible generar modelos de dos capas y calcular el error respecto a nuestro modelo de resistividad obtenido.

El programa recibirá la información del modelo de resistividad y podrá generar un modelo de capas que puede ser ajustado de manera sistemática con base a una curva teórica que debe acoplarse a la curva de datos medidos. El error de acoplamiento se entregará como parte de sus resultados. Es recomendable que este error sea de un valor no mayor al 5% para tener una mayor certidumbre del modelo de capas obtenido. El resultado se puede observar en la Figura 25.

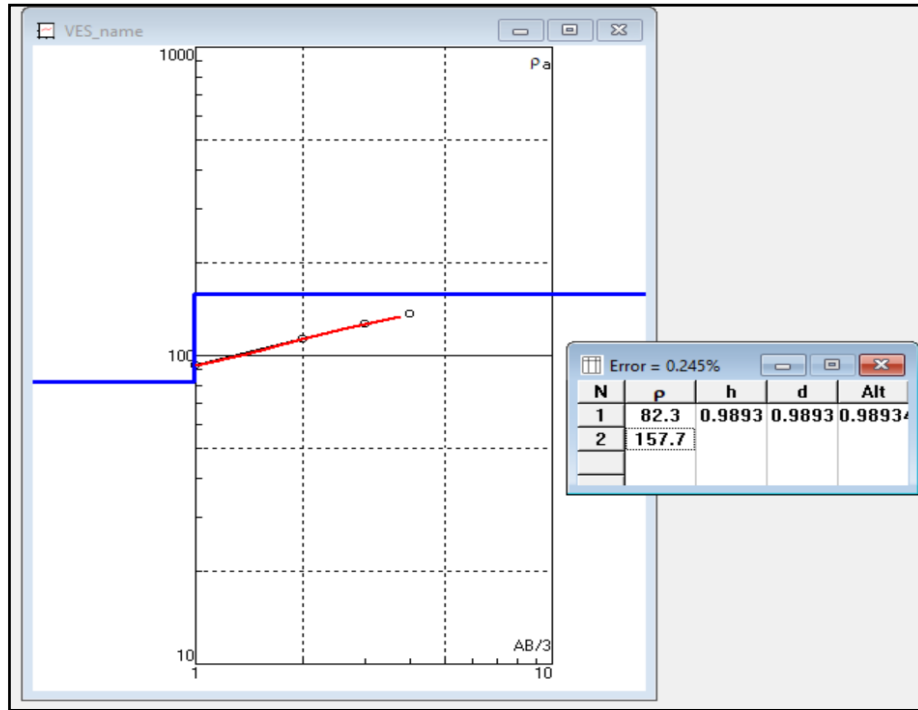


Figura 25 Resultado de modelo de dos capas por método Wenner (Modelo de resistividad en rojo y modelo de capas en azul)

Los resultados de la inversión de datos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Resultados del modelo de dos capas

% Error	0.245	
Capa	ρ [$\Omega \times m$]	h [m]
1	82.3	0.9893
2	157.7	Infinito

En donde:

ρ : Resistividad eléctrica [$\Omega \times m$]

h: Profundidad de la capa [m]

3.1.2 Tamaño del conductor

Para el cálculo de la sección transversal del conductor se aplica la siguiente ecuación [10]:

$$A_{mm^2} = I \times \frac{1}{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)^{1/2}}$$

Ecuación 4 Sección transversal del conductor del electrodo de tierra tipo malla [10]

En donde:

A : Sección transversal del conductor [mm^2]

I : Corriente RMS [kA]

T_m : Temperatura máxima permisible [$^{\circ}C$]

T_a : Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

T_r : Temperatura de referencia para las constantes del material [$^{\circ}C$]

α_0 : Coeficiente térmico de resistividad [$^{\circ}C$]

α_r : Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r

ρ_r : Resistividad del conductor de tierra a la temperatura de referencia [$\mu\Omega \times cm$]

t_c : Tiempo de duración de la corriente [s]

$TCAP$: Factor de capacidad térmica por unidad de volumen [$J/cm^3 / ^{\circ}C$]

$K_f: \frac{1}{\alpha_0} \text{ ó } \left(\frac{1}{\alpha_r}\right) - T_r$ [$^{\circ}C$]

Los parámetros dependen del material a elegir para el conductor de la malla. La Tabla 11 indica las constantes para distintos materiales.

Tabla 11 Constantes de materiales [10]

Descripción	Conductividad del material [%]	Factor α_r a 20°C	K_s a 0°C	Temperatura de fusión T_m [°C]	ρ_r a 20°C [$\mu\Omega * cm$]	Factor de capacidad térmica por unidad de volumen (d) TCAP [$J/cm^3°C$]
Cobre recocido suave inmersión	100	0.00393	234	1083	1.72	3.42
Cobre comercial inmersión dura	97	0.00381	242	1084	1.78	3.42
Cobre revestido alambre de acero	40	0.00378	245	1084	4.40	3.85
Cobre revestido alambre de acero	30	0.00378	245	1084	5.86	3.85
Cobre revestido barra de acero	20	0.00378	245	1084	8.62	3.85
Aluminio grado EC	61	0.00403	228	657	2.86	2.56

Para la malla del electrodo se empleará cobre recocido suave inmersión, por lo que se procede a calcular con las constantes del material.

Además, se considera que las protecciones primarias del sistema eléctrico deben de responder en un tiempo de al menos 0.5s:

$$I = 2.38 [kA]$$

$$t_c = 0.5 [s]$$

$$A_{mm^2} = 2.38 \times \frac{1}{\left(\frac{3.42 \times 10^{-4}}{0.5 \times 0.00393 \times 1.72}\right) \ln\left(\frac{234.45 + 1083}{234.45 + 20}\right)^{1/2}}$$

$$A_{mm^2} = 2.38 \times \frac{1}{(0.10118)(0.82217)}$$

$$A_{mm^2} = 2.38 \times 12.01$$

$$A_{mm^2} = 28.58 \text{ mm}^2$$

$$d = 6.0327 \text{ [mm]}$$

Considerando un factor de sobredimensionamiento del conductor para garantizar el desempeño mecánico y térmico, la norma IEEE-80 recomienda el uso mínimo del conductor de calibre AWG 2/0 que tiene un área transversal de 67.43 mm² y un diámetro del conductor de **d = 9.2657 [mm]**.

Conforme a las especificaciones estipuladas en el criterio de diseño, se empleará para este proyecto el conductor indicado en la Tabla 12:

Tabla 12 Especificaciones de elementos de SPT

<i>Elemento del Sistema de Puesta a Tierra</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Norma de referencia</i>	<i>Material</i>	<i>Calibre nominal</i>	<i>Resistencia mecánica (Carga de ruptura)</i>
Conductor	Condumex	NMX-J-012-ANCE	Cobre suave	2/0	16.62 kN

3.1.3 Análisis de seguridad por tensión de contacto y tensión de paso

Los cálculos de evaluación de la seguridad respetan las prácticas normalizadas norteamericanas descritas en la norma IEEE-80. Esta norma requiere los datos siguientes:

- Peso corporal de la víctima de choque eléctrico (por omisión es 70 kg, con una alternativa de 50 Kg).
- El espesor y la resistividad del material (por ejemplo: piedra triturada) colocada sobre la superficie de la tierra de cobertura natural de la subestación.
- La resistividad de terreno de las capas superior e inferior y el espesor de la capa superior de la tierra de cobertura natural (materiales adicionales de superficie excluidos).
- Duración del choque eléctrico. Normalmente el tiempo de reacción de la protección.

Las ecuaciones siguientes tomadas de la IEEE-80 para calcular las tensiones máximas admisibles de paso y contacto son:

Para un peso corporal de 50 Kg la Ecuación 5 y Ecuación 6:

$$E_{contacto} = (1000 + 1.5 \times C_S \times \rho_S)0.116/\sqrt{t_c}$$

Ecuación 5 Tensión de contacto máxima permisible para un peso de 50kg [10]

$$E_{paso} = (1000 + 6.0 \times C_S \times \rho_S)0.116/\sqrt{t_c}$$

Ecuación 6 Tensión de paso máxima permisible para un peso de 50kg [10]

Para un peso corporal de 70 Kg la Ecuación 7 y la Ecuación 8:

$$E_{contacto} = (1000 + 1.5 \times C_S \times \rho_S)0.157/\sqrt{t_c}$$

Ecuación 7 Tensión de contacto máxima permisible para un peso de 70kg [10]

$$E_{paso} = (1000 + 6.0 \times C_S \times \rho_S)0.157/\sqrt{t_c}$$

Ecuación 8 Tensión de paso máxima permisible para un peso de 70kg [10]

En donde:

- t_c es el tiempo de duración de la corriente del choque eléctrico [s]
- C_S es el factor de reducción de potencia en presencia de material de superficie de alta resistividad. El factor de reducción C_S es una función del factor de reflexión K y del espesor de la capa superior h.
- ρ_S es la resistividad del material de superficie [$\Omega \times m$]

Los datos sobre la evaluación de seguridad se definen en el mismo cuadro de dialogo en que se definen los datos sobre el modelo de terreno. El propósito del cálculo es llegar a un factor de reducción de potencia que permita aprovechar la capa superficial de alta resistividad permitiendo así que se tolere una mayor tensión de contacto. El factor de reducción C_S puede calcularse. Para el cálculo del factor de reducción C_S se usa la Ecuación 9:

$$C_S = 1 - \frac{0.09(1 - \rho/\rho_S)}{2h_S + 0.09}$$

Ecuación 9 Factor de reducción de potencia [10]

Donde:

h_S : es el espesor del material de la capa superficial de alta resistividad [m]

ρ_S : es la resistividad del material de la superficie [$\Omega \times m$]

ρ : es la resistividad del suelo debajo del material de superficie de alta resistividad [$\Omega \times m$]

Para el cálculo, tenemos como cobertura en la subestación una capa de 0.2 m de granito de 2 a 4" de diámetro con una resistividad promedio de $\rho_s = 10,000 \Omega \times m$

En donde:

$$h_s = 0.2 \text{ m}$$

$$\rho_s = 10,000 \Omega \times m$$

$$\rho = 82.3 \Omega \times m$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - 82.3/10000)}{2(0.2) + 0.09}$$

$$C_s = 1 - 0.182$$

$$C_s = 0.818$$

La seguridad de una persona depende de la prevención de cantidades críticas de energía de choque absorbidas por el cuerpo humano, antes de que la falla sea despejada y el sistema desenergizado. El criterio empleado para el cálculo de las tensiones de contacto y de paso fue el del peso de una persona promedio de 70kg.

Empleando la Ecuación 7 sustituimos valores:

$$C_s = 0.818$$

$$\rho_s = 10000 \Omega \times m$$

$$t_c = 0.5 \text{ s}$$

$$E_{\text{contacto}} = [1000 + 1.5 \times (0.817807) \times (10000)] \times 0.157/\sqrt{0.5}$$

$$E_{\text{contacto}} = 2945.71 \text{ V}$$

Empleando la Ecuación 8 sustituimos valores:

$$E_{\text{paso}} = [1000 + 6.0 \times (0.817807) \times (10000)] \times 0.157/\sqrt{0.5}$$

$$E_{\text{paso}} = 11,116.76 \text{ V}$$

3.1.4 Diseño inicial de la malla

Al revisar y analizar la respuesta del modelo de resistividad, se concluye que no habrá mejoras al incorporar conductores verticales debido a la respuesta creciente de resistividad, por esto, se propone una malla sin incluir varillas de tierra, como se indica en la Figura 26.

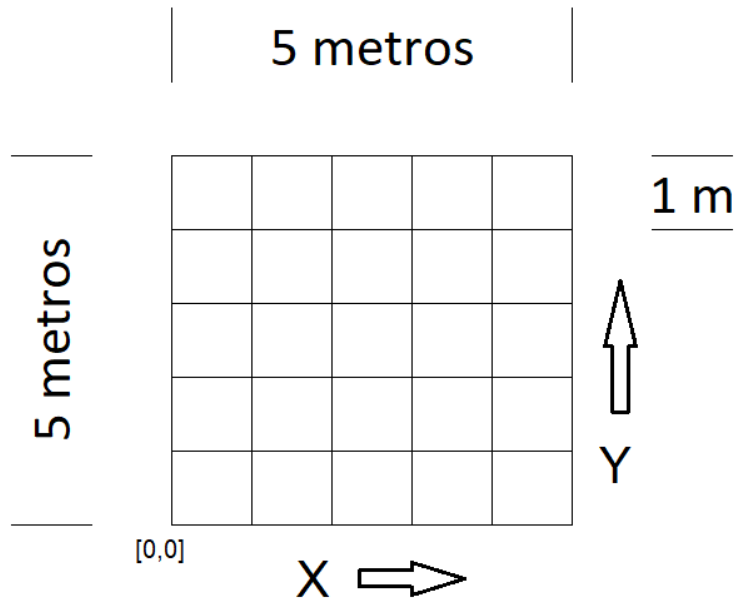


Figura 26 Malla propuesta inicial

La malla se presenta en la Tabla 13 conteniendo los siguientes parámetros:

Tabla 13 Parámetros de la malla propuesta

Conductor horizontal	Inicio [x,y,z]	Final [x,y,z]	L_x [m]	L_y [m]
X1	[0,0,-0.5]	[5,0,-0.5]	5	0
X2	[0,1,-0.5]	[5,1,-0.5]	5	0
X3	[0,2,-0.5]	[5,2,-0.5]	5	0
X4	[0,3,-0.5]	[5,3,-0.5]	5	0
X5	[0,4,-0.5]	[5,4,-0.5]	5	0
X6	[0,5,-0.5]	[5,5,-0.5]	5	0
Y1	[0,0,-0.5]	[0,5,-0.5]	0	5
Y2	[1,0,-0.5]	[1,5,-0.5]	0	5
Y3	[2,0,-0.5]	[2,5,-0.5]	0	5
Y4	[3,0,-0.5]	[3,5,-0.5]	0	5
Y5	[4,0,-0.5]	[4,5,-0.5]	0	5
Y6	[5,0,-0.5]	[5,5,-0.5]	0	5
D Espacio entre conductores paralelos [m]			1 m	
A Área de la malla [m ²]			25 m ²	
L_C Longitud de conductores horizontales [m]			60 m	
L_R Longitud de conductores verticales [m]			0 m	
$L_T = L_C + L_R$ Longitud total [m]			60 m	
h Profundidad de la malla [m]			0.5 m	

3.1.5 Resistencia de la malla

Para la estimación de la resistencia de tierra se empleará la Ecuación 10:

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

Ecuación 10 Resistencia de la malla de tierra de Sverak [10]

Con los datos obtenidos del diseño y modelo de capas del suelo, sustituimos y calculamos:

$$R_G = 82.3 \left[\frac{1}{60} + \frac{1}{\sqrt{20(25)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{20/25}} \right) \right]$$

$$R_G = 7.59 \Omega$$

3.1.6 Corriente de la malla

Para el cálculo de la corriente de malla se debe emplear la corriente simétrica $3I_0$ (de secuencia cero). En nuestra aplicación, tenemos el máximo valor entregado por el CENACE, y no tenemos información de la impedancia en el nodo de interconexión, por lo que se utilizará el valor de corriente de corto máximo para los cálculos.

