

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



**PROTECCIÓN AL IMPACTO DIRECTO DE RAYOS EN
SUBESTACIONES DE POTENCIA USANDO LA NORMA IEEE
STD 998-2012**

PRESENTADO POR:

EMANUEL DE JESÚS QUINTANILLA PORTILLO

DAVID FERNANDO RIVERA ORELLANA

GERSON ISAÍ ROSA SICILIANO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título :

**PROTECCIÓN AL IMPACTO DIRECTO DE RAYOS EN
SUBESTACIONES DE POTENCIA USANDO LA NORMA IEEE
STD 998–2012**

Presentado por:

EMANUEL DE JESÚS QUINTANILLA PORTILLO

DAVID FERNANDO RIVERA ORELLANA

GERSON ISAÍ ROSA SICILIANO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ

SAN SALVADOR, FEBRERO DE 2020

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. NUMA POMPILIO JIMÉNEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 7 febrero 2020, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma


Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

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

- ING. NUMA POMPILO JIMENEZ CORTEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERÓN


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

PROTECCIÓN AL IMPACTO DIRECTO DE RAYOS EN SUBESTACIONES DE POTENCIA
USANDO LA NORMA IEEE STD 998-2012

A cargo de los Bachilleres:

- RIVERA ORELLANA DAVID FERNANDO
- ROSAS SICILIANO GERSON ISAÍ
- QUINTANILLA PORTILLO EMANUEL DE JESÚS

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

8.9

(Ocho puntos nueve)

AGRADECIMIENTOS

Gracias doy a Dios por haberme permitido culminar este trabajo y a la vez una etapa más de mi vida. Este logro está dedicado especialmente a mis padres Carlos Alberto Quintanilla y Rosa María Portillo quienes a través de su esfuerzo y amor incondicional me han dado todo lo necesario para mi desarrollo personal y profesional; a mis hermanos, quienes han estado siempre presentes brindándome apoyo para lograr una meta más en mi vida. A mis compañeros Gerson Rosas y David Rivera por ser un gran equipo, con quienes con mucho esfuerzo hemos logrado culminar este trabajo que representa un gran logro en nuestra carrera; amigos de la infancia, de quienes siempre he recibido apoyo y agradable compañía; compañeros y amigos en general, con quienes he compartido alegrías y tristezas, y a través de bromas y risas hemos sabido aliviar el peso del estudio que la carrera impone.

Asimismo, agradezco al personal docente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica quienes, para mí, han sido una fuente de conocimiento y de ejemplo de profesionalismo a seguir, en especial al Ing. Numa Jiménez de quien hemos obtenido asesoría para el desarrollo y finalización de la presente tesis; a niña Reinita, quien con cariño me refiero, por su amabilidad, sus consejos y orientación que me han ayudado mucho para llegar a este punto en la carrera; a Juancito y Don Posada por su apoyo, quienes con su ingenio, me brindaron cálida compañía y buenos momentos en los laboratorios de la EIE. En general agradezco a todas y cada una de aquellas personas que, de alguna forma, me han ayudado y regalado palabras de aliento para darme fuerzas a seguir.

Para mí, ha sido un gran reto, y aunque los últimos años han traído momentos difíciles, también hubo momentos especiales que se quedarán en mi memoria. Sé que la vida tiene sorpresas y nuevos retos preparados para cada uno de nosotros, por ello viviré cada día con esfuerzo y optimismo, luchando por alcanzar mi próximo objetivo; porque los únicos responsables de nuestra propia felicidad somos nosotros.

Por esto y más, ¡Muchas Gracias!

Emanuel de J. Quintanilla

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres: Jorge Rivera y Mercedes de Rivera por todo ese inmenso apoyo que me han brindado desde el día que nací. Mami gracias por tu dedicación, tus valores, tus enseñanzas, el tiempo por cuidarme y todo tu amor entregado hacia mí. Papi gracias por estar con nosotros, tu amor, tu apoyo incondicional y por consentirnos siempre. Papá y mamá los amo, sé que nunca podré pagar todo lo que ustedes han hecho por mí, sin embargo, este primer triunfo se los dedico a ustedes y confié en mí mismo de que podré darles aún más triunfos y esa vida de calidad que merecen, ustedes son unos súper padres, que Dios me los bendiga siempre.

A mis hermanos Jorge, Ricardo y Andrés que de alguna u otra forma compartían sus opiniones para poder hacer de mí un mejor profesional. Los aprecio mucho y gracias por acompañarme en cada etapa de mi vida. Los amo y admiro mucho, nunca se den por vencido en sus metas.

También quiero agradecer a mi novia Brendita por ser tan especial, por su amor, por su comprensión, por estar conmigo en los buenos y malos momentos. Brendita gracias por motivarme a ser mejor en todo, gracias por acompañarme en los más ambiciosos sueños que compartimos, que Dios nos bendiga en el camino para poder alcanzar nuestros sueños.

Agradezco al Ing. Numa Jiménez por ser un excelente docente, por compartir sus conocimientos y también por darnos la oportunidad de ser nuestro asesor de trabajo de graduación, gracias por todo lo aprendido.

A todos mis amigos y compañeros de la UES que me apoyaron de alguna forma, gracias por formar parte del proceso. También agradezco a mi equipo de trabajo de graduación: Gerson Rosa y Emanuel Quintanilla, ustedes son excelentes, sé que lograrán mucho, sigan adelante.

A mi amigo Marcelo Javier por ser una persona a la cual estimo mucho, gracias por confiar siempre en mí, y por creer en mi éxito, yo sé que también alcanzarás tus éxitos.

Agradezco a los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica por compartir sus conocimientos y por inspirarme más por la bella carrera de ingeniería Eléctrica. Recuerdo el día en que recibí mi primer curso de electromagnetismo, fue la primera materia donde note de lo hermoso que podría ser la electricidad, gracias Ing. Wilber. También a los encargados de los laboratorios Juancito y Posada, y a la encargada de la secretaría de la escuela Reina Vides por tener esa paciencia que nos brindan en las distintas actividades.

Finalmente, a mis amigos de mis últimos años de estudio: Oscar, Vladimir, Rene, Juan, Sandoval, Gerson, Emanuel, Henry Moreno, Henry Beltrán, y Fer-Angel, gracias por compartir su amistad, les deseo que siempre sigan adelante en sus sueños.

David Fernando Rivera Orellana

AGRADECIMIENTOS

Primero a Dios, que ha sido la fuente de fuerza, protección, salud y sabiduría para llegar hasta la meta, sin Él nada de esto sería posible y gracias a su voluntad me permite finalizar esta etapa de mi vida con éxito.

A mis padres José Luis Rosa y Ulma Siciliano, a pesar de las dificultades de la vida nunca se negaron a apoyar mis objetivos, gracias a su amor y apoyo incondicional he podido cumplir mi sueño. A mi hermana Eunice a quien admiro mucho, que ha tenido el cuidado de mí y me ha dado todo su apoyo estando lejos de nuestros padres, a mi hermanito Abner que con su amor me alienta a seguir adelante. A mi abuelita María Siciliano hasta el cielo, que ha sido una parte muy importante en todas las etapas de mi vida. Gracias infinitas, sin duda nunca voy a poder pagar todo lo que han hecho por mí y siguen haciendo, este logro es gracias a ustedes mi amada familia y juntos vamos a salir adelante siempre con la ayuda de Dios.

A mis amigos de la universidad, personas muy humildes a quienes admiro y estimo mucho, su apoyo ha sido fundamental a lo largo de la carrera, especialmente a mis compañeros de tesis Emanuel Quintanilla y David Rivera. Les deseo éxito en sus vidas, sé que son personas extraordinarias y pueden lograr todo lo que se propongan.

A mis amigos y hermanos Byron, Jorge y Sergio, gracias por sus palabras de ánimo y oraciones.

A cada uno de los catedráticos que han compartido los conocimientos necesarios para lograr este objetivo, especialmente a nuestro asesor de tesis Ing. Numa Jiménez un excelente docente de quien aprendí mucho.

A todas las personas que forman parte de la escuela de ingeniería eléctrica, especialmente a Reina Vides quien nos ha brindado todo su apoyo y paciencia, igualmente a Juancito y Posada personas que siempre están dispuestas a ayudar.

A todas las personas que directa o indirectamente han sido parte de este proceso, gracias y bendiciones.

Gerson Isai Rosa Siciliano

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1. ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ALCANCES.....	2
1.4 ANTECEDENTES.....	2
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.6 JUSTIFICACION.....	3
CAPITULO 2. FENÓMENO ELECTROMAGNÉTICO DEL RAYO	4
2.1 FORMACIÓN DE LA CARGA EN LA NUBE	4
2.2 TIPOS DE RAYOS	5
2.3 DISTANCIA DE IMPACTO	7
2.4 PROBABILIDAD DE LA CORRIENTE DE IMPACTO.....	8
2.5 NIVEL ISOCERÁUNICO	9
2.6 DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA.....	9
2.7 NIVEL ISOCERÁUNICO DE EL SALVADOR	10
2.8 SOBRETENSIONES POR RAYO (FRENTE RAPIDO).....	14
2.8.1 SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LÍNEAS AÉREAS	14
2.8.2 SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LAS SUBESTACIONES.....	14
2.9 ELEMENTOS DE PROTECCION USADOS EN EL APANTALLAMIENTO DE UNA SUBESTACION DE POTENCIA.....	16
2.9.3 CABLE DE GUARDA.....	16
2.9.4 PUNTAS	16
2.9.5 MASTILES	16
CAPÍTULO 3: PROTECCIÓN A IMPACTO DIRECTO DE RAYO EN SUBESTACIONES DE POTENCIA.....	18
3.1 IMPORTANCIA DE LA PROTECCIÓN DE IMPACTOS DE RAYO.....	18
3.1.1 EFECTOS Y PÉRDIDAS CAUSADAS POR LOS IMPACTOS DIRECTOS DE RAYO	18
3.1.2 DIFERENTES NORMAS Y MANUALES USADOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS.....	20
3.2 MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE BLINDAJE EN SUBESTACIONES USADOS POR LA NORMA IEEE STD 998-2012.....	22
3.2.1 PROBLEMAS DE DISEÑO	22

3.2.2 MÉTODOS EMPÍRICOS GEOMÉTRICOS.....	23
3.2.3 MODELOS ELECTROGEOMÉTRICOS	29
3.2.4 ANÁLISIS DE RIESGO PARA LOS MÉTODOS CONVENCIONALES.....	36
3.2.5 MODELOS ALTERNATIVOS DE INTERCEPTACIÓN DE RAYOS	37
CAPITULO 4. SIMULADOR DE MÉTODOS DE PROTECCIÓN.....	41
4.1 SOFTWARE DE PAGA PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN.....	41
4.1.1 PRIMTECH 3D- CÁLCULO DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS.....	41
4.1.2 SESSHIELD 3D	42
4.1.3 DISAC.....	43
4.2 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO	44
4.2.1 NIVELES DE AISLAMIENTO ESTÁNDAR	44
4.2.2 DISTANCIAS MÍNIMAS DE OPERACIÓN	45
4.3 SIMULADOR DE MÉTODOS DE PROTECCIÓN	47
4.3.1 ESTRUCTURA DEL ENTORNO DE USUARIO.....	48
4.3.2 FUNCIONAMIENTO.....	50
4.4 DESARROLLO DE EJEMPLO PRÁCTICO.....	53
4.4.1 CÁLCULO TEÓRICO BASADO EN EL MODELO DE MOUSA.....	54
4.4.2 APLICACIÓN MÉTODO EGM DE MOUSA.....	57
4.4.3 APLICACIÓN MÉTODO ÁNGULOS FIJOS	61
4.6 CASO DE ESTUDIO SUBESTACIÓN ROMA	63
4.7 OBSERVACIONES.....	66
CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXO A	69
A.1 EJEMPLO DE PASOS DE UN RAYO DEL TIPO NEGATIVO HACIA ABAJO	69
A.2 DIFERENCIAS ENTRE PUNTAS FRANKLIN Y PUNTAS ACTIVAS	72
A.2.1 PUNTAS FRANKLIN	72
A.2.2 PUNTAS ACTIVAS	72
ANEXO B	74
B.1 CASOS EN LOS QUE UN RAYO IMPACTO UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA	74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Fig 2- 1: Distribución de carga de una nube	4
Fig 2- 2: Pasos de líder escalonado	4
Fig 2- 3: Gradiente eléctrico de la nube con respecto al suelo	5
Fig 2- 4: Tipos de rayos.....	6
Fig 2- 5: Corriente de impacto en kA	8
Fig 2- 6: Probabilidad para una corriente de 31 kA	8
Fig 2- 7: Mapa isocerámico de El Salvador.....	11
Fig 2- 8: Promedio de los niveles Isocerámicos y GFD de los departamentos.....	12
Fig 2- 9: Mapa mundial isocerámico	12
Fig 2- 10: Mapa mundial de la densidad de rayos por km ² por año (GFD)	13
Fig 2- 11: Forma de onda típica de una sobretensión causada de un rayo	14
Fig 2- 12: Ejemplo para el uso de mástiles y cable de guarda para la protección de una subestación	17
Fig 3- 1: Área protegida por cuatro mástiles, usando ángulos fijos	24
Fig 3- 2: Área protegida por dos cables de guarda adyacentes	24
Fig 3- 3: Mástil que protege un solo objeto: exposición al 0.1%. Altura del mástil sobre el objeto protegido “y”, en función de la separación horizontal, “x” y altura del objeto protegido d	26
Fig 3- 4: Mástil que protege el anillo de objetos: 0,1% de exposición. Altura del mástil sobre el objeto protegido, “y”, en función de la separación horizontal, “x” y altura del objeto protegido “d”	26
Fig 3- 5: Dos mástiles que protegen un solo objeto, sin superposición: exposición al 0.1%. Altura del mástil sobre el objeto protegido, y, en función de la separación horizontal s, y altura del objeto protegido d	27
Fig 3- 6: Dos mástiles que protegen un solo objeto, con una superposición del 0.1% de exposición. Altura del mástil sobre el objeto protegido, y, en función de la separación horizontal s, y altura del objeto protegido d	27
Fig 3- 7: Cable de blindaje que protege los conductores horizontales - 0.1% de exposición. Altura de los cables de guarda sobre los conductores, y, en función de la separación horizontal, x y la altura de los conductores protegidos, d	28
Fig 3- 8: Dos cables de guarda que protegen los conductores horizontales: 0,1% de exposición. Altura de los alambres de protección por encima de los conductores, y, en función de la separación horizontal s, y la altura de los conductores protegidos d	28
Fig 3- 9: Método electrogeométrico usando la esfera rodante	29
Fig 3- 10: Área protegida por un mástil vista de lateral.....	33
Fig 3- 11: Zonas de protección de un mástil y dos cables de guarda	34
Fig 3- 12: Esquema básico según Eriksson	34
Fig 3- 13: Ilustración del EGM Eriksson.....	36
Fig 3- 14: (a) Definición de volumen de colección parabólico para un punto de ataque potencial. (b) Una vista tridimensional que muestra los volúmenes de colectores calculados para varios puntos críticos.....	38
Fig 4- 1: Ejemplo de cálculo de protección del software Primtech.....	42
Fig 4- 2: Protección de una subestación con SESShield 3D	43
Fig 4- 3: Protección de una subestación utilizando DiSAC	44
Fig 4- 4: Barra de menú.....	48

Fig 4- 5: Barra de herramientas	48
Fig 4- 6: Área de selección de objetos.....	48
Fig 4- 7: Biblioteca de elementos	49
Fig 4- 8: Entorno de trabajo	49
Fig 4- 9: Atributos de elementos de patio.....	50
Fig 4- 10: Archivo .JAR ejecutable	50
Fig 4- 11: Datos generales.....	51
Fig 4- 12: Elementos de patio insertados mediante la biblioteca de objetos	51
Fig 4- 13: Cálculos y zonas de protección para un sistema de cables de guarda.....	52
Fig 4- 14: Protección mediante método de Ángulos Fijos.....	53
Fig 4- 15: Vista en planta y distancias eléctricas subestación de potencia a 69 kV	54
Fig 4- 16: Zonas de protección método EGM de Mousa: a) vista frontal, b) vista de planta	56
Fig 4- 17: Ingreso de datos generales simulador	57
Fig 4- 18: Distribución de equipos de subestación, a) vista lateral, b) vista de planta, c) vista frontal. * La línea azul representa el cable de guarda instalado	59
Fig 4- 19: Zonas de protección método EGM de Mousa mediante simulador, a) vista de planta, b) vista frontal, c) vista perfil	61
Fig 4- 20: Aplicación ángulo de 45°.....	61
Fig 4- 21: Protección método empírico de ángulos fijos: a) vista frontal, b) vista planta, c) vista lateral	62
Fig 4- 22:Modelo subestación Roma: a) vista de planta, b) vista lateral, c) vista frontal.....	64
Fig 4- 23:Sistema de protección subestación Roma: a) vista lateral, b) vista frontal, c) vista de planta	65
Fig B- 1: Cuadrillas trabajan en el cambio de transformador de potencia dañado por un impacto directo de rayo en la subestación Miraflores	74
Fig B- 2: Daños ocasionados por el impacto directo de rayo en la subestación ubicada en Tiro, Líbano	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2- 1: Ecuaciones para determinar el GFD para distintas partes del mundo.....	10
Tabla 2- 2: Resumen del nivel Isocerámico y GFD por departamento.	11
Tabla 4- 1: Voltajes estándar soportados para clase I.	45
Tabla 4- 2: Voltajes estándar soportados para clase II.	46
Tabla 4- 3: Distancias típicas en equipos de patio.	46
Tabla 4- 4: Distancias mínimas recomendadas para subestaciones aisladas en aire en condiciones de impulso de rayo.	47
Tabla 4- 5: Datos generales de subestación.	54
Tabla 4- 6: Resultados numéricos mediante simulador.	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BIL	Nivel Básico de Aislamiento
CFO	Tensión Crítica de Flameo
V	Voltaje
Z	Impedancia
I	Corriente
Ω	Ohmios
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados Centígrados
HZ	Hertz
kA	Kilo Amperios
kV	kilo Voltios
MVA	Mega Voltios Amperios
PU	Por Unidad
GFD	Densidad de rayos a tierra
P(I)	Probabilidad de corriente de impacto
T_d	Nivel Isocerámico
%	Porcentaje

LISTA DE ABREVIATURAS

ANSI	American Nacional Standard Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
EGM	Modelo Electrogeométrico
NFPA	National Fire Protection Association
CIGRE	Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas

CAPITULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 DESCRIPCIÓN DEL TEMA

El presente trabajo de graduación tiene como propósito principal el diseño de un simulador de computadora, capaz de realizar el análisis de protección al impacto directo de rayo a subestaciones de potencia en El Salvador, tomando como base los criterios de protección presentados por la norma IEEE std 998-2012 y los niveles isoceráunicos altos del país, de tal forma que se garantice la seguridad de los equipos de patio y las personas en el área protegida, permitiendo que las subestaciones disminuyan el número de interrupciones en condiciones de tormenta y aumentando la vida útil de los equipos de patio.

1.2 OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar un simulador para el diseño y análisis de protección al impacto directo de rayos en subestaciones de potencia, aplicando los criterios de protección propuestos por la norma IEEE std 998-2012.

ESPECIFICOS

- Implementar un entorno grafico de usuario para el diseño y análisis de blindaje de subestaciones de potencia, aplicando los métodos empíricos y analíticos; tomando en cuenta los niveles isoceráunicos del país y las características determinadas de cada subestación a analizar.
- Desarrollar una opción para análisis de cálculo para la densidad de descargas a tierra que permita usar datos preestablecidos de niveles isoceráunicos del país y datos ingresados de forma manual.
- Implementar los modelos de configuraciones más comunes de subestaciones básicas, usadas en el país, tales como bus sencillo e interruptor y medio.
- Aplicar el análisis de protección del programa para el caso de subestaciones reales, como caso de estudio que garantice la funcionalidad del software.
- Aplicar los principios físicos de coordinación de aislamiento en subestaciones de potencia.

1.3 ALCANCES

Para facilitar el diseño y análisis de sistemas de protección contra descargas directas de rayos en subestaciones de potencia se propone implementar un simulador de análisis gráfico y matemático, donde se puedan aplicar los métodos de protección empíricos y electrogeométricos. El entorno gráfico se apoyará con vistas 2D para el análisis y diseño de sistemas de apantallamiento. El simulador debe tener la capacidad de modelar subestaciones de bus sencillo e interruptor y medio, en las que se pueda ingresar datos, ejecutar el análisis y explorar los resultados. El simulador debe incluir esquemas de las configuraciones más comunes de las subestaciones de potencia usadas en el país, basadas en las dimensiones reales de equipos de potencia como transformadores, interruptores, descargadores de sobretensión y estructuras de soporte de bus, además de todos los elementos necesarios para el sistema de protección como cables de guarda, mástiles y puntas Franklin. El simulador será diseñado en el lenguaje de programación JAVA ya que cuenta con el desarrollo de interfaces gráficas, facilitando el diseño del simulador con la recolección de datos, salida de resultados y la interacción de dibujos en 2D. El usuario podrá escoger el método que mejor se adapte a sus necesidades, teniendo en cuenta los niveles de voltaje, el tipo de bus y las condiciones de densidad de descarga del lugar donde se hace el análisis, el resultado final mostrara las vistas de planta, lateral y frontal de las áreas protegidas, así como un informe de datos final. Se presentará un estudio de casos para modelar con las subestaciones reales del país.

1.4 ANTECEDENTES

El estudio del fenómeno del rayo y la densidad de descargas a tierra toma un papel muy importante para el diseño del sistema de apantallamiento. Un mal diseño expondría a los equipos de patio a las sobretensiones transitorias causadas por los impactos directos de los rayos. El fenómeno del rayo al ser siempre probable en las subestaciones de potencia se hace requisito fundamental el tener una buena práctica de coordinación de aislamiento, por lo tanto al tener en cuenta el impacto de rayo en los métodos de protección nos permite tener un sistema más efectivo. Los métodos utilizados para la protección de impacto directo de rayos a las subestaciones también deben de ser estudiados a fondo, con el fin de garantizar una protección adecuada, los métodos empíricos generalmente se usan para subestaciones de voltajes relativamente pequeños mientras los métodos electrogeométricos utilizando la esfera rodante proveen una protección a subestaciones de mayor voltaje. Estos métodos requieren para su aplicación el conocimiento de las dimensiones de los elementos de las subestaciones a usar, por lo que se convierten en métodos gráficos. Una práctica antigua de diseño consistía en construir maquetas a escala para rodar una esfera sobre ella, así obtener el punto de posición de las protecciones, actualmente para ello las empresas utilizan software de paga como lo es el SES Shield-3D que crea el cálculo de la protecciones de una subestación basándose en diferentes estándares internacionales como IEEE, IEC y NFPA. Los precios de dichas licencias son elevados.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El equipo de patio que representa un alto costo económico como los transformadores de potencia, y el equipo de control sensible en subestaciones y otras instalaciones eléctricas deben protegerse contra posibles impactos de rayos. Se necesita un sistema de protección contra rayos apropiado para minimizar las interrupciones del servicio y las pérdidas económicas, y para ello la protección debe capturar el rayo y drenar a la red de tierra la energía incidente. El activo más crítico a proteger de la subestación es el transformador de potencia. Asimismo, es costoso los tiempos de reposición del servicio principalmente en zonas industriales.

La aplicación de los métodos de protección a los impactos directos de rayos en subestaciones potencia descritos por la norma IEEE std 998-2012 requieren de un análisis matemático que depende de las características de cada subestación como el BIL y el tipo de bus. Los métodos se aplican de manera gráfica en cada elemento de protección (mástiles, cables de guarda y puntas Franklin) ubicados en la subestación. Para visualizar las zonas protegidas se debe de hacer un modelo a escala, en el caso del método electrogeométrico las zonas que cubre la esfera rodante forman áreas en las que los equipos se encuentran seguros; modelar la subestación a escala requiere de programas de dibujo haciendo vistas laterales y de planta, ayudando a una interpretación más certera de las zonas a proteger, sin embargo la creación de modelos a escala desde cero podría ser un problema para el diseñador en cuanto a tiempo y el correcto dimensionamiento de los equipos.

1.6 JUSTIFICACION

El uso de software de análisis ha facilitado en los últimos años el cálculo de tareas complejas por lo que las prácticas modernas de ingeniería lleguen a incluir poderosos programas de cálculo basados en métodos numéricos. El uso de software para el diseño del sistema de apantallamiento en subestaciones además de usar cálculos numéricos requiere de una visualización grafica de las zonas y áreas protegidas por los elementos que componen el sistema, como los cables de guarda y las puntas Franklin. Los software que han surgido son de paga que incluyen librerías de equipos a escala con los que se puede hacer un modelo de las subestaciones, sin embargo, el acceso a estos programas está limitado debido al alto costo de licencias de uso que rondan los 4200 dólares anuales. Un programa con interfaz gráfico basado en vistas 2D que esté al alcance de los estudiantes es importante para el desarrollo académico y laboral.

CAPITULO 2. FENÓMENO ELECTROMAGNÉTICO DEL RAYO

2.1 FORMACIÓN DE LA CARGA EN LA NUBE

Las nubes contienen carga negativa y positiva separada de alguna forma dentro de la nube. La separación de carga se ilustra en figura 2-1.

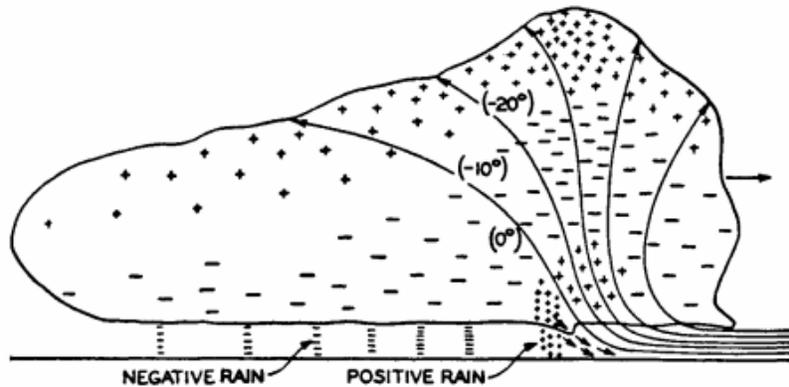


Fig 2- 1: Distribución de carga de una nube

La parte inferior de la nube contiene generalmente carga negativa. La parte superior de la nube concentra la carga positiva al igual que el suelo o cualquier otro objeto (ya sean edificios, líneas de energía eléctrica, estructuras, árboles, etc.), haciendo que la parte inferior de la nube tenga polaridad opuesta a lo que está por debajo de ella. Las concentraciones de carga eléctrica dentro de una nube están limitadas al tamaño de la nube. El tamaño de la nube, en relación con la tierra, es pequeña. Por lo tanto, el gradiente eléctrico que existe en la nube será mucho mayor que el de la tierra. Debido a esto, una descarga eléctrica tiende a iniciarse en la nube en lugar de en el suelo. Un ejemplo de cómo se comporta el gradiente eléctrico de la descarga de una nube se muestra en la Fig 2-3.

En la Fig 2-2 se muestra una descripción simplificada de los pasos de un rayo del tipo negativo hacia abajo. Este tipo de rayo es el más común para la mayoría de las estructuras.

