



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**Análisis de la protección contra impactos directos de rayos y la
coordinación de aislamiento en subestaciones modulares de
distribución**

ROMULO ETDUARDO OROZCO MIRANDA

Asesorado por el Ing. Cesar Alfonso Morales Massella

Guatemala, febrero de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA PROTECCIÓN CONTRA IMPACTOS
DIRECTOS DE RAYOS Y LA COORDINACIÓN DE
AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES MODULARES DE
DISTRIBUCIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROMULO ETDUARDO OROZCO MIRANDA
ASESORADO POR: ING. CESAR ALFONSO MORALES MASSELLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA
GUATEMALA, FEBRERO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Juan Fernando Morales Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godines
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DE LA PROTECCIÓN CONTRA IMPACTOS
DIRECTOS DE RAYOS Y LA COORDINACIÓN DE
AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES MODULARES DE
DISTRIBUCIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha quince de marzo de 2004.

Romulo Etduardo Orozco Miranda

ACTO QUE DEDICO

DIOS	Señor y creador de todo cuanto existe y existirá, mi guía hoy y siempre.
A MIS PADRES	Rómulo Victoriano Orozco Godinez y Rosa Miranda Orozco, por su apoyo y comprensión durante toda la vida, porque este triunfo es de ustedes y no mío.
A MIS HERMANOS	Mayra, Adolfo, Bregner, Pablo y Karen, por su apoyo todos estos años.
A MIS ABUELOS	Como El mejor presente a su memoria.
A MIS SOBRINOS	Daniel y Karla por el cariño brindado.
A MIS TÍOS	Por todo el cariño brindado.
A MIS AMIGOS	Por todo el cariño y compañía en los buenos y malos momentos.
A MIS COMPAÑEROS DE TRABAJO	Por su apoyo y comprensión.
A MI ASESOR	Ing. Cesar Alfonso Morales Gratitud sincera por su asesoría durante el proyecto de tesis.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVI
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. GENERALIDADES	
1.1. Electromagnetismo básico.....	1
1.2. Carga, iones y partículas elementales.....	1
1.3. Potencial electrostático y dipolo eléctrico.....	2
1.4. Fuerza de interrupción y conducción en gases.....	6
1.5. Dieléctricos y cargas inducidas.....	7
1.6. Fundamentos de la propagación de las ondas viajeras.....	9
1.7. Coeficientes y factores de transmisión y reflexión.....	12
1.8. Sobretensiones.....	13
1.8.1. Sobretensiones internas temporales de duración prolongada.....	13
1.8.2. Sobretensiones internas de maniobra.....	14
1.8.3. Sobretensiones externas o descargas atmosféricas.....	16
1.9. Nivel básico de aislamiento al impulso.....	16
1.10. Tipos de aislamientos.....	18
1.11. Ruptura de aislamientos.....	19
1.12. Blindaje y coordinación de aislamiento.....	19
1.13. Dimensionamiento eléctrico de subestaciones.....	20

1.13.1.	Bases para el dimensionamiento eléctrico de subestaciones aisladas en aire.....	21
1.13.2.	Esfuerzos que afectan el aislamiento.....	22
1.14.	Distancias eléctricas de no flameo en aire.....	23
2.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE DESCARGA Y MODELOS DE ANÁLISIS PARA LA PROTECCIÓN	
2.1.	Estructura de la carga.....	25
2.2.	Corriente de descargas puntuales o efecto corona.....	27
2.2.1.	Iniciación de la corona.....	28
2.3.	Teorías de formación de las descargas atmosféricas.....	28
2.3.1.	Mecanismos de descargas.....	30
2.4.	Características de corriente durante una descarga atmosférica.....	32
2.5.	Determinación de la densidad de descargas atmosféricas.....	32
2.6.	La descarga atmosférica como una onda viajera.....	35
2.7.	Principales efectos de las descargas atmosféricas en subestaciones.....	36
2.8.	Modelos y métodos utilizados para el análisis del blindaje y la coordinación de aislamiento de subestaciones.....	37
2.8.1.	Modelo electrogeométrico.....	37
2.8.2.	El método de los ángulos fijos.....	41
2.8.2.1.	Cálculo del blindaje con bayonetas por el método de los ángulos fijos.....	41
2.8.2.2.	Cálculo del blindaje por cables de guarda usando el método de ángulos fijos.....	44
2.8.1.1.	Método electrogeométrico utilizando hilo de guarda.....	46

2.8.3.	Método semi-probalístico o convencional para el análisis en la coordinación de aislamiento.....	47
3.	DISPOSITIVOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS Y SOBRETENSIONES POR MANIOBRA	
3.1.	Sistemas de protección.....	51
3.1.1.	Sistemas pasivos.....	52
3.1.2.	Sistemas activos.....	52
3.2.	Dispositivos de protección contra impactos directos de rayo y sobretensiones.....	53
3.3.	Principios de operación de cada dispositivo de protección.....	53
3.3.1.	Los cuernos de arqueo	53
3.3.2.	Puntas de Franklin	53
3.3.3.	Jaula de Faraday o hilo de guarda.....	54
3.3.4.	Pararrayos con emisión temprana de ascendentes....	54
3.3.5.	Pararrayos autovalvulares.....	55
3.4.	Normas y requerimientos mínimos para la instalación de dispositivos protectores.....	58
3.4.1.	Normas de instalación de la punta Franklin.....	58
3.4.2.	Normas de instalación de la jaula de Faraday.....	59
3.4.3.	Normas de instalación del pararrayos ionizante.....	60
3.4.4.	Requerimientos mínimos para la instalación de los pararrayos autovalvulares.....	61
3.5.	Procedimiento en la coordinación de aislamiento.....	62
3.5.1.	Determinación del nivel de protección de los pararrayos.....	62
3.5.2.	Selección de los pararrayos	65
3.5.3.	Localización de los pararrayos.....	68

3.5.4.	Procedimiento para lograr una adecuada zona de protección con pararrayos.....	71
4.	CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y TEÓRICAS DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRA EN LA BASE DE LAS ESTRUCTURAS	
4.1.	Factores básicos a considerar en el diseño de un sistema de tierras.....	74
4.1.1.	Resistividad del terreno.....	74
4.1.2.	El tamaño o extensión del sistema de tierras.....	76
4.2.	Diseño de sistemas de tierra para subestaciones eléctricas de acuerdo a la norma (IEEE -80).....	77
4.2.1.	Desarrollo de los cálculos.....	78
4.3.	Mallas o redes de tierras.....	79
4.4.	Medios para obtener tomas de tierra.....	80
4.4.1.	Cables compensadores.....	80
4.4.2.	Electrodos	81
4.4.3.	Tratamiento del suelo.....	83
4.5.	Resistencia de una puesta de tierra.....	84
4.6.	Materiales que se emplean en los sistemas de dispersión....	86
5	ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA SUBESTACIONES MODULARES	
5.1.	Subestaciones modulares.....	87
5.2.	Aplicación de modelos matemáticos para el análisis de la protección contra descargas atmosféricas	89

5.2.1.	Sistema con pararrayos Franklin, utilizando el modelo electrogeométrico	90
5.2.2.	Aplicación del modelo electrogeométrico para el análisis utilizando hilo de guarda.....	94
5.2.3.	Sistema de protección con pararrayos ionizantes.....	97
5.2.4.	Aplicación del paquete informático ATP para el análisis de la protección	99
	5.2.4.1. Modelos utilizados.....	100
	5.2.4.1.1. De línea aérea.....	100
	5.2.4.1.2. De línea media tensión.....	100
	5.2.4.1.3. De conductores.....	101
	5.2.4.1.4. De cable subterráneo.....	101
	5.2.4.1.5. De pararrayos de línea 69 kv....	101
	5.2.4.1.6. De pararrayos de línea 13.8 kv...	102
	5.2.4.1.7. De transformadores de medida..	102
	5.2.4.1.8. Interruptor seccionador.....	102
	5.2.4.1.9. De transformador de potencia....	103
	5.2.4.1.10. De la red de tierras.....	103
	5.2.4.2. Resultados del análisis con simulación para la subestación de 3 posiciones en AT...	104
5.3.	Análisis técnico de sistemas de protección.....	100
	5.3.1. Área de protección.....	108
	5.3.2. Montaje.....	109
	5.3.3. Mantenimiento.....	110
	5.3.4. Seguridad.....	111
	5.3.5. Estética.....	112
5.4.	Análisis económico.....	113

CONCLUSIONES..... 119
RECOMENDACIONES..... 121
BIBLIOGRAFÍA..... 123

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Geometría para calcular diferencia de potencial entre dos puntos	4
2	Forma de onda de una descarga atmosférica	17
3	Nube con un dipolo positivo	26
4	Esquematación del mecanismo de formación del rayo	31
5	Mapa isoceraúnico de la República de Guatemala	34
6	Esquema de la zona protegida con el modelo electrogeométrico	39
7	Diagrama representativo del radio de protección	40
8	Cono típico de protección de 30° por medio de mástil	42
9	Descripción de una zona de protección para cierto equipo	43
10	Zona de protección utilizando un hilo de guarda	45
11	Zona de protección utilizando dos hilos de guarda	46
12	Esquema de protección del hilo de guarda	47
13	Curva de características tensión-tiempo en un pararrayos	56
14	Modelo de un pararrayo	57
15	Formas de onda de tensión y corriente típicas de un pararrayos	57
16	Operación típica de un pararrayos	58
17	Representación del nivel de protección a través de las curvas características	63
18	Diagrama del nivel de protección en función de la distancia	69
19	Variación de la resistividad en función de la temperatura y humedad	76

20	Valores de la resistencia impulso a partir de la resistencia de frecuencia nominal del sistema	85
21	Subestación modular vista de planta	89
22	Planta y elevación de la protección en una subestación con puntas Franklin	92
23	Planta y elevación de la protección en una subestación con hilo de guarda	95
24	Esquema de protección vista de planta con pararrayos ionizante	98
25	Esquemas monofásicos de los modelos de interruptor-seccionador empleados en simulación	103
26	Disposición física de las posiciones de AT en la subestación	105

TABLAS

I	Valores de corriente de pararrayos	50
II	Valores de pendiente del frente de onda	72
III	Valores de resistividad del terreno	75
IV	Fórmulas para el cálculo de tomas de tierra	82
V	Valores de la resistencia de tomas de tierra según capacidad	84
VI	Costos de suministros e instalación para el sistema con puntas franklin	93
VII	Costos de suministros e instalación para el sistema con hilo de guarda	96
VIII	Costos de suministros e instalación para el sistema con pararrayos ionizante	99
IX	Nomenclatura de las posiciones de AT en la subestación	105

X	Resultados de la simulación del sistema de protección	106
XI	Precios de suministro e instalación del sistema de protección con pararrayos autovalvulares	107
XII	Resumen de factores técnicos de cada sistema	113
XIII	Cuadro resumen de inversión y costos de los sistemas de protección	114

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
E	Vector de campo eléctrico
q	Carga
dI	Cambio de distancia
dW	Cambio de energía
F	Vector de fuerza
dØ	Diferencia de potencial eléctrico
V	Voltaje
Z	Impedancia
I	Corriente
D	Distancia de cebado
Rp	Radio de protección
BIL	Nivel básico de aislamiento al impulso
NBS	Nivel básico de aislamiento por maniobra
DRT	Densidad de rayos o descargas
Vcf	Tensión crítica de flameo
Ke	Factor de conexión a tierra
exp.	Notación exponencial
µo	Permeabilidad del vacío
Ω	Ohmios
ds	Diferencial de área
°C	Grados Celsius
P/A	Factor del valor presente serie uniforme

GLOSARIO

Avalancha de electrones	Proceso de multiplicación debido a los impactos de los electrones en la ionización de moléculas de gas.
<i>Bushings</i>	Nombre dado a las terminales de alta y baja tensión de un transformador.
Carga	Característica fundamental de las partículas “elementales” como los electrones y protones.
Colectores eventuales de tierra	Conjunto de colectores en los cuales se hacen dispersores y conductores de corriente los terminales de estos.
Cono de Protección	Un volumen cónico alrededor de un pararrayos usado para definir una región de protección.
Coordinación de aislamiento	Proceso en el cual se coordina los niveles de protección con los niveles de aislamiento.
Densidad de descargas	Número anual de rayos por kilómetro cuadrado
Electrostática	Estudio de la interacciones entre cargas inmóviles.

Ferroresonancia	Fenómeno que implica un cambio de signo en el ángulo de desfase entre las armónicas fundamentales de tensión y corriente, que se produce al variar la tensión de la fuente.
Julio	Unidad fundamental de la energía.
Nivel ceraunico	La frecuencia de ocurrencia de las descargas atmosféricas en un sitio determinado en cierto periodo de tiempo.
Nivel de Aislamiento	Representa el valor de la tensión al impulso que un equipo pueda soportar sin dañarse.
Nivel de Protección	Es la máxima tensión que se pueda verificar a causa de los dispositivos de protección.
Pararrayos	Nombre común que se le da a los dispositivos de protección contra descargas atmosféricas.
Pararrayos autovalvular	Dispositivo de protección conectado solidamente a tierra que se coloca para drenar sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas a tierra.
Punta franklin	Dispositivo metálico conectado solidamente a tierra que se coloca exteriormente para captar descargas electroatmosféricas directas.
Rayo	Nombre común de una descarga electroatmosférica.

Sistema de protección contra rayos	Sistema completo para proteger instalaciones, estructuras y áreas abiertas contra las descargas atmosféricas.
Sistema de tierra	Conjunto de elementos conductivos en una subestación que sirven para drenar a tierra cualquier sobrecorriente y sobretensiones que pueda dañar los equipos.
Sistemas de protección interna	Sistema que protege contra sobretensiones ocasionadas por las descargas atmosféricas a los equipos eléctricos y electrónicos.
Sobretensiones	Elevaciones de voltaje grandes en las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica.
Subestación	Parte indispensable de una red eléctrica para cambiar los niveles de voltaje para el transporte y distribución de energía eléctrica.
Tensión	Sinónimo de voltaje.
Zona de protección	Nombre que se le da al alcance que un dispositivo o sistema de protección tienen en una subestación eléctrica.

RESUMEN

El nivel ceraúnico en ciertos sectores del país es alto, por lo que se hace necesario que las subestaciones eléctricas tengan una buena protección contra impactos directos de rayo y una buena coordinación de aislamiento.

Para conseguir la protección de cualquier tipo de subestación o instalación puede recurrirse a uno de los tres sistemas siguientes, o a una combinación de ambos:

1. **Sistema externo:** que comprende los dispositivos captadores, derivadores o bajadas y tomas de tierra. Estarían comprendidos en este grupo todos los dispositivos denominados “pasivos”: varillas o puntas captadoras, conductores tendidos y mallas de conductores. Son denominados así porque no disponen de ningún tipo de ionización propia, limitándose a recoger las descargas atmosféricas con una trayectoria ya formada.
2. **Sistema interno:** comprende los dispositivos que reducen los efectos electromagnéticos de la corriente de la descarga atmosférica dentro del espacio a proteger. Entran dentro de este sistema todos los componentes denominados “activos” que son todos aquellos que disponen de una ionización propia o aprovechada del entorno eléctrico atmosférico, canalizando la trayectoria de la descarga hacia el punto deseado.