Con base en esto, se plantea el determinar en función de las características de la instalación el factor S_f , el cual relaciona la corriente simétrica con la corriente que fluye a través de la malla hacia el terreno que lo rodea [10]. Éste se calcula como se indica en la Ecuación 11.

$$S_f = \frac{I_g}{I_f}$$

Ecuación 11 Factor de división de corriente simétrica de falla y de corriente simétrica de la malla [10]

En donde:

S_f : Factor de división de corriente que relaciona la corriente que entra a la malla y la parte que fluye hacia el terreno

I_g : Corriente simétrica de malla [A]

I_f : Corriente simétrica de falla a tierra [A]

Para el cálculo de la corriente máxima en la malla, se tiene la Ecuación 12.

$$I_G = D_f \times I_g$$

Ecuación 12 Corriente máxima de malla [10]

En donde:

I_G : Corriente máxima de malla [A]

D_f : Factor de decremento para el tiempo de duración de la falla t_c que está en función de la relación X/R en el punto de falla.

Considerando que la planta DGA está relativamente apartada de la infraestructura de la central eléctrica, no se tienen sistemas de puesta a tierra considerables para calcular un factor S_f adecuado. Por esto, se considerará el peor caso, que será un valor de $S_f = 1$.

Para determinar el factor de decremento, se empleará una tabla de valores típicos proporcionada por la norma IEEE-80, que relaciona su magnitud con el valor de X/R en el nodo de evaluación (Tabla 14).

Tabla 14 Valores típicos del factor de decremento (D_f) [10]

Duración de la falla, t_f		Factor de decremento, D_f			
Segundos	Ciclos a 60 Hz	X/R =10	X/R =20	X/R =30	X/R =40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

El valor que tenemos del nodo de conexión con la red general de distribución es de X/R = 16.13 y el valor de duración de falla considerado es de $t_f = 0.5$ s. Con esto, podemos calcular considerando una respuesta lineal (ecuación $y = mx + b$), y nos resulta el valor de $D_f = 1.04193$.

Con esto, podemos calcular la corriente máxima de malla de la Ecuación 12.

$$I_G = 1.04193 \times 2380$$

$$I_G = 2479.79 \text{ A}$$

Con el cálculo de corriente máxima es posible calcular el incremento de potencial de suelo (GPR), como se indica en la Ecuación 13.

$$GPR = R_G \times I_G$$

Ecuación 13 Incremento de potencial en el suelo

Ingresamos los datos y calculamos:

$$GPR = 7.59 \times 2479.79$$

$$\mathbf{GPR = 18821.63 V}$$

3.1.7 Evaluación de GPR y la tensión de contacto

Comparamos con la Tabla 15 el valor obtenido con el valor de tensión de contacto:

Tabla 15 Comparación de GPR y tensión de contacto

GPR	E_{contacto}
18821.63 V	2945.71 V

Observamos que el valor de GPR es más grande en aproximadamente 6 veces la tensión de contacto, por lo que se debe de continuar el análisis con el siguiente paso de la metodología.

3.1.8 Tensión de malla y tensión de paso

La tensión de malla es obtenida a partir del producto del factor geométrico K_m , el factor de corrección K_i , la resistividad del suelo ρ y el promedio de corriente por unidad de longitud efectivamente enterrada del electrodo (I_G/L_M) [10].

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_M}$$

Ecuación 14 Tensión de malla [10]

En donde:

E_m : Tensión de malla [V]

ρ : Resistividad del terreno [$\Omega \times m$]

K_m : Factor de espaciamiento para la tensión de malla

K_i : Factor de corrección para la geometría de la malla

L_M : Longitud efectiva de la tensión de malla, $L_C + L_R$ [m]

Para calcular K_m se tiene la Ecuación 15:

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

Ecuación 15 Factor geométrico K_m [10]

En donde:

D : Espaciamiento entre conductores paralelos de la malla [m]

h : Profundidad de instalación de la malla [m]

d : Diámetro del conductor de malla [m]

K_{ii} : Factor correctivo de ajuste para los efectos de los conductores interiores de malla en las esquinas

K_h : Factor correctivo que enfatiza el efecto de la profundidad de malla

n : Factor geométrico que está en compuesto de los factores n_a , n_b , n_c y n_d

Para mallas con varillas de tierra alrededor del perímetro $K_{ii} = 1$.

Para mallas sin varillas de tierra se tiene la Ecuación 16:

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

Ecuación 16 Factor geométrico para mallas sin varillas de tierra [10]

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Ecuación 17 Factor correctivo K_h [10]

En donde:

$h_0=1$ es la profundidad de referencia de malla [m]

También se tiene la ecuación que define la cantidad efectiva de conductores paralelos en una malla y se presenta en la Ecuación 18:

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

Ecuación 18 Cantidad efectiva de conductores paralelos n [10]

En donde:

$$n_a = \frac{2 \times L_C}{L_p}; \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}}; \quad n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}}; \quad n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

Ecuación 19 Términos para el cálculo de la cantidad efectiva de conductores paralelos [10]

En donde:

$n_b = 1$ para mallas cuadradas

$n_c = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares

$n_d = 1$ para mallas cuadradas, rectangulares y tipo L

L_C : Longitud total del conductor horizontal en la malla [m]

L_P : Longitud periférica en la malla [m]

A : Área de la malla [m²]

L_x : Máxima longitud total de la malla en dirección x [m]

L_y : Máxima longitud total de la malla en dirección y [m]

D_m : Distancia máxima entre cualquiera de dos puntos en la malla [m]

$$K_i = 0.644 + 0.148 \times n$$

Ecuación 20 Factor de irregularidad K_i

$$L_M = L_C + L_R$$

Ecuación 21 Longitud efectiva enterrada

Para nuestro diseño, tenemos $L_C=60$ m y la periferia de la malla nos da $L_P = 20$ m sustituimos y calculamos la Ecuación 19:

$$n_a = \frac{2 \times 60}{20}$$

$$n_a = 6$$

Ya que nuestra malla es de geometría cuadrada:

$$n_b = n_c = n_d = 1$$

Con esto calculamos en la Ecuación 18:

$$n = 6 \times 1 \times 1 \times 1$$

$$\mathbf{n = 6}$$

Para nuestro diseño, la profundidad de la malla es de $h= 0.5$ m por lo que se sustituye y se calcula la Ecuación 17:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}}$$

$$\mathbf{K_h = 1.2247}$$

Con el dato del factor n calculado, sustituimos en la Ecuación 16 y en la Ecuación 20:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times 6)^{\frac{2}{6}}}$$

$$K_{ii} = \mathbf{0.4367}$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \times 6$$

$$K_i = \mathbf{0.5718}$$

Con esto sustituimos y calculamos el factor K_m de la Ecuación 15:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left[\ln \left[\frac{1^2}{16 \times 0.5 \times 0.0105} + \frac{(1 + 2 \times 0.5)^2}{8 \times 1 \times 0.5} - \frac{0.5}{4 \times 0.0105} \right] + \frac{0.4367}{1.2247} \times \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times 6 - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = \mathbf{0.51108}$$

En nuestro caso, al no tener varillas de tierra en nuestro diseño, se calcula la Ecuación 21:

$$L_M = \mathbf{60}$$

Con ello es posible calcular la tensión de malla con la Ecuación 14:

$$E_m = \frac{82.3 \times 0.51108 \times 0.5718 \times 3235.21}{60}$$

$$E_m = \mathbf{1296.83 V}$$

3.1.9 Comparación de tensión de malla y tensión de contacto

Se realiza la comparación de los parámetros en la Tabla 16:

Tabla 16 Comparativa de tensión de malla y tensión máxima de contacto

E_m	$E_{contacto}$
1296.83 V	2945.71 V

Observamos que el valor de la tensión de malla es menor a la tensión de contacto, por lo que continuamos el análisis con el siguiente paso de la metodología.

3.1.10 Comparación de la tensión de paso de la malla propuesta y la tensión máxima de paso permisible

Requerimos de calcular la tensión de paso de nuestra malla propuesta conforme a la Ecuación 22:

$$E_S = \frac{\rho \times K_S \times K_i \times I_G}{L_S}$$

Ecuación 22 Tensión de paso de la malla propuesta [10]

En donde:

K_S : Factor de espaciamento para la tensión de paso

L_S : Longitud efectiva de la tensión de paso, $L_C + L_R$ [m]

Para mallas con o sin varillas la longitud efectiva del conductor L_S se calcula como indica la Ecuación 23:

$$L_S = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R$$

Ecuación 23 Longitud efectiva del conductor para la tensión de paso [10]

La tensión de paso máxima se asume se da a una distancia de 1 metro desde la malla hacia afuera de su perímetro en el ángulo cortando la esquina de la malla. Para profundidades de malla entre $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$, se calcula K_S como la

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

Ecuación 24 Factor de espaciamento para la tensión de paso [10]

Con los datos de nuestro diseño de malla, sustituimos en la Ecuación 24:

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{1 + 0.5} + \frac{1}{1} (1 - 0.5^{6-2}) \right]$$

$$K_S = 0.8289$$

También sustituimos para calcular L_S en la Ecuación 23:

$$L_S = 0.75 \times 60 + 0.85 \times (0)$$

$$L_S = 45 \text{ m}$$

Podemos ahora calcular la tensión de paso de la malla con la Ecuación 22:

$$E_S = \frac{82.3 \times 0.8289 \times 0.5718 \times 2479.79}{45}$$

$$E_S = 2149.55 \text{ V}$$

Comparamos con la Tabla 17 los valores de tensión de paso:

Tabla 17 Comparativa de tensión de paso de malla y tensión máxima permisible

E_s	E_{paso}
2149.55 V	11116.76 V

Observamos que el valor de la tensión de paso de la malla propuesta es menor a la tensión máxima de paso permisible, por lo que podemos concluir con el análisis dado se satisface la condición de seguridad.

3.1.5.7 Resultados del diseño del electrodo del sistema de tierras

Se presenta en la Tabla 18 los resultados del diseño del Sistema de Puesta a Tierra de la planta.

Tabla 18 Resultados del diseño de Sistema de Puesta a Tierra.

Parámetro	Resultado	Observaciones
Resistencia de puesta a tierra	7.59 Ω	
Geometría del electrodo	Malla de 5 x 5 metros	
Calibre de conductores del electrodo	2/0	Sobredimensionado para optimizar resistencia mecánica y térmica
Conductores verticales tipo varilla	No se emplearon	Debido a la respuesta de resistividad del terreno de tipo creciente a la profundidad.
Capa superficial sobre electrodo	Espesor de 0.2 metros de granito lavado de 2 a 4" con $\rho=10000 \Omega \times m$	
Tensión de paso máximo	11,116.8 V	
Tensión de contacto máximo	2,945.71 V	
GPR	18821.63 V	
Tensión de paso del diseño de malla	2149.55 V	
Tensión de malla propuesta	1296.83 V	

3.2 Sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas

Un sistema de protección contra tormentas eléctricas (SPTE) reduce el riesgo de daño que puede provocar un rayo. Sin embargo, su aplicación no garantiza una protección absoluta a personas, estructuras u objetos [9].

El conocimiento actual de la física de la descarga eléctrica atmosférica a tierra establece que un SPTE no tiene la capacidad de influir o evitar los procesos de formación del rayo o descarga eléctrica a tierra de origen atmosférico [9].

El SPTE este compuesta por un conjunto de elementos utilizados para proteger un espacio contra los efectos de las tormentas eléctricas, tanto en un sistema externo como de un sistema interno de protección [9].