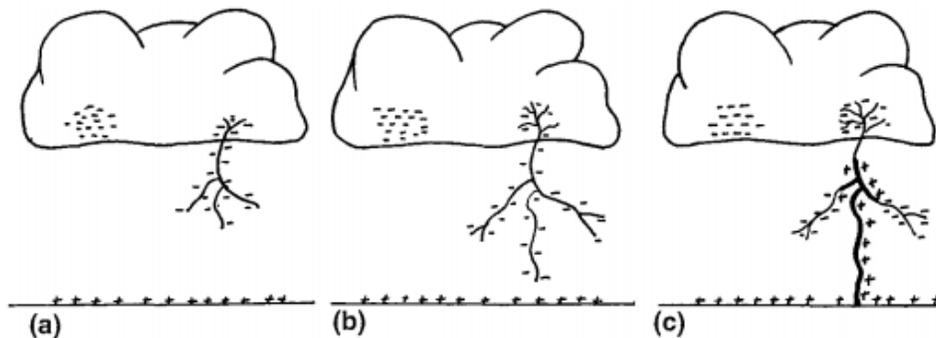


Fig 2- 2: Pasos de líder escalonado

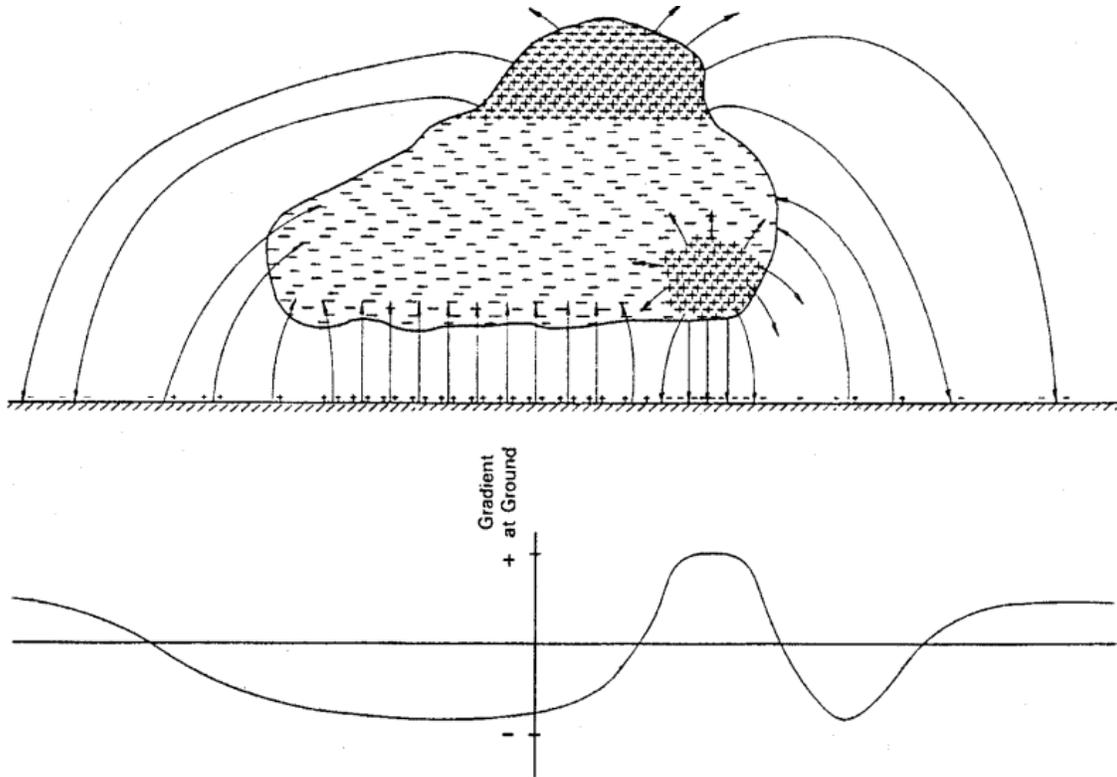


Fig 2- 3: Gradiente eléctrico de la nube con respecto al suelo

2.2 TIPOS DE RAYOS

El primer tipo de rayo, es un rayo negativo hacia abajo que predomina en las estructuras de alturas de menos de 100 metros. Aproximadamente el 85 al 95% de los rayos a estas estructuras son negativos hacia abajo. La corriente media es de aproximadamente de 33 kA.

El segundo tipo es el rayo negativo hacia arriba que predomina en estructuras altas. Por ejemplo, para mástiles de 70 y 80 metros, ubicados a 650 m de altitud, este rayo negativo hacia arriba tiene una corriente media de 25 kA.

El tercer tipo de rayo es el rayo positivo hacia arriba también conocido como el "Súper rayo". Las magnitudes actuales son aproximadamente de 1.2 a 2.2 veces de las del rayo descendente negativo. Los rayos positivos generalmente tienen solo un golpe por disparo y generalmente ocurren al comienzo o al final de una tormenta y ocurren sobre el océano que pueden ser el tipo de rayo predominante durante la temporada de invierno. Típicamente, solo el 2 al 10% de los rayos totales son de polaridad positiva.

En cuanto al rayo descendente positivo no existe una fuente completa de datos. Por lo tanto, el rayo descendente positivo puede ser confundido con el rayo positivo hacia arriba, por no tener una distinción clara.

En conclusión, aproximadamente del 85 al 95% de los rayos a estructuras que tienen alturas menores de aproximadamente 100 metros en un terreno plano u ondulado son negativos hacia

abajo. Los otros 5 a 15% son negativos hacia arriba o positivos. La figura de abajo muestra los distintos tipos de rayos.

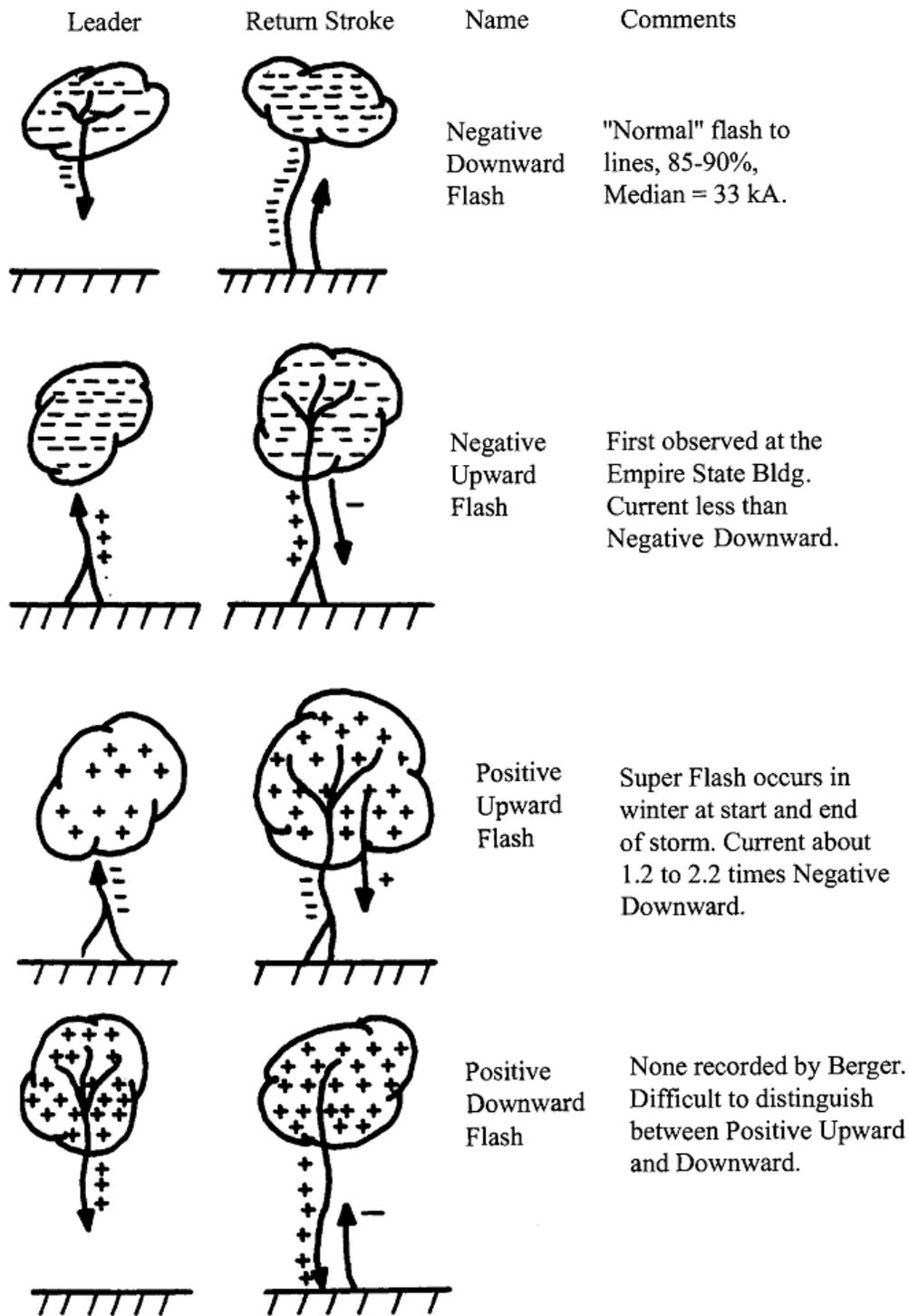


Fig 2- 4: Tipos de rayos

2.3 DISTANCIA DE IMPACTO

La magnitud de la corriente de retorno y la distancia de descarga (longitud del último líder escalonado) están interrelacionadas. Se han propuesto varias ecuaciones para determinar la distancia de ataque. Los principales son los siguientes:

$$S = 2I + 30(1 - e^{-I/6.8}) \quad (2.1) \quad \text{Darveniza}$$

$$S = 10I^{0.65} \quad (2.2) \quad \text{Love}$$

$$S = 9.4I^{2/3} \quad (2.3) \quad \text{Whitehead}$$

$$S = 8I^{0.65} \quad (2.4) \quad \text{IEEE}$$

$$S = 3.3I^{0.78} \quad (2.5) \quad \text{Suzuki}$$

Donde:

S: es la distancia del impacto en metros.

I: es la corriente de impacto de retorno en kiloamperios.

A lo largo de la investigación se optará por la ecuación 2.4. Sin embargo, hay casos en que se es necesario expresar la ecuación en términos de la distancia:

$$I = 0.041S^{1.54} \quad (2.6)$$

Con la ecuación anterior al evaluar diferentes distancias de ataque se obtiene la corriente de impacto para distintos valores que se muestran en el gráfico de la figura 2-5.

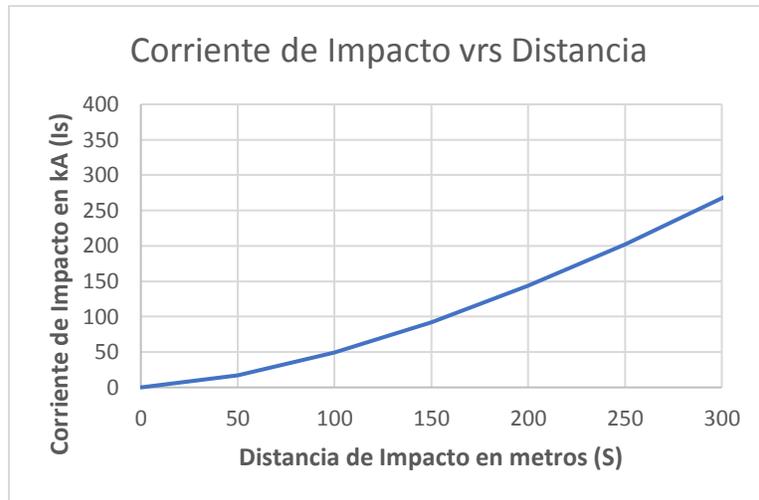


Fig 2- 5: Corriente de impacto en kA

2.4 PROBABILIDAD DE LA CORRIENTE DE IMPACTO

Uno de los valores más representativos y de mayor importancia de un rayo es la magnitud de la corriente pico. Se ha definido que la magnitud media de una descarga es de 31 kA y que la probabilidad de que esta corriente sea excedida por una descarga se define por la siguiente ecuación:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.7)$$

Donde:

P(I): es la probabilidad de que la corriente de impacto máxima sea excedida.

I: es la corriente de cresta especificada del impacto en kiloamperios.

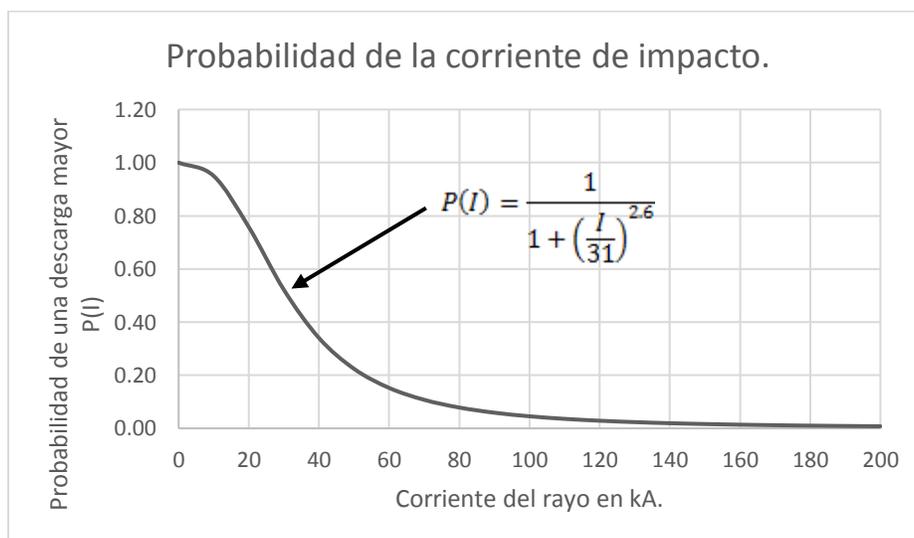


Fig 2- 6: Probabilidad para una corriente de 31 kA

2.5 NIVEL ISOCERÁUNICO

La densidad de rayos a tierra indicada como **Ng** está en unidades de **rayos por km² por año**. El mejor método para obtener Ng es midiendo esta cantidad, sin embargo, hay un método más usual para determinar esta cantidad y para ello es necesario conocer el nivel isoceráunico que son datos investigados por las oficinas meteorológicas.

El término Isoceráunico se refiere al promedio anual de días u horas de tormentas para una localidad determinada. Un día de tormenta se define como el día (24 horas) que se ha escuchado un trueno al menos una vez. Según esta definición, no importa cuántas veces se escuche un trueno durante un período de 24 horas, por lo tanto, el nivel Isoceráunico es el número promedio de días tormentas eléctricas en un año.

Un nivel Isoceráunico por hora es la cantidad promedio de horas por año en que se escucharán los truenos durante un período de lluvia de 1 hora. Por ejemplo, si el trueno se escucha en una hora más de una vez, la hora todavía se clasifica como una hora de trueno (u hora de tormenta). Esto proporciona una imagen más precisa de la densidad del rayo en un área determinada.

2.6 DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA

La densidad de rayos a tierra (GFD) se define como la cantidad promedio de rayos por unidad de área por unidad de tiempo en una ubicación particular. Por lo general se supone que el GFD de una subestación, una línea de transmisión o distribución son aproximadamente proporcional al nivel isoceráunicos en la localidad. La Tabla 2-1 ofrece varias ecuaciones de regresión para GFD que han sido desarrolladas por varios investigadores de todo el mundo. Estos investigadores llegaron a una relación proporcional que oscilaba entre 0.1T y 0.19T de flashes de tierra por kilómetro cuadrado por año, donde T es el nivel isoceráunicos anual promedio.

La siguiente ecuación obtiene el valor del GFD y es la que se usará para los cálculos posteriores al determinar el análisis de riesgo de una subestación.

$$N_k = 0.040(T_d)^{1.25} \quad (2.8)$$

Donde:

Nk: es el número de rayos a tierra por kilómetro cuadrado por año abreviado como GFD.

Td: es el nivel isoceráunico anual promedio, días de tormentas eléctricas.

Tabla 2- 1: Ecuaciones para determinar el GFD para distintas partes del mundo.

Localidad	GFD Rayos a tierra/km²/año	Referencia
World (Temperature Areas)	$0.040T^{1.25}$	Anderson [B7], [B8], [B9]
México	$0.024T^{1.12}$	IEEE Std 1410 TM – 2010[B74]
Brazil	$0.030T^{1.12}$	IEEE Std 1410 – 2010
Columbia	$0.0017T^{1.56}$	IEEE Std 1410 – 2010
South Africa	$0.04T^{1.25}$	Ericksson [B50]
Sweden	$0.004T^2$ (Approx.)	Muller-Hillebrand [B114]
United Kingdom	$0.0026T^{1.9}$	Stringfellow [B136]
United States (North)	$0.11T$	Horn and Ramsey [B64]
United States (South)	$0.17T$	Horn and Ramsey [B64]
United States	$0.10T$	Anderson et al. [B10]
United States	$0.15T$	Brown and Whitehead [B25]
Russia	$0.036T^{1.30}$	Kolokolov and Pavlova [B80]
World (Temperature climate)	$0.15T$	Golde [B57]

2.7 NIVEL ISOCERÁUNICO DE EL SALVADOR

Los últimos estudios realizados en El Salvador del nivel isoceráunico fueron hechos en el año 2008 y se determinó escalas que van desde 55-65 hasta 125-135 días tormentas en un año. En la figura 2-7 puede notarse a detalle los distintos valores por zona en el país.

La tabla 2-2 muestra los valores específicos de los niveles isoceráunicos de cada departamento, así como los promedios por departamento. Los promedios de la tabla 2-2 sirven para tener un panorama general sobre los valores que podrían esperarse en un determinado departamento. Sin embargo, como dato conservador resulta mejor hacer los análisis con aquellos valores donde el nivel isoceráunico es alto ya que se tendría un mayor margen de prevención al tomar en cuenta la probabilidad de que ocurra un día tormenta. En la tabla 2-2 también se ha incluido una columna que muestra el GFD, este valor se ha calculado con la ecuación 2.8 y con el promedio por departamento del nivel isoceráunico.

Los departamentos con presentaron niveles isoceráunicos altos fueron Santa Ana, Chalatenango, La Libertad y San Miguel siendo Santa Ana el departamento con el nivel isoceráunico promedio más alto. Los valores promedios por departamento de los niveles isoceráunicos y GFD se resumen en el mapa de la figura 2-8.

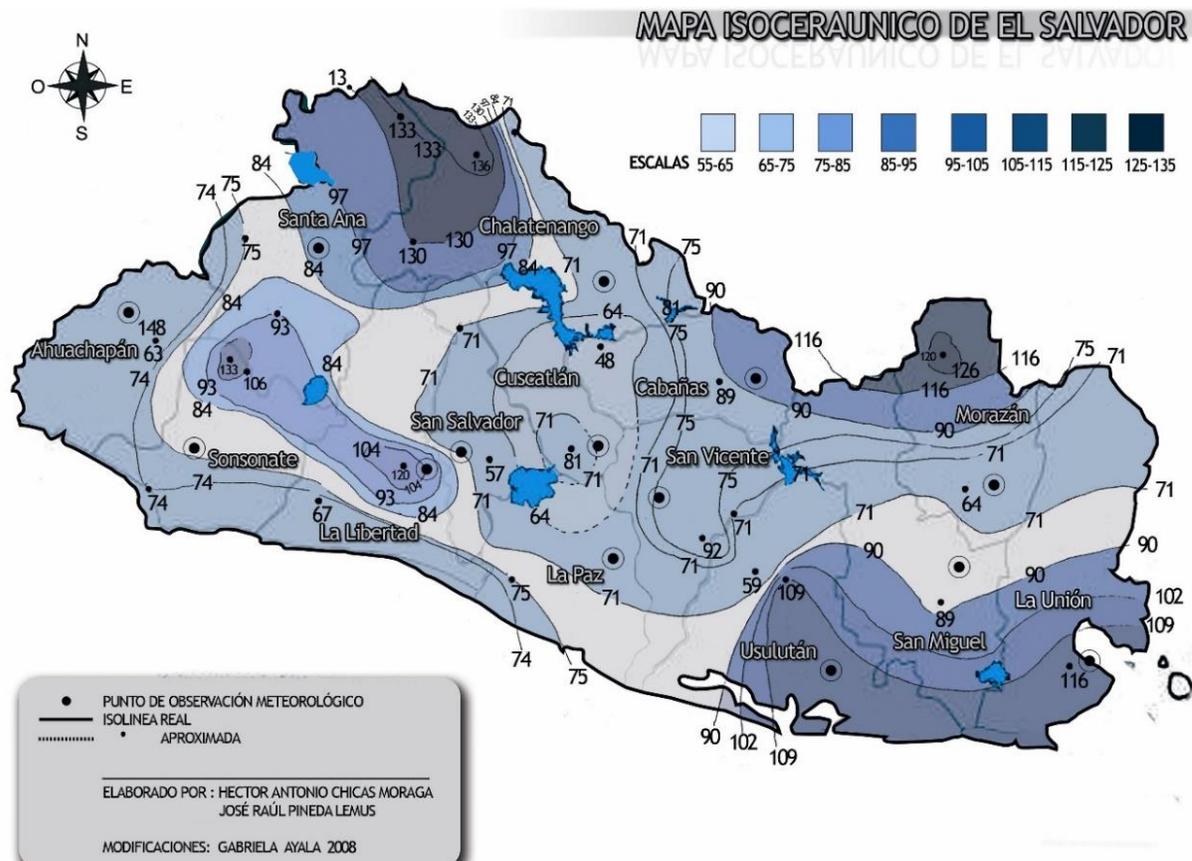


Fig 2- 7: Mapa isoceraunico de El Salvador

Tabla 2- 2: Resumen del nivel Isoceraunico y GFD por departamento.

Departamentos	Niveles Isoceraunicos							Promedio	GFD
Ahuachapán	74	75	84					77.67	9.22
Sonsonate	74	75	84	93	106			86.40	10.54
Santa Ana	133	130	97	84	93	74	75	98.00	12.33
Chalatenango	133	130	97	84	71	64	75	93.43	11.62
La Libertad	97	71	84	93	104	75	74	85.43	10.39
San Salvador	71	97	84	64	75	74		77.50	9.20
Cuscatlán	64	71	84					73.00	8.54
Cabañas	64	71	75	90				75.00	8.83
La Paz	64	71	74	75				71.00	8.24
San Vicente	64	71	75					70.00	8.10
Usulután	71	90	102	109				93.00	11.55
San Miguel	90	102	109	71	75	90	116	93.29	11.60
Morazán	120	116	90	75	71			94.40	11.77
La Unión	75	71	90	102	109			89.40	11.00
							Promedio País	84.11	10.21



Fig 2- 8: Promedio de los niveles Isoceránicos y GFD de los departamentos

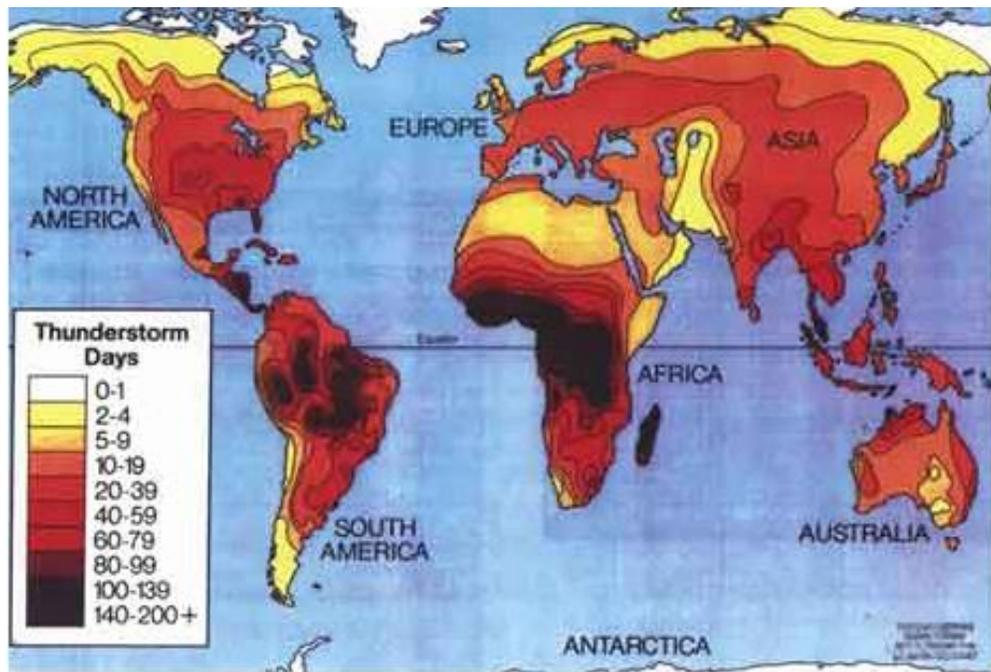


Fig 2- 9: Mapa mundial isoceránico

En la figura 2-9 se muestra un mapa mundial isoceránico que para el caso de El Salvador correspondería a un valor isoceránico en la escala de 80-99 días tormenta, valores similares al promedio determinado anteriormente según los estudios de El Salvador.

Una forma alternativa para obtener la densidad de rayos por km² por año sin ocupar una fórmula de regresión y sin tener los estudios del nivel isocerámico del país, es la de poseer un mapa mundial con los correspondientes valores del GFD. La figura 2-10 nos muestra un mapa mundial de GFD.

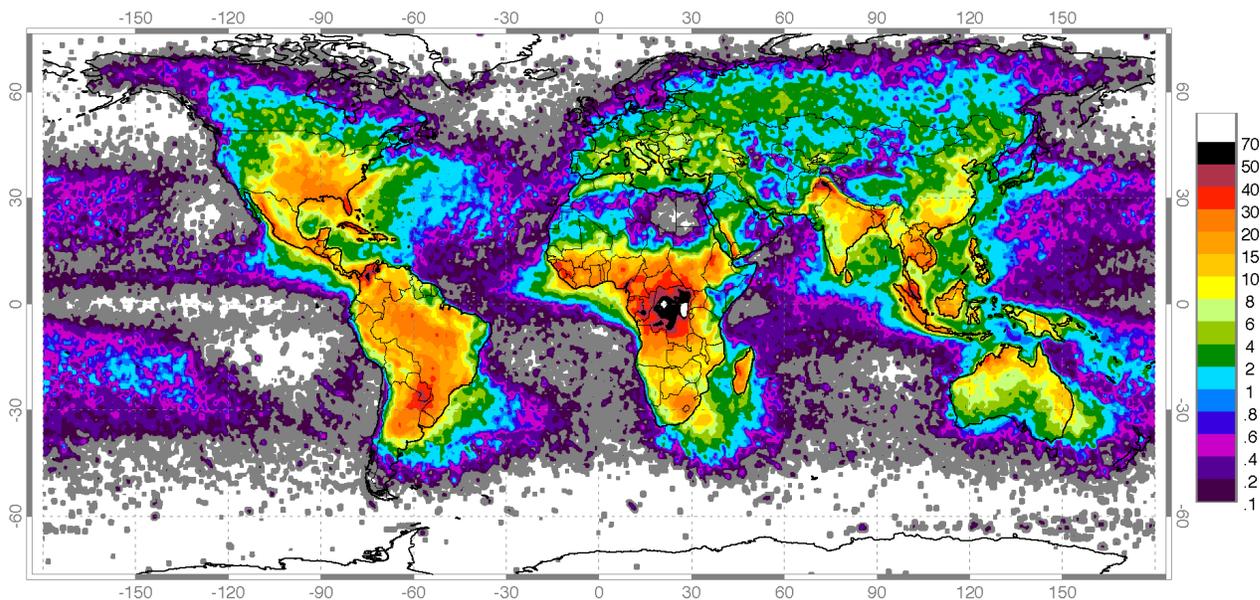


Fig 2- 10: Mapa mundial de la densidad de rayos por km² por año (GFD)

En resumen, los parámetros más importantes en el proceso de una descarga de un rayo son los siguientes:

- 1) La corriente pico para los primeros y posteriores impactos.
- 2) La forma de onda de la corriente.
- 3) El número de impactos por rayo.
- 4) GFD.

2.8 SOBRETENSIONES POR RAYO (FRENTE RAPIDO)

2.8.1 SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LÍNEAS AÉREAS

Las sobretensiones por descargas atmosféricas son causadas por descargas directas en los conductores de fase o por flameos inversos, o son inducidos por descargas atmosféricas a tierra cerca de la línea. Las sobretensiones atmosféricas inducidas generalmente están por debajo de los 400 kV en la línea aérea, y son de importancia únicamente para sistemas con tensión más baja. Debido a la alta soportabilidad del aislamiento, los flameos inversos son menos probables y son raros en sistemas de 500 kV o más.