Para la protección de una subestación eléctrica se hace una evaluación técnica-económica de cada sistema con diferentes dispositivos para dar así conclusiones y recomendaciones.

OBJETIVOS

- **General**

Estudiar y analizar el comportamiento de las descargas atmosféricas así como los diferentes modelos, sistemas y criterios para el blindaje y coordinación de aislamiento, y aplicarlos para el caso de las subestaciones modulares de distribución telecontroladas, como a las subestaciones convencionales.

- **Específicos**

1. Aplicar programas de simulación para el análisis del blindaje y coordinación de aislamiento de subestaciones con diferentes niveles de voltaje.
2. Dar a conocer los nuevos modelos matemáticos de análisis para la protección contra descargas atmosféricas.
3. Conocer el sistema de protección más económico para el caso de las subestaciones modulares.
4. Estudiar los parámetros y criterios para la realización de un buen sistema de tierras en subestaciones, basados en las normas internacionales.
5. Analizar criterios para la selección de equipos de protección contra sobretensiones y descargas atmosféricas en subestaciones.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno del rayo consiste en una transmisión rápida de carga entre la atmósfera y la tierra, este intercambio tiene lugar a través del dieléctrico del aire, generando voltajes y corrientes grandes en su impacto en el punto de tierra de contacto. Los efectos catastróficos ocasionados por las descargas, ponen en peligro la vida de las personas y daños graves en las instalaciones eléctricas, haciéndose necesario la instalación de sistemas de protección, principalmente en zonas de alta frecuencia de tormentas eléctricas.

Las subestaciones eléctricas, como parte de un sistema eléctrico, están sometidas a esfuerzos dieléctricos producidos por las sobretensiones que se presentan, éstas se pueden agrupar en tres categorías principalmente: las debidas a descargas atmosféricas o rayo, aquellas que se dan por las maniobras de los interruptores (apertura y cierre) y las que ocurren a frecuencia del sistema, que pueden ser de larga duración en comparación con las dos primeras que son de naturaleza transitoria.

Las sobretensiones pueden alcanzar valores tales que dañen al aislamiento de los equipos, razón por la cual se deben de proteger. En el caso de las sobretensiones de origen atmosférico, también conocidas como rayo, se pueden presentar en la instalación en dos formas: como descargas directas, o bien, inducidas a través de las líneas de transmisión. En el primer caso relacionado con el nivel isoceraúnico o la densidad de rayos a tierra, se debe adoptar una protección que se conoce como el “blindaje de subestaciones”.

Para las sobretensiones de rayo inducidas por las líneas, las de maniobra de interruptores y las temporales, la protección se hace por medio de partarrayos autovalvulares, entonces se aplica los conceptos de coordinación de aislamiento.

La protección de subestaciones eléctricas contra el rayo, se realiza mediante los sistemas de protección externa y los de protección interna, previa la valoración del riesgo a que pueden estar sometidas

El presente trabajo de tesis pretende investigar y analizar los modelos tradicionales y no tradicionales de protección contra descargas atmosféricas especialmente para subestaciones eléctricas modulares, así como una comparación técnica-económica entre cada sistema.

1 GENERALIDADES

1.1 Electromagnetismo básico

La electricidad atmosférica es un asunto multidisciplinario, y una de sus disciplinas fundamentales es el electromagnetismo. Dentro de ella se encuentra la electrostática, definida por el estudio de interacciones entre cargas inmóviles.

Muchas de las características eléctricas de la atmósfera pueden ser tratadas electrostáticamente cuando sus posiciones relativas y no sus movimientos causan las interacciones. Incluso el relámpago, que obviamente no es estático, se puede aclarar en parte usando electrostática. Ésta elimina interacciones magnéticas y termales, que son debidas al movimiento de la carga y las partículas. Estas otras interacciones se pueden tratar como efectos adicionales agregados a los efectos electrostáticos.

1.2 Carga, iones y partículas elementales

La carga eléctrica es una característica fundamental de las partículas “elementales”, consideradas como electrones, neutrones y protones.

En muchos procesos el electrón es la única partícula importante porque es pequeño y móvil, y porque los electrones de algunos átomos están relativamente libres a los átomos y moléculas.

El electrón se considera que tiene una carga negativa, el protón una carga positiva y el neutrón es eléctricamente neutro y con igual masa que el protón. Una característica importante de la carga que se ha demostrado continuamente, es que no se puede crear ni destruir.

1.3 Potencial electrostático y dipolo eléctrico

El concepto de potencial electrostático (generalmente llamado “el potencial”) usando inicialmente \mathbf{E} de una carga puntual positiva. Las líneas de campo eléctrico van radialmente hacia fuera. Un diagrama de dos dimensiones de la magnitud de \mathbf{E} en la vecindad de una carga puntual parecería una “colina”. La colina es simétrica, y la magnitud de \mathbf{E} varía inversamente con el cuadrado de la distancia o la radio.

Se sabe que una carga q' positiva pequeña colocada a una distancia r de la carga positiva q experimenta una fuerza, $\mathbf{F} = q'\mathbf{E}$, donde \mathbf{E} es de la carga q . La dirección de la fuerza en la carga positiva q' es hacia la carga positiva q . Si se mantiene la carga q' en su posición, se debe ejercer una fuerza para mantenerla allí. Así se requiere una fuerza aplicada en q' tal que la fuerza aplicada en q' tal que la fuerza aplicada balancee exactamente la fuerza eléctrica: $\mathbf{F}_{aplicada} = -q'\mathbf{E}$. Ahora, si se deja mover q' una distancia pequeña, $d\mathbf{l}$, en la presencia de q , una cantidad de trabajo $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$ es hecho, por la fuerza eléctrica en el sistema. Este trabajo es hecho por la energía en el sistema interno. Mientras que el trabajo se define como la fuerza actuando sobre una distancia, una fuerza aplicada trabaja en q' cuando actúa contra una fuerza eléctrica que resiste a mover q' .

Se define la energía que deja el sistema eléctrico (es decir, trabajo hecho por el campo eléctrico) como un cambio negativo, y el que viene de adentro (trabajo hecho por la fuerza externa) como cambio positivo.

En los términos de la energía de este sistema eléctrico, se escribe el cambio de energía, como dW

$$dW = -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = -q'\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \dots \text{Ecc.1.1}$$

La unidad de la energía (y también del trabajo) es el julio (J). Nótese que solamente el movimiento paralelo a la dirección de la fuerza eléctrica (y por lo tanto también a E) puede cambiar la energía de un sistema eléctrico, porque la dirección de la fuerza eléctrica en q' en un punto dado es constante sin importar la dirección del movimiento de q' . El sistema es conservador. Es decir, el cambio total de la energía de un movimiento de q' a lo largo de cualquier trayectoria es cero si q' se vuelve a su posición original. Esto es equivalente al decir que la ecc. (1.1) es un diferencial exacto. Si dividimos el trabajo incremental por la carga de la unidad. Se puede definir esto como cambio en el campo electroestático (o eléctrico).

$$\frac{dW}{q'} = d\phi \dots \text{Ecc.1.2}$$

donde las unidades son julios por culombio (J/C). Así,

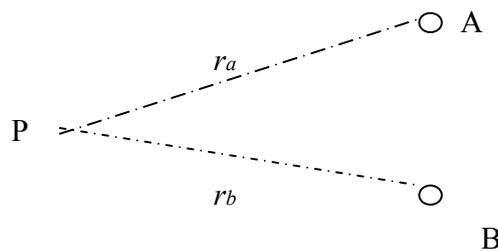
$$d\phi = -E \cdot d\mathbf{l} \dots \text{Ecc.1.3}$$

También da el cambio de potencial, y los julios por culombio son equivalentes a voltios (V). Puesto que, $d\phi$ es un diferencial exacto, podemos escribir la diferencia de potencial eléctrico en dos puntos, A y B como:

$$\phi_B - \phi_A = - \int_A^B E \cdot dl \dots \text{Ecc.1.4}$$

La diferencia de potencial depende solamente de las localizaciones de los puntos A y B y no de la trayectoria tomada por la carga q' que va de A a B. Ésta es una característica de la naturaleza conservadora del campo eléctrico. La diferencia de potencial entre dos puntos a diferentes distancias de una carga puntual q según lo demostrado en la figura.

Figura 1. **Geometría para calcular diferencia de potencial entre dos puntos**



Entonces se tiene,

$$\phi_B - \phi_A = \frac{q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) \dots \text{Ecc. 1.4}$$

Porque se puede definir solamente diferencia de potencial y nunca un potencial absoluto, es conveniente tener un potencial de referencia que se señala como potencial cero. Esto es análogo a asignar la altitud cero al nivel del mar. En el caso de una configuración de una carga puntual, se deja el punto A estar en el infinito y asignar arbitrariamente a ϕ_A el valor de cero. Entonces $\phi = \phi_B - 0$ es el potencial en el punto B con respecto al potencial en el infinito, así que se escribe.

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon r} \dots\dots\dots \text{Ecc. 1.5}$$

Donde $r = r_B$. El significado físico del potencial es la energía potencial de una carga, unidad de prueba traída de un punto de referencia (generalmente infinito) a través de un campo eléctrico no cero causado por otras cargas a un punto específico en el espacio.

El potencial es un escalar y no tiene ninguna dirección, así, los potenciales de cargas múltiples se pueden combinar sin consideración alguna. El potencial en un punto dado debido a un número de cargas puntuales, es justo la suma de los potenciales de las cargas.

Si se quiere encontrar un método conveniente que relacione \mathbf{E} con el potencial, se puede comenzar con la Ecc. $d\phi = -E \cdot dl$. Si ds es la magnitud de los desplazamientos dl y α es el ángulo entre la dirección \mathbf{E} y la dirección del dl , la Ecc. Puede ser escrita como

$$d\phi = -E \cos(\alpha) ds \dots\dots\dots \text{Ecc. 1.6}$$

Como se puede observar el potencial cambia bastante cuando el desplazamiento es paralelo a \mathbf{E} . El campo eléctrico es dado por el índice del cambio máximo en el potencial, y su dirección es opuesta a la dirección del índice del cambio máximo. Puesto que es el gradiente de potencial (generalmente llamado el gradiente de potencial) proporciona la dirección y la magnitud del índice de cambio máximo en ϕ , esta declaración equivale a decir que el campo eléctrico es el negativo del gradiente de potencial:

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \dots\dots\dots \text{Ecc. 1.7}$$

Esta expresión del campo eléctrico en los términos de potencial es una relación básica y muy importante al estudiar las descargas atmosféricas. De esta relación se sigue que la línea del campo eléctrico que pasa a través de cualquier punto es siempre perpendicular a la superficie equipotencial que pasa a través del mismo punto. Al observar el principio de superposición, éste se aplica al potencial. De la definición de V y de la característica de que $\mathbf{E} = 0$ a través del interior de un conductor, se sigue que el potencial en cada punto de la superficie de un conductor debe ser igual. Es decir, la superficie de un conductor es una superficie equipotencial.

Se le denomina dipolo a un par de cargas de polaridad opuesta separadas por una distancia d y encerradas en el espacio. Un momento dipolar eléctrico puede considerarse como un vector \mathbf{p} cuya magnitud p , para el dipolo descrito arriba, es igual al producto de la magnitud de cualesquiera de las cargas q y de la distancia entre ellas. La dirección del dipolo va de la carga negativa a la positiva.

1.4 Fuerza de interrupción y conducción en gases

Pocos aspectos de conducción eléctrica son únicos en los gases. En la atmósfera, iones y electrones son producidos principalmente por los rayos cósmicos y naturalmente se desintegran radiactivamente. Si un campo eléctrico es aplicado al aire entre dos electrodos, una corriente fluye y tenderá a separar iones y electrones por polaridad. Si \mathbf{E} se incrementa continuamente, la corriente se incrementará también hasta que los transportadores son removidos tan rápidamente como se producen.

Más incremento de **E** casi ya no produciría más incremento en la corriente hasta que otro efecto aparezca. Si el **E** viene suficientemente grande, los electrones se acelerarían a velocidades suficientes para chocar con otros electrones de átomos neutrales o moléculas, aumentando el número de cargas portadoras en la atmósfera. A este proceso se le denomina avalancha de electrones. El resultado es un fenómeno denominado corona. Además incrementado **E** significativamente se incrementa la corriente entre los dos electrodos, pero no de una manera catastrófica. Incrementado más el **E** resultan grandes densidades de corriente que calientan los alrededores de los electrodos a tal punto que ocurren emisiones térmicas de electrones. La densidad de corriente aumenta catastrófica y se produce un arco eléctrico. Para la atmósfera al nivel del mar bajo condiciones normales, el rompimiento ocurre cerca de $3 \times 10^6 \text{ V m}^{-1}$. El campo eléctrico en el que ocurre el rompimiento disminuye linealmente con la presión atmosférica.

El proceso descrito es similar al proceso de las descargas eléctricas. Otra forma que es importante en las tormentas eléctricas es la corona en el aire cerca de puntos conductores en tierra, como árboles y matorrales. Este proceso es llamado algunas veces como punto de descarga.

1.5 Dieléctricos y cargas inducidas

Cuando un campo eléctrico es creado en una región conteniendo un conductor aislado de otros conductores o cuando es movido adentro de una región donde un **E** existe, las cargas eléctricas son movidas a la nueva localización en la superficie del conductor. Un clásico experimento de la electrostática fue hallar una ley para la inducción, realizado por Michael Faraday.

El principio que el demostró es usado en modernos dispositivos de medición de cargas en partículas de precipitación. Bajo un objeto cargado suspendido de un hilo dentro de una cubeta de hielo conductora. Conectó un electroscopio afuera de la cubeta conductora para determinar la presencia y relativa cantidad de carga. Un electroscopio es hecho de tubo de ensayo, un tapón aislante y una barra conductora. La parte de arriba de la varilla tiene una esfera conductora dentro del tubo, la varilla tiene dos hojas de oro. Cuando una carga es puesta, las hojas de oro se cargan idénticamente y se rechazan entre sí. Si se quita la carga, las hojas cuelgan. Cuando Faraday bajó el objeto cargado en el cubo, las hojas en el electroscopio se divergieron y cuando el objeto cargado fue quitado, las hojas se cayeron. La divergencia máxima ocurrió cuando el objeto estaba en el envase con una cubierta de metal. El análisis de este experimento es básico en la electrostática.

Existe una clase de materiales que no son buenos conductores de electricidad. Estos se denominan dieléctricos. Una propiedad de estos materiales es su capacidad de almacenar energía cuando son puestos en un campo eléctrico. Esta capacidad es indicada por la permitividad de un dieléctrico, ya que la permitividad de todos los materiales es mayor que la permitividad del vacío.

La unidad de la permitividad es el *coulomb* cuadrado por newton-metro cuadrado ($C^2n^{-1}m^{-2}$), es conveniente escribir la permitividad de un material en términos de la permitividad del vacío. El comportamiento de los dieléctricos puede ser realmente complicado. Por ejemplo, cambios mecánicos y eléctricos pueden ocurrir en dieléctricos sólidos en presencia de un **E**.