3.2.1 Sistema Externo de protección contra tormentas eléctricas

Existen 3 partes fundamentales para el diseño del SEPTE:

1. Valoración del riesgo
2. Diseño del sistema externo de protección
3. Diseño del sistema interno de protección

El riesgo se calcula como:

$$\text{Riesgo} = \text{Gravedad} \times \text{Exposición}$$

Se determina principalmente la densidad de descargas a tierra (DDT) en este caso representa la gravedad, y el área de influencia en función de la instalación que representará la exposición. Con esto podrá ser posible calcular un riesgo por incidencia de rayos en tormentas eléctricas [9].

La norma NMX-J-549 indica el siguiente procedimiento en la Figura 27:

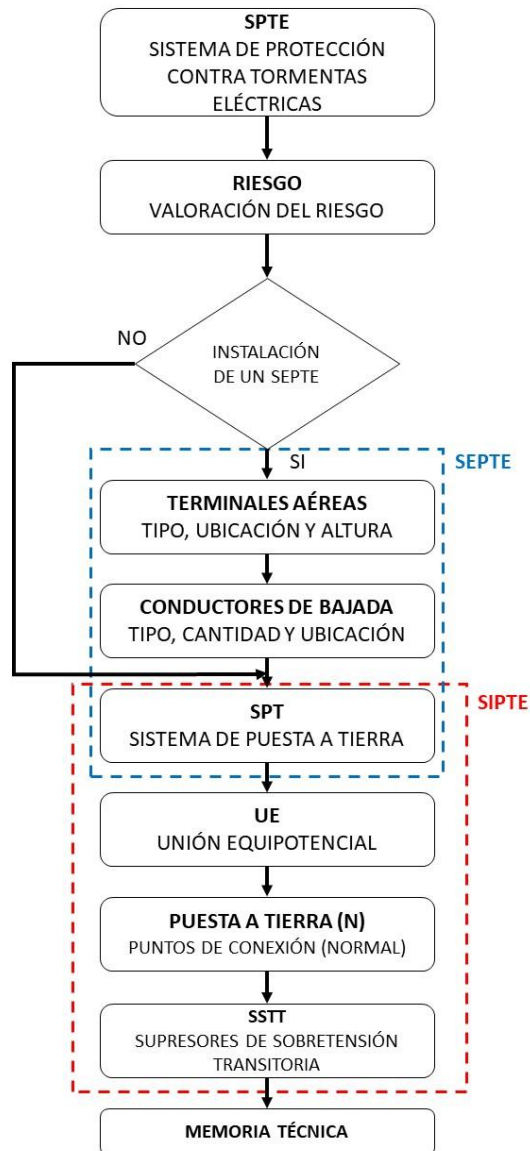


Figura 27 Procedimiento SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA TORMENTAS ELÉCTRICAS tomado de [9]

3.2.1.1 Valoración del riesgo

Para la valoración del riesgo se ingresan los datos del cuestionario de la NMX-J-549-ANCE-2005 el cual se presenta en la Figura 28.

**EVALUACIÓN DE RIESGO DE DAÑOS POR TORMENTAS ELÉCTRICAS
NORMA NMX-J-549**

La siguiente evaluación aplica para estructuras y edificios con características de:

- | | |
|------------------------------------|---|
| a) Uso Común | d) De cualquier altura |
| b) Con riesgo de fuego y explosión | e) Torres de telecomunicaciones con equipos y antenas asociadas |
| c) Con equipo sensible | |

I. Datos Generales de la Infraestructura

Nombre:	Deshidratador Geotérmico de Alimentos de Nayarit
Dirección:	Carretera #15 Chapalilla - Compostela S/N San Pedro Lagunillas, Nayarit
Área construida:	1000 m ²
Giro comercial:	Agro-Industria procesamiento de alimentos

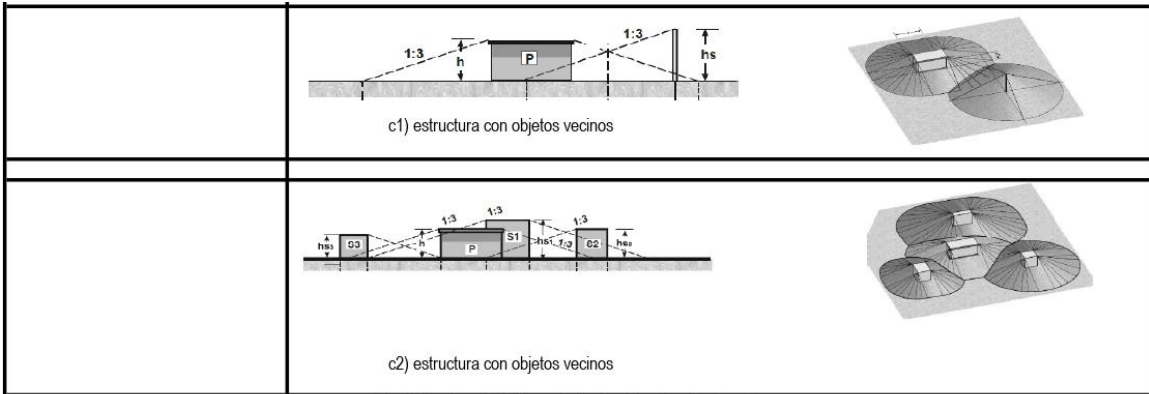
II. Características físicas de la Infraestructura

Fotografía de la estructura o edificio



Seleccione conforme a sus características:

	<p>a1) Terreno plano y techo plano</p>
	<p>a2) Terreno plano y techo dos aguas</p>
	<p>b1) Estructura aislada ubicada en terreno irregular</p>
	<p>b2) Estructura aislada ubicada en terreno irregular</p>
X	<p>b3) Estructura aislada ubicada en terreno irregular</p>
	<p>b4) Estructura aislada ubicada en terreno irregular</p> <p align="right">h = h_e</p>

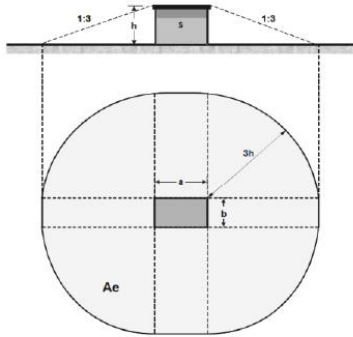


III. Cálculo del Área Equivalente de Captura

Conforme a su selección anterior, indique las dimensiones solicitadas:

a)

Estructura aislada ubicada en terreno plano, con techo plano



a = _____ m
 b = _____ m
 h = _____ m

$$A_e = ab + 6h(a + b) + 9\pi h^2$$

$$A_e = \underline{\hspace{2cm}} \text{ 0 } m^2$$

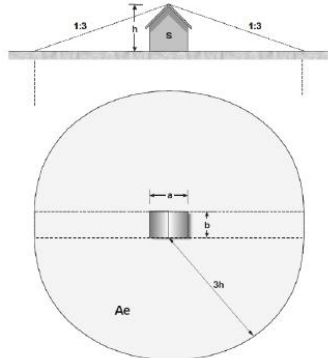
En donde:

- Ae: Área equivalente de captura en m^2
- a: Longitud de un lado de la estructura en m
- b: Longitud del otro lado de la estructura en m
- h: Altura de la estructura

NOTA - La altura h total de la estructura o edificio a proteger debe considerar la altura de todos los equipos

a)

Estructura aislada ubicada en terreno plano, con techo de dos aguas



a = _____ m
 b = _____ m
 h = _____ m

$$A_e = ab + 6hb + 9\pi h^2$$

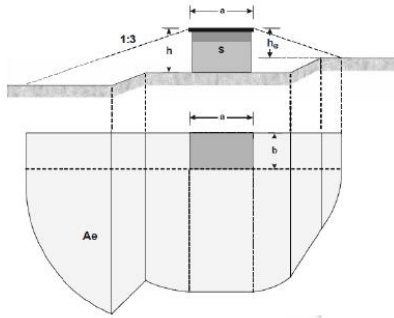
$$A_e = \underline{\hspace{2cm}} \text{ 0 } m^2$$

En donde:

- Ae: Área equivalente de captura en m^2
- a: Longitud de un lado de la estructura en m
- b: Longitud del otro lado de la estructura en m
- h: Altura de la estructura en m

NOTA - La altura h total de la estructura o edificio a proteger debe considerar la altura de todos los equipos

b) Estructura aislada ubicada en terreno irregular



$a = \underline{\quad 33 \quad} \text{ m}$
 $b = \underline{\quad 42 \quad} \text{ m}$
 $h = \underline{\quad 6 \quad} \text{ m}$
 $h_e = \underline{\quad -1.7 \quad} \text{ m}$

$A_e = ab + 6h_e(a + b) + 9\pi h_e^2$

$A_e = \underline{\quad 702.71 \quad} \text{ m}^2$

Ae: Área equivalente de captura en m^2

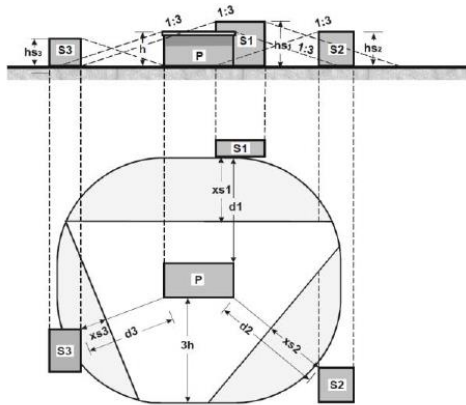
a: Longitud de un lado de la estructura en m

b: Longitud del otro lado de la estructura en m

h: Altura de la estructura en m

he: Altura equivalente en el terreno irregular en m

c) Estructura con otras adyacentes



$h_s = \underline{\quad \quad \quad} \text{ m}$
 $h = \underline{\quad \quad \quad} \text{ m}$
 $d = \underline{\quad \quad \quad} \text{ m}$

$X_s = \frac{d + 3(h_s - h)}{2}$

$X_s = \underline{\quad 0 \quad} \text{ m}$

hs: Altura del objeto vecino

h: Altura de la estructura

d: Distancia horizontal entre la estructura y el objeto vecino

Ae se calcula mediante el área resultante en la intersección de las líneas perpendiculares a la línea de trazado entre el objeto a protegerse y el objeto vecino a una distancia equivalente

$A_e = \underline{\quad \quad \quad} \text{ m}^2$

III. Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes

De acuerdo con la Tabla 1 elija el tipo de estructura que corresponde:

Nd

Residencia 0.04

Granja 0.02

Tanques de agua 0.04

Edificio de servicio 0.02

Hospital, Asilo.. 0.02

Industria 0.01

Museos 0.02

Telecomunicaciones 0.02

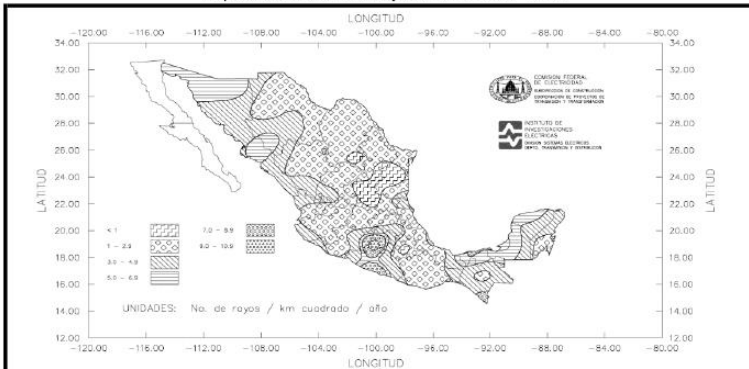
TABLA 1.- Frecuencia media anual permitida de rayos directos sobre estructuras comunes

Estructuras comunes	Efectos de las tormentas eléctricas	Frecuencia (Nd)
Residencia	Daño a instalación eléctrica, equipo y daños materiales a la estructura. Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra.	0,04
Granja	Riesgo principal de incendio y potenciales de paso. Riesgo secundario derivado de la pérdida de suministro eléctrico provocando posibles desperfectos por falla de controles de ventilación y de suministro de alimentos para animales.	0,02
Tanques de agua elevados: metálicos. Concreto con elementos metálicos salientes.	Daño limitado a objetos expuestos en el punto de incidencia del rayo o sobre su trayectoria a tierra, así como posibles daños al equipo de control de flujo de agua.	0,04
Edificios de servicios tales como: Aseguradoras, centros comerciales, aeropuertos, puertos marítimos, centros de espectáculos, escuelas, estacionamientos, centros deportivos, estaciones de autobuses, estaciones de trenes, estaciones de tren ligero o metropolitano.	Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0,02
Hospital Asilo Reclusorio	Falla de equipo de terapia intensiva. Daño a las instalaciones eléctricas y pánico. Falla de dispositivos de control, por ejemplo alarmas. Pérdida de enlaces de comunicación, falla de computadoras y pérdida de información.	0,02
Industria tales como: Máquinas herramientas, ensambladoras, textil, papelería, manufactura, almacenamiento no inflamable, fábrica de conductores, fábrica de electrodomésticos, armado equipo de cómputo, muebles, artefactos eléctricos, curtidurías, agrícola, cementeras, caleras, laboratorios y plantas bioquímicas, potabilizadoras.	Efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y pérdida de producción.	0,01
Museos y sitios arqueológicos	Pérdida de vestigios culturales irremplazables	0,02
Edificios de telecomunicaciones Véase nota	Interrupciones inaceptables, pérdidas por daños a la electrónica, altos costos de reparación y pérdidas por falta de continuidad de servicio.	0,02

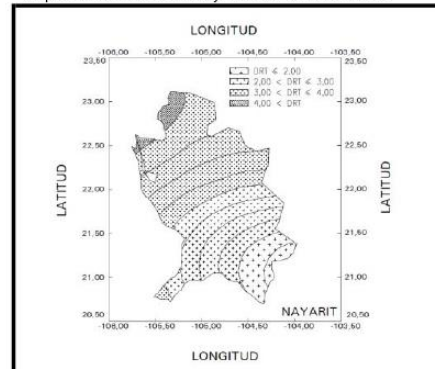
NOTAS
 1 Para cualquier estructura común debe evaluarse el nivel de riesgo en función de su localización, densidad, altura y área equivalente de captura, para decidir la protección.
 2 Para estructuras en zonas con densidad de rayos a tierra mayor a 2, y si el techo de la construcción es de material inflamable (madera o paja), debe instalarse un SEPTE.