Las sobretensiones por descargas atmosféricas de frente rápido tienen tiempos de cresta entre 0.1-20 μ s.

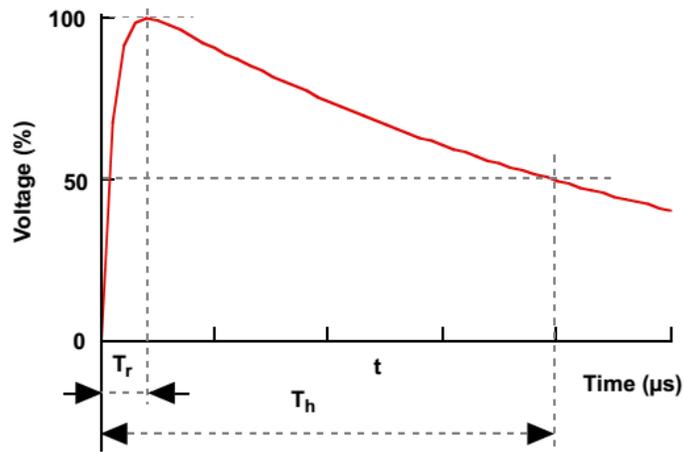


Fig 2- 11: Forma de onda típica de una sobretensión causada de un rayo

En la figura de arriba se muestra una onda de frente rápido, es llamado así porque el valor de cresta se logra rápidamente a un tiempo T_r y este tiempo usualmente está determinado en un rango de 0.1-20 μ s, mientras que el tiempo T_h llamado tiempo de la cola o tiempo donde la onda se ha atenuado al 50% de su magnitud, el tiempo se encuentra en un rango <300 μ s.

2.8.2 SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS SOBRE LAS SUBESTACIONES

Las sobretensiones atmosféricas en subestaciones y sus valores de ocurrencia dependen de:

- El desempeño ante descargas atmosféricas de las líneas aéreas conectadas a la subestación.
- La disposición de la subestación, dimensiones físicas y en particular el número de líneas conectadas a ésta.
- El valor instantáneo de la tensión de operación (en el momento de la descarga).

La severidad de las sobretensiones atmosféricas para los equipos de la subestación está determinada por la combinación de los tres factores anteriores y se requieren varias etapas para asegurar una adecuada protección. Las amplitudes de las sobretensiones (sin limitación de pararrayos) son usualmente muy altas para basar la coordinación de aislamiento en estos valores. En algunos casos y en particular con cables que se conectan a las subestaciones, la autoprotección provista por la baja impedancia de los cables puede reducir las amplitudes de las sobretensiones atmosféricas a valores suficientemente bajos.

Para los aislamientos fase-fase y longitudinal, debe considerarse el valor instantáneo de tensión a frecuencia industrial en los terminales opuestos. Para el aislamiento fase-fase se puede asumir que los efectos de la tensión a frecuencia industrial y el acoplamiento entre conductores en líneas aéreas se cancelan y el terminal opuesto puede considerarse como aterrizado. Para el aislamiento longitudinal, sin embargo, tales efectos de cancelación no existen y la tensión a frecuencia industrial se debe tener en cuenta.

Para las subestaciones, las fallas de blindaje, el retorno de un impacto de rayo y las sobretensiones inducidas generan sobretensiones que afectan al equipo de la subestación. Los voltajes inducidos por rayos generalmente están por debajo de 400 kV y son importantes solo para sistemas de bajo voltaje. Las sobretensiones entrantes causadas por la corriente de retorno de un rayo son más graves que las causadas por fallas de blindaje. El cable de guarda tiene un impacto significativo en la propagación de la onda. Un cable de guarda conectado a tierra en cada torre hace que la velocidad de propagación del componente de onda que viaja a tierra sea muy cercana a la componente del conductor. La magnitud de las sobretensiones causadas por la corriente de retorno oscila entre el 70% y el 120% del CFO de polaridad positiva del aislamiento de la línea.

Para impactos de rayo cerca de las subestaciones, las sobretensiones entre fases tienen aproximadamente la misma magnitud que las de fase de tierra.

Los impactos de retorno de un rayo generalmente ocurren en una fase con el voltaje de frecuencia de alimentación que es opuesta en polaridad al rayo. La sobretensión longitudinal máxima es la diferencia entre la sobretensión del rayo en un terminal y el voltaje de frecuencia de la alimentación de polaridad opuesta sobre el terminal del dispositivo de conmutación.

2.9 ELEMENTOS DE PROTECCION USADOS EN EL APANTALLAMIENTO DE UNA SUBESTACION DE POTENCIA

2.9.3 CABLE DE GUARDA

Son cables ubicados por encima del equipo a proteger y conectados a la tierra a través de los pórticos de la subestación. Las principales características de estos cables se presentan a continuación:

- Protegen a lo largo del cable.
- Son conductores relativamente livianos por lo que no se necesita una estructura muy rígida para soportar el tensado del cable.
- Los cables de guarda aprovechan los pórticos como sus estructuras de soporte.
- Las corrientes del rayo viajarán siempre en las dos direcciones del cable, con lo cual la corriente que debe disipar cada estructura se reduce.
- La impedancia característica presentada al rayo es notablemente inferior (cerca de la mitad de la que presentaría una sola estructura) reduciendo así la inductancia de la estructura, en consecuencia, el riesgo de flameo inverso en los aisladores de suspensión, fenómeno que puede producirse cuando hay descargas repetidas a través del mismo canal ionizado por el rayo.
- Para proteger áreas pequeñas y aisladas de la subestación, el cable de guarda puede resultar más económico que las puntas.

2.9.4 PUNTAS

Las puntas se instalan sobre los pórticos. Económicamente pueden competir con cables de guarda ya que presentan menores problemas para la instalación y mantenimiento, aunque tienen unas características eléctricas ligeramente inferiores a las de estos, tales como:

- Las puntas tienden a aumentar las corrientes de retorno, con lo cual favorecen a los rayos, pero a la vez se presenta mayor problema en la disipación de la corriente.
- Si el área de una subestación aumenta, el apantallamiento con puntas se hace más costoso que con cables de guarda debido a que una protección efectiva con puntas se logra solo con distancias relativamente cortas entre ellas, ya que el área a proteger debe tener una forma aproximadamente cuadrada.

2.9.5 MASTILES

Los mástiles requieren estructura propia por lo que resultan ser relativamente más costosos que las puntas y cables de guarda. Su utilización debe restringirse a casos especiales en los que se requiere proteger equipos aislados que no tengan pórticos aledaños.

Presentan, además, como desventaja adicional a las ya anotadas para las puntas, la gran cantidad de disipación de corriente requerida, dada su tendencia a incrementar las corrientes de retorno, ya que la corriente se debe disipar a través de una sola estructura por el desconocimiento que aún existe sobre la zona de protección del mástil.

En la figura de abajo se muestra un ejemplo del uso de mástiles y cables de guarda. En la vista de planta se nota que se han utilizado dos mástiles que están fuera de los elementos de la subestación, mientras que los otros dos mástiles sirven a la vez de soportes para los dos cables de guarda.

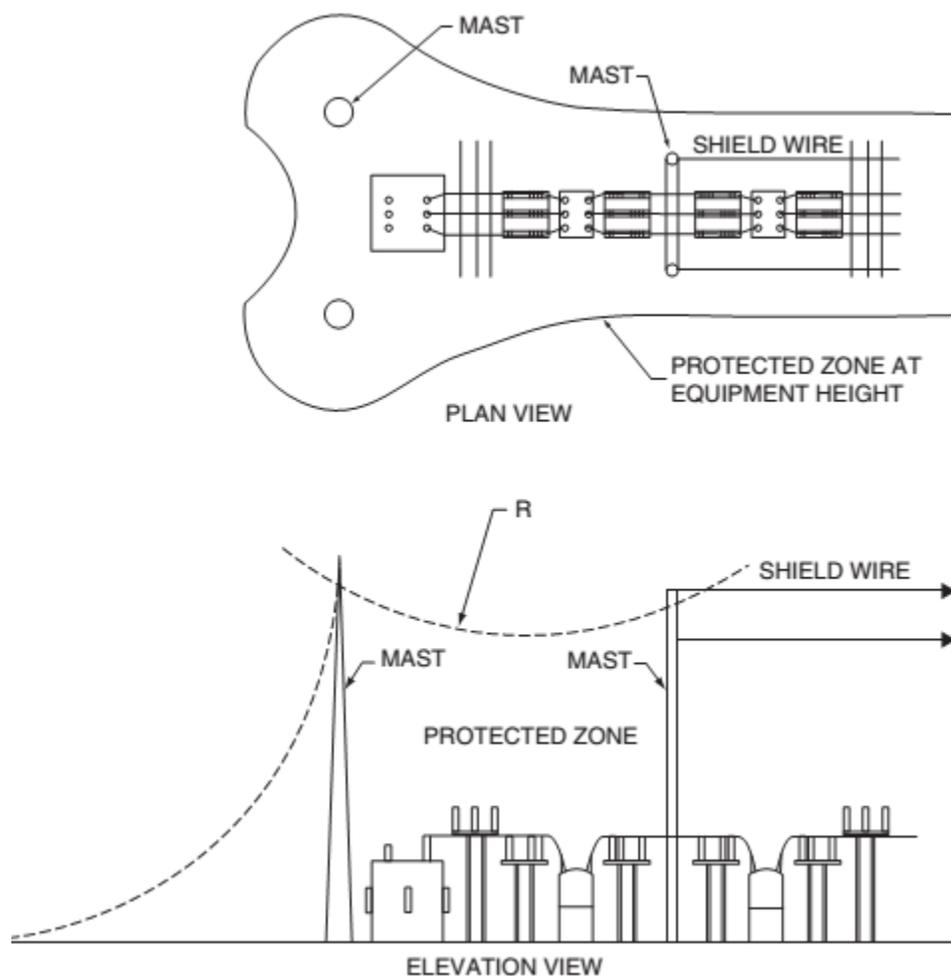


Fig 2- 12: Ejemplo para el uso de mástiles y cable de guarda para la protección de una subestación

CAPÍTULO 3: PROTECCIÓN A IMPACTO DIRECTO DE RAYO EN SUBESTACIONES DE POTENCIA

3.1 IMPORTANCIA DE LA PROTECCIÓN DE IMPACTOS DE RAYO

Una subestación de potencia debe de estar diseñada para funcionar de manera confiable en los ambientes más hostiles, por lo que debe estar protegida a muchos enemigos en el ambiente como el viento, la contaminación, el nivel sísmico, etc. Uno de los enemigos más difíciles de entender es el rayo, un fenómeno estocástico y caprichoso. El desarrollo de un rayo es un evento electromagnético muy complejo, a pesar de estos problemas y complejidades, el ingeniero en ejercicio debe hacer su trabajo, que consiste en diseñar, construir, operar y mantener un sistema que permanecerá en servicio casi el cien por ciento del tiempo, incluso durante condiciones de rayos.

Las sobretensiones que se produce por las descargas atmosféricas que inciden en la subestación de manera directa, producen condiciones críticas para el aislamiento de los equipos de patio de una subestación y todos los elementos de esta. Cuando una descarga atmosférica impacta una subestación de potencia, una sobretensión transitoria muy elevada fluye a través de los conductores y equipos en la subestación. Si la sobretensión excede la capacidad del aislamiento, se formará un arco eléctrico de potencia mantenido por la tensión a frecuencia industrial del sistema. Esta situación hace necesaria la operación de protecciones para liberar la falla, si la descarga se produce a través del aire, o de equipos con aislamiento autorregenerativo, no se producirán daños, pero si la descarga se produce en aislamientos no autorregenerativos como en transformadores el daño puede ser permanente. La función del sistema de protección consiste en proteger al equipo contra este tipo de descargas por medio de un sistema de cables de guarda, mástiles y puntas, ubicadas de manera estratégica sobre la subestación, una de las principales funciones del sistema de protección es interceptar la descarga atmosférica eliminándolas o minimizándolas, y apartarlas de los conductores vivos, y equipo en general. Esto es lo que se conoce como apantallamiento, este sistema de apantallamiento debe garantizar la protección de las personas, equipos, materiales y edificaciones expuestos a daños en caso de descargas atmosféricas directas.

3.1.1 EFECTOS Y PÉRDIDAS CAUSADAS POR LOS IMPACTOS DIRECTOS DE RAYO

El rayo es un fenómeno natural altamente destructivo, si la subestación no cuenta con un sistema de protección externo, los daños que puede causar el impacto directo de un rayo sobre una subestación de potencia pueden ser catastróficos para los equipos y para el personal de servicio. Las sobretensiones por el impacto directo de un rayo se propagan por las líneas y equipos de la subestación produciendo múltiples efectos electromagnéticos, electrodinámicos y térmicos, todos estos efectos tienen como consecuencia importantes daños a los equipos de patio de una subestación y los equipos de electrónica sensible. Las pérdidas económicas pueden tener costos muy elevados por interrupción del servicio y reemplazo de equipo dañado. Por ejemplo, el impacto directo sobre un transformador de

potencia que es el activo que representa mayor importancia y costo económico dentro de una subestación, puede significar pérdidas millonarias por reemplazo y reparación, además de una larga interrupción del servicio.

Los daños que puede producir el impacto directo de un rayo en una subestación son:

- Daño por efectos eléctricos: destrucción de equipos. Elevación del potencial de tierra y generación de sobretensiones que pueden dañar los equipos de servicio de la subestación parcial o permanentemente causando degradación de los materiales aislantes en forma brutal, provocando perforación del dieléctrico, o su envejecimiento prematuro, y posterior perforación.
- Daños por efectos electrodinámicos: Deformaciones y roturas en la estructura por las fuerzas generadas por el elevado campo magnético que se produce. Provocando daños en la obra civil y estructuras de la subestación.
- Daños por efectos térmicos: La disipación de calor por efecto Joule puede llegar a provocar graves incidentes dentro del área de la subestación, como incendios, fusión de componentes y explosiones.
- Daños por efectos de inducción: Dentro de un campo electromagnético variable, todo conductor sufre el paso de corrientes inducidas. Si estos conductores llegan a equipos electrónicos o informáticos pueden llegar a producir perturbaciones en los circuitos de corrientes débiles ya sea de mandos o comunicaciones, provocando daños irreversibles.

Pérdidas causadas por los efectos destructivos del rayo:

- Pérdida de vida humana: La elevación de los potenciales de paso y toque ponen en peligro las vidas del personal de servicio. El paso de una corriente de una cierta intensidad durante un corto plazo de tiempo es suficiente para provocar riesgo de electrocución por paro cardíaco o respiratorio. A esto se añaden los peligros de quemaduras.
- Pérdida de activos: Los daños permanentes en equipos de patio, equipos de electrónica sensible, edificios, vehículos u otro activo de valor significativo para el funcionamiento de la subestación.
- Pérdida de servicio público: Las subestaciones de potencia muchas veces abastecen servicios públicos muy importantes como el bombeo de agua, telecomunicaciones, alumbrado público y señales de tránsito. La pérdida de estos servicios significa un impacto muy importante a las comunidades.
- Pérdida de valor económico: La interrupción del servicio eléctrico por reparación de los daños ya mencionados significan pérdidas económicas elevadas para la subestación de hasta millones de dólares.

3.1.2 DIFERENTES NORMAS Y MANUALES USADOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Existen muchas guías y manuales para el diseño de protección contra impactos de rayos, aunque no todas tratan de forma específica el caso de las subestaciones de potencia, todas incluyen información muy importante referente al fenómeno del rayo y la importancia de una protección confiable, entre las normas más utilizadas por los diseñadores se tiene:

- **Normas IEC 62305 “Protección contra rayos”**

Las normas IEC 62305, partes 1 a 4, son aplicables para la planificación, proyecto, construcción, prueba y mantenimiento de sistemas de protección contra el rayo para estructuras, sus instalaciones, sus contenidos y para las personas que se encuentren en las mismas. Se dividen en:

IEC 62305-1 “Principios generales”: Esta parte de la norma contiene información acerca de los riesgos generados por los rayos, sus características y los parámetros del mismo para llevar a cabo la simulación de los efectos del rayo. Se aclaran y exponen los procedimientos a seguir y los principios de protección en los que se basan las siguientes partes de la norma.

IEC 62305-2 “Gestión del riesgo”: La gestión de riesgos, de acuerdo con la norma IEC 62305-2, utiliza un análisis de riesgos para determinar, en primer lugar, la necesidad de la protección contra rayos. A continuación, se fijan las medidas de protección óptimas, tanto desde el aspecto técnico como desde el económico. Finalmente se determina el riesgo residual. Partiendo de una situación en la que el edificio no está protegido, el riesgo residual se va reduciendo hasta que quede por debajo del umbral del riesgo aceptable. Este procedimiento puede utilizarse, tanto para la simple determinación de la clase de protección de un sistema de protección contra el rayo según IEC 62305-3, como también para determinar y fijar un sistema de protección completo contra el impulso electromagnético de rayo de acuerdo con la norma IEC 62305-4.

IEC 62305-3 “Protección de estructuras y de personas”: Esta parte trata de la protección de estructuras contra daños materiales y del riesgo para la vida de las personas como consecuencia de la acción de la corriente de rayo o por formación de ondas peligrosas, especialmente en el caso de descarga directa del mismo. Un sistema de protección contra rayos incluye, por un lado, medidas de protección externa (instalación captadora, instalación derivadora y sistema de puesta a tierra) y medidas de protección interna, por otro (compensación de potencial de protección contra rayos y distancia de separación). El sistema de protección contra rayos se define por su clase de protección, disminuyendo la eficacia de la protección desde la clase de protección I hasta la IV. La clase de protección requerida en cada caso se determina con ayuda del análisis de riesgos según IEC 62305-2.

IEC 62305-4 “Protección de sistemas eléctricos y electrónicos en estructuras.”: Esta parte trata de la protección de edificios y estructuras con sistemas eléctricos y electrónicos contra los efectos del impulso electromagnético de rayo. Basándose en las medidas de protección

según IEC 62305-3, con esta norma se tienen además en consideración los efectos de los campos eléctricos y magnéticos, así como de las corrientes y tensiones inducidas, que se han ocasionado como consecuencia de descargas de rayo directas o indirectas. La relevancia y la necesidad de esta norma es consecuencia de la creciente utilización de complejos sistemas eléctricos y electrónicos.

- **Estándar NFPA 780 “Instalación de sistemas de protección contra rayos”**

Esta norma cubre los aspectos de las instalaciones de protección contra rayos tanto en estructuras convencionales como aquellas que requieren características especiales por su tipo de ocupación. Entre algunos contenidos de esta norma se tiene:

- Definiciones.
- Protección para estructuras ordinarias.
- Protección para estructuras especiales
- Protección para estructuras que contienen material inflamable.

- **Norma IEEE Std 998-2012 “Guía para la protección a impacto directo de rayos en subestaciones”**

Esta guía identifica y discute los procedimientos de diseño para proporcionar protección contra impactos directos en las subestaciones de distribución, transmisión y plantas generadoras. Además, proporciona información sobre dos métodos que se encuentran ampliamente utilizados:

- a) El método empírico clásico
- b) El modelo electrogeométrico

También se revisa un tercer enfoque, que implica el uso de terminales receptoras no convencionales y métodos de diseño alternativos. Esta guía no pretende incluir todos los métodos de protección que puedan haberse desarrollado. La guía tampoco aborda la protección contra sobretensiones que ingresan a una subestación por líneas de transmisión, comunicación o por problemas de seguridad del personal. Los usuarios de esta guía deben familiarizarse completamente con todos los factores que se relacionan con el diseño de una instalación en particular y utilizar un buen criterio de ingeniería en la aplicación de los métodos presentados, particularmente con respecto a la importancia y el valor del equipo que se protege.

3.2 MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE BLINDAJE EN SUBESTACIONES USADOS POR LA NORMA IEEE STD 998-2012

La norma IEEE std 998-2012 es una guía para el diseño de protección a impactos directos de rayos enfocada solamente a subestaciones de potencia, presenta una serie de métodos que ha sido utilizados durante décadas para el diseño de apantallamiento en subestaciones, los métodos más utilizados son los empíricos también llamados geométricos y los métodos electrogeométricos, además la guía muestra una serie de modelos recientes no convencionales cuya investigación todavía se encuentra en desarrollo y pueden llegar a tener una aplicación en el campo de la ingeniería, el propósito principal de esta guía es proporcionar la mayor información con la que se puedan tener criterios de diseño en la protección contra rayos, según sea el caso de estudio.

3.2.1 PROBLEMAS DE DISEÑO

El diseño de blindaje contra impactos directos de rayos en subestaciones debe de tener en cuenta varios factores relacionados al fenómeno de los rayos:

- La naturaleza impredecible y probabilística del rayo.
- La falta de datos debido a la baja frecuencia de los rayos en las subestaciones.
- La complejidad y la economía involucradas en el análisis de un sistema en detalle.

No existe un método conocido para proporcionar 100% de protección. La incertidumbre, la complejidad y el costo de realizar un análisis detallado de un sistema de blindaje históricamente han dado lugar a simples "reglas generales" que se utilizan en el diseño de instalaciones de menor voltaje. Las instalaciones de alto voltaje, con sus componentes de equipo crítico y más costoso, generalmente justifican un estudio más sofisticado para establecer el riesgo versus el costo beneficio, estos estudios pueden involucrar uso de software avanzado que permita un análisis completo de protección. Debido a los factores anteriores, se sugiere que se utilice un análisis que incluya al menos los siguientes cuatro pasos en el diseño de un sistema de protección:

- a) Evaluar la importancia y el valor de la instalación que se protege.
- b) Investigue la gravedad y la frecuencia de las tormentas eléctricas en el área de la instalación de la subestación y la exposición de la subestación.
- c) Seleccione un método de diseño apropiado consistente con la evaluación anterior y luego diseñe un sistema de protección apropiado.
- d) Evaluar la efectividad y el costo del diseño resultante.

3.2.2 MÉTODOS EMPÍRICOS GEOMÉTRICOS

Los Métodos geométricos suponen que el dispositivo de blindaje (cable o mástil) puede interceptar todos los rayos que llegan sobre el área del sujeto si el dispositivo de blindaje mantiene una cierta relación geométrica (separación y altura diferencial) con el objeto protegido. Estos métodos establecen que un conductor o estructura de blindaje a tierra moldea o proyecta una “sombra” eléctrica en el plano de tierra debajo de ella.

Los métodos de diseño empíricos clásicos que han sido utilizados para el blindaje subestaciones de los impactos directos brindando una protección aceptable son:

- Ángulos fijos.
- Curvas empíricas.

3.2.2.1 MÉTODO DE LOS ÁNGULOS FIJOS

Este es un método empírico de diseño que utiliza ángulos verticales para determinar el número, la posición y la altura de mástiles o cables de guarda. Los ángulos pueden variar en función de nivel de exposición a los rayos y el área de la subestación. Al no tomar en cuenta la magnitud de la corriente de descarga es probable que a ciertas magnitudes de corriente el nivel básico de aislamiento pueda fallar.

El valor del ángulo α que se utilizan comúnmente es de 45° y para el ángulo β se utilizan valores de 30° y 45° , se pueden reducir los ángulos de protección a medida que aumenta la altura de las estructuras para mantener una baja tasa de fallas. La figura 3-3 muestra el área de protección para cuatro mástiles, la altura “y” es la diferencia entre la altura total y la altura “d” del equipo, el radio de protección “x” para cada mástil está limitado por altura “d” de los equipos protegidos, entonces el radio de protección se puede calcular con la ecuación 3.1. Un enfoque similar podría ser utilizado para la aplicación de puntas en subestaciones.

$$\tan \theta = \frac{x}{y} \quad (3.1)$$

Donde

x: distancia de protección en m.

y: diferencia de altura entre mástil y el equipo

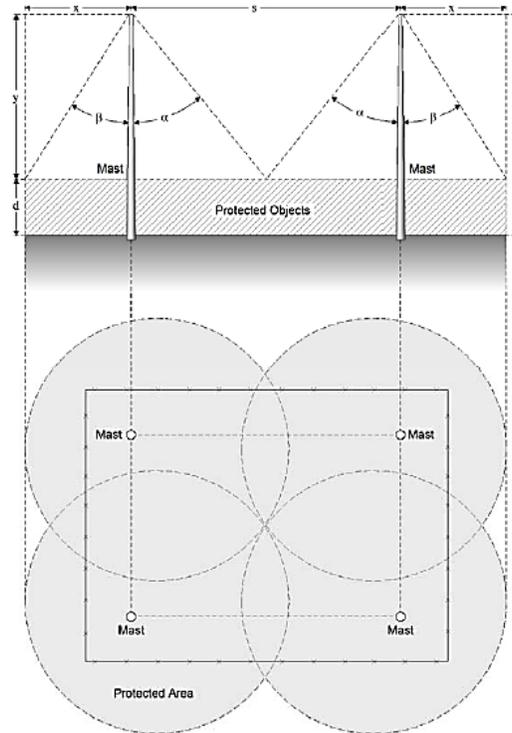


Fig 3- 1: Área protegida por cuatro mástiles, usando ángulos fijos

El radio de protección se puede obtener despejando “x” de la ecuación 3.1. Algunos autores sugieren ángulos de protección de 40° a 45° para alturas de equipos hasta 15 m, 30° para alturas entre 15 y 25 m, y menos de 20° para alturas de hasta 50 m. Se asume una tasa de falla de 0.1 a 0.2 fallas de blindaje / 100 km / año. Este enfoque también podría usarse para seleccionar ángulos de blindaje para cables de guarda en subestaciones.

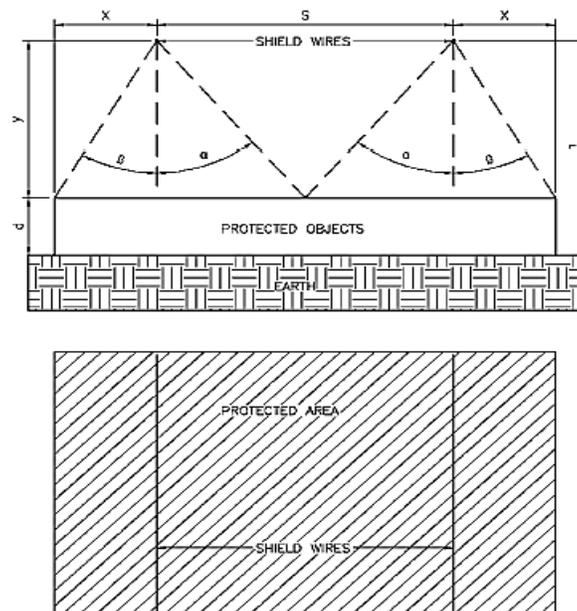


Fig 3- 2: Área protegida por dos cables de guarda adyacentes

Aplicación del método:

1. Se supone una altura de mástil o cable de guarda y su localización.
2. Se determina el área de protección para la altura de los equipos de acuerdo con los ángulos supuestos.
3. Se incrementa la altura del mástil o cable de guarda, se relocalizan los mástiles o se adicionan más para tener un cubrimiento completo.

3.2.2.2 MÉTODO DE LAS CURVAS EMPÍRICAS

Este método plantea el uso de un modelo electrogeométrico desarrollado en laboratorios, experimentado con modelos a escala de subestaciones y de electrodos simuladores de descargas. Las pruebas del modelo de escala se realizaron utilizando un impulso positivo de $1,5 \times 40 \mu\text{s}$ para iniciar una descarga de una varilla (que representa la nube cargada) a un plano de tierra o un cable de guarda horizontal y un conductor ubicado cerca del electrodo. El espaciado relativo del electrodo, el cable de guarda y el conductor se variaron con cada descarga para producir una base de datos adecuada para el análisis. A partir de esta base de datos se hicieron gráficos que muestran el porcentaje de descargas que golpean el cable de guarda, el conductor o el plano de tierra. El año siguiente, 1942, Wagner, McCann y Lear publicaron un documento sobre el blindaje de subestaciones. Estas investigaciones se basaron en pruebas adicionales del modelo a escala y se desarrollaron una serie de curvas que relacionan la altura y el espaciado de los cables de guarda y los mástiles con varias tasas de falla. Estas curvas producen un diseño más preciso que las aproximaciones lineales. Las curvas se desarrollaron para proteger las tasas de falla de 0.1%, 1.0%, 5.0%, 10% y 15%. En el modelo original usaban relaciones de alturas para diferentes configuraciones de cables de guarda, mástiles y objetos protegidos. Para eliminar la necesidad de usar relaciones se elaboraron curvas continuas $f(x, y)$ para un valor constante d como se muestra de la Figura 3-3 a la Figura 3-8.