1.6 Fundamentos de la propagación de las ondas viajeras

Las relaciones de corriente y voltaje en cualquier punto de una línea de transmisión se expresan con las siguientes relaciones:

$$\frac{dV}{dx} = ZI \text{Ecc. 1.8}$$

$$\frac{dI}{dx} = YV \text{Ecc. 1.9}$$

Estas ecuaciones son simples, pero debe tomarse en cuenta ciertas restricciones. La solución de éstas se da en función de la distancia de la línea siendo ésta la siguiente:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{dI}{dx} \text{Ecc. 1.10}$$

Y sustituyendo 1.9 en 1.10

$$\frac{d^2V}{dx^2} = ZYV \text{Ecc. 1.11}$$

Siendo la solución a la ecuación diferencial anterior

$$V = V_1 \exp \sqrt{ZYX} + V_2 \exp -\sqrt{ZYX} \text{ Ecc. 1.12}$$

Teniendo para la corriente una solución similar,

$$I = I_1 \exp \sqrt{ZYX} + I_2 \exp \sqrt{ZYX} \text{ Ecc. 1.13}$$

La cual nos describe la distribución de corriente a lo largo de la línea en cualquier punto.

Considerando el significado de $V = V_1 \exp \sqrt{ZY} X$ vemos que nos representa el voltaje de un punto localizado a una distancia "X" de la carga que está al final de la línea; por ejemplo en $X = 0 \exp \sqrt{ZY} X = 1$ y V se reduce al valor de V_1 . V , entonces representa diferentes valores de voltaje en diferentes puntos a lo largo de la línea diferenciándose de sus valores angulares y de fase.

Tomando el final de la línea como el receptor, el voltaje en ese momento es:

$$V_R = V_1 + V_2 \dots \dots \dots \text{Ecc. 1.14}$$

y para la corriente

$$I_R = I_1 + I_2 \dots \dots \dots \text{Ecc. 1.15}$$

Las ecuaciones (1.14) y (1.15) describen los voltajes y las corrientes de una línea en términos de sus componentes. Desarrollando las ecuaciones hasta aquí descritas, se encuentra que:

$$V_1 = \sqrt{Z/Y} I_1 \quad \text{e} \quad V_2 = -\sqrt{Z/Y} I_2 \dots \dots \text{Ecc. 1.16}$$

Donde $\sqrt{Z/Y}$ es la llamada impedancia característica (Z_0).

Para el análisis de ondas viajeras se considera un generador de corriente alterna en el punto de envío de la línea; el voltaje es propagado hacia la carga como una onda viajera que pasa por todos los puntos de la línea y aparece como un voltaje alterno.

Si la onda produce un voltaje retrasado en un punto en un momento dado; un instante más tarde el voltaje en otro punto a cierta distancia del primero, aparece con un ángulo de fase relativamente retrasado. La onda viajando a una velocidad constante, tiene un vector que representa el voltaje en cualquier posición y cuyo ángulo de retraso es proporcional a la distancia del punto del generador. De lo anterior se deduce que una onda viajera viene a ser más pequeña mientras mas viaja, esto debido a la pérdida de energía; teniendo entonces menor amplitud cerca de la carga, que del generador. Combinando estos cambios de amplitud con los de fase se tiene que cuando una onda viaja hacia la carga a lo largo de la línea, el voltaje disminuye y el ángulo de fase se retrasa.

La expresión $V = V_1 \exp. \sqrt{ZY} X$ se puede escribir en términos $V_1 e^{\alpha x} e^{j\beta x}$, que describe una onda viajera en forma matemática.

Entonces de la ecuación de voltaje indica que éste en una línea de transmisión puede ser descrito como la suma de dos ondas viajeras, una viajando hacia la carga y la otra desde la carga hacia el generador. La primera es llamada onda incidente y la segunda onda reflejada así las ecuaciones (1.16) se pueden escribir en términos Z_0 ;

$$V_1 = Z_0 I_1 \quad \text{y} \quad V_2 = -Z_0 I_2 \quad \dots\dots\dots \text{Ecc. 1.17}$$

Las ondas de línea son encontradas sumando los voltajes y las corrientes de las ondas viajeras que pasan por ese punto.

1.7 Coeficientes y factores de transmisión y reflexión

Cuando una onda viajera en una línea, llega a un punto de discontinuidad en el cual existe un cambio repentino de las constantes del circuito, tales como: abierto, corto circuito o una unión con otra línea, una parte de la onda incidente es reflejada y la otra transmitida a la siguiente sección.

Si la línea es terminada en cualquier impedancia que no sea la característica habrá una parte de la onda que será reflejada. El valor del voltaje de la onda incidente se ve afectado por el llamado factor o coeficiente de reflexión. Su determinación se logra de las ecuaciones (1.14) y (1.15). Y con la relación:

$$Z_R = V_R / I_R \dots\dots\dots \text{Ecc. 1.18}$$

Resolviendo estas tres ecuaciones se obtiene que el factor de reflexión sea:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} = \rho \dots\dots \text{Ecc. 1.19}$$

La parte de la onda que continúa su recorrido hacia delante después de pasar la discontinuidad se llama onda transmitida, y es la relación entre el voltaje V_1 y el que llega al punto de recibo.

$$\frac{V_R}{V_1} = \alpha = \frac{2 Z_R}{Z_R + Z_0}$$

Que es el llamado factor de transmisión.

1.8 Sobretensiones

Algunas veces aparecen entre conductores o entre estos y tierra, diferencias de potencial sensiblemente mayores a los de operación normal; a esto se le llama sobretensiones. Todo equipo eléctrico debe estar protegido contra sobretensiones, porque cuando éstas aumentan más de lo que los aislamientos pueden soportar se producen daños muy severos que inciden directamente en el costo del equipo.

Las sobretensiones pueden ser de origen interno o externo al sistema en el cual está localizada la subestación. Son de origen externo las producidas por descargas atmosféricas y éstas pueden a su vez subdividirse en directas e indirectas.

Las llamadas internas se originan por operaciones de cierre-apertura de interruptores; que provocan impulsos pico que son proporcionales al voltaje de operación. Para el diseño del aislamiento debe tenerse en cuenta las sobretensiones que el equipo va a estar sometido, pero esencialmente las debidas a descargas atmosféricas, ya que arriba de ciertos valores de voltaje de operación, serán éstas las que rijan el nivel de aislamiento a utilizar.

1.8.1 Sobretensiones internas temporales de duración prolongada

Estas perturbaciones generalmente se presentan en forma de oscilaciones de frecuencia próxima a la de operación y están moderadamente amortiguadas. El valor de las sobretensiones temporales asociadas no suele superar 1.5 veces la tensión de servicio.

Pueden originarse por fallas a tierra, instalaciones de horno de arco, desconexión de cargas importantes o de líneas muy capacitivas en vacío que provoquen la autoexcitación de un generador, resonancias o ferróresonancias en circuitos no lineales. Al respecto, el concepto ferróresonancia es el fenómeno que implica un cambio de signo del ángulo de desfase entre las armónicas fundamentales de tensión y de la corriente, que se producen al variar la tensión o la corriente de la fuente de alimentación en presencia de elementos no lineales.

Así mismo, los hornos de arco tienen una forma de trabajo que da lugar a importantes perturbaciones en las líneas que están conectadas a una subestación. Ya que el arco eléctrico que se forma en los electrodos y el baño es muy inestable, dando lugar a fuertes variaciones en la corriente de línea, que originan fluctuaciones de potencia reactiva en las líneas y consecuentemente habrá variaciones de tensión.

Si la subestación alimenta a una carga alineal, surgirán corrientes armónicas de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema. La presencia de corrientes armónicas junto con las posibilidades de resonancia de las líneas, puede originar valores apreciable de tensiones armónicas superpuestas a la tensión fundamental, resultando una tensión en barras totalmente distorsionada.

1.8.2 Sobretensiones internas de maniobra

Perturbaciones que son de breve duración y están fuertemente amortiguadas. Principalmente se originan por la acción de maniobra de interruptores y pueden simularse, con respecto a los efectos que producen en los aislamientos, con impulsos de maniobra normalizados.

Las maniobras de conexión, desconexión y reenganche de líneas en vacío, el corte de pequeñas corrientes inductivas o de magnetización de transformadores en vacío, la eliminación de fallas y el corte de corrientes capacitivas en los bancos de condensadores, la apertura de los interruptores en vacío (que por no tener arco no cortan a corriente nula, provocando sobretensiones en las inductancias), la no simultaneidad en la extinción de los arcos de los distintos polos de un interruptor, son casos típicos que pueden producir sobretensiones de maniobra.

Al respecto, cabe comentar que todo proceso de conmutación, ya sea con conexión o desconexión, trae aparejado un complejo proceso energético transitorio, en el que intervienen los arcos voltaicos que aparecen en los contactos y las inductancias y capacitancias del circuito involucrado. La forma y el valor máximo de las sobretensiones dependen de un considerable número de factores, alguno de ellos de carácter aleatorio.

Esta enorme variedad de casos posibles origina asimismo una gran variedad de formas de onda y valores de cresta posibles, que han dificultado utilizar la forma de las sobretensiones como un factor a tener en cuenta en la coordinación de aislamiento, limitándose sólo a considerar los valores de cresta como factores determinantes de la capacidad de un aislamiento para soportar una sobretensión dada.

El valor relativo de las sobretensiones de maniobra con respecto a las sobretensiones atmosféricas producida por los rayos crece a medida que la tensión de servicio de las líneas es mayor.

1.8.3 Sobretensiones externas o descargas atmosféricas

Estas sobretensiones son de una duración aún mas pequeña que las de maniobra y muy fuertemente amortiguadas. Se producen generalmente por la acción directa de un rayo sobre líneas y equipos en subestaciones.

El carácter aleatorio de ciertos parámetros, como la intensidad del rayo, el punto de caída, y otros; determinan que dichas sobretensiones no puedan definirse mediante un valor concreto para una instalación dada, sino como una distribución de probabilidad de alcanzar una serie de valores.

Las distintas normas establecen ondas de choque típicas para simular la acción de la caída de rayos sobre las líneas de transmisión de la energía eléctrica.

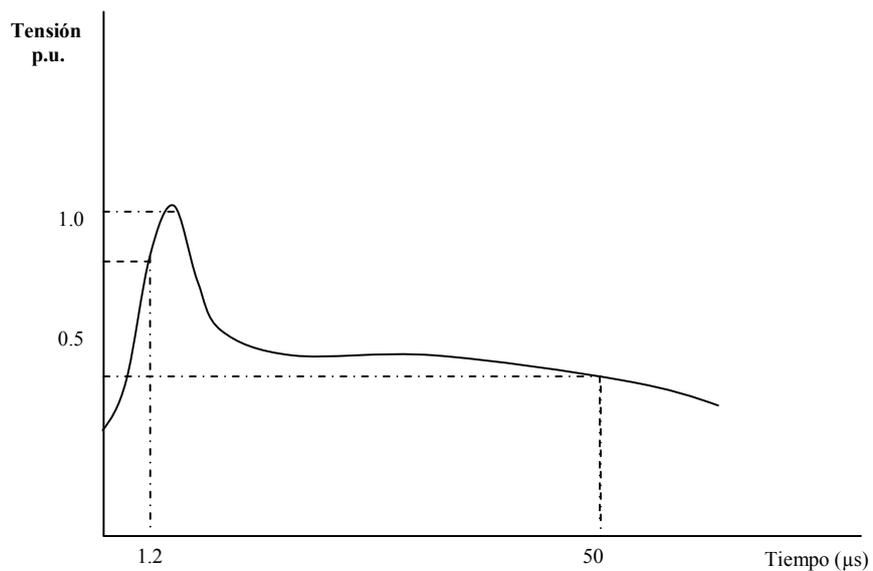
Así, la norma IRAM correspondiente prescribe una onda de corriente en la que el tiempo de crecimiento es de 8 microsegundos, mientras que el lapso hasta que se reduce al 50% del valor máximo dura 20 microsegundos (onda 8/20). En otros casos para ondas de tensión, se adopta los valores 1.2 y 50 μ seg., respectivamente.

1.9 Nivel básico de aislamiento al impulso

Es un nivel de referencia, expresado como un impulso de voltaje (valor pico) con una onda normalizada no mayor de 1.2 x 50 microsegundos aplicado en el momento de prueba. La característica de estas ondas es muy similar a las que se desarrollan durante una descarga atmosférica.

Estos voltajes de prueba se aplican a los aislamientos varias veces durante cortos periodos de tiempo, tomándose nota de cuanto resiste el aislamiento sin que se produzca un chispazo o flameo. El BIL es generalmente expresado en valores por unidad (P.U.) del valor pico del voltaje normal de operación. En la expresión 1.2x 50 microsegundos, el primer termino representa el tiempo en microsegundos que toma la onda en llegar a su valor de cresta y el segundo el tiempo que tarda en llegar al 50% de su valor cresta, llamado valor de cola.

Figura 2. **Forma de onda de una descarga atmosférica**



La prueba de aislamiento al impulso se realiza con una onda de voltaje que crece en 1.2 microsegundos y cae a la mitad de su valor pico en 50 microsegundos, esta onda es conocida como 1.2/50 μseg y es típica de una descarga atmosférica.

1.10 Tipos de aislamientos

Aislamiento externo. Comprende las superficies aislantes externas de los aparatos, el aire ambiente que los rodea y las distancias en aire. La rigidez dieléctrica del aislamiento externo depende de las condiciones atmosféricas, tales como la contaminación, la humedad etc.

Aislamiento interno. Comprende aislamiento internos sólidos, líquidos o gaseosos que forman parte del aislamiento de los equipos que están protegidos de los efectos atmosféricos, tales como contaminación, humedad y otras condiciones externas.

Aislamiento externo tipo interior. Es aquel tipo de aislamiento externo que está diseñado para operar dentro de los edificios y consecuentemente, no está expuesto a las condiciones ambientales.

Aislamiento externo tipo exterior. Todo aislamiento externo que está diseñado para operar fuera de los edificios y, consecuentemente, está expuesto a las condiciones ambientales.

Aislamiento auto recuperable. Es el aislamiento que recupera totalmente sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva causada por la aplicación de una tensión de prueba, un aislamiento de este tipo es por lo general, externo aunque no necesariamente sea un aislamiento externo.

Aislamiento no auto recuperable. Es aquel tipo de aislamiento que pierde sus propiedades aislantes o que no las recupera completamente después de una descarga disruptiva causada por la aplicación de una tensión de prueba.

1.11 Ruptura de aislamientos

La ruptura o perforación de un aislamiento se produce cuando se le somete a esfuerzos de tensión con valores mucho mayores que para los cuales fueron diseñados. Se debe tomar en cuenta que todos o casi todos los aislantes, la máxima tensión que soportan varía inversamente con la duración de dicha tensión. Por ejemplo, una descarga atmosférica produce una sobretensión de valores muy altos con respecto al valor de la tensión de operación, pero cuya duración es corta, tenemos entonces que conocer el comportamiento de los aislantes en estos casos.

Otro factor importante que no debe olvidarse, es la contaminación de los aislamientos debido al medio ambiente en que estén instalados, ya que esto reduce sensiblemente su capacidad para evitar su propia ruptura en caso necesario. A continuación se definen varios términos usados comúnmente.