IV. Densidad de Rayos a Tierra

Mapa de isodensidad de rayos a Tierra 1983 - 1993



Mapa de isodensidad de rayos a Tierra en la Entidad



DRT [Rayos/km2/año] = 4

V. Frecuencia de rayos directos a una estructura	
$N_o = N_g \times A_e \times 10^{-6}$	<p>No = <u>0.002810852</u></p> <p>Ng = <u>4</u> [Rayos/km2/año]</p> <p>Ae = <u>702.71</u> [m2]</p> <p>No: Frecuencia anual promedio de rayos directos a una estructura</p> <p>Ng: Densidad promedio anual de rayos a tierra por km2 (DRT)</p> <p>Ae: Área equivalente de captura de la estructura</p>
VI. Evaluación de la necesidad de protección	
<p>Nd: <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="0.01"/></p> <p>No: <input style="width: 50px; text-align: center;" type="text" value="0.002811"/></p>	<p>La infraestructura requiere de protección SEPTE: Si <input checked="" type="checkbox"/> (No ≤ Nd)</p> <p style="margin-left: 100px;">No / Optativo <input type="checkbox"/> (No > Nd)</p>

Figura 28 Evaluación del riesgo de daños por tormentas eléctricas

En el apartado VI del documento se concluye que si es necesario realizar el SEPTE de la planta DGA de Nayarit.

Para determinar el nivel de protección, la norma mexicana NMX (tabla no. 2 dentro de la norma) nos indica que para una estructura común tipo Industria tal como: maquinas, herramientas, ensambladoras, agrícola, laboratorios, etc. Los efectos de las tormentas eléctricas pueden ser de efectos diversos dependientes del contenido, variando desde menor hasta inaceptable y en pérdida de producción. Por esto, se recomienda implementar un Nivel de Protección I o II. Como indicación se especifica que el Nivel I es el de mayor protección y el de Nivel IV es el de menor protección.

El Nivel de protección para la planta DGA de Nayarit será el Nivel II, considerando el mínimo recomendable y tomado la decisión para minimizar el aspecto económico de la inversión a ejecutar.

3.2.1.2 Diseño del sistema externo de protección contra tormentas eléctricas

Los elementos que conforman a un SEPTE son:

1. Terminales aéreas
2. Conductores de bajada
3. Sistema de puesta a tierra

Para la determinación de la cantidad de terminales aéreas se empleará el método de la esfera rodante.

3.2.1.2.1 Método de la esfera rodante y terminales aéreas

El método de la esfera rodante consiste en rodar una esfera imaginaria sobre tierra, alrededor y por encima de la instalación a proteger o cualquier otro objeto en contacto con la tierra, capaz de actuar como un punto de intercepción de la corriente de rayo. La esfera imaginaria debe rodarse (desde el nivel de tierra) hacia la estructura a proteger e instalar una terminal aérea en el primer punto de contacto con la estructura [9].

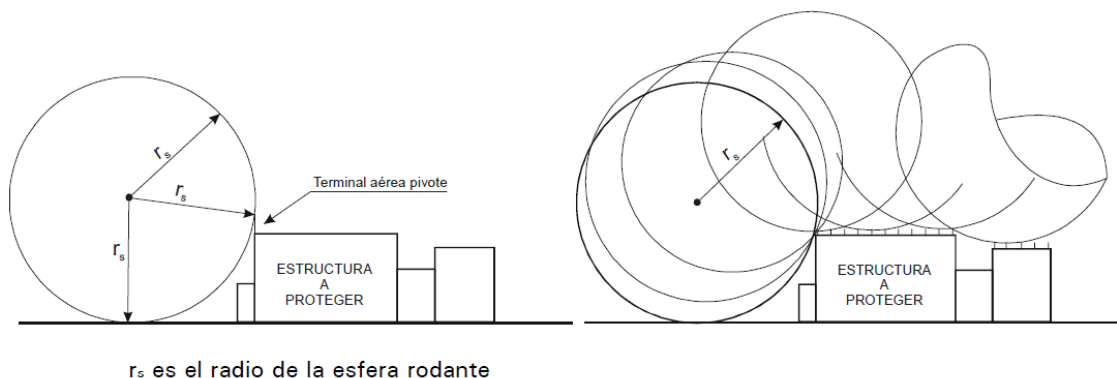


Figura 29 Método de la esfera rodante [9]

Esta primera terminal aérea se conoce como pivote, cuya altura debe ser suficiente para que la esfera no toque la estructura cuando ésta se apoye sobre tierra y sobre la punta de la terminal aérea pivote.

Una vez especificado el primer punto de sacrificio para la corriente de rayo, debe rodarse la esfera por encima de la terminal aérea pivote y hacia el techo de la estructura e instalarse una terminal aérea de intercepción en todos aquellos puntos donde la esfera imaginaria toque la estructura o edificio a proteger. Este proceso debe mantenerse hasta cubrir la totalidad del edificio o estructura a proteger. El espacio comprendido bajo el rodamiento de la esfera representa el volumen protegido.

Por su característica volumétrica, el método de la esfera rodante puede aplicarse sobre cualquier estructura. El radio de la esfera rodante r_s se indica en la Tabla 19. Este radio se selecciona de acuerdo con el nivel de protección del SEPTE.

Tabla 19 Altura de las terminales aéreas verticales de acuerdo con el nivel de protección para el método de la esfera rodante [9]

Nivel de protección	Radio de la esfera rodante r_s y su valor de corriente de rayo i		Altura de la terminal aérea a partir del plano a proteger (h)
	r_s [m]	i [kA]	[m]
I	20	3	≤ 20
II	30	6	≤ 30
III	45	10	≤ 45
IV	60	16	≤ 60

La corriente i [kA] representa el valor mínimo al cual el nivel de protección ofrece una protección eficiente.

Tabla 20 Probabilidad de incidencia del rayo de las corrientes de rayo [9]

1% de los rayos exceden los 200 kA
10% de los rayos exceden los 80 kA
50% de los rayos exceden los 28 kA
90% de los rayos exceden los 8 kA
98% de los rayos exceden los 3 kA

Tabla 21 Eficiencia del SEPTE de acuerdo con el nivel de protección [9]

<i>Nivel de protección</i>	<i>Eficiencia del SEPTE</i>
I	98%
II	95%
III	90%
IV	80%

En la evaluación de la protección con el método de la esfera rodante, la altura máxima efectiva de la terminal aérea a partir del plano a proteger es igual al radio utilizado para la esfera rodante.

Para la resolución por método de esfera rodante, se requiere el nivel de protección, que en este caso se ha determinado el Nivel II y esto nos indica un radio de la esfera de 30m.

Se propone la primera terminal aérea en la planta para efectuar las revisiones de los puntos donde se tendrá que considerar terminales aéreas en el techo de la planta como se observa en la Figura 30. La longitud de la terminal aérea desde el punto de instalación es de 2 metros.

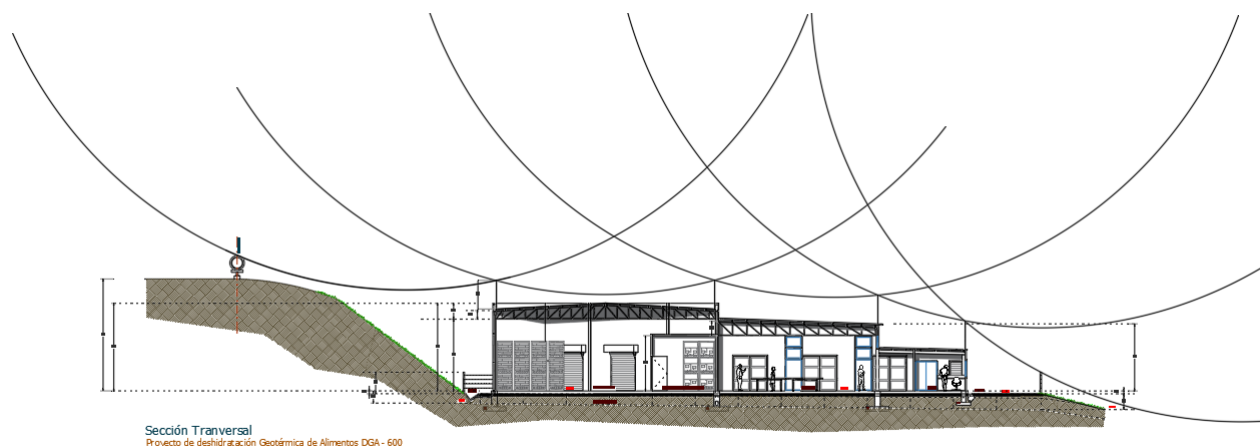


Figura 30 Propuesta de terminales aéreas en sección transversal de la planta con radio de 30m Nivel II de protección

La distancia entre pararrayos máxima en el ejercicio es de 15 m para satisfacer la ausencia de contacto en la estructura protegida y con terminales aéreas con longitud de 2 metros desde el punto

de instalación en la estructura. Se realizan las mediciones en vista de planta del plano arquitectónico y se proponen puntos de localización de las terminales aéreas, como se indica en la Figura 31.

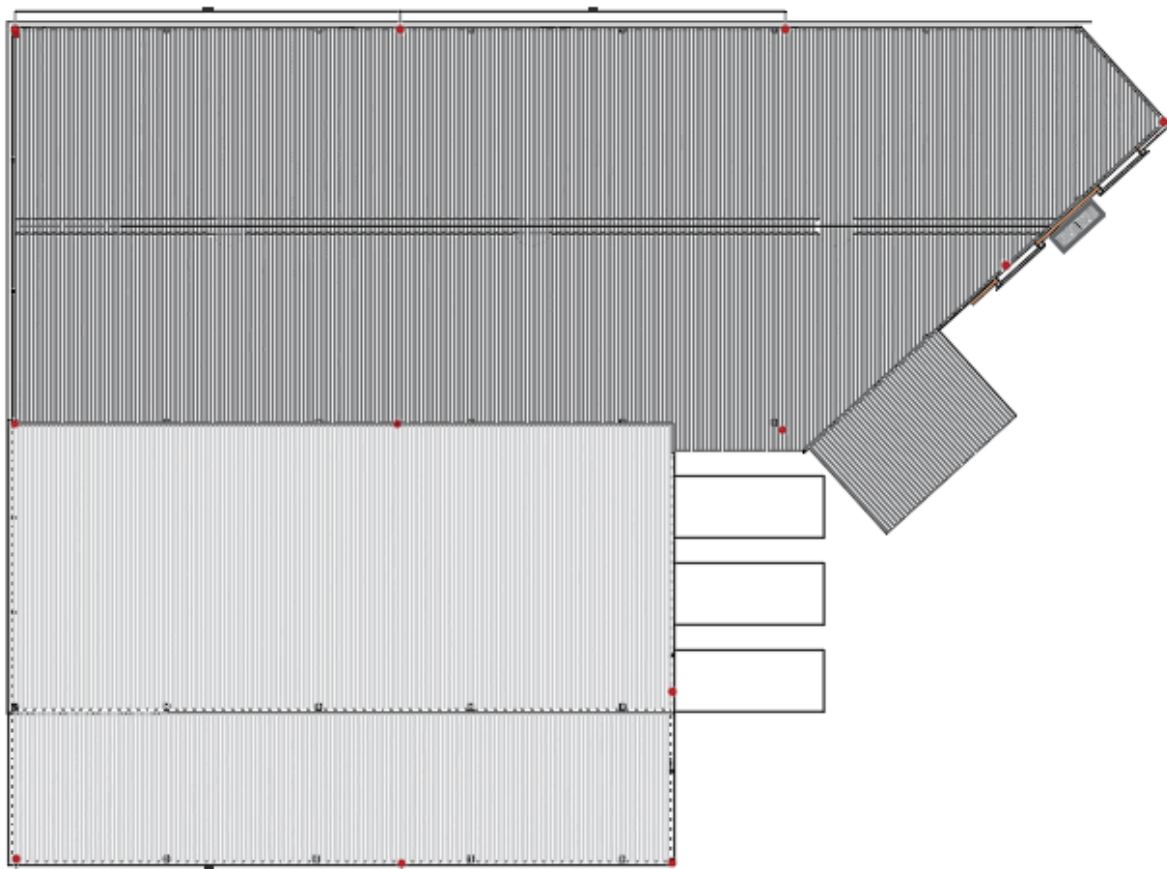


Figura 31 Vista en planta con localización de 14 terminales aéreas verticales en color rojo (pararrayos) con distancia promedio o menor de 15m entre ellas

Como dato de entrada para la memoria de cálculo se tiene un perímetro de la planta de 150 metros.

3.2.1.2.2 Conductores bajantes del SEPTÉ

Para el cálculo de la separación promedio de las bajantes, nos apegamos a la norma NMX-J-549, como se indica en la Tabla 22.