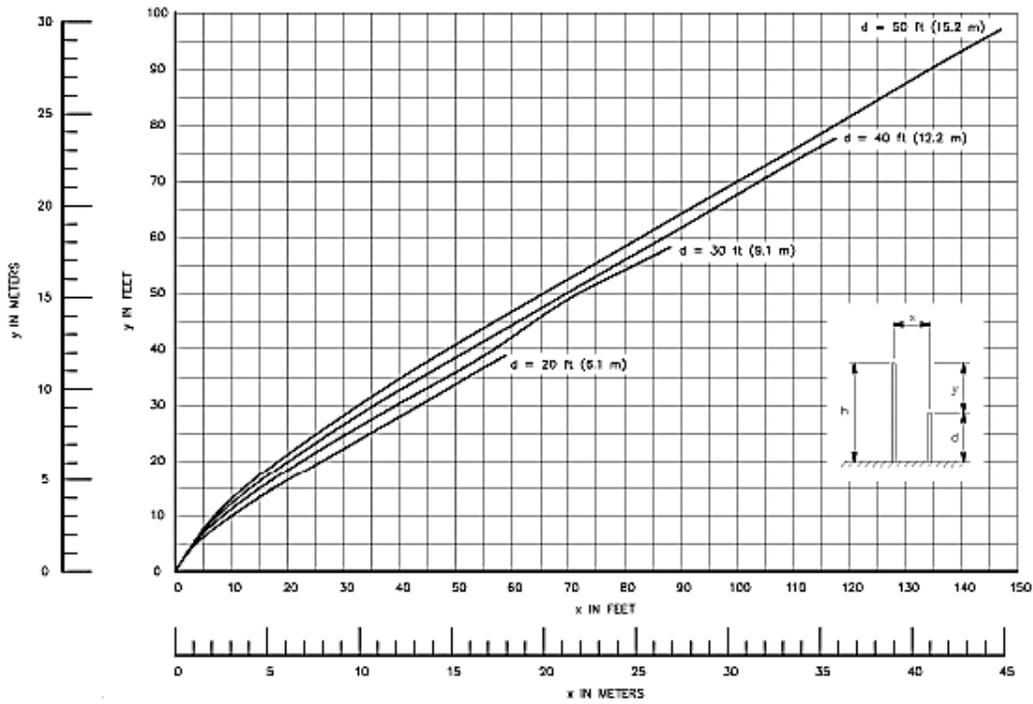


Fig 3- 3: Mástil que protege un solo objeto: exposición al 0.1%. Altura del mástil sobre el objeto protegido” y ”, en función de la separación horizontal, “ x ” y altura del objeto protegido d

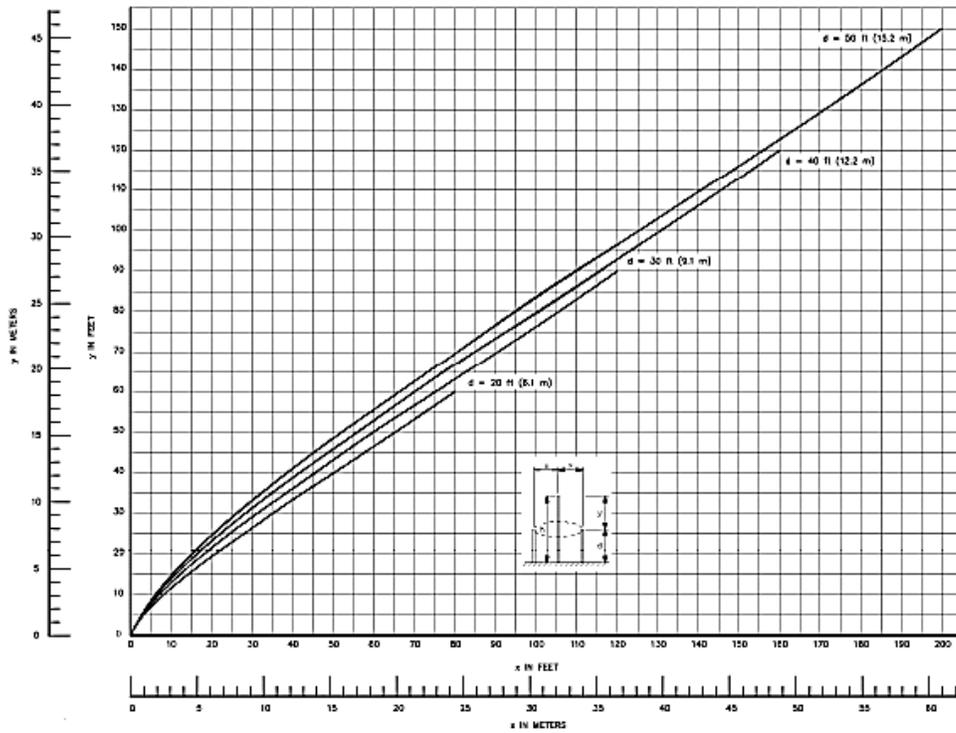


Fig 3- 4: Mástil que protege el anillo de objetos: 0,1% de exposición. Altura del mástil sobre el objeto protegido, “ y ”, en función de la separación horizontal, “ x ” y altura del objeto protegido “ d ”

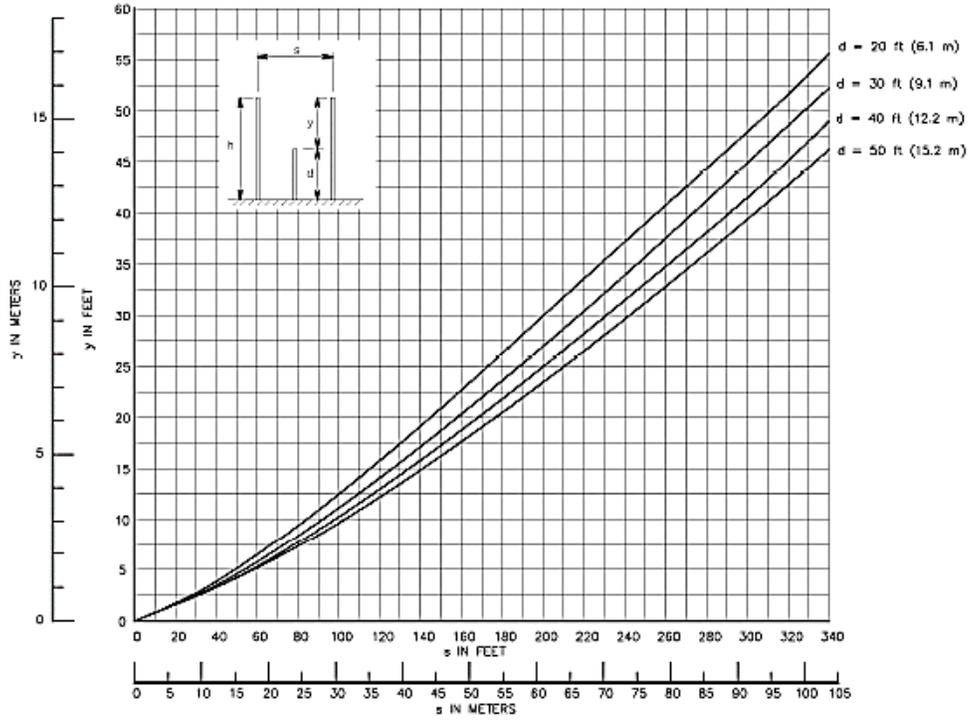


Fig 3- 5: Dos mástiles que protegen un solo objeto, sin superposición: exposición al 0.1%. Altura del mástil sobre el objeto protegido, y , en función de la separación horizontal s , y altura del objeto protegido d

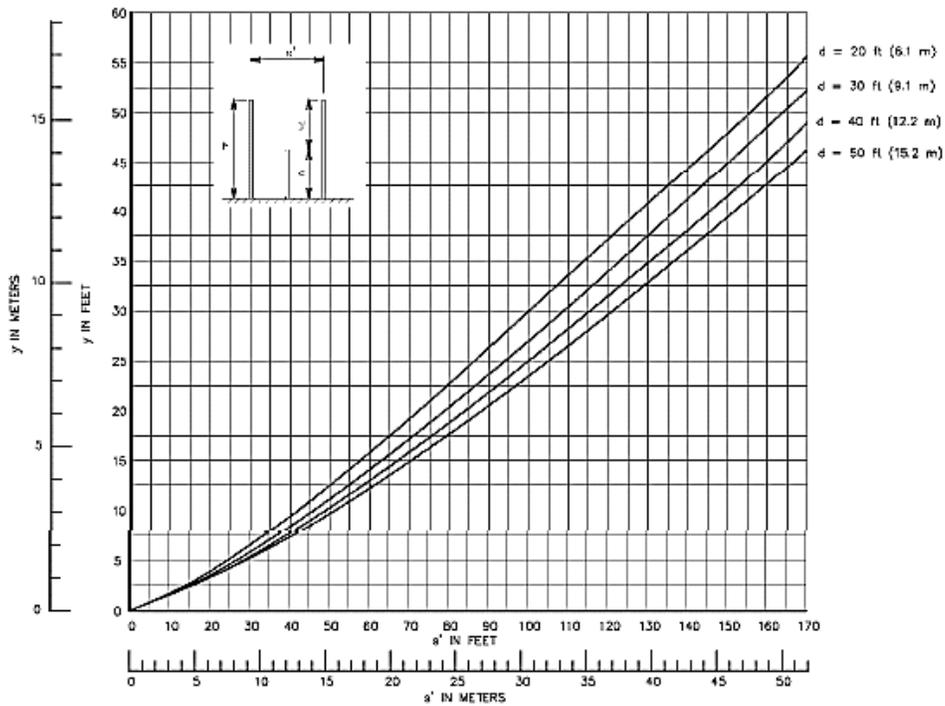


Fig 3- 6: Dos mástiles que protegen un solo objeto, con una superposición del 0.1% de exposición. Altura del mástil sobre el objeto protegido, y , en función de la separación horizontal s' , y altura del objeto protegido d

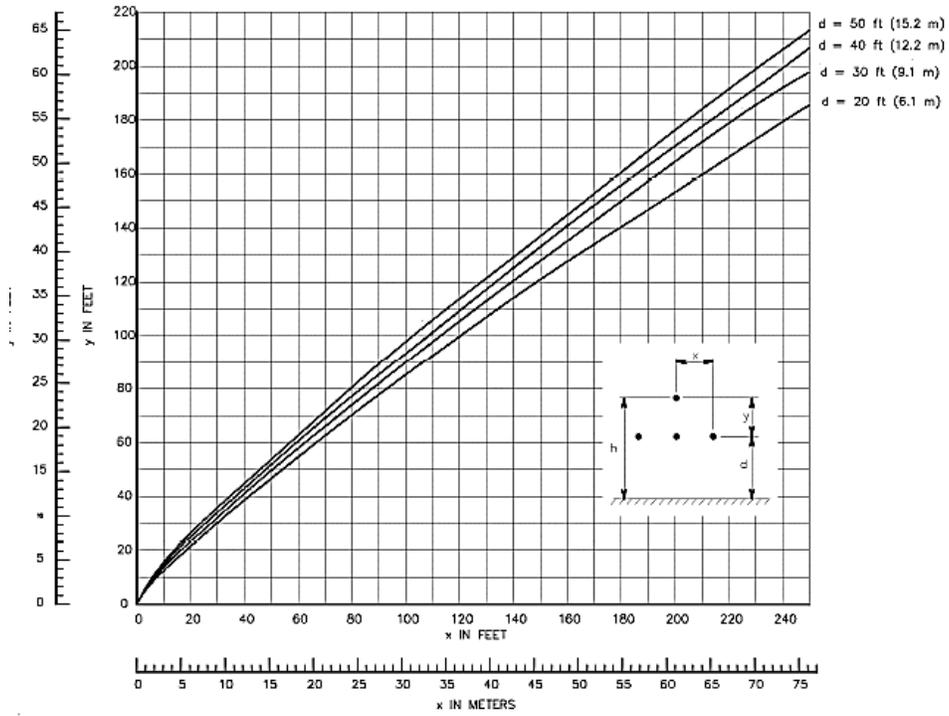


Fig 3- 7: Cable de blindaje que protege los conductores horizontales - 0.1% de exposición. Altura de los cables de guarda sobre los conductores, y , en función de la separación horizontal, x y la altura de los conductores protegidos, d

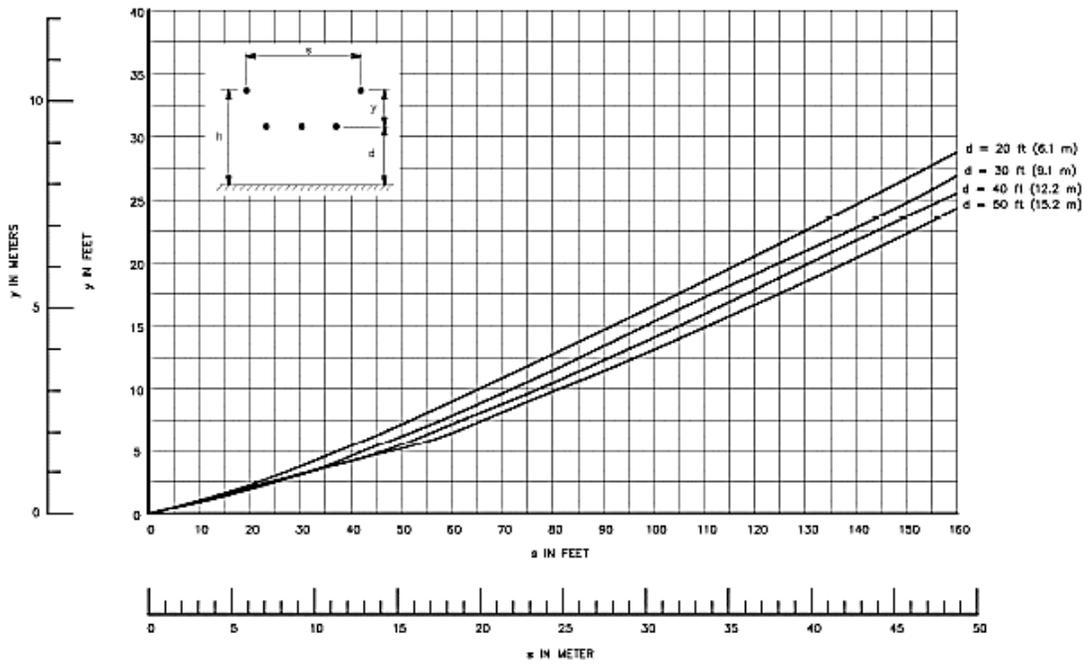


Fig 3- 8: Dos cables de guarda que protegen los conductores horizontales: 0,1% de exposición. Altura de los alambres de protección por encima de los conductores, y , en función de la separación horizontal s , y la altura de los conductores protegidos d

3.2.3 MODELOS ELECTROGEOMÉTRICOS

Este método pretende que todos los objetos a ser protegidos sean menos atractivos a los rayos que los elementos de protección, determinando una “distancia de descarga” esta distancia es la longitud del salto final entre el líder descendente escalonado y la estructura puesta a tierra que lo atrae.

La distancia de descarga determina la posición de la estructura de protección con respecto al objeto que se quiere proteger, tomando en cuenta la altura de cada uno respecto a tierra. Dicha distancia está relacionada con la carga del canal del rayo y por lo tanto es una función de la corriente de retorno de este. En la práctica para determinar la altura mínima de los dispositivos de protección, se trazan arcos de circunferencia con radio igual a la distancia de descarga a los objetos a ser protegidos. De tal forma que los arcos sean tangentes al plano de tierra y a los objetos, o tangentes entre los objetos. Cualquier equipo por debajo de los arcos estará protegido por el o los objetos que conforman el arco y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas.

Otra forma de visualizar este concepto consiste en imaginar una esfera de radio igual a la distancia de descarga, rodando sobre la superficie de la subestación y sobre los objetos de esta. Todos los equipos que logre tocar la esfera serán susceptibles a descargas directas. El propósito es que los únicos objetos que toque la esfera sean los dispositivos apantalladores.

Los métodos electrogeométrico aplicados en la norma IEEE std 998-2012 son:

- Método electrogeométrico de Mousa
- Método electrogeométrico de Eriksson.

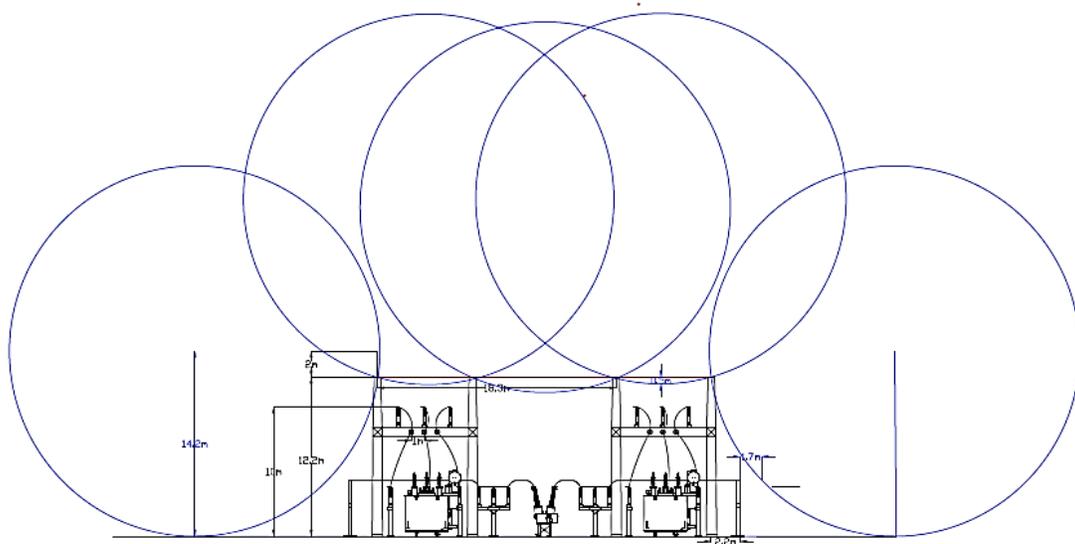


Fig 3- 9: Método electrogeométrico usando la esfera rodante

3.2.3.1 MÉTODO ELECTROGEOMÉTRICO DE MOUSA

Este método permite seleccionar la altura efectiva del apantallamiento teniendo ya definidas las dimensiones de los pórticos, y las alturas de vanos y buses dentro de la subestación de potencia. Mousa supone que la descarga eléctrica llega en dirección vertical, considerando que la suposición que las descargas llegan en ángulos aleatorios es una complicación innecesaria. Propone estimar el proceso de fijación del rayo y el área protegida proporcionada por los componentes del sistema de protección mediante la determinación de una distancia de descarga crítica.

Distancia de descarga crítica: La distancia de descarga crítica corresponde al último paso del líder de la descarga atmosférica para la corriente crítica. El valor define el tamaño del área que rodea un mástil, o un cable de guarda, que está protegido de los rayos.

Existen una serie de ecuaciones propuestas por diferentes investigadores para calcular el valor de la distancia de descarga. Mousa hace una modificación a la ecuación propuesta como la mejor aproximación a la distancia de descarga por la norma IEEE 998 std-2012, agregando un coeficiente “k” que representa las diferentes distancias de impacto a un mástil, un cable de guarda y al suelo

$$S_c = 8kI_c^{0.65} \quad (3.2)$$

Donde:

S: es la distancia de descarga en metros

K: es el coeficiente para diferentes distancias de descarga

- a) un mástil o punta $k = 1.2$,
- b) un cable de guarda $k = 1.0$

I_c: la corriente crítica de flameo en kA.

Corriente de descarga crítica: Debido a que la magnitud de la corriente de los rayos puede variar, el área de protección para una corriente de descarga determinada posiblemente no proteja el equipo para una corriente de descarga menor, por el contrario, la misma área puede proteger el equipo de corriente de descarga más grande. Debido a que los impactos menores que un valor crítico pueden penetrar el sistema de protección, la coordinación de aislamiento debe ser capaz de resistir todas estas sobre tensiones sin producir arcos, entonces el sistema de protección debe estar diseñado para interceptar todos los impactos de magnitud de la corriente de descarga crítica y mayores a esta.

La corriente de descarga crítica se usa para determinar la distancia de alcance para el sistema de protección contra rayos de la subestación. La ecuación de corriente de descarga crítica es una función de la impedancia de sobretensión del bus y del nivel de aislamiento básico (BIL) del equipo. Los aisladores de bus generalmente se seleccionan para resistir un nivel de impulso básico (BIL), los aisladores también se pueden elegir de acuerdo con otras características eléctricas, incluida la tensión de descarga disruptiva crítica (CFO) de impulso de polaridad negativa. El arco se produce si el voltaje producido por la corriente de rayo

que fluye a través de la impedancia de sobretensión del bus excede el valor soportado, esto se puede expresar en la ecuación 3.3 y 3.7. Las ecuaciones no tienen en cuenta los descargadores de sobretensiones de la subestación, que limitarán las sobretensiones dentro de la subestación.

$$I_c = \frac{BIL * 1.1}{\left(\frac{Z_s}{2}\right)} = \frac{BIL * 2.2}{Z_s} \quad (3.3)$$

O

$$I_c = \frac{0.94 * CFO * 1.1}{\left(\frac{Z_s}{2}\right)} = \frac{2.068 * CFO}{Z_s} \quad (3.4)$$

Donde:

I_c: la corriente de descarga crítica en kA.

BIL: tensión soportada al impulso tipo atmosférico del aislamiento del equipo en kV.

CFO: tensión crítica de flameo de los aisladores.

1.1: es el factor a tener en cuenta para la reducción de la corriente de descarga que termina en un conductor en comparación con la impedancia cero de la tierra.

Z_s: es la impedancia de sobretensión del bus a proteger.

La ecuación 3.3 es utilizada cuando el apantallamiento protege un bus soportado por aisladores de poste o equipos. El valor el BIL será determinado para la instalación según los estudios de coordinación de aislamiento.

La ecuación 3.4 puede ser utilizada cuando el apantallamiento protege un bus soportado por cadenas de aisladores, el valor de CFO se reduce 6% para producir la capacidad aproximada al BIL, él CFO puede ser estimado por la ecuación 3.5:

$$CFO = 0.94 * 585w \quad [kV] \quad (3.5)$$

Donde:

CFO: tensión crítica de flameo inverso de los aisladores.

w: longitud de la cadena de aisladores en m.

Impedancia de sobretensión Z_o: La impedancia de sobretensión se expresa por la ecuación 3.9.

$$Z_c = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h_{av}}{R_c}\right) \ln\left(\frac{2h_{av}}{r}\right)} \quad (3.6)$$

Donde:

h_{av}: es la altura promedio del conductor.

R_c: es el radio de la corona.

r: es el radio metálico del conductor, o radio equivalente en el caso de conductores agrupados.

Cálculo del radio de corona: El radio de corona para un solo conductor por fase, que viene dado por la ecuación 2.11:

$$R_c * \ln \left[\frac{2h_{av}}{R_c} \right] - \frac{V_c}{E_o} = 0 \quad (3.7)$$

Donde:

Rc: es el radio de la corona para un solo conductor por fase en metros.

hav: es la altura promedio del conductor en metros.

Vc: es el voltaje de aislante permisible para un aumento de polaridad negativa que tiene un frente de onda de 6 μ s en kilovoltios (Vc = el BIL para aisladores de poste)

Eo: es el gradiente de corona de límite, esto se toma igual a 1500 kV/m

Consideraciones a tomar:

Ajuste para el extremo de un bus: la situación común en la que un rayo impacta directamente a un conductor, esta descarga tendría que fluir al menos en dos direcciones. Las ecuaciones suponen que las impedancias de sobretensión son iguales en ambas direcciones y la impedancia de sobretensión total es el paralelo de las dos. Pero en algunos casos la corriente solo podría ir en una dirección un ejemplo sería un impacto en el extremo de un bus radial, la descarga solo fluiría en una dirección y la sobretensión sería el producto de la corriente de descarga y la impedancia de sobretensión del bus, en este caso la corriente Is se puede calcular dividiendo la ecuación (3.3) y la ecuación (3.4) por 2.

Ajuste para transformador, switch abierto o interruptor abierto: En los puntos abiertos, o en los devanados de los transformadores la impedancia cambia a un valor más grande, en estos puntos la onda de voltaje invertirá su flujo y regresara a lo largo del conductor, produciendo hasta el doble del voltaje por lo que es necesario aplicar descargadores de sobretensión en esos puntos Is se puede calcular dividiendo la ecuación (3.3) y la ecuación (3.4) por 2. Los equipos con BIL reducido se deben proteger con descargadores de sobretensión.

Determinación del área de protección para un solo mástil

Para el cálculo de área de protección para un mástil empleando el método electrogeométrico, en el que se tiene en cuenta la altura del mástil h, la altura del equipo d, y la distancia de descarga critica. El procedimiento describe considerando un mástil sobre el que se apoya la esfera.

Cálculo de la distancia de protección para un solo mástil.

La distancia X se calcula restando la distancia D (triangulo verde) y las distancia d (triangulo rojo)

$$x = D - d$$

$$x = \sqrt{S_c^2 - (S_c - H_{punta})^2} - \sqrt{S_c^2 - (S_c - H_e)^2} \quad (3.8)$$

Donde:

x = distancia de protección para un solo mástil.

H_e = altura del equipo o bus

S_c = Radio de la esfera calculado numéricamente

H_{punta} = Altura de la punta franklin

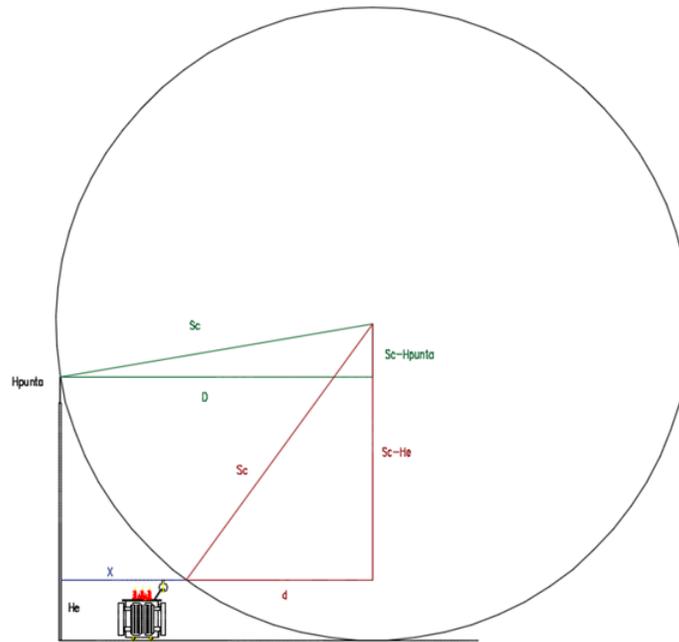


Fig 3- 10: Área protegida por un mástil vista de lateral

Procedimiento para el diseño

Para el cálculo del apantallamiento se realiza el siguiente procedimiento, tanto para cables de guarda como para mástiles y puntas.

- 1) Determinar altura de estructuras y equipos.
- 2) Cálculo de la impedancia de sobretensión del bus, teniendo en cuenta el radio corona, Z_o .
- 3) Cálculo de la corriente crítica de descarga, I_s .
- 4) Cálculo de la distancia de descarga crítica (radio de la esfera), S_c .

Para mástiles y puntas.

- 1) Se asigna la altura inicial del mástil, h .
- 2) Cálculo del área de protección de un solo mástil, x .
- 3) Cálculo de la máxima separación de los mástiles.
- 4) Con esta información los mástiles pueden ser ubicados en la subestación, ajustando su localización para obtener el diseño óptimo.