1.12 Blindaje y coordinación de aislamiento

En una subestación la coordinación de los aislamientos debe ser pareja, esto quiere decir que resulta inútil hacer gastos en aislamientos adicionales, así como, protecciones contra sobretensiones, sólo para una parte de la subestación; dejando otros elementos sin ninguna de ellas o en menor escala. Con lo anterior queremos decir que los aislamientos están relacionados a las tensiones normales de operación así como a las sobretensiones producidas por alguna de las circunstancias descritas anteriormente, y que puedan afectar cualquier elemento expuesto a ellas.

En el caso de los pararrayos, éstos coordinan su tensión de operación con los niveles de aislamiento (normalizados) para los componentes de una subestación eléctrica, con el fin de proteger precisamente los aislamientos. Para una buena coordinación se debe escoger un pararrayos que opere a una tensión menor que aquella que produce una ruptura del aislamiento del elemento a proteger.

En las subestaciones tipo exterior y las áreas externas de equipo primario de las mismas, así como las líneas de transmisión, requiere de la protección contra los impactos directos de rayo y contra las ondas viajeras de sobretensión que llegan de otras partes del sistema, en donde ha habido descargas directas.

La protección contra los impactos directos del rayo se logra por medio de lo que se conoce como blindaje, de manera que los rayos impactan al blindaje que está conectado a la red de tierras de la instalación. Las líneas de transmisión tienen un blindaje a base de cables de guarda y las subestaciones eléctricas tipo exterior, tienen un blindaje a base de cables de guarda, bayonetas y sistemas de protección activos.

1.13 Dimensionamiento eléctrico de subestaciones

El equipo eléctrico de las subestaciones eléctricas está sujeto a condiciones anormales, como resultado de las descargas atmosféricas directas, las ondas de sobretensión que viajan a través de los conductores y las fallas en el sistema; estas condiciones anormales producen sobretensiones, que pueden dar como resultado flameos en el equipo o fallas de aislamientos.

Para prevenir daños en el equipo y salidas de servicio debidas a las sobretensiones, se deben dimensionar correctamente las subestaciones desde el punto de vista eléctrico.

1.13.1 Bases para el dimensionamiento eléctrico de subestaciones aisladas en aire

El dimensionamiento de las distancias entre partes vivas y de partes vivas a tierra, que se refiere a instalaciones de tipo convencional y modular, ya sea en interiores o intemperie, no se considera en las instalaciones de tipo blindado o aisladas en gas.

La separación entre aparatos de una instalación y la disposición física de los mismos, se efectúa a partir de un diagrama unifilar, seleccionando la capacidad de la instalación y su tensión nominal. Estos factores no sólo afectan el tamaño de las componentes, sino también las distancias a tierra y entre fases. La determinación de estas dimensiones se efectúa por medio del cálculo de las distancias eléctricas entre las partes vivas del equipo y, entre éstas y las estructuras, muros, rejas y el suelo. Estas son:

- a) Distancia entre fases: es el dimensionamiento entre partes vivas de fases diferentes.
- b) Distancia a tierra: es el dimensionamiento entre partes vivas (energizadas) y estructuras a tierra, muros, rejas y tierra.
- c) Distancias de aislamiento: entre las terminales de un aislador, o también entre conexiones a las terminales de un interruptor.

d) Distancias entre secciones: entre partes vivas y los límites de las zonas de mantenimiento (zonas de trabajo). Los límites de las zonas de mantenimiento pueden ser tierra o una plataforma sobre la cual trabajen los operarios. Si se considera que una subestación eléctrica los hombres deban caminar libremente bajo las zonas con equipo energizado, es necesario dar una distancia adecuada entre el punto más bajo sobre cada aislador (donde se conectan a tierra las partes metálicas) y tierra, para asegurar que una persona no sufrirá los efectos del campo eléctrico. Esta distancia está basada en las denominadas distancias de seguridad.

1.13.2 Esfuerzos que afectan el aislamiento

Durante la operación de un equipo, se presentan diferentes esfuerzos dieléctricos. A continuación se menciona las clases de esfuerzos dieléctricos que afectan el aislamiento:

- Tensiones a la frecuencia del sistema bajo condiciones normales de operación, es decir, que no excedan de la tensión máxima de diseño del equipo.
- Sobretensiones temporales.
- Sobretensiones por maniobra.
- Sobretensiones por descargas atmosféricas.

Para un esfuerzo de tensión dado, el comportamiento de un aislamiento interno puede ser afectado por: su grado de vejez, por un aislamiento externo y por su grado de contaminación atmosférica.

1.14 Distancias eléctricas de no flameo en aire

a) Aislamiento de fase a tierra

Se refiere al aislamiento de una fase cualquiera con relación a los puntos conectados a tierra. Está caracterizado por una tensión relacionada con una distancia a tierra, que se verifica por medio de procedimientos convencionales y reproducibles en laboratorios, que se expresa en las normas como distancia de aislamiento en el aire, que es necesaria para definir los aspectos de seguridad.

b) Aislamiento de fase a fase

El aislamiento entre fases debe garantizar un comportamiento dieléctrico que relacione la tensión con la distancia en aire, sin considerar ningún elemento a tierra entre los conductores de fase.

En las subestaciones, la distancia de aislamiento entre fases resulta de las condiciones de la instalación y frecuentemente se refiere a los equipos, aunque no dependa de estos.

2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE DESCARGA Y MODELOS DE ANÁLISIS PARA LA PROTECCIÓN

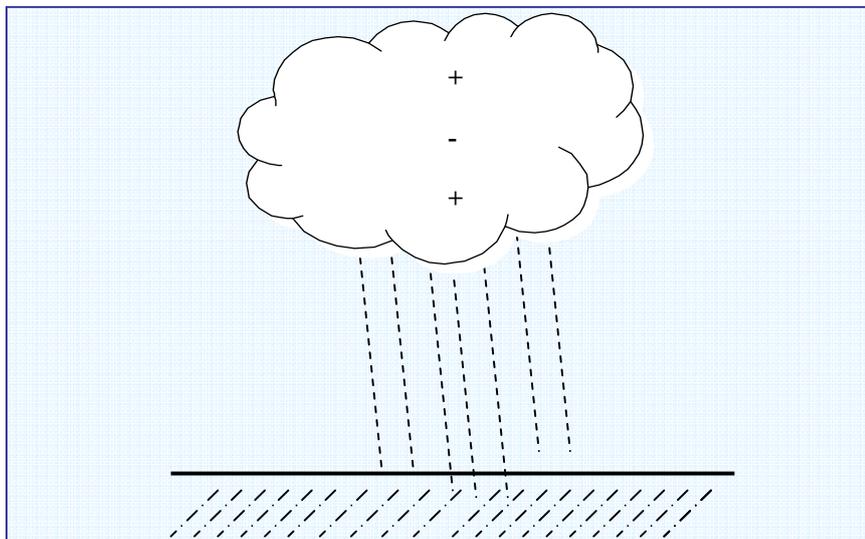
2.1 Estructura de la carga

En el siglo XVIII, Benjamín Franklin estableció qué cargas negativas estaban generalmente presentes en las tormentas eléctricas, aunque fueron observadas cargas positivas. Estas medidas fueron hechas bajo tormentas eléctricas, tendiendo a ser dominadas por la carga en la parte mas baja de las tormentas. C.T.R. Wilson, hizo mediciones en la tierra del campo eléctrico de tempestades de truenos y de los cambios del campo eléctrico del relámpago. De acuerdo con variaciones sistemáticas en la polaridad del campo, sugirió que las tempestades de truenos tienen típicamente carga positiva sobre carga negativa, una configuración llamada ahora dipolo positivo.

La distribución de la carga en las tempestades de truenos es bastante complicada. Las medidas hechas en la superficie, alejada de las cargas de las tempestades de truenos, confunden la evidencia. Como ejemplo de la confusión posible, considérese el caso en el cual hay una carga positiva pequeña debajo de la carga negativa en el dipolo positivo de una tormenta. Si hay bastante carga positiva más baja, el campo eléctrico en la superficie por debajo de la tormenta sería negativo o invertiría la polaridad dos veces con distancias del eje del dipolo. Simpson y Scrase (1937) y Simpson y Robinson (1941) valoraron los globos que llevaban los alti-electrógrafos, para registrar la corona causada por el componente vertical del campo eléctrico.

De acuerdo con estas medidas, concluyeron que las cargas principales en una tempestad de truenos formaron típicamente un dipolo positivo. Sin embargo, encontraron que dos cargas verticalmente separadas eran escasas para explicar los perfiles del campo eléctrico observado en muchas tormentas eléctricas. Una tercera carga, una carga positiva más pequeña, era necesaria debajo de la carga negativa en muchas tormentas. Las modernas medidas *in situ* de los perfiles de campo eléctrico y de la carga en partículas individuales de la precipitación, han confirmado que centros positivos más bajos de la carga ocurren en muchas tempestades de trueno. El modelo conceptual simple de la estructura de carga gruesa se demuestra en la siguiente figura.

Figura 3. **Nube con un dipolo positivo**



Este modelo conceptual, dipolo/tripolo, ha prevalecido hasta el presente.

Las siguientes son características típicas de la estructura de carga en las tormentas eléctricas:

- Una región de carga positiva es típicamente arriba de la carga negativa (probablemente 1 Km. menor de altura).
- Las medidas de **E** durante travesías horizontales a través de tormentas eléctricas indicaron a menudo que las diferentes polaridades de carga eran de lado a lado.
- La carga negativa generalmente domina en las regiones inferiores de las tormentas, de ordinario en rangos de temperaturas medio calidas, hasta 25°C y algunas veces hasta -10°C.
- La mayoría de carga de pequeños iones debajo de las tormentas eléctricas es producida por puntos de descarga; la corriente, inducida en la tierra a través de objetos puntiagudos, como matorrales y árboles, bajo la influencia de campos eléctricos de tormentas eléctricas.
- Las precipitaciones llevan a menudo predominante carga positiva debajo de la nube; la carga en las precipitaciones cerca de la tierra es afectada significativamente por iones producidos por puntos de descarga.

2.2 Corriente de descargas puntuales o efecto corona

Los términos puntos de descarga y corrientes de corona son usados alternativamente. Las corrientes de corona son creadas por el rompimiento del aire en los intensos campos eléctricos cerca de los conductores puntiagudos debajo de tormentas, como estructuras, árboles y matorrales. La densidad de corrientes de corona es típicamente en el orden de nanoamperes por metro cuadrado. Esto indica que, para una tormenta aislada, el flujo total de corriente es de unos pocos cientos de amperios. Según estudios en los años treinta demostraron que las corrientes de corona transfirieron más carga negativa que positiva a la tierra.

Si todos los parámetros, excepto el campo eléctrico, se mantienen constantes, las transiciones a más formas energéticas de corona son causadas por incrementos en el campo eléctrico. Naturalmente ocurre corona en la atmósfera y se puede dividir en dos grupos: (a) corona de la vegetación y el suelo, (b) descarga de corona de hidrometeoros en las nubes.

Corona, chispas y rayos pueden ocurrir cuando la magnitud de campo eléctrico es suficientemente grande para causar rompimiento del aire como aislante y se vuelve suficientemente ionizado para actuar como un buen conductor.

2.2.1 Iniciación de la corona

La naturaleza de la descarga de corona es básicamente igual si ocurre en puntos de metal, hidrometeoros o puntos naturales tales como árboles. En todos los casos, la corona se inicia cerca de los puntos cuando el campo eléctrico local es bastante fuerte, acelera los electrones libres a las energías cinéticas que ionizarán las moléculas antes de que los electrones choquen con una partícula o una molécula atmosférica. El campo de inicio (a veces llamado campo crítico), E_{ON} , de la corona es altamente variable. De las mediciones reportadas por Winn y Moore (1972) y los laboratorios Langmuir, se infieren valores de E_{ON} para lugares desarbolados en las montañas, de 4 KV m⁻¹.

2.3 Teorías de formación de las descargas atmosféricas

Para explicar este fenómeno se han desarrollado algunas teorías.

Las más útiles son las de precipitación y la convección y sus mejoras posteriores, de las cuales la más notable es la teoría de la temperatura de inversión de la carga.

La teoría de la precipitación se basa en la observación de que las gotas de agua grandes se aceleran hacia la tierra a causa de la gravedad, mientras las gotas más pequeñas (neblina) permanecen suspendidas en el aire o se elevan al ascender al aire más caliente. Las colisiones entre las gotas de agua grandes y las gotitas de neblina, así como posiblemente los cristales de hielo en las altitudes más frías, dan lugar a la transferencia de una carga neta negativa a las gotas de agua más grandes. Al moverse hacia altitudes menores (por gravedad) ocasionan una carga neta negativa en la parte más baja de la nube. La conservación de la carga requiere que la parte superior de la nube esté cargada positivamente, con lo que resulta una estructura dipolar en la nube.

La teoría de la convección, se basa en la transferencia de partículas ascendentes y descendentes que ocurren dentro de la nube. La teoría sugiere que las partículas cargadas son generadas por dos mecanismos: (A) los rayos cósmicos que inciden en las moléculas de aire las ionizan, para dar lugar a dos iones, uno cargado positivamente y el otro negativamente, (B) los campos de corriente de gran intensidad que se forman en torno a los objetos afilados que hay en la superficie de la tierra y que producen descargas de corona que dan lugar a iones con carga positiva. Los iones son transportados mayormente por el tiro ascendente de la nube. En cambio los iones negativos se adhieren a las gotas de agua en descenso. El resultado neto es una estructura dipolar en la nube de la tormenta.

Algunas mediciones y observaciones realizadas dieron paso a otra hipótesis más, que explica la naturaleza tripolar de la nube. Esta es la llamada hipótesis de la temperatura de inversión de la carga que establece que cuando chocan partículas de nieve granulosa con cristales de hielo, la carga transferida a una de estas partículas depende de la temperatura.

A temperaturas superiores a cierto valor, al cual se le llama temperatura de inversión de la carga, la carga transferida es positiva. La temperatura se cree que es de alrededor de -15°C .

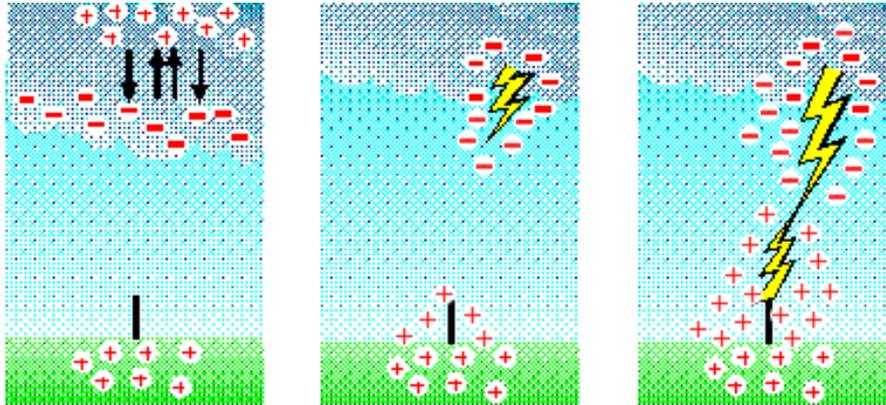
El hecho de que la temperatura de la atmósfera es -15°C a una altitud de aproximadamente de 6 km significa, que debido a las colisiones de las partículas de nieve granulada y los cristales de hielo, la nube de tormenta estará, en forma agregada, negativamente cargada para altitudes mayores de 6 km y positivamente cargada debajo de 6 km.