Tabla 22 Distancia promedio de separación entre los conductores de bajada contiguo de acuerdo con el nivel de protección [9]

<i>Nivel de protección</i>	<i>Distancia promedio [m]</i>
I	10
II	15
III	20
IV	25

En este caso corresponde la distancia promedio de 15 metros para un nivel de protección II y en el ejercicio del método de la esfera rodante, se encontró una distancia promedio de 15m adecuadas para lograr la protección del elemento protegido, por lo que coincide con la separación entre bajantes.

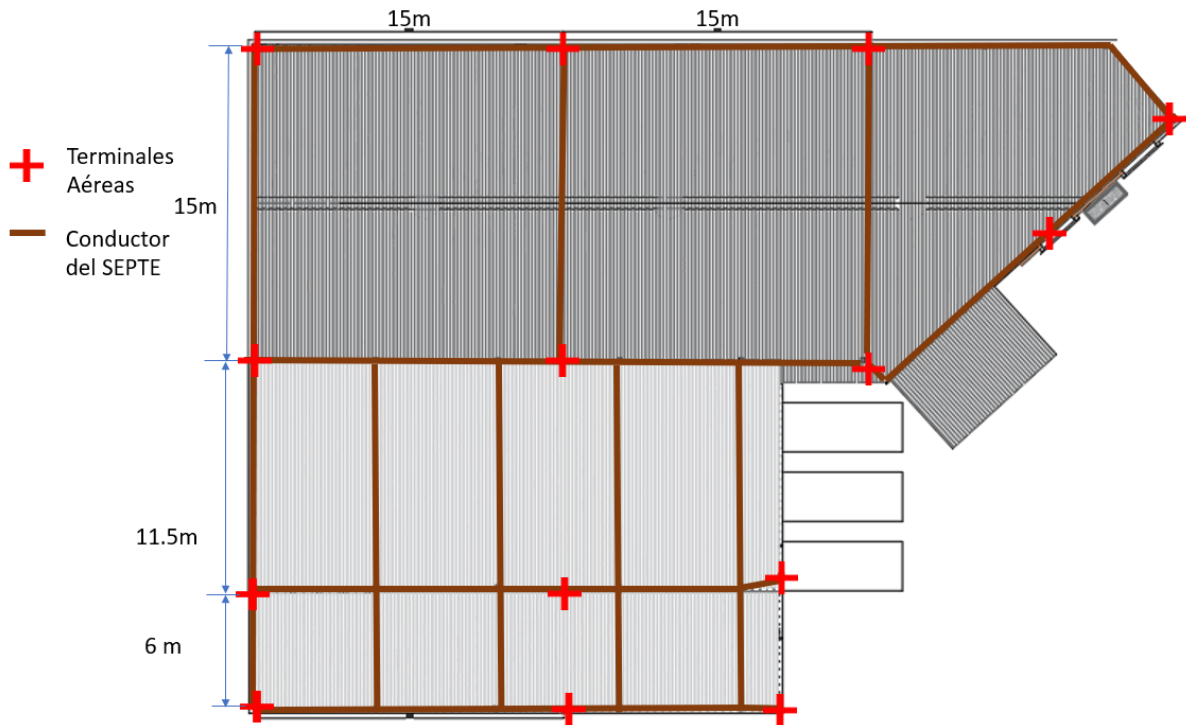


Figura 32 Terminales aéreas interconectadas con conductor SEPTE de estructura metálica estructural natural.

Para el cálculo del número de bajantes, empleamos la Ecuación 25.

$$\# \text{ Bajantes} = \frac{P}{S}$$

Ecuación 25 No. de bajantes del SEPTE

P: Perímetro de la infraestructura a proteger [m]

S: Separación promedio $\sim \lambda/20$ (Longitud de onda rayo considerando la banda de frecuencias de rayo de 200kHz-2MHz) [m]

$$\# \text{ Bajantes} = \frac{150 \text{ m}}{15 \text{ m}} = 10 \text{ bajantes}$$

Las bajantes que se emplearán se muestran en la Figura 33 serán los propios conductores de bajada naturales del acero estructural como podemos observar en el proyecto y dentro de norma NMX-J-549.



Figura 33 a) Acero estructural de planta DGA DE NAYARIT que se emplearán como bajantes naturales, b) Detalle de soldadura en estructuras para un mejor acoplamiento eléctrico

Las terminales aéreas estarán acopladas con un mínimo de dos trayectorias cada una, para cumplir con la norma, y se conectarán a las columnas que actúan como bajantes naturales de la planta.

En la vista de planta se indican a continuación las bajantes del sistema.

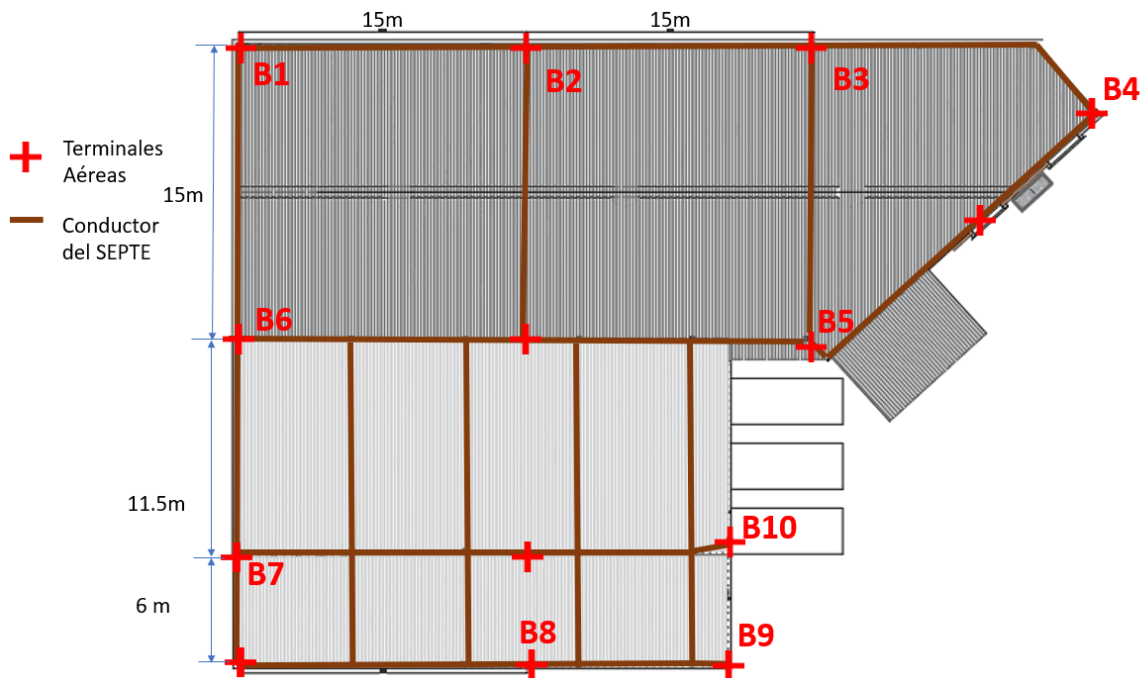


Figura 34 Bajantes del sistema localizadas en acero estructural de la planta

3.2.1.2.3 Sistema de puesta a tierra (SPT)

Para el sistema de protección contra tormentas eléctricas debe utilizarse un SPT que minimice los potenciales de paso y contacto para reducir riesgos de electrocución y la formación de arcos laterales entre partes metálicas que pongan en peligro al personal y al equipo en la trayectoria de los conductores de bajada.

Debido a que se tiene equipo de cómputo y de control considerado como sistemas electrónicos sensibles, el diseño del SPT se realizará de manera anillada. La separación será de 1 metro y se instalará a 0.6 m de profundidad en la periferia de la planta como se indica en la Figura 35.

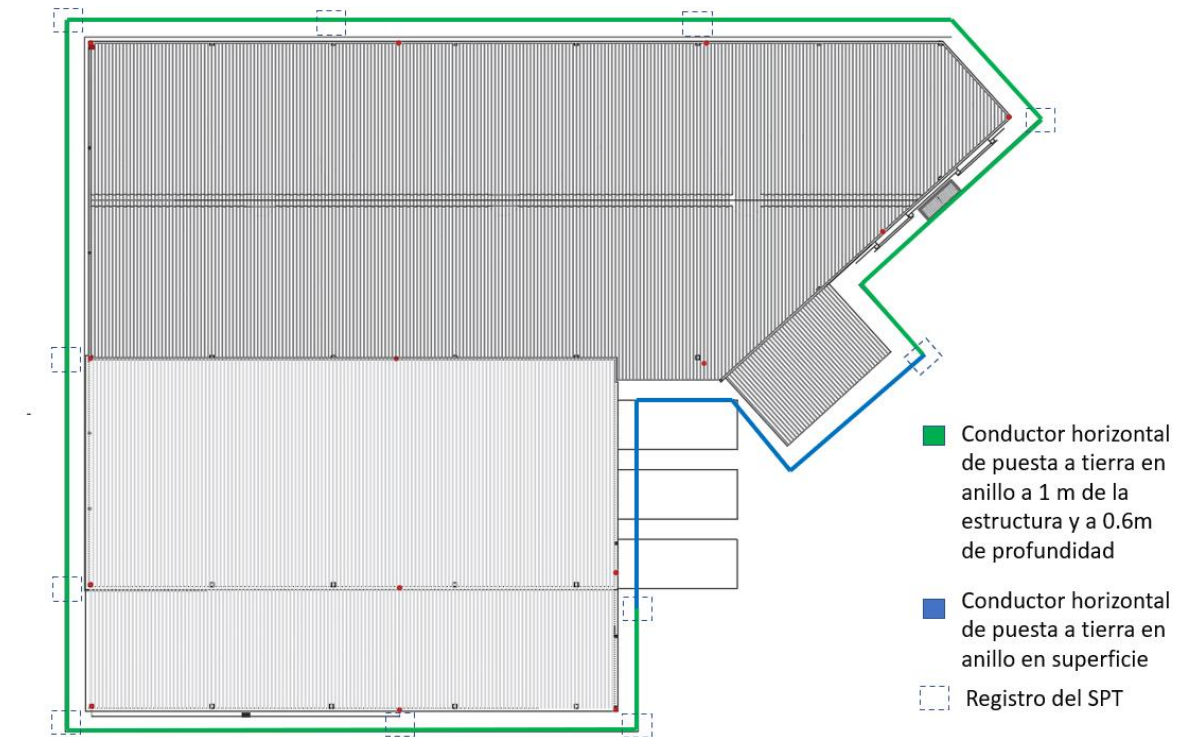


Figura 35 Sistema de Puesta a Tierra del SEPTE

Se contabilizan 11 registros para electrodos de puesta a tierra, donde se tendrán las uniones de tipo exotérmica con el cable del bajante instalado a la columna de acero estructural como lo muestra la Figura 36.

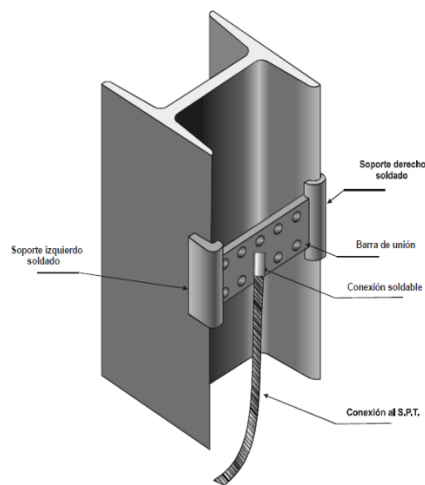


Figura 36 Detalle típico de conexión al acero de refuerzo (viga de acero). Tomado de [9]

Se instalará 1 electrodo verticales de longitud de 3 m por cada registro asociado a una bajante, ya que el diseño al ser tipo anillo, se interconectará a través de un conductor horizontal localizado a 0.6m del nivel de suelo y será unido con método exotérmico en los 11 registros proyectados. Los registros tendrán una instalación como se muestra en la Figura 37.

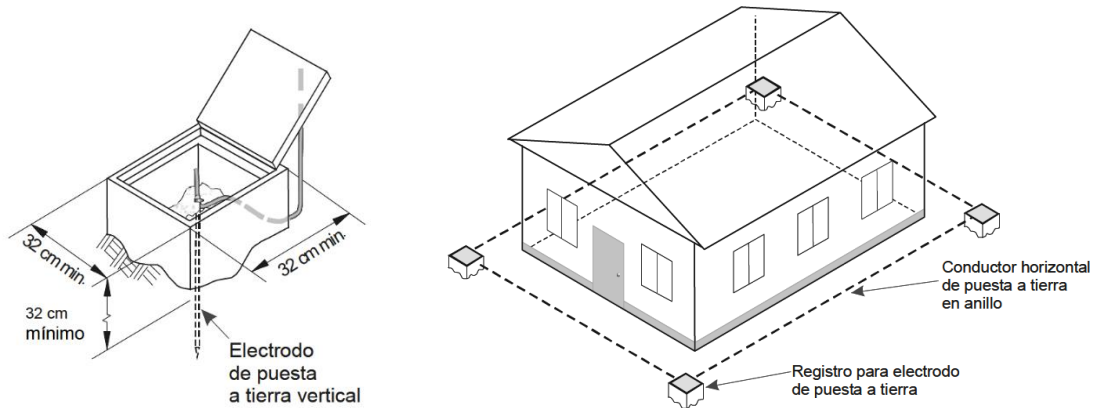


Figura 37 Detalle típico de registro para electrodo de puesta a tierra. Tomado de [9]

Podemos observar que, en cada registro asociado a la bajante, tendremos un arreglo como se observa en la Figura 38.