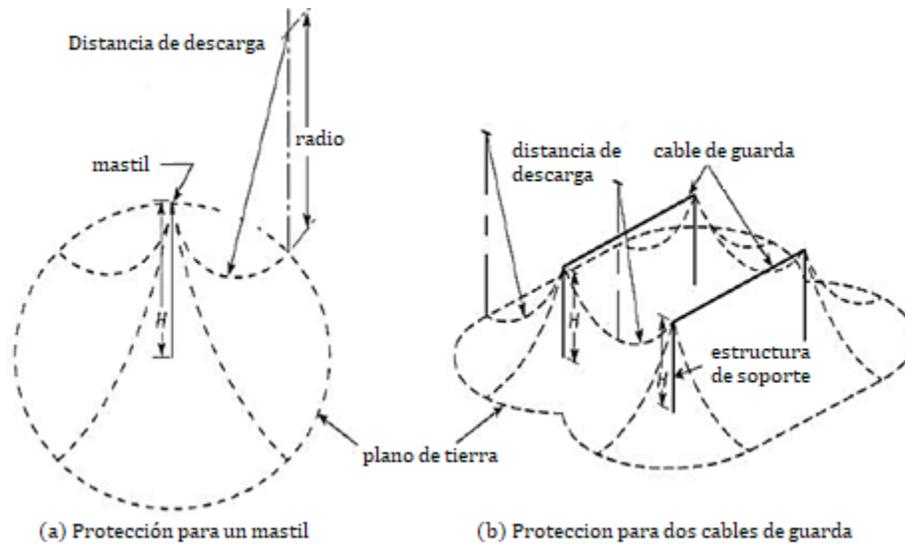


Fig 3- 11: Zonas de protección de un mástil y dos cables de guarda

3.2.3.2 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO DE ERIKSSON

A diferencia de los métodos anteriores que utilizan solamente la magnitud de la corriente de descarga del rayo para determinar la distancia de impacto, el modelo de Eriksson añade una variable para el cálculo de la distancia tomando en cuenta la altura de las estructuras o mástiles y la altura de los cables de guarda logrando un método más completo. Eriksson fundamentó su modelo a partir de la interceptación de los líderes descendente y ascendente descubriendo que la interceptación depende de la altura de la estructura, las velocidades relativas y de las posiciones relativas de los líderes llegando a definir la distancia de captura del rayo como el radio atractivo R_a , tal como se muestra en la figura 3-12.

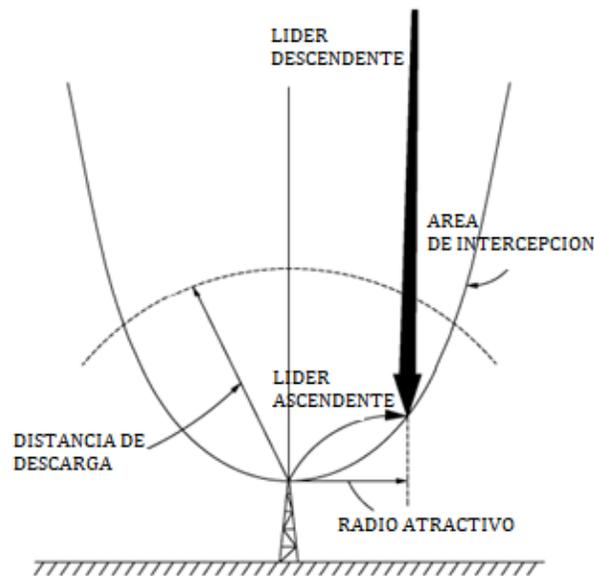


Fig 3- 12: Esquema básico según Eriksson

Para estructuras verticales de hasta 60 m de altura, Eriksson definió el radio atractivo como:

$$R_a = 0.84H_m^{0.6}I_s^{0.74} \quad (3.9)$$

Para cables de guarda horizontales y líneas de hasta 60 m de altura, el radio atractivo viene dado por:

$$R_a = 0.67H_{sw}^{0.6}I_s^{0.74} \quad (3.10)$$

Donde:

R_a: es el radio atractivo en metros.

I_s: corriente de descarga del impacto en kilómetros desde la ecuación (3.3).

H_m: es la altura de la estructura en metros.

H_{sw}: es la altura de la los cables de guarda

El radio atractivo es de menor magnitud que la distancia del impacto del rayo cuando no se toma en cuenta las alturas de los elementos de protección haciendo del método más conservador. El radio atractivo debe calcularse para cada elemento de la subestación que va a protegerse mediante los elementos de protección sean estos mástiles o cables de guarda. Al cumplir estos requerimientos se dice que la instalación está protegida a un nivel predeterminado.

La ecuación (3.11) muestra cómo calcular el ángulo crítico. Para proporcionar una mejor protección contra rayos, debe usarse un ángulo de 45 grados o menos cuando se requiera protección contra rayos laterales. Los ángulos críticos típicos α_c para las subestaciones son de 30° a 60°. Los radios de atracción necesitan que R_g sea mayor que la diferencia de la altura de protección y la altura del conductor que se protege. La ecuación (3.12) da la distancia horizontal máxima sugerida para una estructura de protección del equipo que está siendo protegido, donde R_g está dada por la ecuación (3.9) y R_c por la ecuación (3.10).

$$\alpha_c = \tan^{-1} \frac{X}{Y_g - Y_c} \quad (3.11)$$

Donde:

α_c : es el ángulo crítico en grados.

X: es la distancia máxima horizontal entre la protección y los equipos

Y_g: es la altura vertical del sistema de blindaje en metros

Y_c: es la altura vertical del conductor en metros.

$$X = \sqrt{(R_g)^2 - (Y_g - Y_c - R_c)^2} \quad (3.12)$$

Donde:

X: es la distancia horizontal máxima a la que se puede colocar el blindaje del conductor que se está protegiendo

R_g: es la longitud del arco de atracción para la estructura de blindaje.

R_c: es la longitud del arco de atracción para el componente eléctrico que se está protegiendo.

Y_g: es la altura vertical del dispositivo de protección.

Y_c: es la altura vertical del componente eléctrico que se protege.

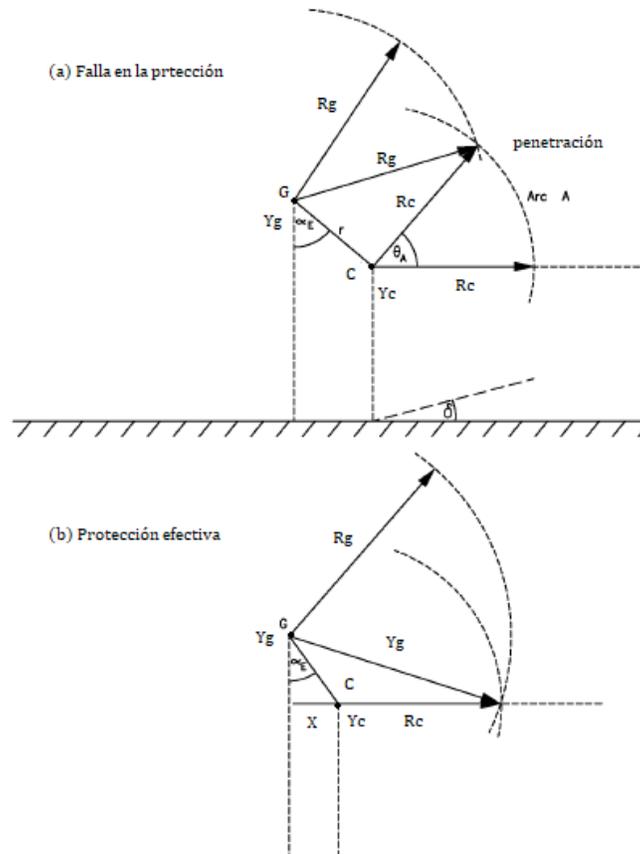


Fig 3- 13: Ilustración del EGM Eriksson

3.2.4 ANÁLISIS DE RIESGO PARA LOS MÉTODOS CONVENCIONALES

Para evaluar el rendimiento de la protección esperada de un sitio de subestación, se procede de la siguiente manera:

- Determine la densidad de rayos a tierra utilizando la ecuación (2.8).

$$GFD = 0.04T_d^{1.25} \text{ flash}/\text{km}^2/\text{año} \quad (3.13)$$

b) Calcule el número de rayos en el área de la subestación, N_s .

$$N_s = GFD * \frac{A}{(1000)^2} \quad (3.14)$$

A es el área de la subestación en metros.

c) Calcule el número de impactos por año que penetra el escudo.

$$SP = N_s * (tasa\ de\ exposicion) \quad (3.15)$$

Se elige una tasa de exposición aceptable, para los métodos geométricos se usa una tasa de falla de 0.1% a 0.2%, mientras para los métodos electrogeométricos una tasa de falla aceptable es de 0.5%.

d) Definir un criterio de tiempo entre fallas permisible para una subestación para n número de años. Por ejemplo, se permite un rayo cada 400 años.

3.2.5 MODELOS ALTERNATIVOS DE INTERCEPTACIÓN DE RAYOS

Existen modelos y métodos de diseño no convencionales de fijación de rayos. Estos modelos aún se encuentran en estudio para su completa validez y no se ha demostrado la efectividad de estos para el blindaje de las subestaciones.

La IEEE aún no recomienda ni aprueba los desempeños reales de estos métodos. Es importante que el diseñador tome en cuenta y determine la validez del rendimiento reclamado de dichos sistemas.

3.2.5.1 MÉTODO DEL VOLUMEN DE RECOLECCIÓN (CVM)

El modelo electrogeométrico mejorado tuvo en cuenta la dependencia de la distancia de descarga en la altura de la estructura además de la dependencia conocida de la corriente de descarga máxima I_s (descarga del líder descendente).

Al considerar la altura como una variable importante, el modelo permite que se intensifique el campo eléctrico creado por la estructura. A ese grado de intensificación del campo se le asocio un factor de intensificación de campo, K_i . Al modelo electrogeométrico de Eriksson se extendió con la colocación de un terminal aéreo tridimensional con lo que se le denominó método del volumen de recolección (CVM) o método de factor de intensificación de campo (FIFM).

Para una subestación, el equipo y estructuras, el K_i está determinado en gran medida por la altura y el ancho. En el caso de terminaciones de aire verticales, como los mástiles independientes, el K_i depende de la altura y el radio de curvatura de la punta y para el caso de terminaciones de aire horizontales, como cables de guarda, se aplican conceptos similares.

El método considera el acercamiento del líder descendente del rayo a una estructura y, el respectivo valor K_i (x, y, z) de las terminaciones de aire y de todos los elementos de la subestación, tales como el perímetro de la estructura, el equipo, el bus de trabajo, etc.

Determinando de esta forma el punto en el que se lanzará el líder ascendente desde cada ubicación.

El análisis anterior produce un volumen parabólico por encima del punto de impacto potencial, como se ilustra en la Figura 3-14 (a). Este volumen representa la "captura" tridimensional o el "volumen de recopilación" de ese punto. Los autores afirman que un líder descendente solo terminará en el punto designado si se alcanza la distancia de descarga y si la trayectoria del líder está contenida dentro del límite de velocidad o propagación del volumen de recolección. Los volúmenes de recolección se calculan para todos los puntos de interés alrededor de la subestación, es decir, terminaciones de aire, esquinas y bordes de estructuras, equipos, bus de trabajo, conductores, etc.

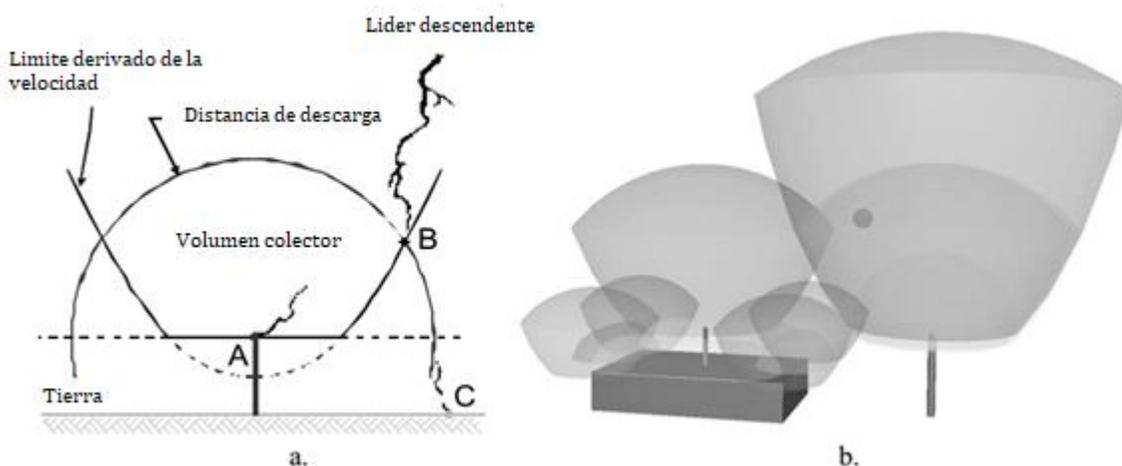


Fig 3- 14: (a) Definición de volumen de colección parabólico para un punto de ataque potencial. (b) Una vista tridimensional que muestra los volúmenes de colectores calculados para varios puntos críticos

3.2.5.2 MODELO DE PROGRESIÓN DEL LÍDER (LPM)

El modelo de propagación del líder (LPM), se toma en cuenta la progresión del líder descendente en el tiempo, espacio, en función de la evolución temporal del campo eléctrico. El LPM también tiene en cuenta los principales mecanismos físicos definidos a partir de los estudios de descargas en espacios de aire distantes, así como los estudios de los canales de los rayos. El énfasis principal del LPM es modelar el progreso de un líder negativo hacia abajo y la propagación del líder ascendente positivo desde el objeto terrestre.

Por medio de un procedimiento computacional, el LPM requiere un cálculo iterativo del campo eléctrico resultante para simular la carga en la nube y la carga real desplazada por los canales cuando ambos líderes están en el proceso de interceptarse. Los autores de este modelo mencionan que una de las características útiles del modelo es la capacidad de simular ataques a estructuras ubicadas en diversas condiciones geográficas, como terrenos llanos, valles, montañas, etc.

3.2.5.3 TEORÍA DE INICIO DEL LÍDER (LIT)

La teoría y el modelo del inicio del líder fue desarrollada durante la década de 1990. La base de este modelo es que un objeto alcanzado por un rayo es un participante activo en el proceso de unión. Bajo condiciones críticas, esta participación se manifiesta por la formación y propagación de un líder que se conecta hacia arriba (líder ascendente), que busca encontrar al líder descendente en un llamado "salto final".

Una cantidad fundamental utilizada en el modelo es el potencial espacial creado por la nube y las cargas del líder descendente. Para un campo de tierra ambiente dado debido a las cargas en la nube y a la corriente de impacto de retorno, el potencial espacial se determina con la altura sobre el suelo de la punta de un pararrayos o de un cable de tierra, pero en caso de la ausencia de estos objetos el potencial se mantendrá a tierra.

El modelo supone que las últimas etapas del proceso de unión de los líderes, existe una relación constante entre las velocidades de los líderes descendente y ascendente. En una versión ambas velocidades se calculan continuamente a lo largo de las trayectorias del líder.

En el modelo se analizó diferentes alturas para las estructuras y dentro del rango de corriente de impacto de retorno, se asume un radio atractivo R_a para una varilla o mástil y una distancia de atracción lateral D_a para un cable a tierra.

3.2.5.5 TERMINALES DE RAYOS ACTIVOS

En los métodos anteriores de protección contra rayos, se considera que el terminal de rayos es un elemento pasivo que intercepta el impacto de la descarga simplemente en virtud de su posición con respecto al bus o equipo energizado. Hay sugerencias de que la protección contra rayos se puede mejorar mediante el uso de terminales "activos".

Tres tipos de tales dispositivos se han propuesto a lo largo de los años:

- a) Pararrayos con puntas radiactivas son dispositivos que amplían el rango atractivo de la punta a través de la ionización del aire.
- b) Pararrayos de emisión temprana son dispositivos que contienen un mecanismo de activación que envía pulsos de alto voltaje a la punta de la barra cada vez que aparecen nubes cargadas sobre el sitio. El proceso mencionado genera una línea ascendente que extiende el rango atractivo.
- c) Los dispositivos de prevención de rayos mejoran el fenómeno de descarga de puntos mediante el uso de una serie de agujas en lugar de la punta individual del pararrayos estándar. La carga espacial generada por las muchas agujas de la punta neutraliza parte de la carga en una nube que se aproxima y evita un impacto de retorno al dispositivo, extendiendo aún más la efectivamente el área protegida.

A pesar del uso de los tres tipos anteriores de terminales aéreos en todo el mundo, hasta la fecha no se ha proporcionado evidencia científica que demuestre que estos sistemas sean

superiores a los mástiles y cables de guarda convencionales o que funcionen según lo demandado por los fabricantes.

Puntos relevantes acerca de estos dispositivos:

- i. Los pararrayos radiactivos fueron prohibidos en Europa ya hace años porque se descubrió que la contaminación nuclear resultante era injustificable por su mínimo beneficio. Que, además, fallaron en las instalaciones de campo.
- ii. Los pararrayos de emisión temprana y el método de diseño asociado en NFC 17-102 se han criticado por la comunidad científica por una serie de defectos fundamentales y técnicos en su modo de operación.
- iii. La comunidad científica mundial no ha aceptado que las geometrías pasivas mejoradas demuestren incrementos en la distancia de descarga por factores mayores al 20% con relación a los mástiles y cables blindados.

CAPITULO 4. SIMULADOR DE MÉTODOS DE PROTECCIÓN

Este capítulo presenta el desarrollo de un software simulador de métodos de protección contra impactos directos de rayos en subestaciones de potencia basados en la norma IEEE 998 std 2012. En la sección 4.1 se muestran algunos softwares de paga de este tipo que se usan actualmente, y las funciones que estos desempeñan en el análisis de protección. Asimismo, en la sección 4.2 se desarrolla el concepto de coordinación de aislamiento, con el fin de presentar las condiciones del aislamiento que se han considerado en el software basados en las normas IEEE 1313.1 1996 e IEEE 1313.2 1999 para tener un mayor grado de acercamiento a resultados reales. Posteriormente se presenta un ejemplo de la norma en el que se aplica el método EGM de Mousa y el método empírico de Ángulos Fijos el cual se ha desarrollado de forma manual y a través del simulador con el fin de hacer el análisis de comparación de resultados.

4.1 SOFTWARE DE PAGA PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN

El uso de software para el diseño de protección a rayos es muy común en la actualidad, ya que existen diversos y potentes programas de cálculo gráfico, estos programas facilitan la aplicación de los métodos de protección a nivel visual. Alguno de los programas de paga que se utilizan se muestran a continuación.

4.1.1 PRIMTECH 3D- CÁLCULO DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Primtech es un software que presenta un poderoso cálculo de protección contra rayos implementando métodos de cálculo de protección contra rayos convencionales. Utilizando puntas y cables de guarda contra rayos, ilustra visualmente los resultados requeridos en forma de volúmenes y áreas de protección contra rayos.

Primtech admite cálculos de rayos de acuerdo con el estándar DIN VDE 0101, así como el método de esferas rodantes derivado de la Norma IEC 62305-1. En el método de la esfera rodante, las 4 clases de protección se pueden calcular también utilizando esferas de varios radios. Es un soporte óptimo en la ingeniería debido al rápido cálculo de los volúmenes de protección 3D, que se extiende por la instalación de protección contra rayos.

Este software es ideal para el proceso de ingeniería de interruptores de alto voltaje. Permite el cálculo rápido de diferentes clases de protección contra el rayo o la variación de pararrayos (por ejemplo, ajuste de la altura de las barras) que pueden compararse y evaluarse visualmente fácilmente. Para el desarrollo de Subestaciones de Alta Tensión, el cálculo de la protección contra el rayo está diseñado y optimizado para las subestaciones con aislamiento de aire (subestaciones de patio). Esto permite cálculos de protección rápidos y consistentes incluso para grandes subestaciones. Además, los cálculos de protección se pueden aplicar a edificios y estructuras. La figura 4-1 muestra un ejemplo de protección para una subestación de potencia y un edificio.

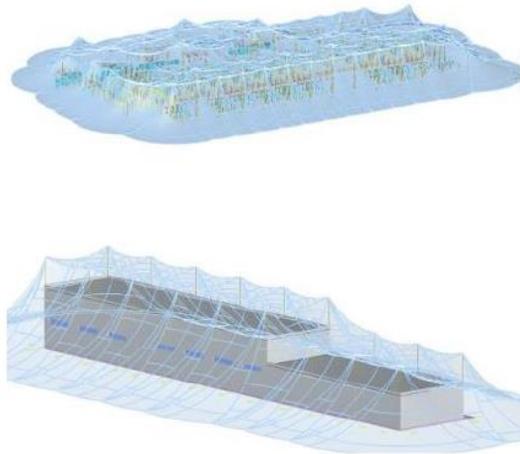


Fig 4- 1: Ejemplo de cálculo de protección del software Primtech

4.1.2 SESSHIELD 3D

SESShield-3D es un potente paquete de software para el análisis y diseño de sistemas de protección contra el rayo para entornos 3D complejos, incluidas subestaciones, centrales eléctricas, plantas industriales y otras instalaciones similares, que representan la presencia de líneas eléctricas, equipos, edificios, etc. SESShield-3D permite que estructuras metálicas arbitrarias actúen como sistemas de blindaje, que incluyen no solo cables de protección y mástiles, sino también otras estructuras que atraen los rayos. SESShield-3D ofrece una interfaz de usuario simple e intuitiva que se puede utilizar para llevar a cabo un análisis completo de protección contra rayos para un sistema de objetos de posición libre que tienen varias formas geométricas, como catenarias, cilindros, conos, cubos y otros prismas. Además, los cálculos son extremadamente rápidos y proporcionan una retroalimentación gráfica clara e interactiva en 3D, de modo que se puede diseñar un sistema de protección muy rápidamente. Este software puede analizar y diseñar un sistema de protección contra rayos para la protección de sistemas vulnerables de geometrías arbitrarias, también puede evaluar la probabilidad de falla de un sistema de protección contra rayos, teniendo en cuenta la distribución estadística de los rayos en el área del sistema a proteger. El programa apoya cuatro métodos de posicionamiento del sistema de blindaje. Estos métodos se describen en las normas pertinentes IEEE e IEC e incluyen el modelo electrogeométrico (comúnmente implementado como método de la esfera rodante) y sus variaciones, el modelo electrogeométrico de Eriksson, que tiene en cuenta la altura de la estructura, el método de ángulo de protección y el método de malla. La licencia de estudiante de este programa ronda los \$4,200 anuales.

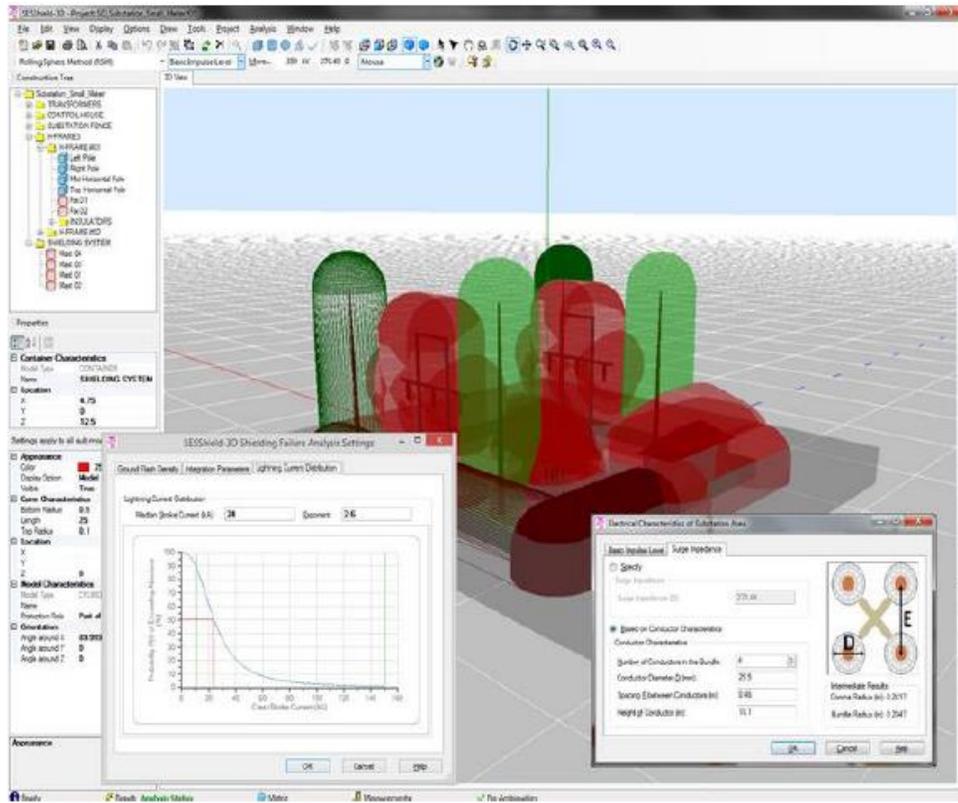


Fig 4- 2: Protección de una subestación con SESShield 3D

4.1.3 DISAC

El DiSAC es una herramienta de diseño para la disposición física de subestaciones, bajo plataforma de dibujo de Autocad, aplicable a subestaciones exteriores convencionales en media, alta y extra alta tensión (figura 4-3). Permite realizar un modelo digital de la subestación, tanto de la parte superficial (pórticos, equipos, cables, bus, edificios, etc.)

Grafica las superficies de apantallamiento sobre el modelo de la subestación, permitiendo validar la ubicación de cables de guarda, puntas pararrayos y mástiles, a partir de los cálculos realizados, con base en los requerimientos de la norma IEEE-998.

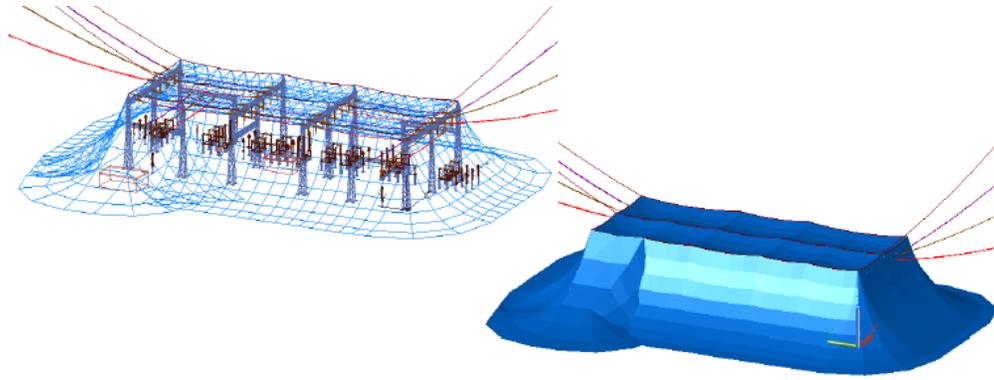


Fig 4- 3: Protección de una subestación utilizando DiSAC

4.2 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

El concepto de coordinación de aislamiento se puede definir como la selección de la rigidez dieléctrica de los equipos y su aplicación, en relación con los voltajes que pueden aparecer en el sistema para el que se seleccionó, teniendo en cuenta las características de los dispositivos de protección disponibles a fin de reducir económicamente y operacionalmente a un nivel aceptable la probabilidad de que las tensiones de stress impuestas sobre el equipos causen daño en el aislamiento del equipo o afecten la continuidad del servicio.

En el caso de una subestación de potencia, el propósito de la coordinación de aislamiento es de reducir la probabilidad de daños a los equipos y fallas causadas por sobretensiones, para esto se deben especificar:

- La capacidad de aislamiento del equipo, es decir, el BIL y BSL de todos los equipos.
- Las distancias de seguridad, fase-tierra y fase-fase.
- La ubicación, clasificación y cantidad de descargadores de sobretensiones.
- La ubicación, la configuración y el espaciamiento de los espacios de protección.
- La ubicación y el tipo (mástiles o cables de guarda) de protección de la subestación contra descargas directas de rayo.