2.3.1 Mecanismos de descargas

Una nube tiene cargas positivas en la parte superior y negativas en la parte inferior, usualmente están separadas por varios kilómetros. Cuando se desarrolla una tormenta, las cargas positivas y negativas están separadas por una corriente de aire; cristales de hielo en la parte superior de la nube y lluvia en la parte inferior.

La masa del nubarrón está cargada negativamente, además tiene una capa de cargas positivas en la parte superior y otra muy pequeña en la parte inferior, con más o menos una distancia de 15 km entre ambas. En la figura 4 se muestra el mecanismo de la descarga en la nube.

Figura 4. **Esquemmatización del mecanismo de formación del rayo**



El primer indicio de una descarga atmosférica a tierra, es la señal luminosa llamada relámpago que es visible y que a veces es o se muestra como una rápida fluctuación de variable intensidad luminosa; cuando se produce una descarga y luego se tiene otras se ha comprobado que la segunda sigue el camino dejado por la primera con intervalos de 0.5 a 500 milisegundos.

Una descarga se inicia con el llamado “Líder”, que consiste en un pequeño núcleo o canal cuyas características son iguales a las de un arco de plasma. El líder principia en la región de la nube donde la concentración de cargas causa gradientes de potencial de valores críticos, y en regiones con agua el gradiente es aproximadamente de 10 KV cm^{-1} , o sea una tercera parte del valor en aire seco.

El líder es precedido y rodeado por una corona con un diámetro de cerca de 30 metros y que se extiende más o menos 45 metros en el frente.

Como dijéramos anteriormente el líder consta de un pequeño canal que se mueve rápidamente en pasos de 10 a 80 metros y pausas después de cada paso, teniendo una velocidad de propagación de $1/500$ a $1/2000$ de la velocidad de la luz. Del canal principal salen varios ramales que no llegan a tierra, mientras éste sigue un camino zigzagueante.

2.4 Características de corriente durante una descarga atmosférica

Oscilogramas de corriente de descargas atmosféricas indican que inicialmente poseen una parte de máxima corriente y se caracterizan por tener tiempos de frente de onda de hasta 10 microsegundos; el frente es usualmente cóncavo hacia arriba. A continuación, existe una cola de baja corriente la cual puede durar unos cientos de microsegundos y es la responsable del daño térmico en los equipos eléctricos.

Las corrientes de las descargas son medidas directamente en edificios altos o en torres que no son parte de un sistema de distribución o transmisión.

2.5 Determinación de la densidad de descargas atmosféricas

La frecuencia de ocurrencia de las descargas atmosféricas en un sitio determinado se conoce como el nivel ceraúnico, que se define como el número promedio de días al año en los cuales se escucha, al menos una vez en un periodo de 24 horas, una descarga eléctrica. Con el desarrollo del radar Doppler y las técnicas modernas, fue posible tener mejores elementos para definir el concepto del nivel ceraúnico sobre la base más precisa.

El número promedio de descargas por unidad de área en cualquier sitio o localidad, se conoce como densidad de rayos o descargas atmosféricas (DRT) y se supone que normalmente el valor del DRT es proporcional al nivel cerámico del área. La relación entre el nivel cerámico y la densidad de descargas a tierra se puede expresar como:

$$N = 0.04 T^{1.25} \quad \text{.....Ecc. 2.1}$$

Donde:

N = número de descargas a tierra por km^2 por año.

T = Nivel cerámico promedio anual.

Tratándose de subestaciones eléctricas, el área expuesta de la subestación a los rayos o descargas atmosféricas, se calcula como:

$$A_s = (W + 2R_A) (L + 2R_A) \quad \text{.....Ecc. 2.2}$$

Donde:

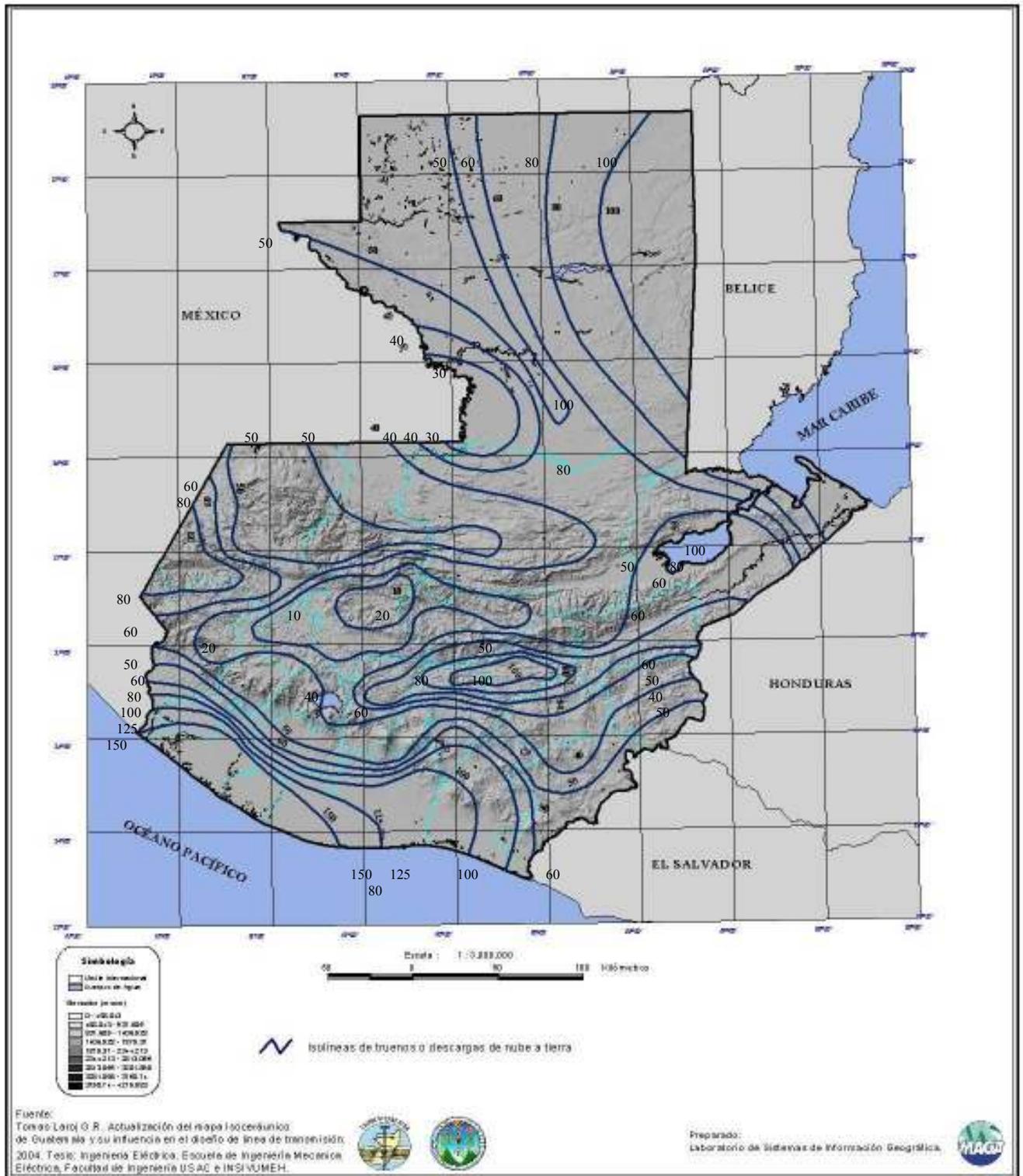
W = longitud del terreno de la subestación.

L = Ancho del terreno de la subestación

$$R_A = 16 h^{0.6}$$

En Guatemala en ciertas zonas el nivel cerámico es mayor que en otras. En la figura 5 se muestra los valores de los niveles cerámicos, que han sido monitoreados por el Insivume recientemente y copilados por el ingeniero Rafael Tomás en su tesis de grado de Ingeniería eléctrica.

Figura 5. Mapa isoceraúnico de la República de Guatemala



2.6 La descarga atmosférica como una onda viajera

En teoría simplificada la carga estacionaria en el descenso del canal del líder, momentos antes de hacer contacto puede ser considerado como la superposición de dos ondas de media magnitud viajando en sentido opuestos. Esto es lo mismo que el voltaje $V/2$ es conmutado en la impedancia característica Z_0 . Se tiene entonces las ecuaciones siguientes:

$$V_0 = V/2 + V' \dots\dots \text{Ecc. 2.3}$$

$$I_0 = I/2 + I' \dots\dots \text{Ecc. 2.4}$$

Donde V' , I' son referidos a las ondas reflejadas hacia arriba en el camino del líder.

y V_0 è I_0 son referidos a la impedancia Z_0 .

$I/2 = V/2Z$ donde Z es la impedancia al impulso del camino de la descarga atmosférica.

La ecuación (2.4) se puede escribir como:

$$\frac{V}{2Z} - \frac{V'}{Z} = \frac{V_0}{Z_0} \dots\dots \text{Ecc. 2.5}$$

y de (2.3) tenemos:

$$V_0 = (2Z_0 / Z + Z_0) \times (V/2) = \frac{Z_0 V}{Z + Z_0} \dots\dots \text{Ecc. 2.6}$$

$$I_0 = V_0 / Z_0 = \frac{V}{Z + Z_0} \dots\dots \text{Ecc. 2.7}$$

Para descargas con resistencia a tierra igual a cero el valor de I_{0max} es

$$I_{0max} = V / Z \text{Ecc. 2.8}$$

La inclusión de impedancia de impulso Z_0 en el camino de una descarga reduce el valor de I_{0max} en un factor de $Z / Z + Z_0$.

2.7 Principales efectos de las descargas atmosféricas en subestaciones

- a) Efectos debidos a las cebaduras: creación de diferencias de potenciales entre algunos elementos metálicos de la subestación.
- b) Efectos térmicos: puntos de fusión a nivel de los impactos para los materiales conductores y elevación de temperatura en los dispositivos que tengan mal contacto, para los materiales de gran resistividad.
- c) Efectos electrodinámicos: surgen fuerzas de repulsión y atracción en conductores y dieléctricos muy cercanos, tomados por la descarga.
- d) Efectos acústicos: el trueno se debe a una brusca elevación de presión (2 a 3 atmósferas) del canal de descarga contraído por las fuerzas electrodinámicas durante la duración de la descarga.
- e) Efectos de inducción: el acercamiento de un rayo y su descarga a través de los conductores crea un flujo magnético que genera tensiones inducidas elevadas en las líneas de transmisión y distribución, que están partiendo de la subestación.
- f) Efectos luminosos: deslumbramiento de proximidad que provoca durante algunos segundos pérdida de visión.

- g) Efectos indirectos: potenciales desfasados o tensiones de paso y contacto peligroso, en el área donde esté ubicada la subestación, así como el perímetro metálico que lo rodea.

2.8 Modelos y métodos utilizados para el análisis del blindaje y la coordinación de aislamiento de subestaciones

Son modelos o métodos matemáticos que se caracterizan por ofrecer alternativas para el análisis de los diferentes sistemas de protección contra impactos directos de rayo y en los cuales se puede estudiar los siguientes:

2.8.1 Modelo electrogeométrico

El modelo electrogeométrico que se desarrolló en los 60's y que ha tenido a lo largo del tiempo algunas variantes en su aspecto conceptual, publicándose en 1971 por el *Edison Electric Institute* de Estados Unidos.

De acuerdo con el modelo electrogeométrico, la distancia de impacto de un rayo (es decir, la distancia sobre la cual desciende el canal principal del rayo para tocar un objeto), es proporcional a la densidad de carga del canal principal de descarga; sin embargo, la corriente de retorno es proporcional a la densidad de carga precedente al canal principal.

El modelo electrogeométrico es un modelo matemático de aplicación a las descargas negativas descendentes basado en la propagación del trazador descendente, representado por una línea de carga, que desciende en línea recta desde la nube al suelo, y en el valor del campo eléctrico inducido en las estructuras situadas en la superficie del terreno, que al alcanzar el valor de cebado produce la descarga positiva, para finalmente producirse la unión de los dos, salvando una distancia tanto mayor cuanto mayor sea la carga del trazador negativa.

En el modelo electrogeométrico, el punto de impacto de la descarga viene determinado por el objeto sobre el suelo que primero se encuentra a la distancia "D" del trazador descendente. La distancia D que determina el punto de encuentro de los trazadores descendente y ascendente se denomina "distancia de cebado".

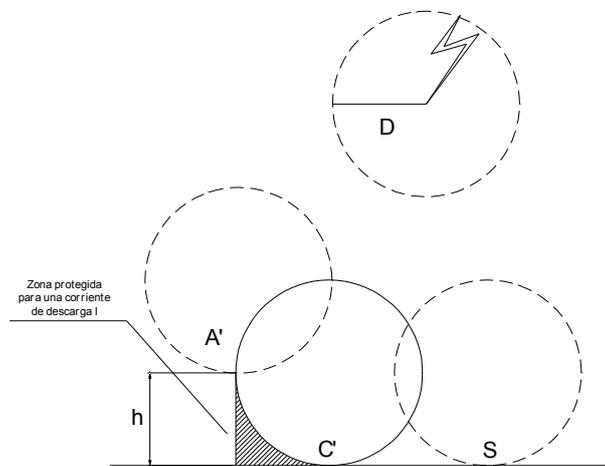
Esto es equivalente a que en el extremo del trazador descendente esté rodeado de una esfera ficticia, de radio igual a la distancia de cebado, centrada sobre el extremo, y como si esta esfera acompañase rígidamente al extremo del trazador descendente.

En el caso particular de un pararrayos de altura "h" con respecto a la superficie de referencia, existen tres posibilidades:

- Si la esfera entra en contacto únicamente con la punta vertical (A') ésta constituirá el punto de impacto de la descarga.
- Si la esfera entra en contacto con la superficie de referencia sin tocar la punta, el rayo tocará únicamente el suelo en S.

- Si la esfera entra en contacto con un punto entre el pararrayos y la superficie de referencia simultáneamente, hay dos puntos posibles de impacto A' y C', pero nunca se producirá el impacto en la zona de protección efectiva (zona sombreada de la figura 6).

Figura 6. Esquema de la zona protegida con el modelo electrogeométrico



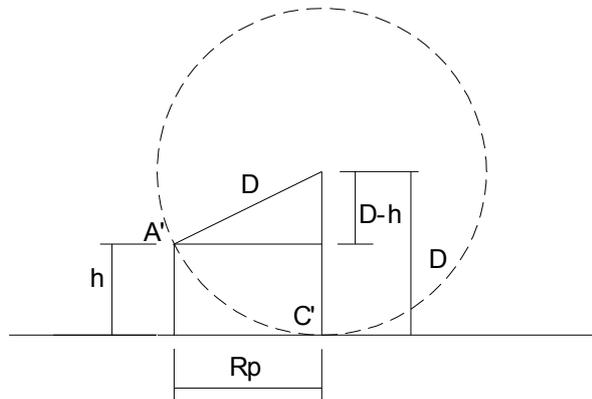
En el modelo electrogeométrico, para un pararrayos de tipo pasivo (punta Franklin), la distancia de cebado D viene dada por la expresión:

$$D(m) = 8 \times i^{2/3} \dots \text{Ecc. 2.9}$$

Siendo I el valor de la intensidad de la descarga (pico de la corriente del primer arco de retorno en kA).