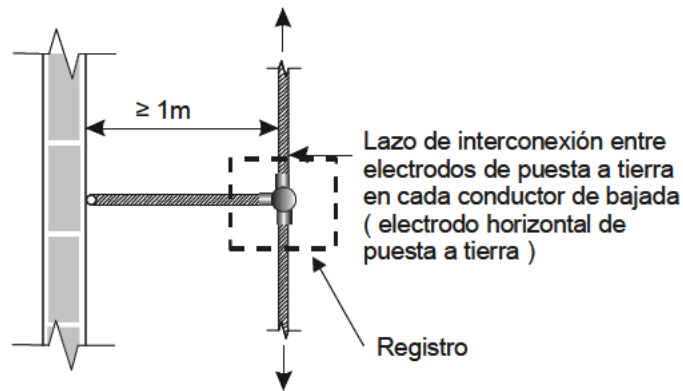


Figura 38 Vista de planta del arreglo para formar el electrodo de puesta a tierra que conecta a cada conductor de bajada del SEPTE. Tomado de [9]

Para el cálculo de la resistencia del SPT, se empleará la formula simplificada de Sverak indicada en la Ecuación 10 la cual considera los datos de medición de resistividad del suelo del SPTE.

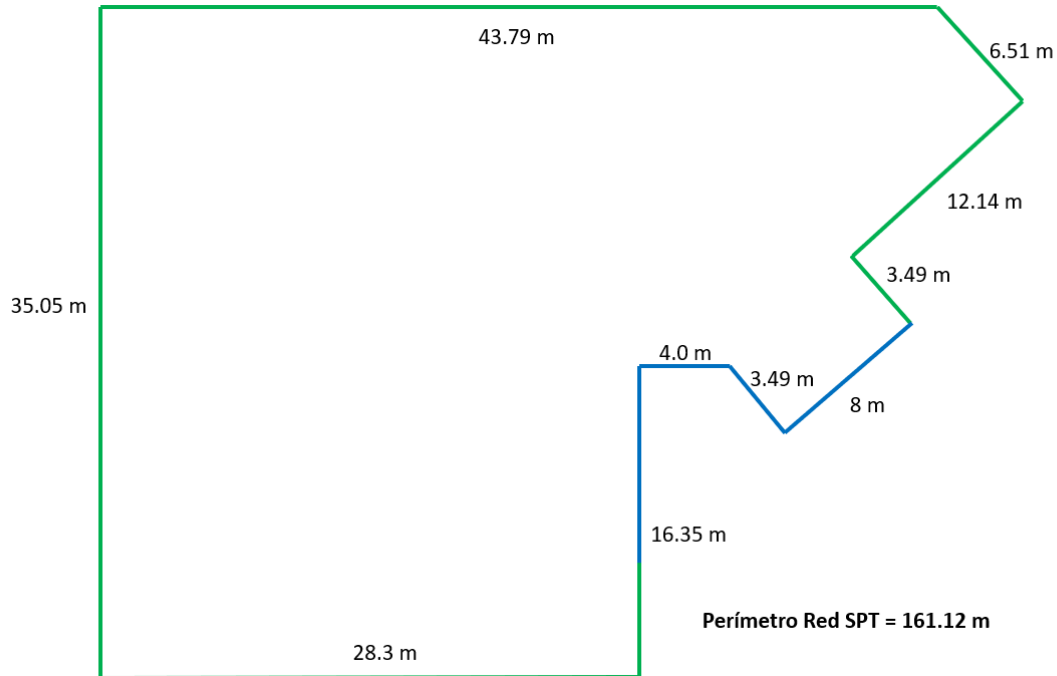


Figura 39 Perímetro del SPT del SEPTÉ de la planta

$$L = 161.12 + (5 \times 3) = 176.12 \text{ m}$$

$$A = (28.3 \times 35.05) + (16.1 \times 35.05) = 1556.22 \text{ m}^2$$

$$h = 0.6 \text{ m}$$

$$\rho = 82.3 \Omega \times \text{m}$$

Sustituyendo en la Ecuación 10:

$$R = 82.3 \left[\frac{1}{176.12} + \frac{1}{\sqrt{20 (1556.22)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.6 \sqrt{\frac{20}{(1556.22)}}} \right) \right] \Omega$$

$$\mathbf{R = 1.37 \Omega}$$

En resumen, podemos enlistar los elementos que conforman el SEPTE en la Tabla 23.

Tabla 23 Lista de componentes del SEPTE de la planta

<i>Item</i>	<i>Elemento</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Dimensión</i>	<i>Especificación</i>	<i>Observaciones</i>
1	Terminal Aérea L= 2 metros	14	NA	Acero inox. 50mm ²	
2	Conductor bajante del SEPTE	10	Existente		Existente naturales acero estructural
3	Conductor de bajante a Terminal Aérea	14	3 m	Cable aluminio 25mm ²	Conexión atornillada
4	Electrodo vertical	10	3 m	Pica de 18 mm de diámetro acero galvanizado	Instalados en cada registro asociado a una bajante
5	Electrodo horizontal	1	162 m	Cobre trenzado 53.5mm ²	130m Enterrado a 0.6 m y 32m en superficie
6	Registros de electrodos	11	32 x 32 x 32 cm		10 registros asociados a bajantes y 1 registro en una esquina de la planta
7	Conductor conexión al SPT	14	3 m	Cable cobre 50mm ²	Conexión soldada
8	Accesorios de montaje	1	Lote	Acero y sus aleaciones	
9	Soldadura exotérmica	1	Lote		Para unión de electrodo horizontal y vertical

En la Tabla 24 se presentan los resultados del diseño del SEPTE.

Tabla 24 Resultados del diseño del SEPTE

<i>Parámetro</i>	<i>Resultado</i>	<i>Observaciones</i>
Terminales aéreas	14 terminales aéreas	Instalación a 2 m del nivel de techo de la planta
Bajantes	10 de tipo natural conformadas por acero estructural	Se asocian registros en el suelo en donde se realizará la conexión con los electrodos verticales
Electrodos verticales	10 varillas de 18 mm diámetro	Conectados al electrodo horizontal por método exotérmico
Conexión de bajantes al SPT	Si, con una varilla por bajante e interconectadas a conductor horizontal tipo anillo	
Electrodo horizontal (Techo)	Si, de tipo natural conformado por acero estructural	Las terminales aéreas se interconectan en techo con el electrodo horizontal
Electrodo horizontal (SPT)	Si, instalado a 1 metro en la horizontal y a 0.6m de profundidad en forma de anillo	Se tiene un 19.8% instalado sobre la superficie.
Resistencia del Sistema de Puesta a Tierra del SEPTE	1.37 Ω	
Nivel de protección SEPTE	Nivel II	

3.2.2 Sistema Interno de protección contra tormentas eléctricas (SIPTE)

Los criterios de diseño para el SIPTE considerando las características de la planta se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25 Medidas de protección contra sobretensiones atmosféricas en el DGA de Nayarit

Medida de protección	Acciones para implementar	Observaciones
Sistema de puesta a tierra (Del SEPTE)	Tipo B: Arreglo que se integra por un anillo conductor externo a la estructura a proteger.	Calculado previamente en SEPTE
Red de conexión equipotencial (Estructuras para la referencia de señales)	Se considera el uso de malla electrosoldada de 6" x 6" en el área de control y en la oficina de la planta donde se usarán computadoras.	La malla electrosoldada será interconectada al SPT
Blindaje magnético y canalización de líneas de señales analógicas y de comunicación	Uso de canalización de acero galvanizado desde cuarto de control hasta los instrumentos de medición de señales, debidamente conectado al SPT. Las señales analógicas de corriente 4 a 20mA y de control de 0 a 24VDC y de comunicación serán transmitidas con conductores con malla de cobre estañado para un blindaje por efectos electromagnéticos.	Conforma parte de la red de conexión equipotencial.
Instalación de interfases de aislamiento	Se recomienda el uso de transformador de aislamiento relación de transformación 1:1 para el circuito del sistema de control y monitoreo localizado en cuarto de control.	Se debe realizar la conexión conforme a las instrucciones del fabricante.
Coordinación de supresores de sobretensión transitorias (Sistema Interno de protección contra tormentas eléctricas)	Implementación de supresores de sobretensión transitoria de modo coordinado para aminorar los efectos a las cargas sensibles.	Se realiza las acciones necesarias a continuación.

Los efectos que causa un rayo al interior de un edificio protegido con SEPTE son los generados por transitorios que crean diferencias de potencial, capaces de generar daño a los equipos eléctricos y electrónicos.

La manera de prevenir estas diferencias de potencial es creando una unión equipotencial UE de los objetos metálicos de una instalación. Con esto se puede controlar y dar seguridad a la instalación. La función de la unión equipotencial es reducir las diferencias de potencial generadas por rayo cuando éste incide en los elementos de intercepción de un SEPTTE, sobre o en las cercanías de la instalación o estructura. La diferencia de potencial puede producir la circulación de corrientes indeseables y la generación de arcos eléctricos con el riesgo de fuego y explosión en áreas peligrosas o bien algún daño físico tanto a los seres vivos como al equipo [9].

Una vez lograda la unión equipotencial a un punto común, debe realizarse una conexión entre dicho punto y la red del SPT de la instalación.

Para lograr la Unión Equipotencial, debemos emplear:

Conductores de unión. Los conductores se utilizan para interconectar dos partes metálicas. La longitud de estos conductores de unión debe ser lo más corta posible y la sección transversal debe cumplir con los valores indicados en la NMX-J-549.

Barras de unión. Las barras se utilizan para interconectar, mediante los conductores de unión, elementos metálicos de diversos sistemas (energía eléctrica, telecomunicaciones, gas, agua, etc.), así como los elementos estructurales metálicos de la instalación a un solo punto de unión.

Supresores de sobretensiones transitorias (SSTT). Estos supresores se utilizan en los dos casos siguientes: 1) para la protección de equipo eléctrico o electrónico sensible y 2) donde no se permite el uso de conductores de unión, como por ejemplo en la unión de dos piezas metálicas aisladas entre sí en tuberías de gas, y por restricciones del sistema de protección catódica.

Con el sistema externo de protección contra tormentas eléctricas establecimos una jaula de Faraday que nos permite proteger un elemento contra inducciones electromagnéticas generadas por los rayos por impacto directo o cercano al elemento protegido. En otras palabras, se han establecido las zonas de protección indicadas gráficamente en la Figura 40, considerando:

Z0A: Zona cero A es la zona que se encuentra fuera de la jaula de Faraday y que tiene probabilidad de impacto directo y de inducción de un rayo

Z0B: Zona cero B es la zona que se encuentra dentro de la protección creada por la jaula de Faraday en los límites de diseño de la esfera rodante y, por lo tanto, no hay probabilidad de impacto directo, sin embargo, no hay protección contra inducción electromagnética.

Z1: Zona 1 es la zona que se encuentra dentro de la jaula de Faraday y no hay probabilidad de impacto directo por rayo y el campo generado por efectos inductivos es atenuado.

Z2: En caso de existir la Zona 2 es una zona que se encuentra con una mayor atenuación del campo debido al aislamiento por una zona anidada dentro de la jaula de Faraday.

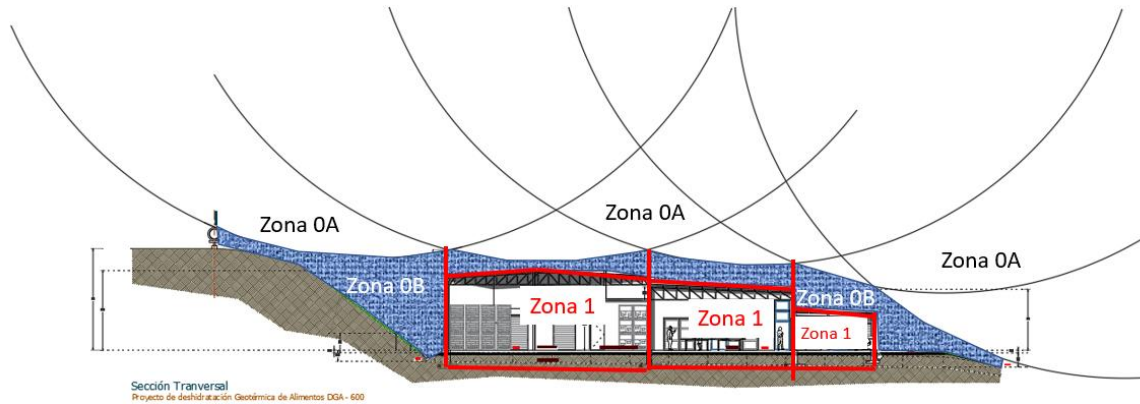


Figura 40 Zonas del SEPTE de la planta

Sin embargo, debemos de considerar que existen instalaciones como lo son la acometida eléctrica o alimentadores, que entran desde una zona Z_{0A} , hacia una zona Z_{0B} hasta la zona Z_1 . Este punto donde se ingresa a la jaula de Faraday, denominado punto frontera, es donde se debe de incorporar un sistema de protección adicional.

Logramos esto, incorporando dispositivos supresores de sobretensiones transitorias (SSTT).

Para la selección de la clase de supresores de transitorios, se tendrán las siguientes consideraciones:

Un rayo se encuentra en la banda de frecuencias de 200kHz a 1MHz, por lo que es considerado como un fenómeno de alta frecuencia.