4.2.1 NIVELES DE AISLAMIENTO ESTÁNDAR

La selección del nivel de aislamiento del componente clasificado consiste en la selección de voltajes de resistencia de aislamiento estándar que proporcionan un margen suficiente por encima de la tensión de sobretensión del sistema. Las pruebas requeridas para verificar los voltajes máximos nominales del componente están definidas por los estándares relevantes del equipo. El componente de baja frecuencia, tensión soportada de corta duración se selecciona de la lista de tensiones soportadas estándar.

Clases de voltaje máximo del sistema: Los voltajes más altos estándar se dividen en las siguientes dos clases:

- Clase I: Tensiones medias (1 -72.5 kV) y altas (72.5-242 kV)
- Clase II: voltajes extra altos y ultra altos:> 242 kV

Los voltajes estándar soportados para los equipos de Clase I se muestran en la tabla 4-1, mientras que para clase II se tiene la tabla 4-2.

4.2.2 DISTANCIAS MÍNIMAS DE OPERACIÓN

Una vez que se conocen los niveles de aislamiento, se pueden establecer distancias eléctricas. Por varias razones o inquietudes (configuración del sistema, niveles de sobretensión de maniobra, capacidades de energía del pararrayos, voltaje de recuperación transitoria, resonancia, etc.), se pueden requerir estudios de coordinación de aislamiento detallados que involucren simulaciones digitales en cualquier subestación específica. En general, los niveles de aislamiento y las separaciones eléctricas recomendadas asociadas a menudo se estandarizan a valores específicos comunes en todo el sistema de potencia de un usuario, que históricamente se basa en los niveles nominales de voltaje del sistema. Las separaciones eléctricas operativas asociadas se determinan por alineación con las distancias de alcance asociadas con las clasificaciones BIL o BSL del aislador, según norma IEEE 1313.2-1999 (Tabla 4-3 y 4-4).

Tabla 4- 1: Voltajes estándar soportados para clase I.

Voltaje máximo del sistema Vm Fase – fase [kV, rms]	Voltaje soportado de corta Duración a baja frecuencia Fase – tierra [kV, rms]	BIL Fase – tierra [kV, pico]
15	34	95 110
26.2	50	150
36.2	70	200
48.3	95	250
72.5	95 140	250 350
121	140 185 230	350 450 550
145	230 275 325	450 550 650
169	230 275 325	550 650 750
242	275 325 360 395 480	650 750 825 900 975 1050

Tabla 4- 2: Voltajes estándar soportados para clase II.

Voltaje máximo del sistema Vm Fase – fase [kV, rms]	Voltaje soportado de corta Duración a baja frecuencia Fase – tierra [kV, rms]	BIL Fase – tierra [kV, pico]
362	900 975 1050 1175 1300	650 750 825 900 975 1050
550	1300 1425 1550 1675 1800	1175 1300 1425 1550
800	1800 1925 2050	1300 1425 1550 1675 1800

Tabla 4- 3: Distancias típicas en equipos de patio.

Equipos (entre equipo y equipo)	Distancia típica [m]				
	72.5 kV	123 kV	245 kV	550 kV	800 kV
Transformador de instrumentación y seccionador	2,0	3,0	4,0	6,0	7,5
Interruptor y seccionador	2,0	3,0	4,5 – 5,5	7,0 – 8,0	9,0 – 10,0
Interruptor y seccionador con vía de circulación	5,0	7,5	8,0 – 9,5	12 – 14	14 – 16
Interruptor y transformador de instrumentación	1,5	2,0	3,5 – 4,5	6,5	8,5
Interruptor y transformador de instrumentación con vía de circulación	5,0	6,5	6,5	10 – 12	12 – 14
Seccionador y seccionador	3,0	3,5	6,0	7,0 – 8,0	9,0 – 10,0
Seccionador pantógrafo y seccionador pantógrafo	-	3,0	4,5	6,5	8,0
Seccionador pantógrafo y transformador de instrumentación	-	2,5	3,5	5,5	7,0
Interruptor y seccionador pantógrafo	-	3,0	5,0	10,0	13,0
Interruptor y seccionador pantógrafo con vía de circulación	-	7,0	7,5 – 9,0	11 – 13	13 – 15
Seccionador pantógrafo y seccionador	-	3,5	4,5	7,0	9,0
Entre transformadores de instrumentación	1,5	2,0	3,0	4,0 – 5,0	6,0
Pararrayos y transformadores de instrumentación.	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0

Tabla 4- 4: Distancias mínimas recomendadas para subestaciones aisladas en aire en condiciones de impulso de rayo.

Voltaje máximo del sistema fase a fase (kV, rms)	BIL (kV, crest)	Distancia mínima Fase a tierra		Distancia mínima Fase a fase	
		mm	(in)	mm	(in)
1.2	30	57	(2.3)	63	(2.5)
	45	86	(3.3)	92	(3.6)
5	60	115	(4.5)	125	(5)
	75	145	(5.6)	155	(6.2)
15	95	180	(7)	200	(8)
	110	210	(8)	230	(9)
26.2	150	285	(11)	315	(12)
36.2	200	380	(15)	420	(16)
48.3	250	475	(19)	525	(21)
72.5	250	475	(19)	525	(21)
	350	665	(26)	730	(29)
121	350	665	(26)	730	(29)
	450	855	(34)	940	(37)
	550	1045	(41)	1150	(45)
145	350	665	(26)	730	(29)
	450	855	(34)	940	(37)
	550	1045	(41)	1150	(45)
	650	1235	(49)	1360	(54)
169	550	1045	(41)	1150	(45)
	650	1235	(49)	1360	(54)
	750	1325	(56)	1570	(62)
242	650	1235	(49)	1360	(54)
	750	1425	(56)	1570	(62)
	825	1570	(62)	1725	(68)
	900	1710	(67)	1880	(74)
	975	1855	(73)	2040	(80)
	1050	2000	(79)	2200	(86)
362	900	1710	(67)	1880	(74)
	975	1855	(73)	2040	(80)
	1050	2000	(79)	2200	(86)
	1175	2235	(88)	2455	(97)
	1300	2470	(97)	2720	(105)
550	1300	2470	(97)	2720	(105)
	1425	2710	(105)	2980	(115)
	1550	2950	(115)	3240	(130)
	1675	3185	(125)	3500	(140)
	1800	3420	(135)	3765	(150)
800	1800	3420	(135)	3765	(150)
	1925	3660	(145)	4025	(160)
	2050	3900	(155)	4285	(170)
	2300	4375	(170)	4815	(190)

4.3 SIMULADOR DE MÉTODOS DE PROTECCIÓN

El software consiste en un simulador gráfico desarrollado mediante lenguaje de programación en JAVA, el cual implementa métodos de protección contra impactos de rayos basados en la norma IEEE 998 std 2012, en modelos de subestaciones previamente elaboradas por el usuario. Este permite al usuario crear modelos gráficos de subestaciones de potencia, mediante la biblioteca de elementos de patio, que tiene a disposición el equipo necesario para elaborar un nuevo modelo o bien crearlos a partir de diseños de subestaciones reales.

El simulador es capaz de implementar dos métodos de protección contra impacto de rayos: el método Electrogeométrico de Mousa o bien conocido como “Esfera Rodante” y el método empírico de Ángulos Fijos. Ambos métodos aún están en desarrollo por lo que pueden presentar fallos no esperados a la hora de ejecutarlos, por esta razón en secciones posteriores se explicara con detalle la manera indicada de uso del software para la buena aplicación de los métodos. Al finalizar el cálculo de protección, se genera el reporte respectivo, en formato PDF, del método empleado en el análisis.

4.3.1 ESTRUCTURA DEL ENTORNO DE USUARIO

El simulador está formado por una barra de menús, barra de herramientas, biblioteca de objetos, área de selección y entorno de trabajo.

- La barra de menú: Permite abrir, crear y guardar diseños elaborados por el usuario, así como también ejecutar el cálculo de los parámetros y generar el reporte en formato PDF de la protección del diseño actual (Figura 4-4).

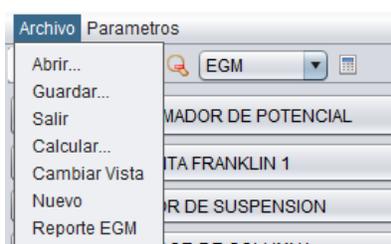


Fig 4- 4: Barra de menú

- Barra de herramientas: Tiene a disposición herramientas que permiten al usuario interactuar con los elementos insertados en el entorno de trabajo, tales como: rotar, borrar, herramienta zoom y calcular. También permite seleccionar el método a utilizar (Figura 4-5).

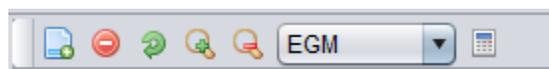


Fig 4- 5: Barra de herramientas

- El área de selección de objetos: Permite interactuar con los elementos insertados, bien sea mover a través del entorno de trabajo o extraer los atributos que los describen (Figura 4-6).



Fig 4- 6: Área de selección de objetos

- Biblioteca de objetos: Tiene a disposición modelos de elementos básicos de subestación, permitiendo al usuario la selección del elemento que requiera insertar (Figura 4-7).

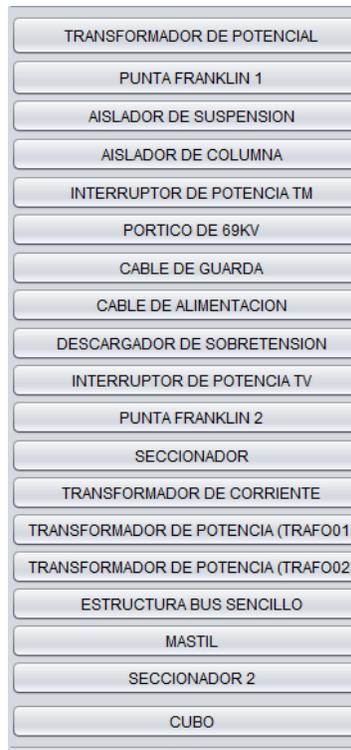


Fig 4- 7: Biblioteca de elementos

- El entorno de trabajo: Constituye el espacio donde el usuario puede interactuar directamente de forma gráfica y en tiempo real con cada elemento previamente insertado. Se presentan tres vistas: lateral, frontal y de planta, las cuales permiten un vistazo previo del modelo desarrollado y una forma práctica y sencilla a la hora de mostrar resultados, como por ejemplo el área protegida por un sistema de cables de guarda. La cuadrícula está conformada por secciones de 1m, lo cual permitirá dimensionar de forma más precisa los nuevos modelos (Figura 4-8).

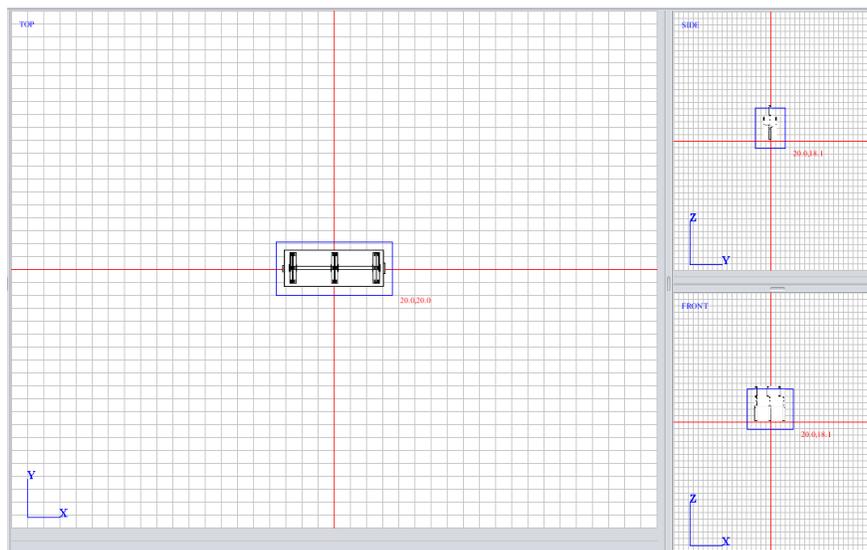


Fig 4- 8: Entorno de trabajo

Esta versión, tiene a disposición del usuario, elementos básicos de subestación, tales como: Transformador de potencia, interruptor de potencia, seccionador, puntas Franklin, cable de guarda, estructuras de bus, estructura de pórticos, descargador de sobretensión, TC y TP. Cada elemento posee atributos físicos y eléctricos Figura 4 – 9, con el fin de que el usuario tenga a disposición modificarlos para adaptarlos a las especificaciones de los fabricantes que desee. Así como tres vistas disponibles para el usuario, en las cuales se presentan los resultados gráficos de área de protección.

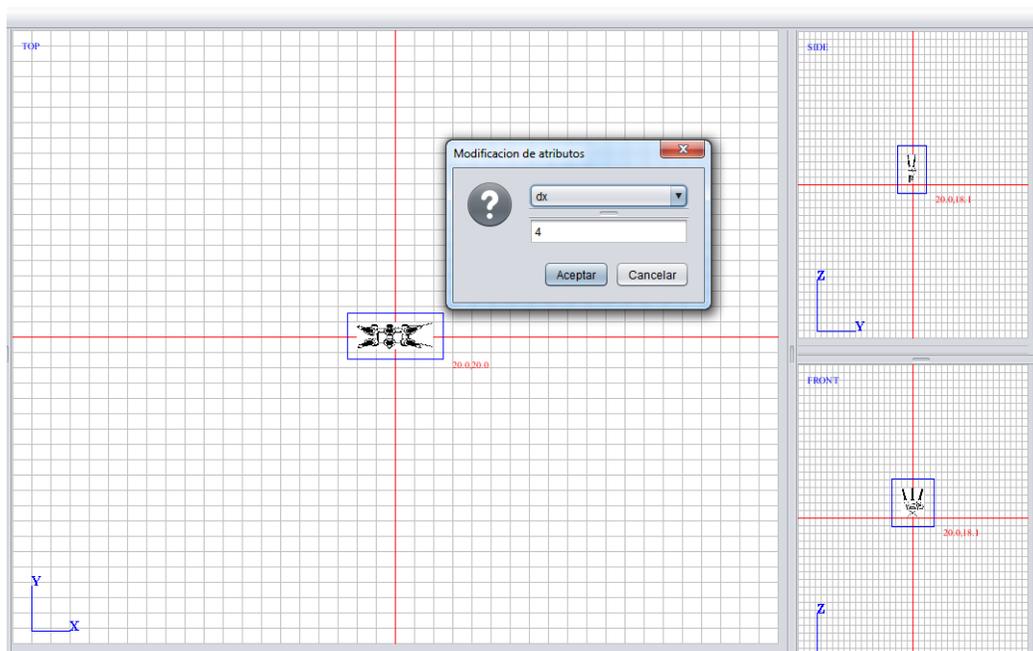


Fig 4- 9: Atributos de elementos de patio

4.3.2 FUNCIONAMIENTO

Para la creación de nuevos modelos es necesario seguir los siguientes pasos:

Paso 1. Ejecutar el programa a través del archivo “ProtectionSubstation.jar” ubicado en la carpeta “dist” como muestra la figura 4-10. Es necesario tener el paquete de JAVA versión 8.2 instalado previamente.

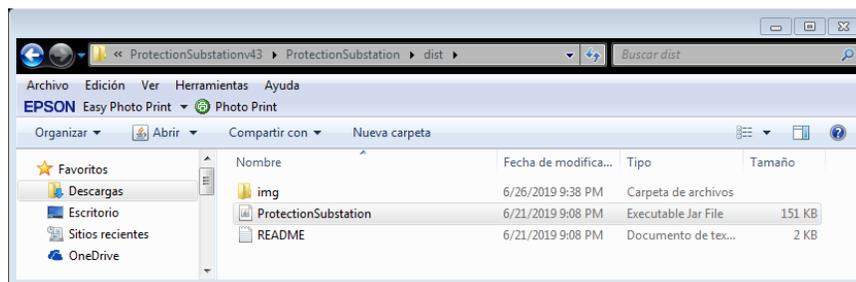


Fig 4- 10: Archivo .JAR ejecutable

Paso 2. Llenar los datos generales de la subestación en el menú “Parámetros” seleccionar “Subestación”, y llenar los campos (Figura 4-11).

The dialog box titled "Ingrese la información" contains the following fields and controls:

- Subestacion: Text input field.
- Codigo de Proyecto: Text input field.
- Ubicacion: Text input field.
- Tipo de Subestacion: Text input field.
- Configuracion del Bus: Text input field.
- Nivel Isoceraunico: Text input field.
- VOLTAJE[kV]: Spin box with value 0.
- POTENCIA[MVA]: Spin box with value 0.
- ANCHO: Spin box with value 0.
- LARGO: Spin box with value 0.
- Buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Fig 4- 11: Datos generales

Paso 3. Una vez definidos los datos de entrada en el paso anterior, se insertan los equipos de patio que componen la subestación, a un modelo aproximado (Figura 4 – 12).

Paso 4. Se ingresan los atributos de cada elemento, dando doble click izquierdo sobre el elemento aparece la ventana de atributos. Los parámetros dx, dy, dz, realizan el posicionamiento en las tres vistas, los parámetros técnicos varían dependiendo del tipo de elemento y son necesarios para realizar el cálculo de protección.

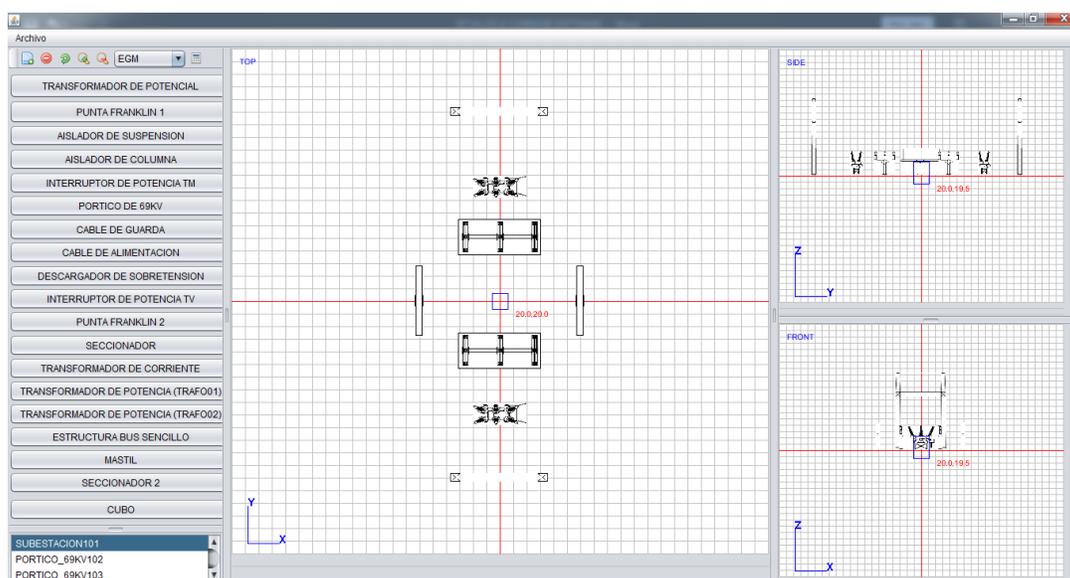


Fig 4- 12: Elementos de patio insertados mediante la biblioteca de objetos

Paso 5. Al haber ingresado todos los elementos y datos necesarios, se ejecuta el cálculo de protección, en la barra de herramientas se selecciona el método que va a utilizarse, posteriormente se ingresan los datos necesarios y se presiona el botón “Calcular”. Automáticamente se realizará el cálculo y de forma gráfica se genera el área de protección, tal como se muestra en la figura 4-13 en la cual se han usado cable de guarda para un sistema de protección utilizando el método EGM de Mousa.

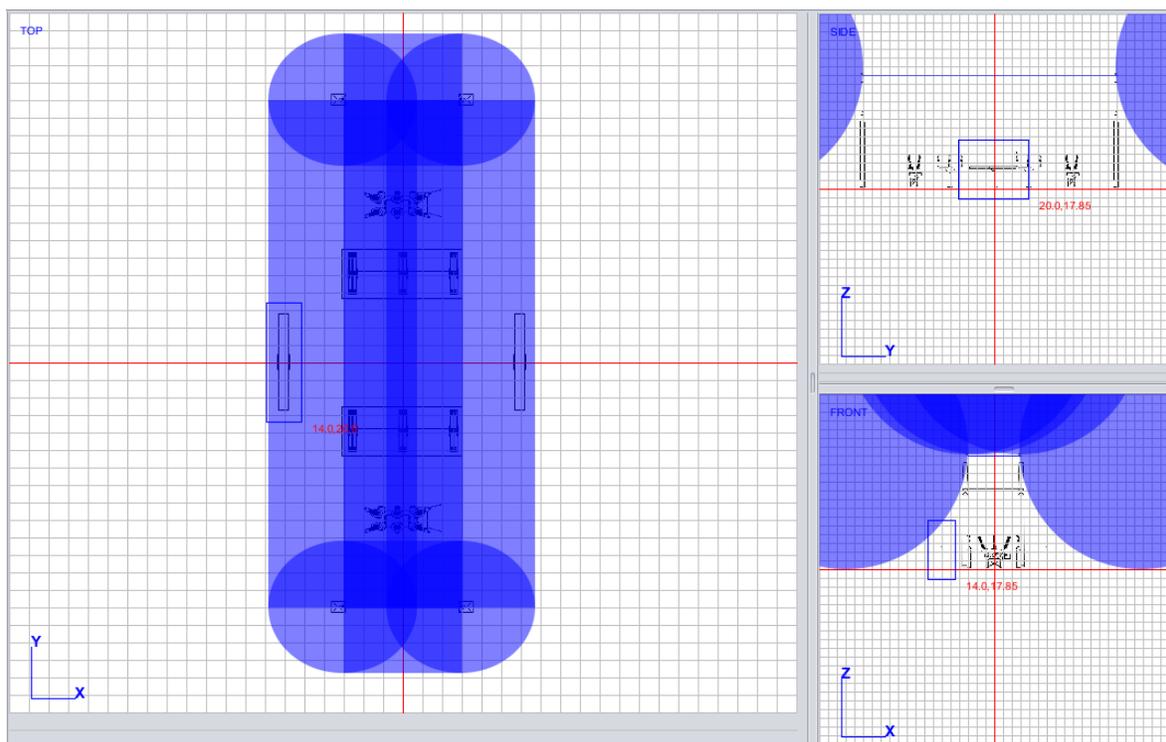


Fig 4- 13: Cálculos y zonas de protección para un sistema de cables de guarda

Para el método de Ángulos Fijos el proceso de cálculo es más simplificado que el EGM, después de haber ingresado el modelo de subestación con sus elementos, en la opción del método se selecciona ángulos fijos y posteriormente se ingresa en el parámetro de la subestación el valor del ángulo a considerar. Según la norma IEEE std 998 – 2012 estos ángulos pueden tomar valores de 30 y 45 grados, pero por motivos más prácticos, para la simulación se ha asumido ángulos iguales. Aplicando el método de Ángulos Fijos al ejemplo anterior se obtienen los resultados que se muestran en la figura 4-14.

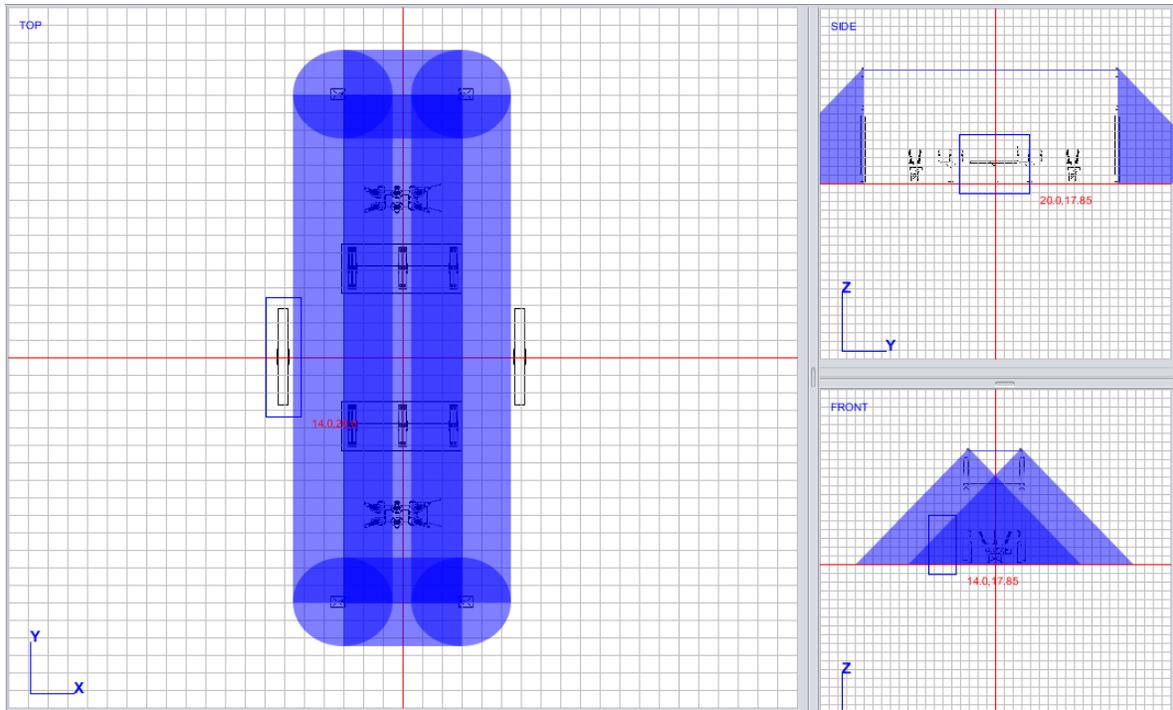


Fig 4- 14: Protección mediante método de Ángulos Fijos

4.4 DESARROLLO DE EJEMPLO PRÁCTICO

Como primer modelo se ha desarrollado el ejemplo que describe el anexo B.2.1 de la norma IEEE 998 std-2012, el cual consiste en una subestación de potencia a 69 kV. Si bien es cierto el modelo de la figura denota ligeras diferencias con respecto al de la norma, esto es con el objetivo de aproximarse a un modelo más funcional y con mayor confiabilidad, como el caso de subestaciones reales.

Para la coordinación del aislamiento se han tomado distancias eléctricas entre equipos de 2 metros en general, esto debido a que el voltaje por el que se ha especificado es de 72.5 kV, que es el más cercano a 69 kV según la Tabla 4 – 3. Asimismo, para la distancia entre fases se han tomado de 1 metro, de la Tabla 4 – 4, dejando un margen de seguridad de 0.5 metros aproximadamente. En la figura 4 – 15 se muestran las distancias eléctricas que se han tomado, así como la distribución en vista de planta de la subestación.