A partir de esa expresión y según la figura adjunta, el radio de protección efectivo del pararrayos R_p se obtiene de la expresión:

Figura 7. Diagrama representativo del radio de protección



$$R_p = \sqrt{D^2 - (D - h)^2} - \sqrt{D^2 - (D - h_e)^2} \dots\dots\dots \text{Ecc. 2.10}$$

El método de análisis anteriormente descrito recibe el nombre de *método de la esfera rodante*.

Para ello, se hace rodar una esfera de radio correspondiente a la distancia de cebado que se pretende estudiar, las descargas incidirán en aquellos puntos en que la esfera toca a la estructura a proteger o quedan exteriores y a más altura del volumen de la esfera de radio D.

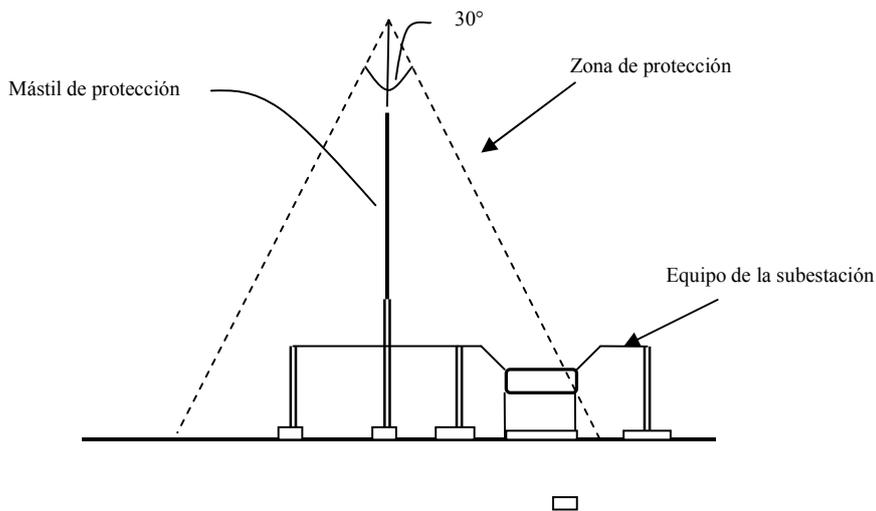
La aplicación del método a una estructura compuesta y dotada de un pararrayos, permite observar las zonas susceptibles de ser impactadas y las zonas protegidas, así como establecer las puntas captadoras que pueden disponerse para una protección completa, teniendo en cuenta que cuanto menor sea la intensidad de la descarga, menor será el radio de la esfera, y por tanto, mayor será el tamaño de la zona susceptible de ser impactada.

2.8.2 El método de los ángulos fijos

Por este método se puede calcular el blindaje, con bayonetas o con cables (hilos) de guarda, y es una práctica estándar en la industria proporcionar una forma de protección contra descargas directas, ya sea por medio de bayonetas o por medio de cables de guarda; en cualquier caso, están eléctricamente conectadas a la malla o red de tierras de la subestación. Las bayonetas pueden estar en postes auto soportados, o bien, en las terminales (parte superior) de las estructuras de la subestación.

Los métodos más comunes de análisis del blindaje suponen que las bayonetas y los cables de guarda proyectan una zona de protección al equipo que se encuentran debajo de ellos, en la forma de un cono. Benjamín Franklin estableció que un ángulo para el cono debería ser de aproximadamente 60 grados. El valor de este ángulo ha ido decreciendo a través de los años, hasta llegar a un valor aceptado de 30 grados. Un ejemplo de una zona típica de protección usando el método del cono se muestra en la siguiente figura. Este método, denominado cono de protección, sugiere que para proporcionar una protección completa a un área externa, se debe colocar un mástil o bayoneta cerca del centro del área por proteger a una altura suficiente, como para proporcionar la protección deseada.

Figura 8. **Cono típico de protección de 30° por medio de mástil y bayoneta sencilla**



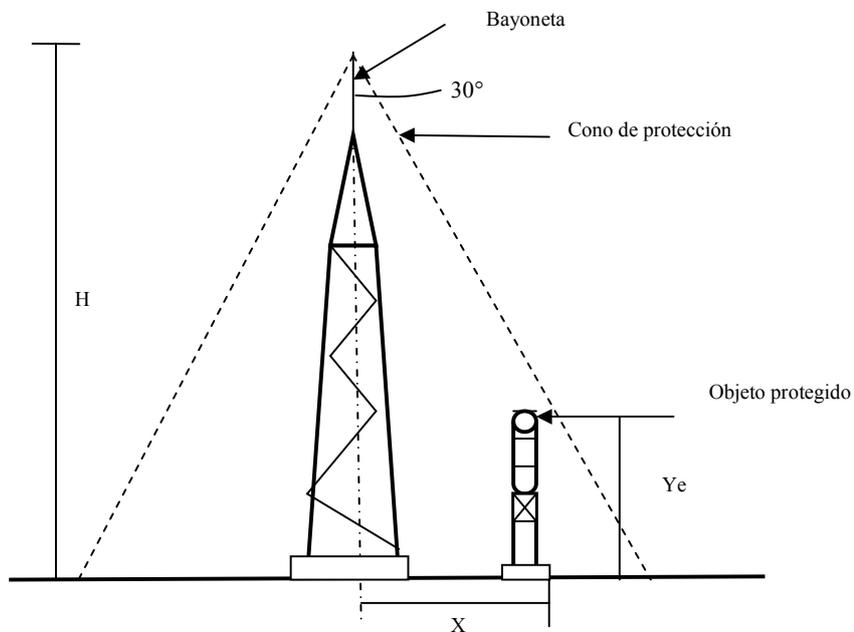
Este método tiene algunas objeciones, por tratarse de un cálculo determinístico que no toma en consideración la naturaleza aleatoria de las descargas atmosféricas, esto hace que en ocasiones falle el no tomar en cuenta que la corriente del rayo varía en magnitud, pero también en ángulo de incidencia, y que el nivel básico de aislamiento pueda fallar para una cierta descarga.

2.8.2.1 Cálculo del blindaje con bayonetas por el método de los ángulos fijos

Las bayonetas con electrodos de acero, cuya función principal es la concentración de electrones de predescarga, para su descarga a tierra a través de las puestas a tierra de la subestación, deben estar terminadas en puntas y se deben instalar en los puntos más altos de las estructuras de las subestaciones.

La zona de protección que brinda una bayoneta se calcula a partir de la altura máxima obtenida entre estructuras y bayoneta, y considerando que el ángulo de protección medido con relación al eje de la bayoneta no debe exceder, en ningún caso, de acuerdo a lo indicado antes, a 30° para una bayoneta aislada como se muestra en la siguiente figura.

Figura 9. Descripción de una zona de protección para cierto equipo



Para encontrar la distancia horizontal de protección con la punta de Franklin sobre un mástil se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$Y = H - Y_e \text{Ecc. 2.11}$$

$$X = Y \text{ Tan } 30^\circ \text{Ecc. 2.12}$$

Donde:

Y = altura efectiva sobre el plano de protección

Y_e = Altura del equipo a proteger

H = Altura del mástil más el tamaño de la punta de Franklin

X = Distancia horizontal de protección

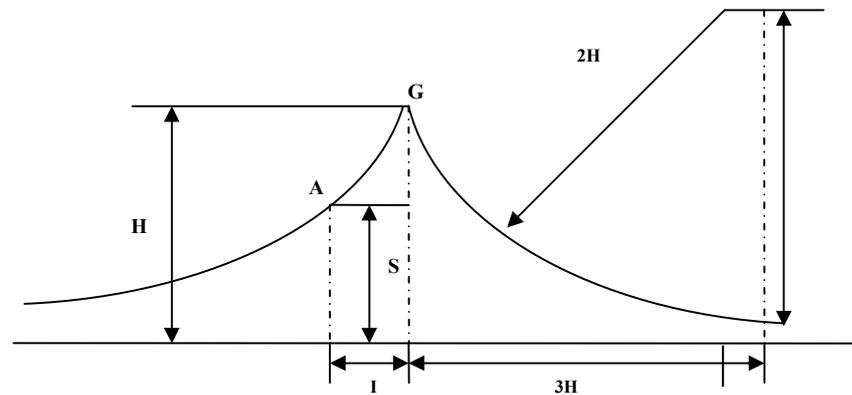
Cuando la distancia entre estructuras y la altura de las mismas es tal, que las zonas de protección obtenidas por las bayonetas se cortan sobre el plano de los objetos por proteger, entonces los ángulos de protección permisibles pueden llegar a ser de 45° . Siempre se deberá hacer un cálculo de verificación, ya que este concepto no es probalístico y sólo da una idea al margen de protección que proporciona.

2.8.2.2 Cálculo del blindaje por cables de guarda usando el método de ángulos fijos

Partiendo del concepto de que las subestaciones eléctricas de tipo exterior (intemperie) se deben proteger contra descargas atmosféricas en forma semejante a las líneas de transmisión, es necesario instalar hilos de guarda, cuando el tipo de proyecto así lo requiera.

La zona externa por proteger que debe de incluir a todo el equipo, y en particular el transformador, se puede calcular de acuerdo a las siguientes consideraciones, a partir de la figura que muestra los principales elementos que intervienen en el cálculo.

Figura 10. Zona de protección utilizando un hilo de guarda



La máxima altura protegida es función del objeto por proteger y la distancia de la torre depende del hilo de guarda, así se puede encontrar el valor de esta altura con base en la siguiente ecuación.

$$H = 1/3 (2s + 3i) + 1/3 (S^2 + 4 \sqrt{3} Is)^{1/2} \dots\dots \text{Ecc. 2.13}$$

En donde:

H = Altura del hilo de guarda sobre el nivel del suelo

M = Centro de la descarga

S = Altura del objeto protegido

G = Hilo de guarda

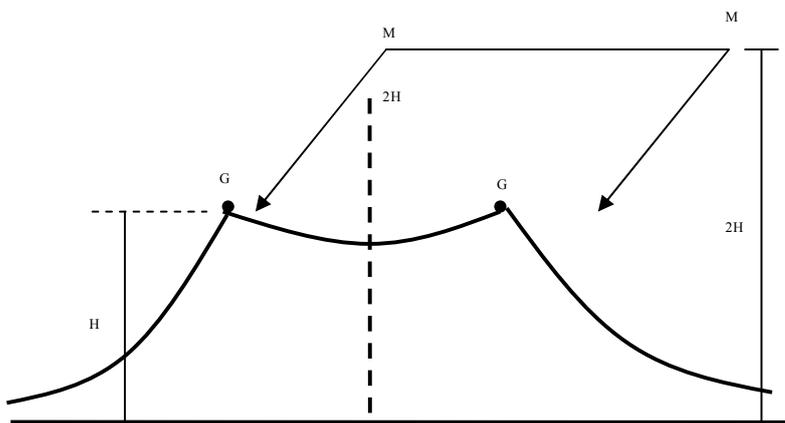
I = Distancia del objeto a la posición del hilo de guarda

En caso que se requiera el uso de dos hilos de guarda la fórmula a utilizar para este análisis es:

$$H = \frac{2}{3} S + \left[\frac{1}{9} S^2 + \frac{1}{3} (l/2)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots \text{Ecc. 2.14}$$

Y el esquema de protección toma la forma siguiente:

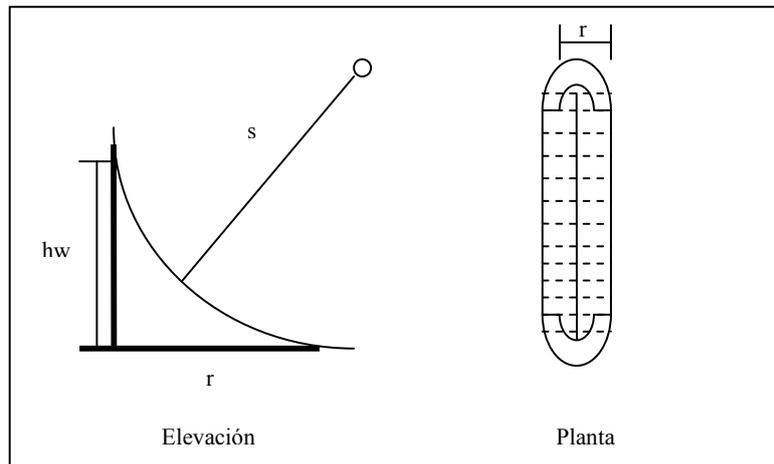
Figura 11. **Zona de protección utilizando dos hilos de guarda**



2.8.1.2 Método electrogeométrico utilizando hilo de guarda

La aplicación de este método con el sistema del hilo de guarda es el mismo que el que se emplea con las puntas franklin, la zona de protección desarrollada por el cable de guarda se muestra en la siguiente figura.

Figura 12. **Esquema de protección del hilo de guarda**



2.8.3 Método semi-probalístico o convencional para el análisis en la coordinación de aislamiento

En forma semejante a las líneas de transmisión, para la coordinación de aislamiento en subestaciones eléctricas se utiliza este método, ya que es un método de análisis que no requiere información estadística experimental, éste se basa en cuatro puntos principales:

- A. los niveles básicos de aislamiento por rayo (NBI), y por maniobra de interruptores (NBS).
- B. Para niveles de extra alta tensión (más de 400 KV) en aislamientos auto recuperables, se determinan los niveles básicos de aislamiento por maniobra selección de las características de los pararrayos. Esta selección deberá basarse en las condiciones de las sobretensiones máximas esperadas, de manera que el pararrayos empleado debe de ser capaz de soportar estas condiciones con un riesgo de falla mínimo.

- C. Debe seleccionarse una tensión mayor del pararrayos que la del (NBS) de los interruptores, suponiendo que no hay acción de los pararrayos. En estos niveles de tensión en el sistema, existe la posibilidad de que se permitan valores inferiores de NBS, dado que las características de protección del pararrayos para ondas de *switcheo*, pueden ser mayores que las ondas producidas por las maniobras de interruptores.
- D. Se debe hacer un análisis de la distribución del equipo en la subestación y las distancias, con objeto de determinar el número y localización de los pararrayos, así como posibles variaciones en el NBI y NBS.

Para una determinación inicial de los NBI y NBS en la selección de equipo, en este método se puede emplear las siguientes expresiones:

- Aislamientos no auto recuperables (aislamientos internos) no afectados por condiciones ambientales.

a) Ondas por maniobra de interruptores

$$NBS = 1.15 \times (T_a) \quad \dots\dots\text{Ecc. 2.15}$$

Donde T_a = (Tensión de arqueo del pararrayos por impulso de maniobra)

b) Por rayo

$$NBI = 1.2 \times (T_r) \quad \dots\dots\text{Ecc. 2.16}$$

Donde T_r = (Tensión residual de pararrayos para una onda de impulso de 1.2/50 μ seg.)