Los conductores eléctricos en general, pueden ser modelados como una impedancia, conteniendo resistencia y reactancia inductivo y capacitiva como la Ecuación 26. En un análisis de alta frecuencia, podemos observar lo siguiente:

$$Z_L = X_L + X_C$$

Ecuación 26 Impedancia del conductor eléctrico

En donde:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Z_L : Impedancia de la línea [Ω]

X_L : Reactancia inductiva [Ω]

X_C : Reactancia capacitiva [Ω]

f : frecuencia [Hz]

C: Capacitancia [F]

L: Inductancia [H]

Por análisis podemos observar que el efecto de un rayo (de alta frecuencia) será influido principalmente por la reactancia inductiva del cable conductor, siendo su incremento de manera proporcional a su valor de L. Por el contrario, vemos que la reactancia capacitiva tenderá a un número muy pequeño en altas frecuencia.

Ahora, si evaluamos la tensión que se puede generar en ese cable, tendríamos:

$$V_L = I_{pico} 2\pi f L \approx L \frac{di}{dt} [V]$$

Como característica de referencia, la corriente de rayo varía a razón de $\frac{di}{dt} = 40 \frac{kA}{\mu s}$ [3]

Además, sabemos que el valor de inductancia de un cable está alrededor de $1 \frac{\mu H}{m}$

Esto nos indica que se pueden generar tensiones del rango de 20 y 40 kV/m de cable conductor por efectos de la circulación de corriente de rayo.

Para poder atenuar estos transitorios de sobretensión generados por el impacto por rayo o por inducción de un rayo, se deben seleccionar los supresores en función de las zonas de protección (Figura 42) y de las pruebas en laboratorio en forma de onda por impulso directo de 10/350 μs como se muestra en la Figura 41.

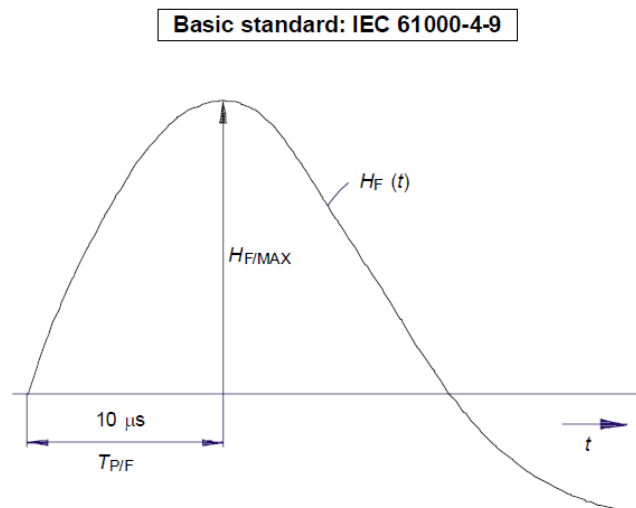


Figura 41 Forma de onda del primer impacto por rayo (10/350 μs)

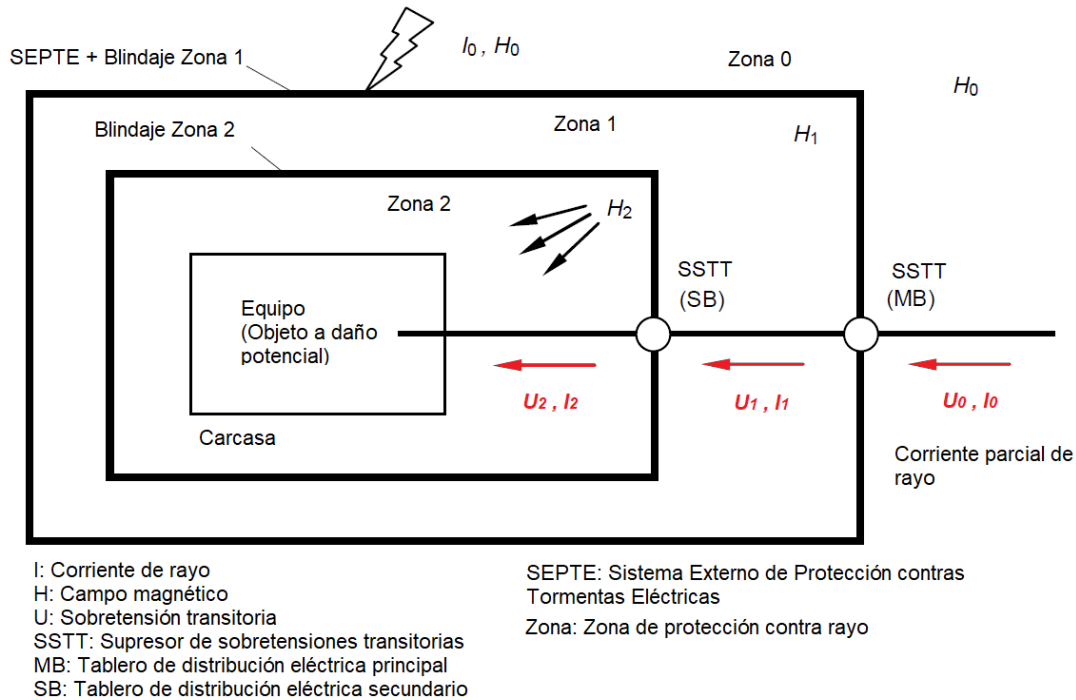


Figura 42 Implementación de protección con STT en tres zonas de protección y tensiones residuales. Tomado de [4]

Para la forma de onda 10/350 μ S, tendremos una clasificación como e indica en la Tabla 26 para los supresores de transitorios:

Tabla 26 Clases en función de forma de onda 10/350uS [9]

Impulso 10/350 μ S	Amplitud para nivel de protección contra rayos			
	I	II	III	IV
I_0	200 kA	150 kA	100 kA	50 kA
U_w	6 kV	4 kV	2.5 kV	1.5 kV

Donde U_w es la tensión máxima del supresor de transitorios, que en el equipo a proteger sería el NBAI e I_0 es la corriente por drenar por el impulso por rayo.

En la Figura 43 observamos la representación de los supresores de transitorios, los cuales están instalados desde la zona menos protegida hasta la más protegida, con el objetivo de atenuar al máximo los transitorios hasta el equipo más sensible como pueden ser computadoras, sistemas de monitoreo, PLC, etc.

Para ser eficaces en la protección, se debe de realizar una coordinación de aislamiento, en donde se selecciona el supresor de acuerdo con la tensión residual U_p , indicada en la Ecuación 27.

$$U_p \leq 0.8 NBAI$$

Ecuación 27 Tensión residual de salida del supresor

En donde:

U_P : Tensión residual de salida del supresor

NBAI: Nivel básico de aislamiento contra rayo del equipo.

Para la protección de los sistemas eléctricos, se implementará las clases de supresores en función a su zona de protección y con el objeto de atenuar las tensiones transitorias hasta un valor menor o igual al 80% al NBAI del equipo sensible.

De manera general, podemos conocer el nivel NBAI de los cables conductores que entran a la instalación, ya que es equivalente entre 8 a 10 veces la tensión máxima que soporta su aislamiento. De esto, en una instalación de baja tensión, sabemos que la tensión máxima que soporta el aislamiento es de 600V y tendríamos entonces un NBAI de entre 4.8 y 6 kV.

Para estos conductores implementaremos supresores clase I y serán conectados en el tablero principal lo más cercano a las terminales posibles y con longitud del cable de conexión hacia la fase de < 0.5m, con la finalidad de no incrementar la U_P . [2]

En la revisión de la planta se identifican los tableros eléctricos y se realizan las anotaciones de los puntos de entrada a la instalación, en donde se tendrá que considerar un supresor y en función a su U_w o NBAI.

Se presenta el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la planta DGA en la Figura 43. En la Figura 44 se indican la localización de SSTT.

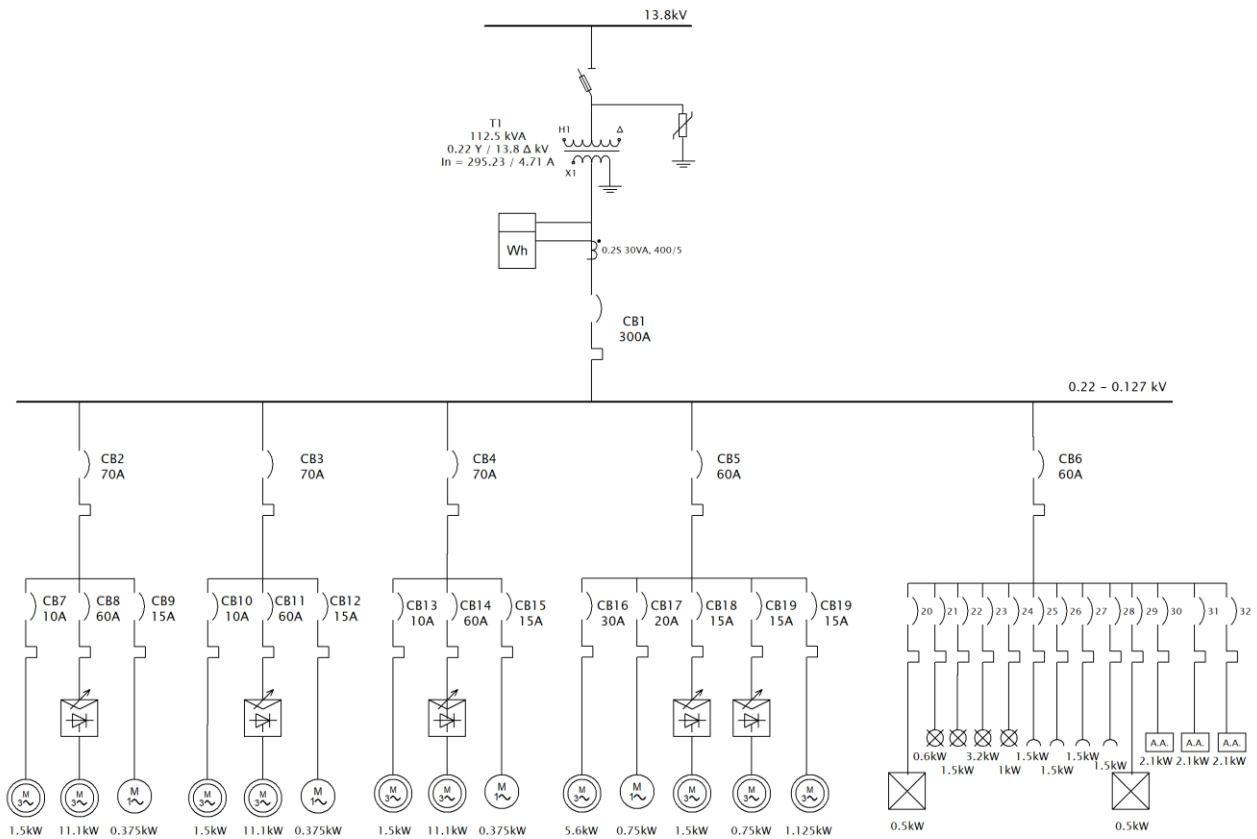


Figura 43 Diagrama Unifilar Sistema eléctrico de la planta

Se realizó la revisión de tableros para clasificar por localización en la zona de protección que requiere, por lo que se realizó la propuesta de supresores de sobretensión transitoria que se observa en la Figura 44.

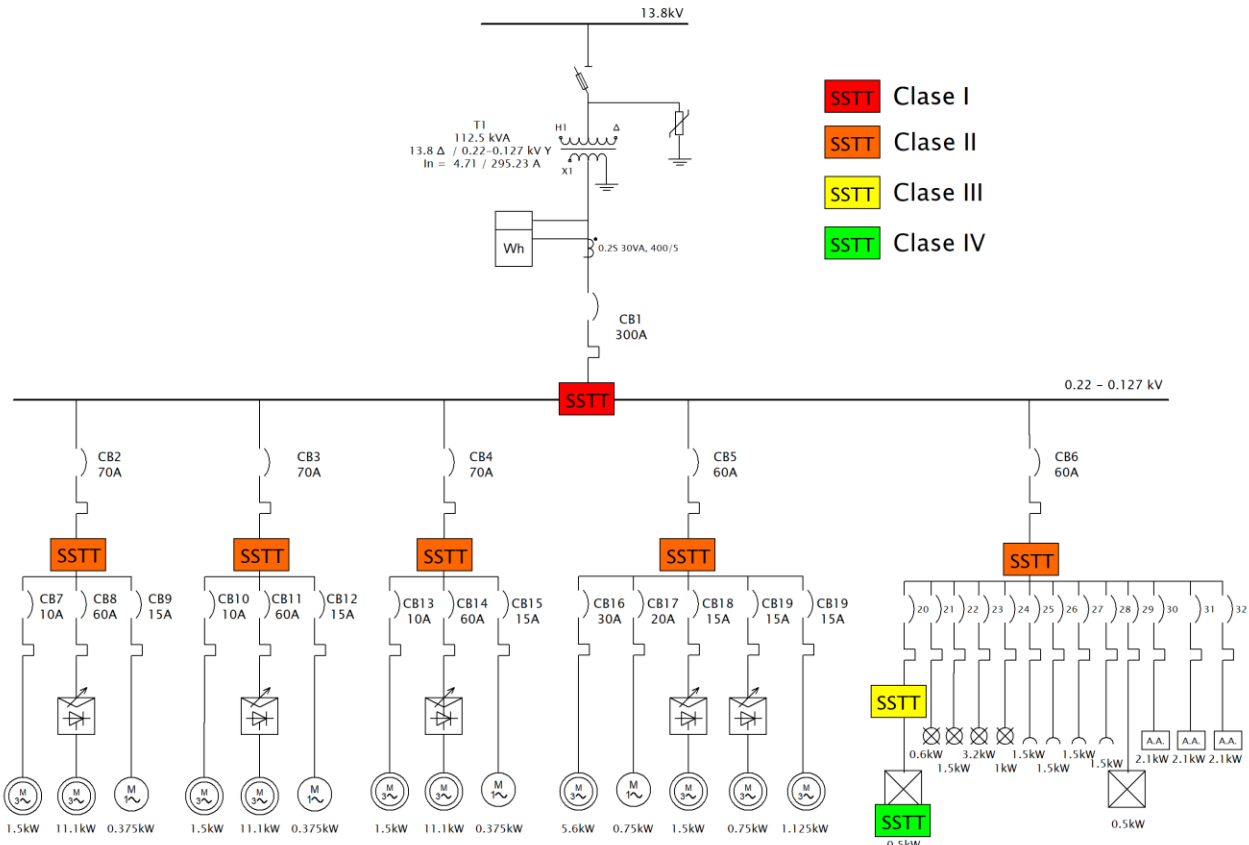


Figura 44 Localización de Dispositivos supresores de transitorios en la instalación eléctrica de la planta

El equipo más sensible es el tablero de instrumentación, el cual tiene un PLC con tensión máxima por impulso de 1500 VAC. El SPD clase IV se instalará dentro del tablero a un lado del dispositivo PLC para mejor eficacia.