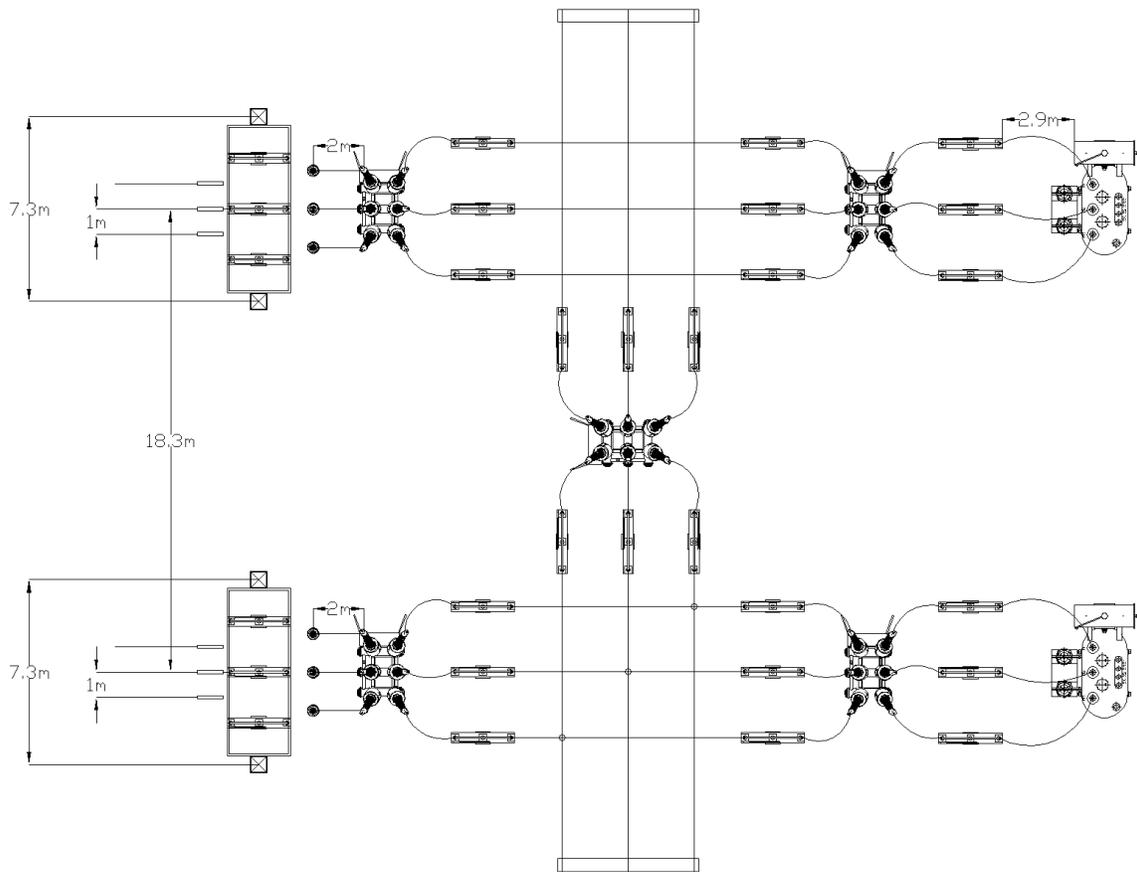


Fig 4- 15: Vista en planta y distancias eléctricas subestación de potencia a 69 kV

4.4.1 CÁLCULO TEÓRICO BASADO EN EL MODELO DE MOUSA.

En la Tabla 4-5 se muestran los datos generales de la subestación, los cálculos se realizarán para el bus A, debido a que es el bus principal y una falla en este punto sería crítica.

Tabla 4- 5: Datos generales de subestación.

Datos		
Potencia:	50	MVA
Voltaje:	69	kV
BIL	350	kV
Tipo bus:	rígido	
Radio bus:	0.04	m
Altura cable	12.2	m
Altura Punta	14.2	m
Altura bus A	4.3	m
Altura bus B	3.8	m

Los cálculos se realizarán en base a un sistema compuesto por cables de guarda. Tomando los valores de la subestación de 69 kV y 2 transformadores de 25 MVA, tenemos que:

$$BIL = 350 \text{ kV}$$

Luego de la tabla 3-5 tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Radio del bus: } & 0.04 \text{ m} \\ \text{Altura del bus: } & 4.3 \text{ m} \\ \text{Altura del cable de guarda: } & 12.2 \text{ m} \end{aligned}$$

Cálculo de radio corona para un conductor:

$$R_c \times \ln\left(\frac{2 \times h}{R_c}\right) - \frac{V_c}{E_o} = 0$$

Aproximación por newton-Raphson:

$$\begin{aligned} R_c &= 1.2 \times 10^{-4} V_c \\ V_c &= BIL; \\ R_c &= 0.042 \text{ m} \end{aligned}$$

La impedancia de sobretensión se calcula de la siguiente manera:

$$Z_s = 60 \times \sqrt{\ln\left(\frac{2 \times h}{R_c}\right) \times \ln\left(\frac{2 \times h}{R}\right)}$$

Donde:

h: es la altura promedio del conductor

Rc: es el radio corona

r: es el radio metálico del conductor, o el radio equivalente en caso de conductores empaquetados

Sustituyendo se tiene:

$$Z_s = 320.7 \Omega$$

Corriente crítica de flameo:

$$I_c = \frac{BIL * 2.2}{Z_s} = 2.4 \text{ kA}$$

Distancia de descarga crítica (radio de la esfera), S_c . Para cable $k=1$.

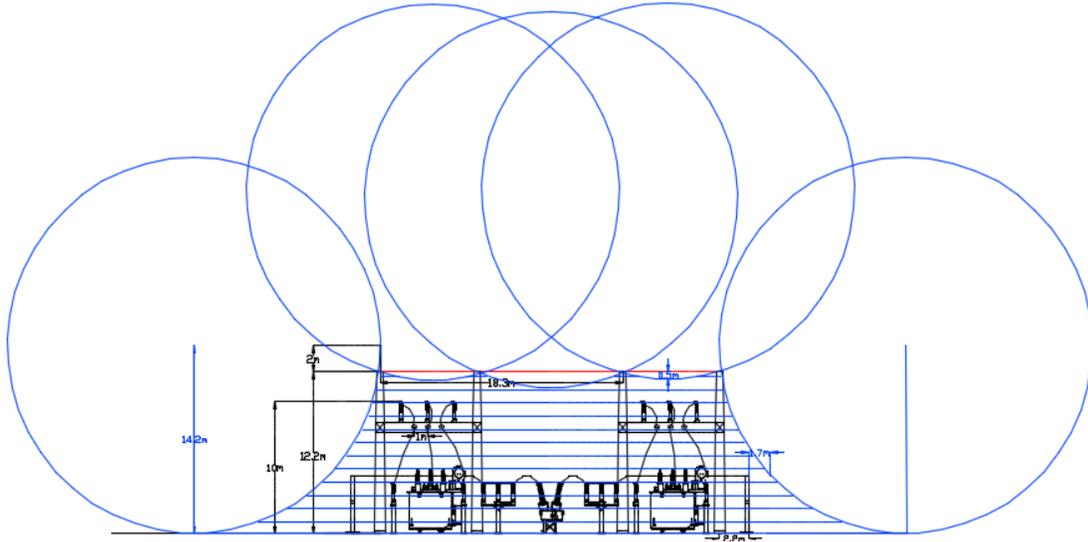
$$\begin{aligned} S_c &= 8kI_c^{0.65} \\ S_c &= 14.13 \text{ m} \end{aligned}$$

Área de protección para cables

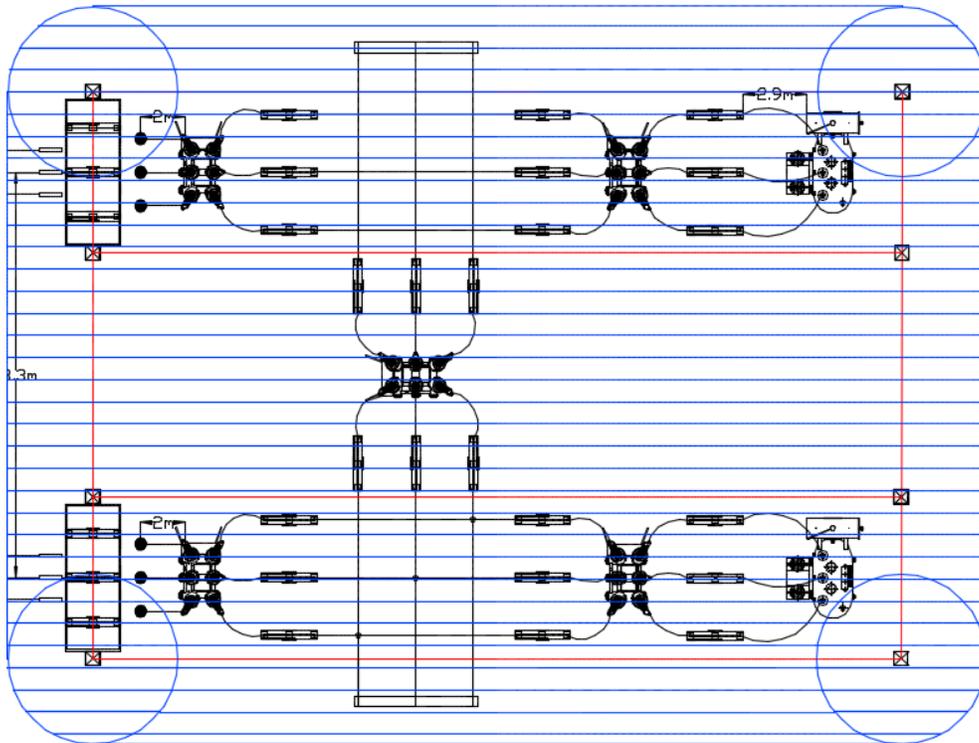
$$x_A = \sqrt{S_c^2 - (S_c - h_{cable})^2} - \sqrt{S_c^2 - (S_c - d_{bus})^2}$$

$$x_A = 3,85 \text{ m}$$

De los valores obtenidos anteriormente se realiza de forma manual el resultado final del área de protección mediante el software AutoCAD, el cual se muestra en las figuras 4-16 a y b.



a)



b)

Fig 4- 16: Zonas de protección método EGM de Mousa: a) vista frontal, b) vista de planta

Para el análisis de riesgo, de la Tabla 2-2 se ha seleccionado un nivel isoceraúnico promedio de 84.11 días/tormenta.

La densidad de descargas a tierras GFD está dada por:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25}$$

$$N_g = 10.19 \text{ rayos}/\text{km}^2/\text{año}$$

Se tiene un nivel de exposición de:

$$N_s = N_g * \frac{\text{Area}}{1 \times 10^6}$$

$$N_s = 0.012228 \text{ rayos/año}$$

Dependiendo del BIL, el porcentaje de falla para el método EGM es típicamente bajo, mucho menor al 1%. Basándose en un porcentaje de falla de 0.05% (según norma IEEE 998 – 2012), se tiene que:

$$SP = \%falla * N_s$$

$$SP = 0.0122 \frac{\text{rayos}}{\text{año}} \times 0.0005$$

$$SP = 0.000006114 \text{ rayos/año}$$

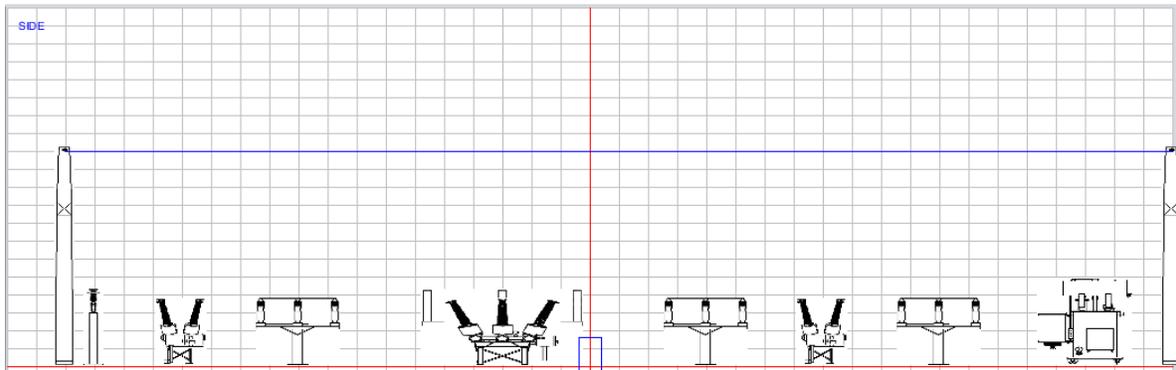
4.4.2 APLICACIÓN MÉTODO EGM DE MOUSA

Aplicando el procedimiento descrito en la sección 4.2.2, se procede a realizar el diseño del ejemplo mediante el software simulador en desarrollo. Primeramente, se ingresan los datos generales de la subestación como muestra la figura 4-17.

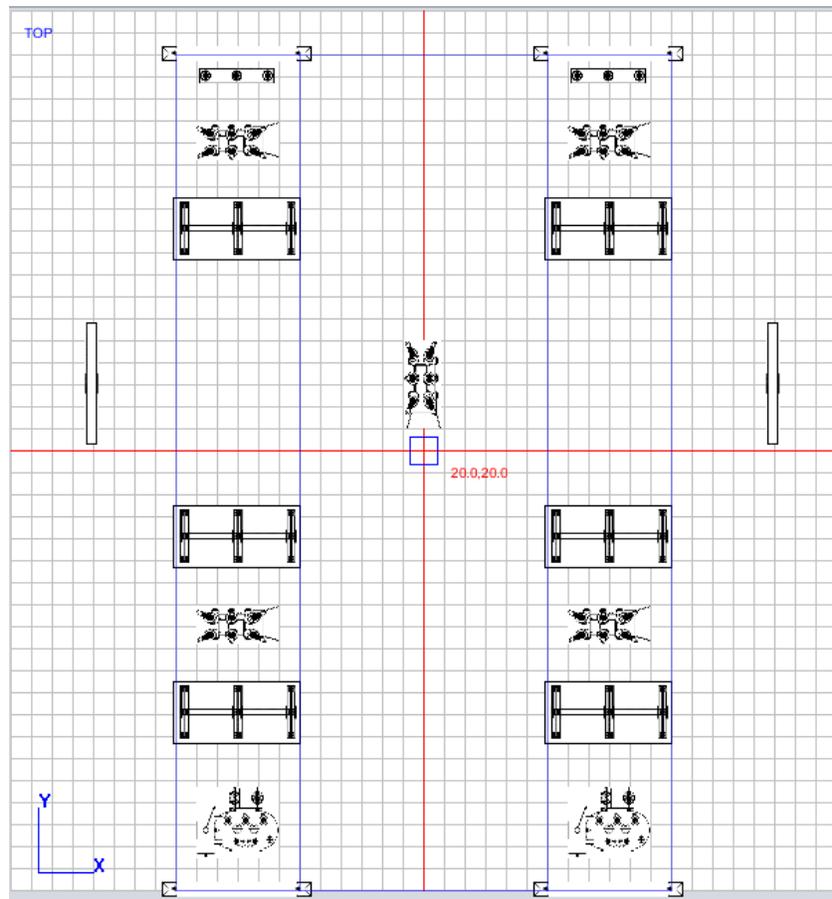
Field	Value
Subestacion	EJEMPLO
Codigo de Proyecto	1234
Ubicacion	SAN SALVADOR
Tipo de Subestacion	POTENCIA
Configuracion del Bus	SENCILLO
Nivel Isoceraunico	77.5
VOLTAJE[kV]	69
POTENCIA[MVA]	50
ANCHO	30
LARGO	40

Fig 4- 17: Ingreso de datos generales simulador

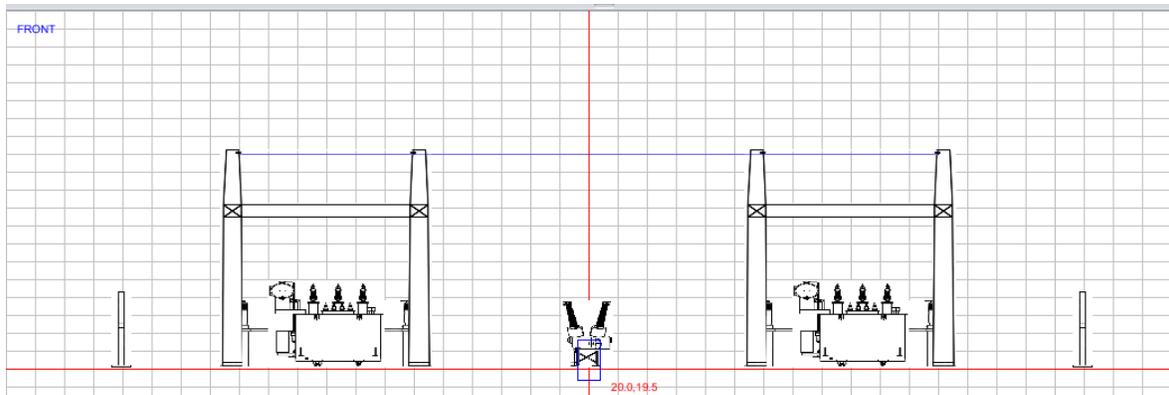
Una vez ingresados los datos generales, se realiza el diseño insertando el equipo de patio, teniendo en cuenta que se ha tomado 1 pixel por cada metro de distancia real entre equipos, la distribución se muestra en las figuras 4-18 a, b y c.



a)



b)



c)

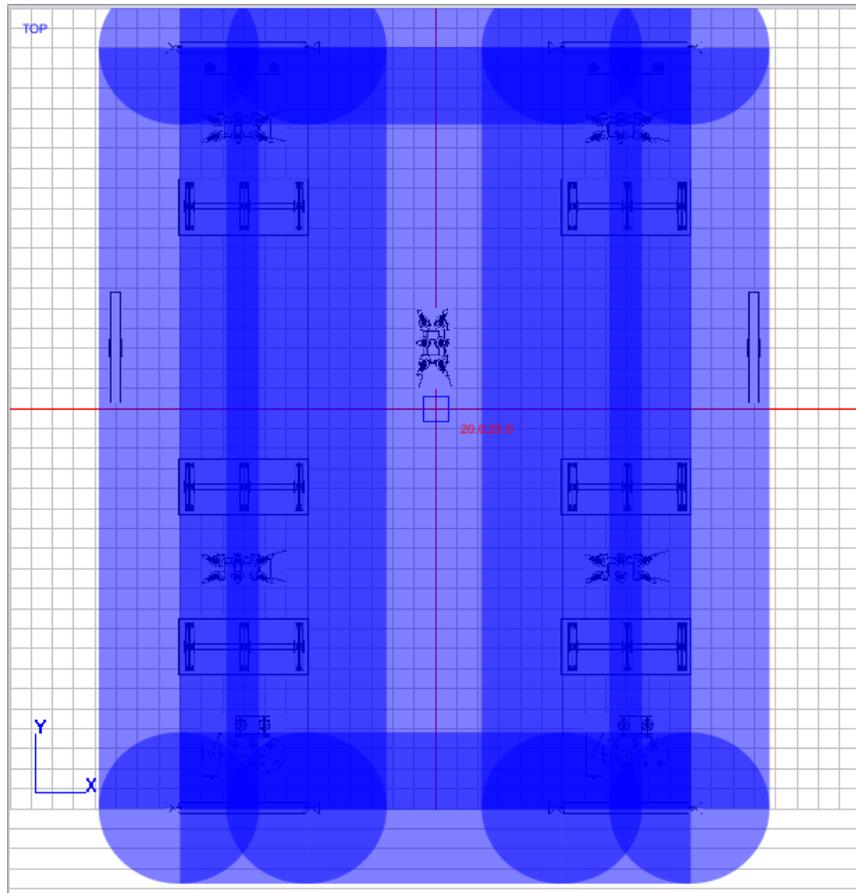
Fig 4- 18: Distribución de equipos de subestación, a) vista lateral, b) vista de planta, c) vista frontal. * La línea azul representa el cable de guarda instalado

Posteriormente se ingresan los parámetros del bus, como tipo de bus, radio de bus, y altura. Esto para el cálculo de impedancia de sobretensión y radio corona. Asimismo, se le añaden los parámetros al elemento de protección, ya sea cable de guarda o punta Franklin, para obtener los cálculos de área de protección. Los resultados de los cálculos realizados por el simulador se presentan en la Tabla 3-6.

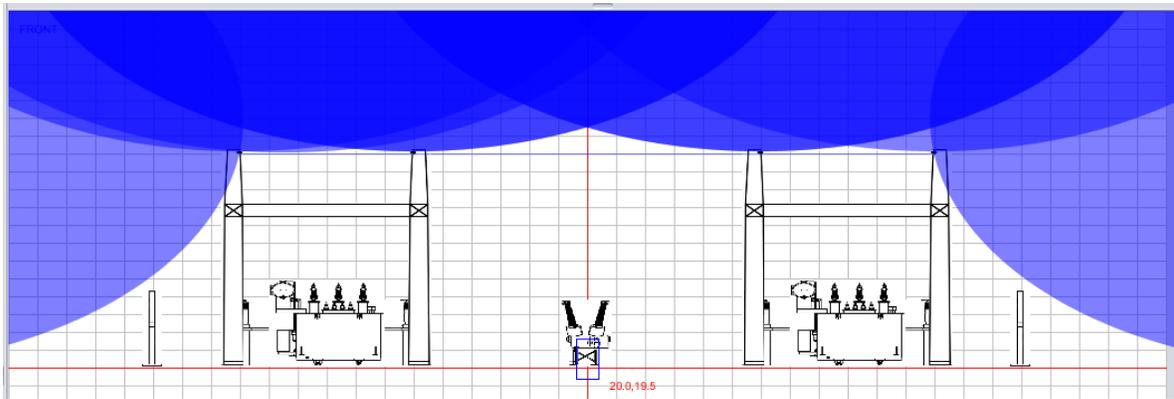
Tabla 4- 6: Resultados numéricos mediante simulador.

PARAMETRO	CALCULO NUMERICO	UNIDAD
BIL	350	kV
Corriente Nominal	418.37	kAmp
Corriente critica	2.40	kAmp
Radio corona	0.042	m
Impedancia de Sobretensión	320.77	Ohm
Radio de protección cable de guarda	14.13	m
Área de protección cable de guarda	3.85	m

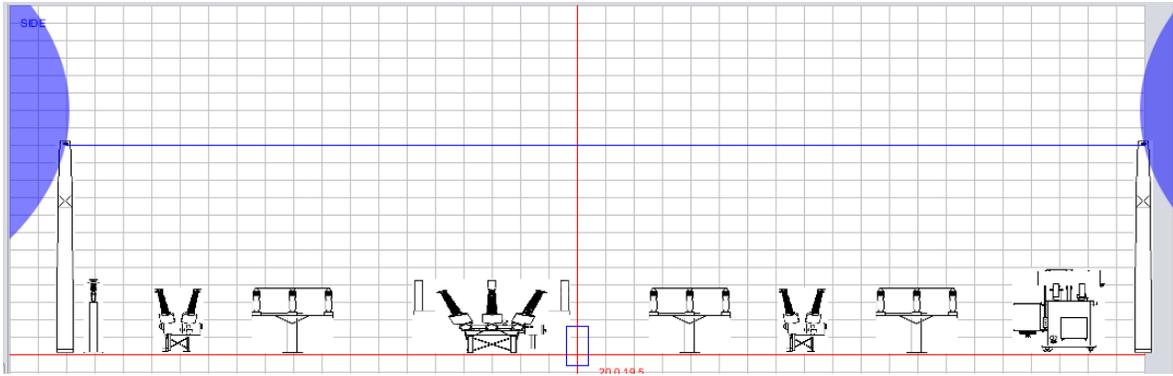
Los resultados finales se presentan de forma gráfica en el entorno de trabajo. En la figura 4-19 a, b y c se tienen las vistas de planta, frontal y de perfil respectivamente, en las que demuestran que el método se ha aplicado de forma efectiva, y todos los elementos de patio están protegidos.



a)



b)



c)

Fig 4- 19: Zonas de protección método EGM de Mousa mediante simulador, a) vista de planta, b) vista frontal, c) vista perfil

En la figura 4-22 se muestra el reporte en PDF generado con los datos del proyecto, las características de la subestación, el análisis del método y el análisis de riesgo.

4.4.3 APLICACIÓN MÉTODO ÁNGULOS FIJOS

Para el ejemplo de la sección anterior se ha aplicado el cálculo de protección por medio del método empírico. En el simulador el proceso es similar al EGM, una vez se han ingresado los datos de subestación (figura 4 – 17), se selecciona el método Ángulos Fijos en la barra de herramientas y posteriormente, haciendo doble click en el elemento de la subestación, se ingresa el valor del ángulo, que en este caso será de 45° como se muestra en la figura 4-20.

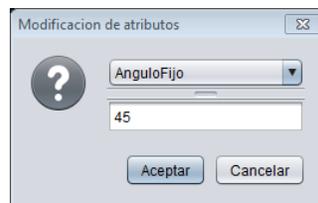
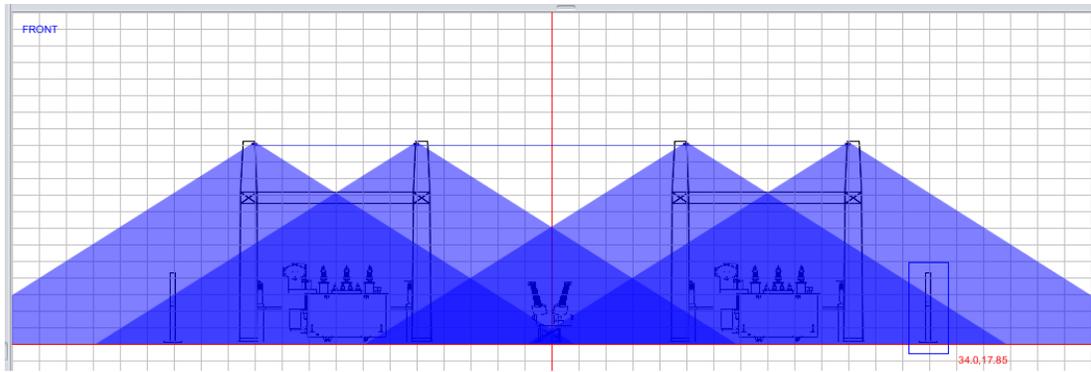
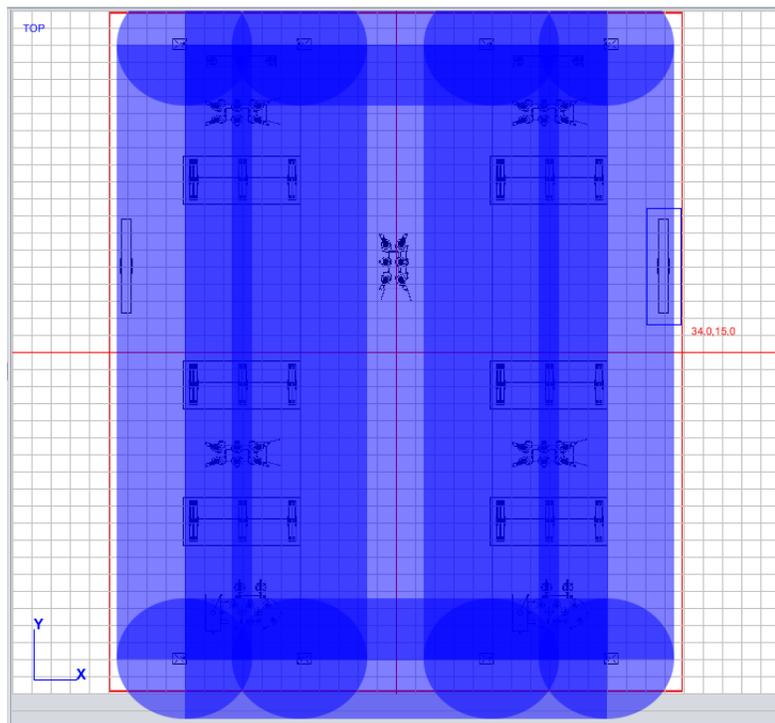


Fig 4- 20: Aplicación ángulo de 45°

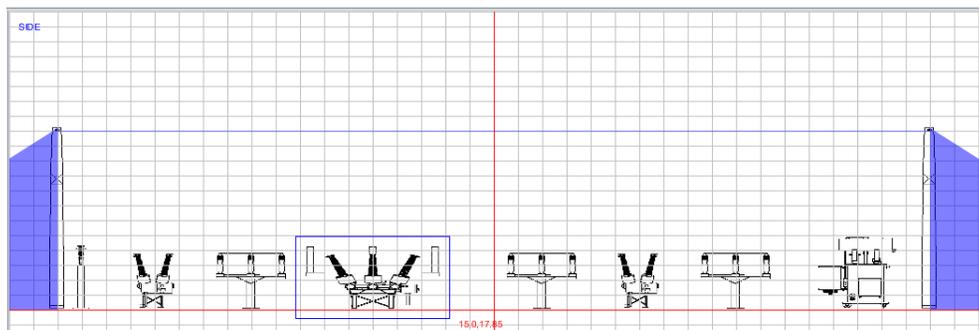
Una vez ingresado el valor del ángulo, se realiza el cálculo en el cual se obtienen los resultados mostrados en la figura 4-21.



a)



b)



c)

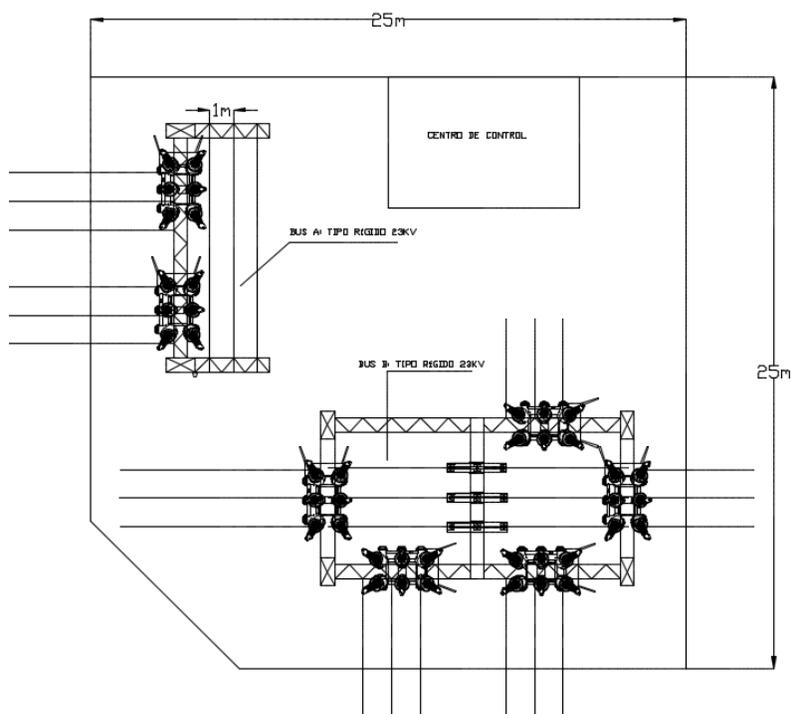
Fig 4- 21: Protección método empírico de ángulos fijos: a) vista frontal, b) vista planta, c) vista lateral

4.6 CASO DE ESTUDIO SUBESTACIÓN ROMA

En esta sección se analizará el caso para la subestación Roma ubicada en la colonia Roma en la ciudad de San Salvador, que pertenece a la empresa CAESS y es de tipo maniobra. Los datos generales se muestran en la Tabla 4 – 7. En las figuras 4 – 22 a, b y c, se muestran las vistas de planta lateral y frontal realizadas mediante software AutoCAD 2015.