O también:

NBI = 1.043 x (Tensión de arqueo por frente de onda del pararrayos)

El valor de 1.15 en el cálculo del NBS y de 1.2 en el cálculo del NBI se denomina “relaciones de protección” y representan los márgenes de protección.

En sistemas de extra alta tensión, el comité de transformadores de IEEE recomienda que la relación de protección anterior para el frente de onda se reduzca a 1.10 por unidad en lugar de 1.15.

- Aislamientos auto recuperables (externos)

En este caso, las relaciones anteriores cambian como sigue:

- a) Por maniobra de interruptores

$$NBS = \frac{1.15}{(0.96 \partial_r)^n} \times (T_a) \dots\dots\text{Ecc. 2.17}$$

Donde $n = 1.08 - 0.035 d$, y “d” es la distancia de no arqueo entre conductor y estructura en pies. Estas expresiones ya consideran el NBS corregido por humedad.

- b) Por impulso de rayo

$$NBI = \frac{1.2}{(0.96 \partial_r)} \times (T_r) \dots\dots\text{Ecc. 2.18}$$

Donde $T_r =$ (Tensión residual de pararrayos para una onda de impulso de 1.2/50 μ seg.)

La tensión de descarga de los pararrayos es una función de la corriente de descarga, la cual a su vez es una función de la impedancia característica de la línea Z_o , la tensión crítica de flameo de polaridad negativa, la corriente para el pararrayos se puede calcular en forma conservativa como:

$$I_d = \frac{2 (NBI) - V_r}{Z_o} \dots\dots\text{Ecc. 2.19}$$

Aunque desde el punto de vista de los fabricantes también se puede calcular en forma más severa como:

$$I_d = \frac{2 (V_{cf} - V_r)}{Z_o + R_A} \dots\dots\text{Ecc. 2.20}$$

Donde:

V_{cf} = Tensión crítica de flameo para la línea en KV

V_r = Tensión residual del pararrayos en KV

R_a = Resistencia del pararrayos

Z_o = Impedancia característica de la línea en ohms.

Algunos valores de I_d en función de las tensiones máximas del sistema se dan en la tabla I.

Tabla I. **Valores de corrientes de pararrayos**

Tensión nominal (KV)	Tensión máxima (KV)	I_d KA	Valores de fabrica
69	72.5	5	5
115	121	5	5
230	245	5	5 (10,20)
345	362	7	10 (20 KA)
400	420	10	10 (20 KA)

3 DISPOSITIVOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS Y SOBRETENSIONES POR MANIOBRA

3.1 Sistemas de protección

Para conseguir la protección de cualquier tipo de estructura o instalación puede recurrirse a uno de los dos sistemas siguientes, o a una combinación de ambos:

- **Sistema externo**, que comprende los dispositivos captadores, derivadores o bajadas y tomas de tierra. Estarían comprendidos en este grupo todos los dispositivos denominados “pasivos”: varillas o puntas captadoras, conductores tendidos y mallas de conductores. Son denominados dispositivos pasivos porque no disponen de ningún tipo de ionización propia, limitándose a recoger las descargas atmosféricas con una trayectoria ya formada.
- **Sistema interno**, que comprende los dispositivos que reducen los efectos electromagnéticos de la corriente de la descarga atmosférica dentro del espacio a proteger. Entran dentro de este sistema todos los componentes denominados “activos” que son todos aquellos que disponen de una ionización propia o aprovechada del entorno eléctrico atmosférico, canalizando la trayectoria de la descarga hacia el punto deseado.

3.1.1 Sistemas pasivos

Estos sistemas únicamente captan las descargas que indiscriminadamente pueda recibir la instalación protegida. Es difícil determinar el lugar o punto de impacto de un rayo en este tipo de sistemas.

Dentro de este grupo de dispositivos se encuentran las puntas Franklin, las jaulas de Faraday o las mallas conductoras. Se trata de los sistemas más sencillos y económicos de protección, y dentro de estos, el uso de puntas Franklin es el método más fiable y con menos coste de instalación y mantenimiento. Las mallas conductoras e hilos de guarda, si bien proporcionan una buena protección, conllevan un problema añadido de mantenimiento, con los costes que ello implica.

3.1.2 Sistemas activos

En este caso, los dispositivos empleados cuentan con unos excitadores eléctricos que ionizan la atmósfera en un gradiente que es directamente proporcional al gradiente de potencial existente entre ésta y la tierra. Constan de dos zonas diferenciadas, denominadas excitadoras y deflectora. La zona excitadora es la que se encuentra al potencial del aire circundante, y la deflectora la que está a potencial de tierra. El efecto equivalente es el de tener un condensador que permite la creación de los trazadores ascendente y descendente, y por tanto, la ruptura entre la nube y el pararrayos.

El cono de protección proporcionado por estos pararrayos es similar, en cuanto a proyección angular, al proporcionado por las puntas franklin.

3.2 Dispositivos de protección contra impactos directos de rayo y sobretensiones

Entre los dispositivos de protección, más utilizados están, los pararrayos autovalvulares, los cuernos de arqueo, jaula de Faraday o hilo de guarda y las puntas Franklin, todos se conectan en paralelo con el aislamiento del equipo, ofreciendo así un camino más fácil a las sobretensiones. El pararrayos es un dispositivo más sofisticado que los demás, pero los otros ofrecen métodos más baratos por lo que se utilizan en muchos lugares.

3.3 Principios de operación de cada dispositivo de protección

3.3.1 Los cuernos de arqueo

Estos dispositivos tienen como propósito principal arquear cuando exista una sobretensión de una magnitud y enviarla a tierra, para esto, es necesario ajustar la separación entre los *gaps* de los cuernos de arqueo de boquillas o *bushings* de los transformadores, cuchillas y otros equipos. La separación debe ser necesaria, de acuerdo con el nivel de tensión para protección y considerar las condiciones atmosféricas que los afectan.

3.3.2 Puntas de Franklin

Se basa en los efectos de puntas (alta concentración de cargas en éstas) y consiste en una barra metálica terminada en punta, colocada en el lugar más alto de la subestación y conectada a tierra mediante un conductor.

Su zona de protección debe calcularse aproximadamente en un radio igual a su altura de instalación sobre el suelo.

Como ya es conocido, en las puntas se produce una elevada densidad de cargas con lo que en ellas, preferentemente se formará el trazador que saldrá al encuentro del trazo piloto, y, por lo tanto, la descarga principal partirá de tierra a través del pararrayos dirigiéndose a la nube, mientras que las descargas secundarias serán conducidas a tierra a través de la punta sin causar daño alguno a la subestación protegida.

3.3.3 Jaula de Faraday o hilo de guarda

La jaula de Faraday es un escudo electrostático que se construye para rodear, literalmente, la subestación protegida. La jaula es a menudo tanto el terminal aéreo constituido por hilos de guarda como el conductor de bajada. Sin embargo, algunos instaladores a menudo instalan pararrayos convencionales espaciados en la parte superior de la jaula. La protección con este sistema tiene la ventaja de ofrecer protección RF (electrostática) cuando los cables de la malla están cercanos entre sí. A medida que aumenta la separación entre cables, se reduce la atenuación de RF hacia frecuencias más y más bajas. En el otro extremo, la malla de alambres se convierte en un cuarto de pantalla. Esta configuración atenúa los transitorios atmosféricos en proporción directa con la densidad de la matriz de cables.

3.3.4 Pararrayos con emisión temprana de ascendentes

Funciona básicamente mediante el incremento de la tensión de punta cuando el ambiente está cargado, de forma que se produce un incremento del “efecto corona”, el cual incrementa la formación del efluvio ascendente.

Para la formación del efecto corona se puede utilizar un excitador piezoeléctrico, que funciona de la siguiente forma. Los cristales o cerámicas piezoeléctricas son estructuras en las cuales los dipolos eléctricos han sido emplazados fuertemente en una orientación dada, sometiéndolos inicialmente a un campo intenso de polarización.

Estas cerámicas o cristales generan un voltaje muy alto simplemente incrementando la presión (entre 20 y 25,000 voltios), niveles de voltaje que son mucho más altos que los necesarios para producir el número de iones deseados. El efecto de la presión se obtiene por medio de la fuerza resultante de la combinación formada por el mismo pararrayos y turbulencias de aire, el efecto vibratorio de la resonancia del mástil y la presión previa aplicada al estimulador.

Los iones son elevados y generan una corriente de aire ionizado alrededor de la cabeza de captación evitando así el impacto de la descarga. El sistema de ionización por cristales piezoeléctricos, termina principalmente con el tiempo de iniciación del efecto corona.

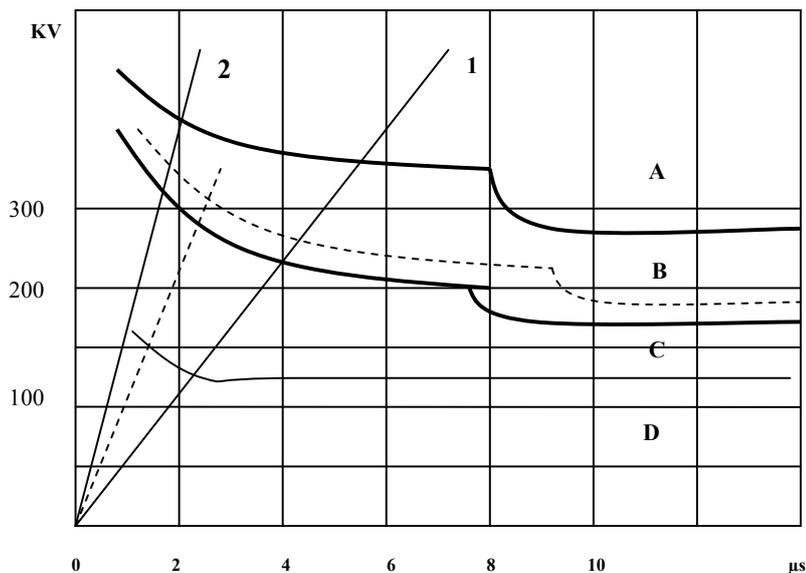
3.3.5 Pararrayos autovalvulares

Este es un dispositivo primario de protección usado en la coordinación de aislamiento, su función es limitar la sobretensión aplicada al equipo, los elementos básicos de este dispositivo son el espaciamiento de ruptura o explosores que actúan como un interruptor rápido y una resistencia no lineal, que en condiciones normales de funcionamiento actúa como una gran resistencia y en condiciones de falla o sobretensiones actúa como una baja resistencia, lo cual permite drenar cualquier falla a la red de tierra.

Las características de tensión-tiempo se representan en la curva de la figura 13 cuya forma significa el grado de resistencia no lineal.

Las características tensión-corriente de un apilamiento de resistencias (elementos de válvula) se muestran en la figura 13, los cuales permiten unas descargas de ondas de altas intensidades de corriente con una caída IR del orden de la tensión de ruptura y a la frecuencia de potencia cuyo valor puede ser interrumpido por el espaciamiento.

Figura 13. **Curva de características tensión-tiempo en un pararrayos**



Donde:

La curva A es la curva de aislamiento de un equipo eléctrico.

La curva B es la curva de operación del pararrayos.

La curva C es la curva de operación de los interruptores.

Figura 14. **Modelo de un pararrayos**

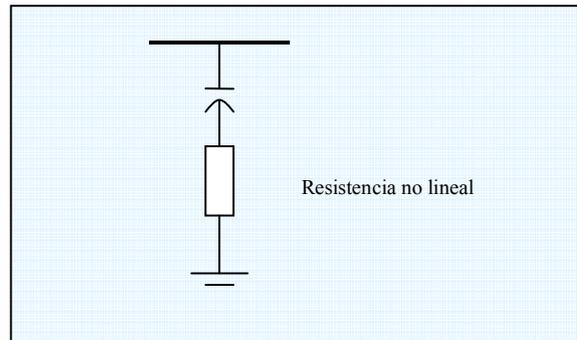
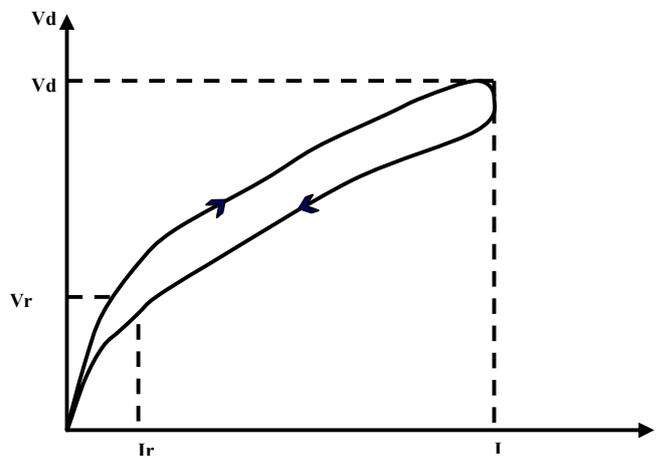


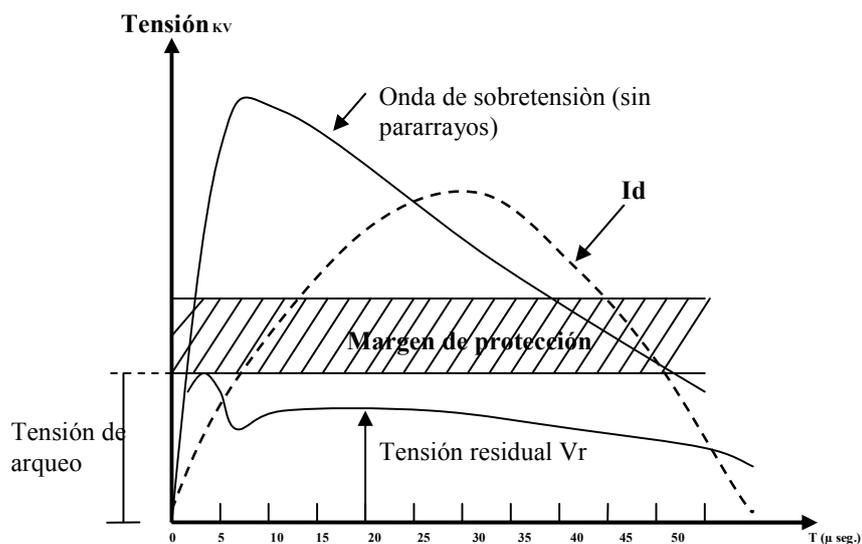
Figura 15. **Formas de onda de tensión y corriente típicas de un pararrayos durante una descarga**



V_d = Tensión máxima a través del pararrayos durante una descarga con una onda cuyo valor pico de corriente es I_d .

V_r = Tensión nominal del pararrayos (máxima tensión r.m.s. a la frecuencia del sistema al cual el pararrayos es capaz de resellarse).

Figura 16. **Operación típica de un pararrayos**



3.4 Normas y requerimientos mínimos para la instalación de dispositivos protectores

3.4.1 Normas de instalación de la punta Franklin

- La punta Franklin se situará en puntos dominantes de la subestación. Si se emplea mástil éste tendrá una altura entre 12 y 14 m. y la punta de Franklin será fijada solidamente al mismo.
- El cable que baja de la punta deberá ser cobre desnudo, de un calibre no menor al 1/0 AWG.