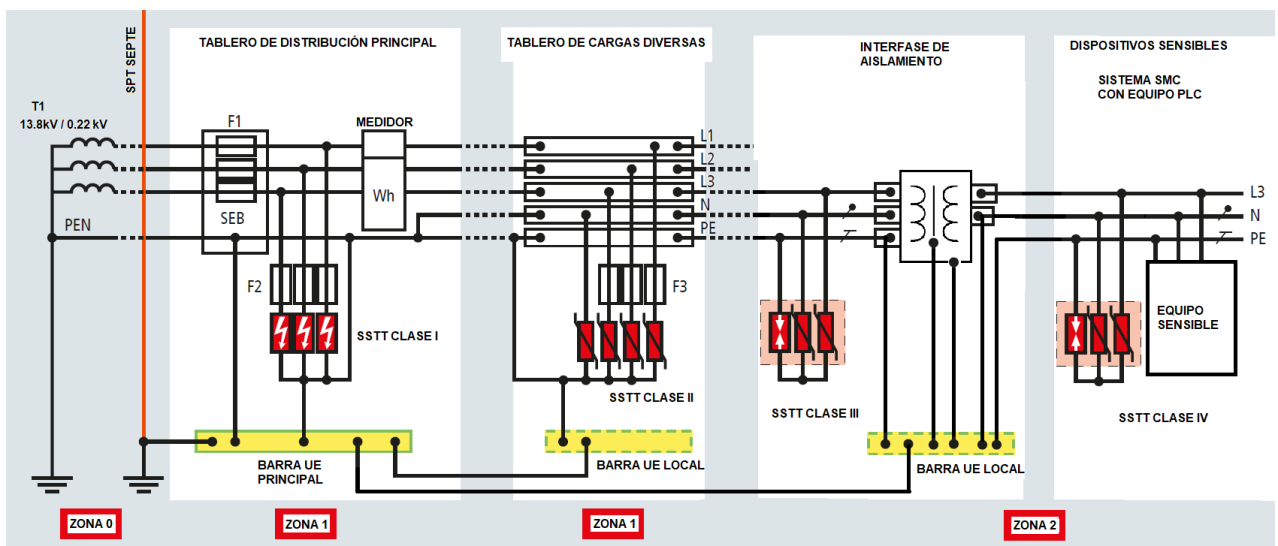


Figura 45 Coordinación de SSTT desde Zona 0 hasta Zona 2 para cargas electrónicas sensibles

Para la selección de los equipos se consideran los niveles de U_w y los puntos frontera identificados y se presentan en la Tabla 27:

Tabla 27 Tableros eléctricos y zonas de protección

ID Tablero / equipo a proteger	Localización por zona de protección	U_w	Tecnología de SSTT a emplear	Observaciones
Tablero principal CB 300 ^a	Zona 0 _B	6 kV	Clase I	SSTT aprobado para forma de onda 10/350 μ s
Tablero distribución	Zona 0 _B	6 kV	Clase I	SSTT aprobado para forma de onda 10/350 μ s
Tablero de CCM1	Zona 1	4 kV	Clase II	SSTT aprobado para forma de onda 8/20 μ s
Tablero de CCM2	Zona 1	4 kV	Clase II	SSTT aprobado para forma de onda 8/20 μ s
Tablero de CCM3	Zona 1	4 kV	Clase II	SSTT aprobado para forma de onda 8/20 μ s
Tablero de CCM4	Zona 1	4 kV	Clase II	SSTT aprobado para forma de onda 8/20 μ s
Tablero de cargas diversas	Zona 1	2.5 kV	Clase III	SSTT aprobado para forma de onda 8/20 μ s
Sistema de monitoreo y control SMC	Zona 2	1.5 kV	Clase IV	SSTT aprobado para forma de onda 8/20 μ s

Para la selección de equipos se ha elegido el fabricante Dehn.



Figura 46 Equipo SPD del fabricante Dehn

Para los supresores clase I, se eligen nivel de protección con I_0 para 200 kA, pero al ser trifásico, se requieren equipos por cada fase con $I_0 = 66.66$ kA. Sin embargo, el fabricante Dehn en

este nivel de protección ofrece para protección por fase de $I_0 = 200\text{kA}$, que, si bien es mayor al requerido, tiene la ventaja de manejar un U_P pequeño del orden de 2.5kV .

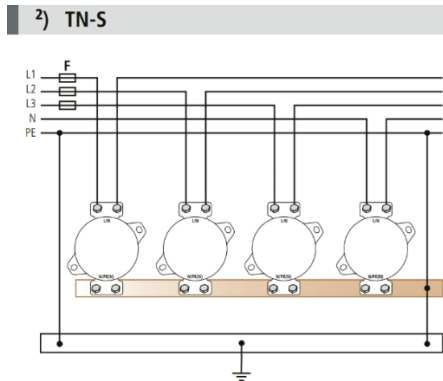


Figura 47 Instalación de equipos SPD en régimen TN-S

Para la protección de equipos en Clase II se empleará el siguiente equipo:

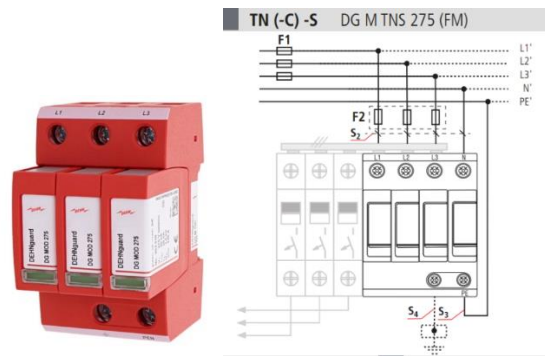


Figura 48 SPD fabricante Dehn modelo Dehnguard y su diagrama de instalación en régimen TN-S

Para la protección de equipos clase III se empleará:

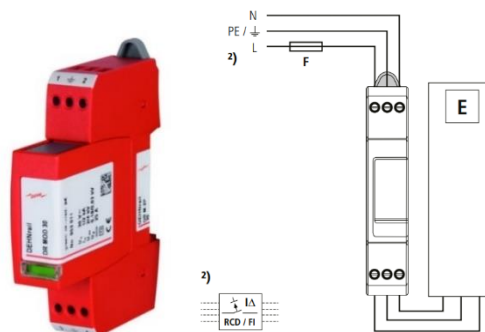


Figura 49 SPD clase III para equipo final sensible

4. RESULTADOS

- Se establece los rangos de resistencia de los sistemas de puesta a tierra y de protección contra rayos que exige las normas oficiales mexicanas, y se obtienen como resultado una resistencia de $R = 7.59 \Omega$ para el SPT a frecuencia industrial y de $R = 1.37 \Omega$ para el SPT del SEPTE.
- Se diseña el electrodo de puesta a tierra en forma de malla empleando metodología de la norma IEEE-80 configurando una malla de 5 x 5 metros instalada a 0.5 metros de profundidad.
- Se realiza el dimensionamiento de los conductores de malla aplicando un factor de sobredimensionamiento para soportar los factores térmicos y mecánicos ante un evento de falla, siendo de calibre 2/0 y con material cobre recocido suave.
- Se establece un Nivel de Protección II para el SEPTE con base en las características físicas de la infraestructura a proteger y su giro.
- Se emplea el método de esfera rodante para la localización de 14 terminales aéreas con distancia de separación promedio entre ellas de 15 metros, considerando 10 bajantes hacia un sistema de puesta a tierra tipo B (anillo), logrando la protección de equipos y personas a 1 metro de la periferia de la planta.
- Con base en análisis de la información eléctrica de la planta se propone un SIPTE seleccionando la clase de supresores de sobretensiones con el criterio de la IEC desde clase I hasta clase IV y su localización dentro del sistema para lograr una aplicación coordinada desde una zona 0 hasta una zona 2 para proteger los equipos electrónicos tanto de cómputo como de monitoreo y control de la planta.
- Se implementan medidas de prevención en la zona 2 incluyendo:
 - Una unión equipotencial en forma de malla en el piso
 - Aislamiento de interfases con la instalación de un transformador de aislamiento en baja tensión con relación 1:1
 - Blindaje magnético con la recomendación el uso de cables de instrumentación con blindaje electromagnético
 - Coordinación de supresores logrando nivel bajo de U_P con el uso de clase III o IV

5. CONCLUSIONES

- Las instalaciones industriales requieren de un diseño de sistema de puesta a tierra incorporando el análisis de seguridad a través de las tensiones de paso y de contacto para lograr un resultado óptimo y eficiente en caso de un evento de falla en la subestación eléctrica.
- En el caso de estudio presentado se analiza el comportamiento de la resistividad del suelo en modo creciente (a mayor profundidad mayor resistividad eléctrica), por lo cual no se hace relevante, ni existe un mayor cambio en la evaluación de la malla de tierra al incorporar electrodos verticales o varillas de tierra, por lo que en el diseño no fueron necesarias. Para otros diseños con terrenos distintos, tendrá que evaluarse el comportamiento de la resistividad del suelo, ya que es posible optimizar el diseño de la malla en función de esta variable.
- Se puede concluir que la resistividad de la capa superficial que se considera en las subestaciones es de gran importancia para disminuir la tensión de paso y de contacto.
- Las características del terreno y el tipo de instalación (giro) son factores preponderantes para la evaluación del riesgo ante impacto por rayo, ya que la gravedad está relacionada con la densidad de descargas a tierra DDT que depende de la localización geográfica y la exposición dependerá del área de influencia de la instalación, por lo que se debe prestar atención especial a este tipo de evaluaciones, realizando una búsqueda de información básica para una mejor toma de decisiones.
- Para instalaciones industriales se tiene la menor frecuencia media anual de impactos de rayo a estructuras permitida con un valor de $N_d = 0.01$, por lo que es muy probable que sea requerido un sistema externo de protección contra tormentas eléctricas, aunado a la obligación de los propietarios en implementar medidas de seguridad para mitigar riesgos eléctricos por evento de falla y/o descargas eléctricas en la infraestructura.
- Es de gran importancia implementar los sistemas de protección contra descargas atmosféricas, ya que incluso en un nivel de protección I no se garantiza el 100% de eficacia. Esto representa un riesgo latente a la seguridad de los trabajadores, a los equipos eléctricos propiedad de las empresas y a la misma producción de la planta.
- La propuesta de diseño para la planta DGA presenta un proyecto de reforma de las instalaciones eléctricas existentes que generará una oportunidad de mejorar las condiciones de seguridad para los trabajadores y los equipos electrónicos.

6. REFERENCIAS

- [1] IEC 60071-1, Insulation coordination –Part 1. Definitions, principles and rules, Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission, 2019, agosto.
- [2] DEHN+SOHNE, Lighting protection guide 3rd Edition, Neumarkt: DEHN + SOHNE, 2014, diciembre.
- [3] IEC 62305-1, Protection against lightning - Part 1 General principles 2nd Edition, Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission, 2010, diciembre.
- [4] IEC 62305-4, Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures 2nd Edition, Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission, 2010, diciembre.
- [5] Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, Ley de la Infraestructura de la Calidad, México: Diario Oficial de la Federación, 2020, 1 de julio.
- [6] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, NOM-002-STPS-2010, Condiciones de seguridad-Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo., México: Diario Oficial de la Federación, 2010, 12 de noviembre.
- [7] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, NOM-022-STPS-2015 Electricidad estática en los centros de trabajo-Condiciónes de seguridad., México: Diario Oficial de la Federación, 2016, 1 de abril.
- [8] Secretaría de Energía, NOM-001-SEDE-2012 Instalaciones Eléctricas (utilización), México: Diario Oficial de la Federación, 2012, 29 de noviembre.
- [9] Asociación de Normalización y Certificación, NMX-J-549-ANCE-2005 Sistema de protección contra tormentas eléctricas - Especificaciones, materiales y métodos de medición, México: Diario Oficial de la Federación, 2006, 15 de marzo.
- [10] IEEE Std 80, Guide for Safety in AC Substation, New York, USA: IEEE Power and Energy Society, 2013.
- [11] IEC 62305-3, Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard 2nd Edition, Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission, 2010, diciembre.

[12] IEEE Std 1100, IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, New York, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005, 29 de diciembre.