Tabla 4 – 7. Datos Subestación Roma.

Datos		
Nombre:	Subestación Roma	
Ubicación:	San Salvador	
Tipo:	Maniobra	
Configuración del bus	Sencillo	
Potencia:	50	MVA
Voltaje:	23	kV
BIL	150	kV
Tipo bus:	rígido	
Radio bus:	0.04	m
Altura Punta	8.0	m
Altura bus A	6.8	m
Altura bus B	4.8	m



a)

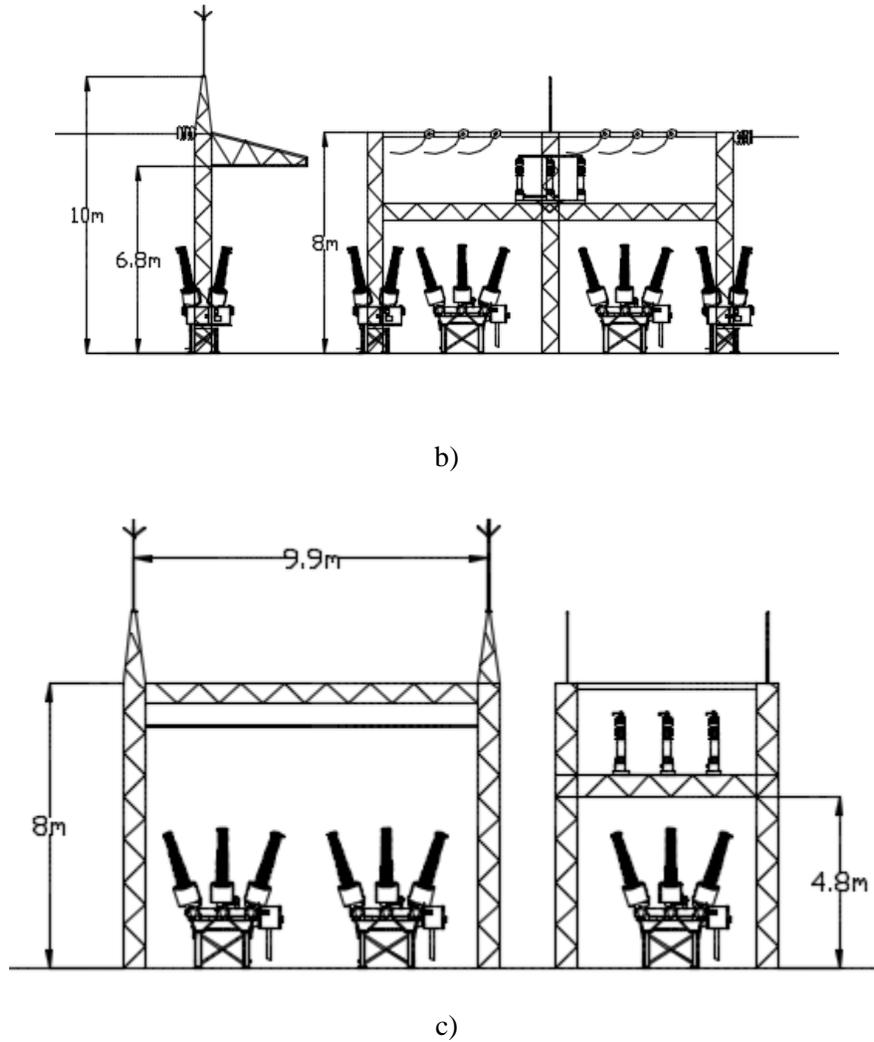
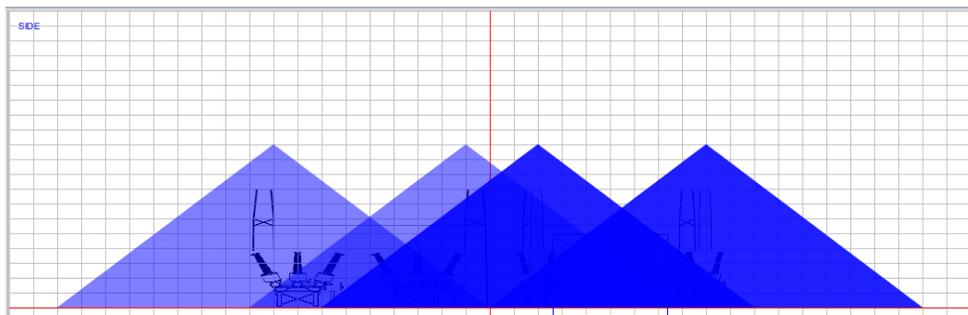
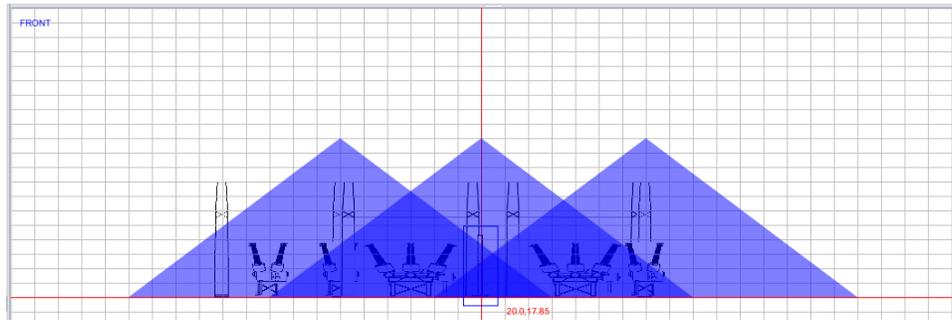


Fig 4- 22:Modelo subestación Roma: a) vista de planta, b) vista lateral, c) vista frontal

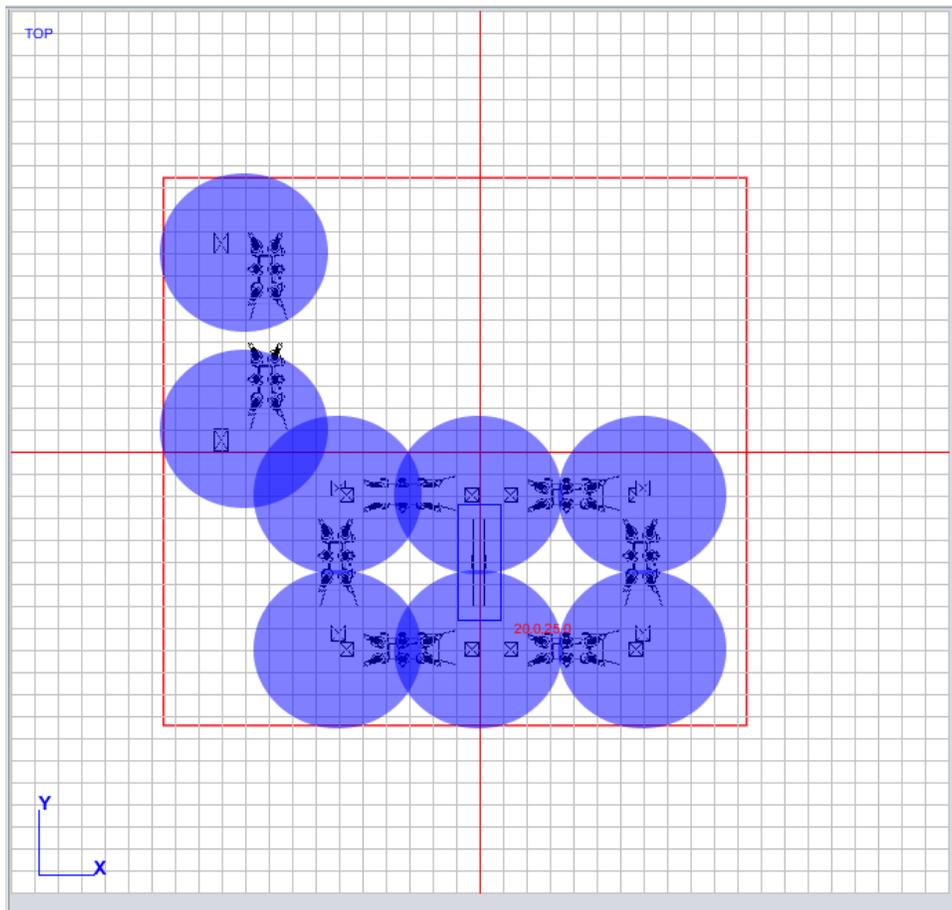
En la figura 4 – 22 se muestran las dimensiones de la subestación, y con los datos de la Tabla 4 – 7 se construye el modelo en el simulador. El sistema de protección se ha realizado con puntas franklin tal como es en la realidad, y el método aplicado es el de ángulos fijos, con un ángulo de protección de 45° , resultando en un área de protección como se muestra en la figura 4 – 23.



a)



b)



c)

Fig 4- 23: Sistema de protección subestación Roma: a) vista lateral, b) vista frontal, c) vista de planta

Los resultados muestran una efectiva protección en los elementos de la subestación, sin embargo, la imagen nos muestra que la protección se concentra en las estructuras y el área restante queda desprotegida.

4.7 OBSERVACIONES

- Para el análisis de protección, y por motivos prácticos, el simulador se limita al uso del tipo de bus rígido y a un solo conductor por fase.
- Para el método de ángulos fijos, el simulador utiliza un valor de ángulos de protección para α y β (IEEE 998 std 2012), esto con el fin de simplificar el análisis.
- La coordinación de aislamiento que se maneja en el simulador está basada en la Norma IEEE 1313 (sección 4.2) en la cual se ha considerado el BIL según el nivel de tensión específico del sistema para determinar los valores mínimos de distancias permisibles de contacto de fase a fase y de fase a tierra.
- Para el buen funcionamiento, deberá crearse una carpeta llamada “projects” en el disco local C, la ruta sería “C:\projects” en la que se guardarán todos los diseños elaborados por el usuario, y reportes generados.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló un simulador con un entorno gráfico para el análisis y diseño de sistemas de protección contra impactos directos de rayos en subestaciones de potencia, basado en la norma IEEE std 998-2012, utilizando el método empírico de ángulos fijos y el método analítico electrogeométrico de Mousa, el simulador realiza el análisis de forma numérica y gráfica por medio de tres planos que muestran la vista de planta, frontal y lateral en forma dinámica permitiendo obtener un diseño visual completo de la protección.
- El simulador realiza el cálculo de riesgo de falla de la protección basado en nivel isocerámico de la ubicación de la subestación, tomando el criterio de densidad de descarga de rayo a tierra dada por la norma IEEE std 998-2012 y una tasa de falla específica según el método de protección usado, el criterio usado para determinar una tasa de riesgo aceptable para fallas tiene que ser igual o menor a 1 rayo/400 años.
- El simulador permite la creación de modelos con formato de lenguaje de marcado extensible (.xml), esto facilita guardar y abrir archivos de forma que los modelos implementados pueden ser usados y editarse. Esto permite modelar y analizar los tipos de subestaciones básicas usadas en el país como bus sencillo e interruptor y medio.
- Se han desarrollado ejemplos de subestaciones de potencia en el diseño de la protección a impactos directos de rayos, obteniendo el reporte de cálculos numéricos, análisis gráfico y análisis de riesgo con resultados muy aceptables.
- Para simplificar el método de ángulos fijos se limitó el cálculo numérico igualando los ángulos de protección $\alpha=\beta$, esto permite la creación de un cono simétrico de protección.
- Se limitó el cálculo numérico del método electrogeométrico de Mousa usando solamente el BIL de la subestación para todos los casos, el cálculo de la impedancia de sobretensión se realiza para un solo conductor por fase. Esto permite simplificar el cálculo.
- Se han aplicado principios de coordinación de aislamiento en base a las normas IEEE 1313.1 – 1996 e IEEE 1313.2 – 1999, como la selección del BIL mediante el voltaje del sistema, y la selección de distancias eléctricas mínimas entre equipos de subestaciones de potencia mediante la norma IEEE 1427 – 2006.

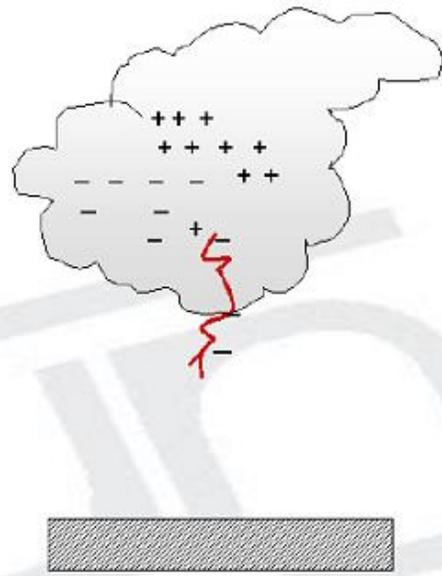
BIBLIOGRAFÍA

- 1) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **IEEE Std 998-2012 Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations**. Norma IEEE, Estados Unidos 30/4/2013.
- 2) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **IEEE Std 1313.1-1996, Standard for Insulation Coordination--Definitions, Principles, and Rules**. Norma IEEE 1996.
- 3) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **IEEE Std 1313.2-1999, Guide for the Application of Insulation Coordination**. Norma IEEE 1999.
- 4) Andrew R. Hileman. **Insulation Coordination for Power Systems**. Taylor & Francis Group 1999.
- 5) Mejía Villegas S.A. **Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión**. 1991, Carlos Felipe Ramírez, Segunda Edición.
- 6) John D. McDonald. **Electric Power Substations Engineering**. Taylor & Francis Group 2007, Segunda Edición.
- 7) José Raúl Martín. **Diseño de subestaciones eléctricas**. Editor, McGraw-Hill/Interamericana, 1992.
- 8) Grupo OPSA (8 de septiembre de 2007) **250 mil capitalinos se quedan sin energía**. Tegucigalpa, Honduras. La Prensa. Recuperado de: <https://www.laprensa.hn>
- 9) Proceso (9 de septiembre de 2010). **Rayo en subestación eléctrica causa apagón nacional**. Tegucigalpa, Honduras. Proceso Digital. Recuperado de: <https://www.proceso.hn>
- 10) El País (14 de diciembre de 2015). **Caída de un rayo en subestación provocó corte de luz en parte del país**. Montevideo, Uruguay. El país. Recuperado de: <https://www.elpais.com.uy>
- 11) Lebanon news (28 d septiembre de 2014). **Lightning strike burns down power plant in Tyre**. The daily star. Tiro, Libano. Recuperado de: <https://www.dailystar.com.lb>

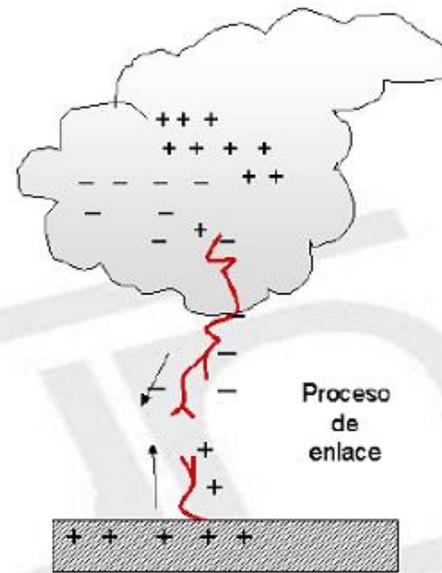
ANEXO A

A.1 EJEMPLO DE PASOS DE UN RAYO DEL TIPO NEGATIVO HACIA ABAJO

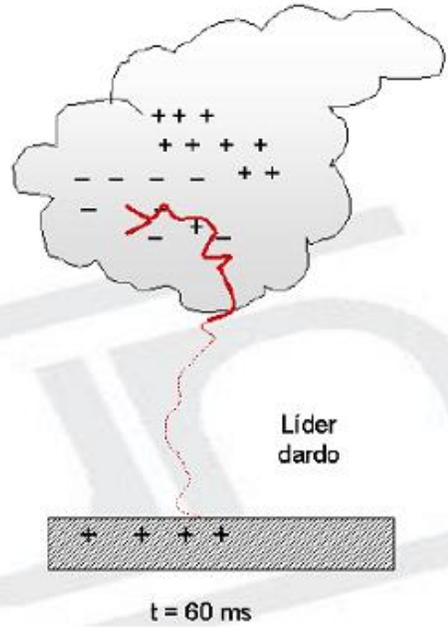
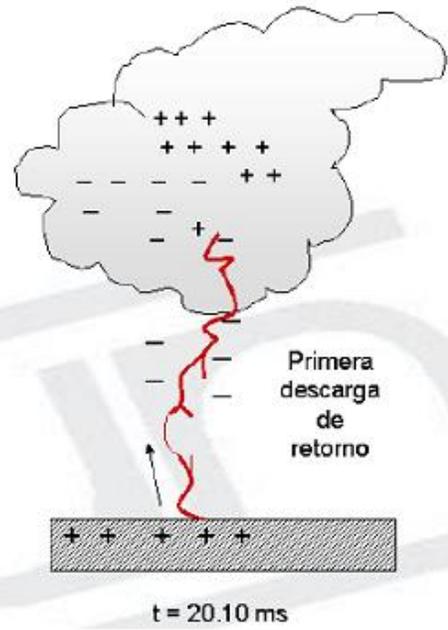


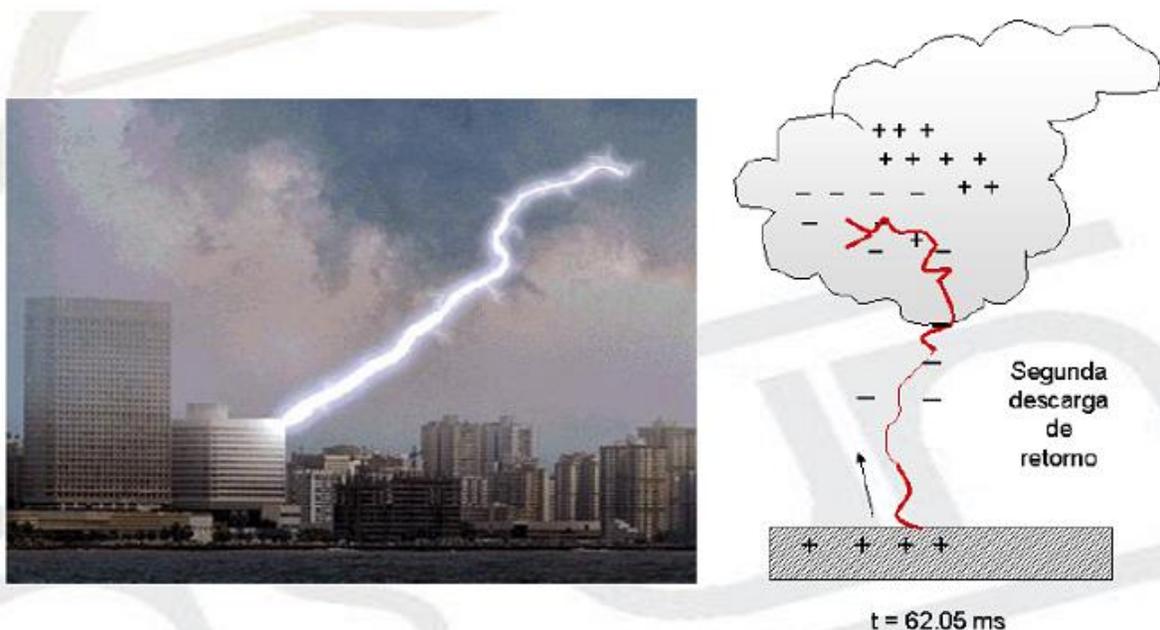


$t = 1,20 \text{ ms}$



$t = 20 \text{ ms}$





A.2 DIFERENCIAS ENTRE PUNTAS FRANKLIN Y PUNTAS ACTIVAS

A.2.1 PUNTAS FRANKLIN

Las puntas franklin son elementos de protección pasivos y son sistemas de protección que no realiza ningún tipo de acción previa a la caída del rayo, su funcionalidad se ejecuta cuando cae un rayo en la estructura encargándose de conducir y disipar la energía del rayo hasta la toma de tierra. Los elementos pasivos también pueden ser los mástiles y cables de guarda.

A.2.2 PUNTAS ACTIVAS

El sistema de protección activa realiza una acción previa a la caída del rayo, el sistema de puntas activas emite una ionización creando una descarga de retorno dirigida a la nube canalizando y dirigiendo el rayo a un punto seguro y preparado para su descarga.

Hay 3 tipos de dispositivos que se han propuesto a lo largo de los años:

- a. Pararrayos con puntas radiactivas son dispositivos que amplían el rango atractivo de la punta a través de la ionización del aire.
- b. Pararrayos de emisión temprana son dispositivos que contienen un mecanismo de activación que envía pulsos de alto voltaje a la punta de la barra cada vez que aparecen nubes cargadas sobre el sitio. El proceso mencionado genera una línea ascendente que extiende el rango atractivo.
- c. Los dispositivos de prevención de rayos mejoran el fenómeno de descarga de puntos mediante el uso de una serie de agujas en lugar de la punta individual del pararrayos estándar. La carga espacial generada por las muchas agujas de la punta neutraliza

parte de la carga en una nube que se aproxima y evita un impacto de retorno al dispositivo, extendiendo aún más la efectivamente el área protegida.

Las ventajas que estos sistemas ofrecen con los convencionales son:

- Protección no solo de la estructura sino también de sus alrededores o zonas abiertas.
- Facilidad de instalación, reduciendo el precio de la mano de obra, por lo que resulta mucho más económico.
- Menos impacto visual, al tener una instalación menos voluminosa el edificio protegido no resulta alterado estéticamente de forma importante.

La norma IEEE 998-2012 dijo que hasta la fecha no se ha proporcionado evidencia científica que demuestre que estos sistemas sean superiores a los mástiles y alambres convencionales o que funcionen según lo demandado por los fabricantes.

Puntos relevantes acerca de estos dispositivos:

- i. Los pararrayos radiactivos fueron prohibidos en Europa ya hace años porque se descubrió que la contaminación nuclear resultante era injustificable por su mínimo beneficio. Que, además, fallaron en las instalaciones de campo.
- ii. Los pararrayos de emisión temprana y el método de diseño asociado en NFC 17-102 se han criticado por la comunidad científica por una serie de defectos fundamentales y técnicos en su modo de operación.
- iii. La comunidad científica mundial no ha aceptado que las geometrías pasivas mejoradas demuestren incrementos en la distancia de ataque por factores mayores al 20% con relación a los mástiles y cables blindados.
- iv. La viabilidad económica de estos dispositivos se basa en la afirmación de que “un solo dispositivo” puede proteger a una edificación completa y ello justificaría su mayor costo unitario que un Terminal Franklin. Por ejemplo, para enero del 2002 el precio de lista de una punta activa de la empresa ERICO es de US \$1,250.0 comparado con un terminal aéreo convencional Franklin, el cual es de US \$ 10.00.

ANEXO B

B.1 CASOS EN LOS QUE UN RAYO IMPACTO UNA SUBESTACIÓN DE POTENCIA

Subestación Miraflores, Honduras

En el año 2007, un rayo impacto el transformador de potencia de la subestación Miraflores en la capital de Honduras. Unas 250 mil personas fueron afectadas debido al evento que produjo fallas en la zona suroriente y sur de la capital. Las reparaciones duraron 7 días con interrupciones de 3 a 6 horas. Los daños en el transformador fueron muy severos por lo que tuvo que ser reemplazado por un transformador de la subestación de Toncontín, el transformador dañado tenía 20 años de operación con una cotización de 1 millón de dólares.



Fig B- 1: Cuadrillas trabajan en el cambio de transformador de potencia dañado por un impacto directo de rayo en la subestación Miraflores

Subestación Suyapa, Honduras

El 9 de septiembre de 2010, Un rayo que cayó en la subestación de Suyapa, al oriente de la capital hondureña, causó daños y generó un apagón nacional.

Fueron tres descargas eléctricas que provocaron una falla generalizada en el sistema que se originó en Tegucigalpa y que afectó todo el sistema de interconexión. Un rayo impactó en la subestación de Suyapa, que es de donde se originan las principales líneas de transmisión hacia las principales ciudades del país. La subestación eléctrica de Suyapa “es la reguladora del Centro Nacional de Despacho, donde se regula y se hace la generación del servicio de energía”.

Subestación Montevideo, Uruguay

En el año 2015, el impacto de un rayo en una de las principales subestaciones de Uruguay provocó que varios barrios de Montevideo se vieran afectados. Se reportaron que también hubo cortes en Canelones, Maldonado y Cerro Largo. Unos 800 mil clientes se quedaron sin energía debido a "un impacto de rayo directo en una de las subestaciones que perturbó todo el sistema". El gerente de operaciones explicó que lo que ocurrió fue que "se perdió el anillo de la red de 500 kV de alta tensión que llega a Montevideo".

Subestación transformadora, Líbano

En el año 2014 un rayo impactó una subestación en la ciudad de Tiro, el incidente provocó un gran incendio en el lugar ocasionado terribles daños en los equipos e infraestructura. La subestación de energía eléctrica alimentaba una estación de bombeo de agua que consistía en 50 pozos de agua, que abastecían a más de 70 aldeas. Mientras tanto, la central eléctrica suministraba electricidad a 50 pueblos.

La central eléctrica se apagó completamente como resultado del incendio, pero los funcionarios emplearon dos generadores Diesel para operar dos de los pozos en la estación hidráulica. La reparación de la planta tardó algunos meses debido a los extensos daños a su infraestructura e instalaciones. Esto, a su vez, dio lugar a una grave escasez de agua y electricidad en el sur del Líbano.



Fig B- 2: Daños ocasionados por el impacto directo de rayo en la subestación ubicada en Tiro, Líbano