- c) El cable que baja, una vez fijado a la abrazadera de la punta Franklin y con el fin de evitar deterioros por dilataciones o frotamientos, será guiado por grapas o guías de cable con aislador de porcelana.
- d) Las bajadas del cable de la punta deberán descender en una línea tan recta como sea posible.
- e) El cable, en la base de la cimentación deberá ser protegido por un tubo o canal, debiendo evitarse en caso de ser material magnético, que se cierre alrededor del mismo.
- f) El cable descendente deberá ser fijado soldado a la toma de tierra, de manera que la unión presente mínima resistencia eléctrica y máxima resistencia mecánica.
- g) La toma de tierra de la punta de Franklin se realizará preferentemente, mediante picas de cobre con alma de acero o placas de cobre.
- h) Es aconsejable unificar la toma de tierra con las demás de la subestación, con el fin de tener un dispensador único, tanto para altas como bajas tensiones.

3.4.2 Normas de instalación de la jaula de Faraday

- a) las terminales aéreas se instalarán en todas las partes donde se encuentren equipos expuestos y puedan ser dañados por una descarga.
- b) Los conductores se colocarán sobre las partes más altas de la subestación, estos pueden ser de acero, igual a los hilos de guarda que tienen las líneas que llegan a la subestación.
- c) El cable de bajada, con el fin de evitar deterioros por dilataciones o frotamientos, será guiado por grapas o guías de cable en las columnas de los pórticos.

- d) Las bajadas del cable de la malla de guarda descenderá en una línea tan recta como sea posible para conectarse a la red de tierras.
- e) Para asegurar la protección mecánica del cable en la base de la cimentación, éste deberá ser protegido por un tubo o canal, debe evitarse en caso de ser material magnético, que se cierre alrededor del mismo.
- f) El cable descendente deberá ser fijado soldado a la toma de tierra, de manera que la unión presente mínima resistencia eléctrica y máxima resistencia mecánica.
- g) La toma de tierra de malla se realizará preferentemente, mediante picas de cobre con alma de acero o placas de cobre.

3.4.3 Normas de instalación del pararrayos ionizante

- a) el pararrayos deberá quedar instalado como mínimo a una altura superior a 2 metros, del punto más elevado del equipo a proteger. Es necesario que la altura total del pararrayos sobre el nivel del suelo no debe ser menor de 10 m.
- b) Irá siempre sustentada por una antena, de la longitud necesaria para cumplir el inciso anterior.
- c) Será fijado solidamente a la antena sustentadora, con el fin de resistir las vibraciones y esfuerzos mecánicos.
- d) El cable de bajada, con el fin de evitar deterioros por dilataciones o frotamientos, será guiado por grapas o guías cable en las columnas de los pórticos.
- e) Las bajadas del cable deberán ser de cobre desnudo, de una sección no inferior a 50 mm².

- f) El cable descendente deberá ser fijado soldado a la toma de tierra, de manera que la unión presente mínima resistencia eléctrica y máxima resistencia mecánica.
- g) La toma de tierra del pararrayos se realizará preferentemente, mediante picas de cobre con alma de acero o placas de cobre.

3.4.4 Requerimientos mínimos para la instalación de los pararrayos autovalvulares

- No deben producirse arcos bajo condiciones de tensiones dinámicas, excepto para circunstancias especiales. (los pararrayos deben destruirse si su capacidad térmica es baja).
- Su curva tensión-tiempo debe estar bajo el nivel de ruptura del aislamiento protegido en cualquier región donde se necesita la protección. El margen entre las dos curvas debe estar de acuerdo, de modo que pueda permitir los efectos de distancia, polaridad, densidad relativa del aire, humedad, envejecimiento del aislamiento y cambios en los aparatos protectores.
- Deben ser capaces de soportar altas descargas de ondas de energía sin cambios en sus niveles de protección o daños propios, así como aislamientos adyacentes.
- Después de una descarga, deben resellarse (volverse no conductores) en presencia de sobretensiones dinámicas.

3.5 Procedimiento en la coordinación de aislamiento

Si los pararrayos se utilizan para establecer los niveles de protección, su tensión nominal debe escogerse menor que la máxima tensión a tierra a frecuencia de potencia en el punto de instalación, bajo condiciones normales o de falla. La tensión nominal del pararrayos es el valor r.m.s. de la tensión a frecuencia de potencia medida entre línea y tierra, donde el pararrayos trabaja continuamente, con esta tensión aplicada debe interrumpir la corriente después de una operación.

Para cualquier pararrayos la tensión de descarga y de ruptura se conoce por medio de sus curvas que se obtienen de la información que dan los fabricantes.

3.5.1 Determinación del nivel de protección de los pararrayos

El problema de la protección de las redes eléctricas contra las sobretensiones por rayo y por maniobra de interruptores, ofrece un amplio campo de estudio, esto involucra la técnica de construcción de los equipos y máquinas eléctricas que deban soportar tensiones elevadas a la frecuencia del sistema y por impulso, de acuerdo a valores definidos por las normas.

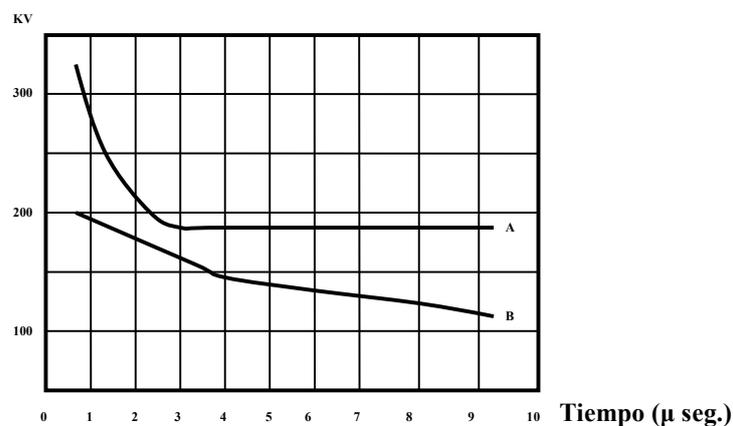
Evidentemente la selección del nivel de aislamiento es un problema técnico económico, ya que el nivel de aislamiento seleccionado debe ser tal que no permita disturbios muy frecuentes durante la operación, pero es obvio que no debe corresponder a un costo excesivo.

Se debe hacer notar en este punto, que la protección no sólo debe tener como punto de referencia el costo de la instalación por proteger, también se debe considerar otros factores, como es la naturaleza del servicio que debe ser lo más continuo y evitar cualquier incidencia debido a las sobretensiones.

Para mantener las sobretensiones de origen atmosférico dentro de los límites de tolerancia, es necesario que en las instalaciones se instalen los dispositivos de protección adecuados, coordinando sus características de protección con las de los aislamientos.

El concepto de coordinación de aislamiento se basa en la coordinación de los niveles de protección y de aislamiento, en la figura 17 se ilustra este concepto, siendo la curva A la representación del aislamiento de un transformador representada por la curva de descarga tiempo. La curva B representa el nivel de protección en función del tiempo, del dispositivo de protección.

Figura 17. **Representación del nivel de protección a través de las curvas características**



- A.- Curva de aislamiento de un transformador a proteger
- B.- Curva del nivel de protección del dispositivo de protección

Es evidente que la curva A se encuentra protegida por la curva B mientras que el margen de seguridad, en las dos curvas, debe garantizar la protección del equipo.

El nivel de aislamiento al impulso representa entonces el valor de la tensión al impulso que el transformador u otro equipo puede soportar sin dañarse, mientras que el “nivel de protección”, está representado por la máxima tensión que se puede verificar a causa de los dispositivos de protección.

El nivel de protección se establece con la localización de los pararrayos, pero se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- a) El efecto de la separación entre los equipos protegidos y el pararrayos causado por las ondas viajeras de frente corto de descargas atmosféricas.
- b) Caída de voltaje en las conexiones de las líneas a la terminal de alto voltaje de pararrayos y de la terminal de tierra al electrodo. La tensión del pararrayos en la derivación puede tomarse como el nivel de protección.
- c) La posibilidad de variación de las características de los pararrayos y la reducción de la resistencia no lineal, ambas con el tiempo.

Los valores comunes para los márgenes efectivos, arriba del nivel de protección son del 20 al 30% para márgenes altos y para valores bajos de tensión son del 15%.

3.5.2 Selección de los pararrayos

La selección de un pararrayos para protección contra sobretensiones de origen atmosférico y por maniobra, debe de estar de acuerdo con el criterio de protección establecido para la instalación, en función del criterio de la coordinación de aislamiento adoptado, es decir, se debe de verificar que un tipo de pararrayos cumpla con los requerimientos de la línea, transformador, aisladores y otros equipos en la subestación.

Las características importantes para la selección de un pararrayos son:

- a) Tensión nominal
- b) Corriente nominal de descarga.

3.5.2.1 Selección de la tensión nominal del pararrayos

La selección de la tensión nominal del pararrayos se basa normalmente en la corriente alterna a frecuencia fundamental de (60Hz) que ocurre durante una descarga y una falla simple a tierra, o ambos efectos combinados.

La tensión nominal de pararrayos se calcula de acuerdo con la expresión:

$$V_n = K_e V_{m\acute{a}x}. \dots\dots\text{Ecc. 3.1}$$

Donde:

V_{max} = tensión máxima del sistema entre fases en KV

V_n = Tensión nominal del pararrayos en KV

K_e = Factor de conexión a tierra.

El factor K_e depende de la forma en como está conectado el sistema de tierra, considerando la falla de línea a tierra que produce la sobretensión en las fases no falladas. De acuerdo con esto, la relación de reactancias de secuencia cero a secuencia positiva (X_0/X_1) y la relación (R_0/X_1), se pueden graficar en varias curvas en un plano cartesiano y así representar el punto de corte que cae en alguna de estas curvas, en donde el mínimo indicador representa la tensión máxima (en por ciento) que puede aparecer de línea a tierra en las fases de la línea no falladas.

Con sistemas de neutro flotante o conectado a tierra con una impedancia de alto valor, $X_0/X_1 = 0$ entonces, los valores se interceptan en la curva de 100% y $K_e = 1$ el valor nominal del pararrayos se escoge como el valor menor al que sea igual a la tensión fase a fase del sistema.

En sistemas de tierra efectivos o con neutro solidamente conectado a tierra $X_0/X_1 < 3$ y $R_0/X_1 < 1$ y estos valores se interceptan en la curva marcada con el 80%, es decir, $K_e = 0.80$ el pararrayos se escoge como menor, al valor igual al 80% del valor más alto de la tensión fase a fase.

En la práctica común los fabricantes designan los pararrayos como de: 100%, 80% y 75%, estos valores se refieren normalmente a la tensión nominal del sistema, así por ejemplo, un pararrayos de 100% tiene una tensión nominal que es mayor en un 5% a la tensión nominal del sistema y se emplean en el caso que $K_e = 1$.

El valor de la tensión nominal de un pararrayos es importante en la economía de la instalación, como en el caso de un sistema con neutro solidamente conectado a tierra en donde se podría utilizar un pararrayos con el 75%.

Se tendría un mayor número de operaciones, y por lo tanto mayor probabilidad de falla. Por el contrario, si se selecciona pararrayos de 110% de la tensión nominal de la instalación, se tendría un menor número de operaciones, pero es probable que la protección no sea adecuada. Por lo anterior, se debe coordinar la tensión de operación del pararrayos con los niveles básicos de aislamiento del equipo.

Debido a que los pararrayos también deben operar por sobretensiones debida a maniobras de interruptores, se debe determinar este valor, por ejemplo, las normas ANSI recomiendan que el valor de operación del pararrayos por sobretensión de maniobra sea 0.83 NBI.

3.5.2.2 Selección del valor de la corriente nominal

Para sistemas arriba de 3 KV se utilizan pararrayos de 5 KA y 10 KA, estos últimos proporcionan una mejor protección. Una más alta capacidad de descarga que los de 5 KA. Pero son lógicamente de un costo mayor. Normalmente los de 5 KA son usados para sistemas de 3 KV a 36KV. Arriba de 36 KV solamente se utilizan pararrayos de 10 KA.

3.5.3 Localización de los pararrayos

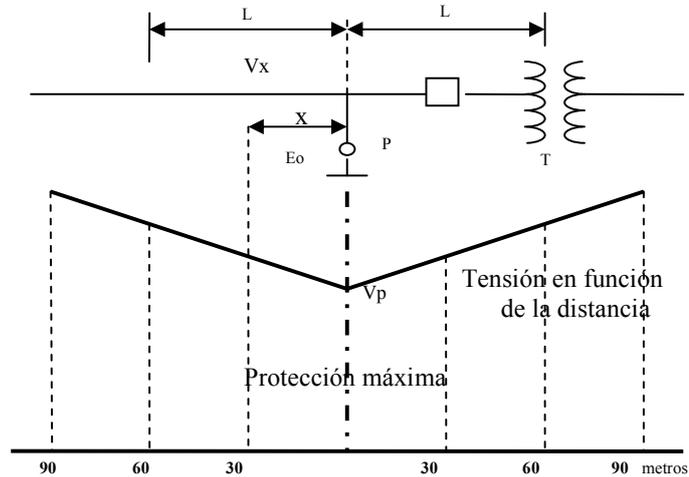
Los pararrayos deben instalarse lo más cercano al equipo protegido. Tan importante como seleccionar las características adecuadas de un pararrayos para proporcionar una protección efectiva, es la localización de los pararrayos en la subestación, ya que dependiendo de esto se logrará una buena protección, en subestaciones eléctricas en donde llegan y salen líneas de subtransmisión y distribución, por razones técnicas y económicas.

Se debe determinar la zona de protección y en función de esto establecer el número de pararrayos que se requieren para obtener el nivel de protección adecuado.

La protección de un pararrayos es máxima en el lugar de la instalación y disminuye en forma gradual a medida que se aleja el equipo hacia ambos lados, de tal forma que hay una distancia que proporciona un valor de protección mínimo requerido y que determina la zona de protección, de tal manera que para valores de distancia mayores, el pararrayos ya no protege al equipo en la medida que se requiera.

En la determinación de la zona de protección o distancia en que el pararrayos ofrece protección al equipo, intervienen varios factores que tienen que ver con las características del pararrayos representada por su tensión de operación o cebado, con la onda incidente en cuanto a la pendiente del frente de onda se refiere en KV/ μ seg. Y por supuesto de la distancia de instalación al equipo por proteger. Para ilustrar lo anterior se muestra el siguiente diagrama.

Figura 18. Diagrama del nivel de protección en función de la distancia



En donde:

L = Distancia del pararrayos a ambos lados del punto de instalación

P = Pararrayos

T = Transformador o equipo a proteger

$V(x) = E_0 =$ Tensión que aparece en cualquier punto "x" de la instalación medida a partir del punto de localización del pararrayos.

En la figura 18, se observa que a medida que se aleja el pararrayos, la tensión que aparece en la instalación es mayor y ésta se puede determinar a partir de las consideraciones siguientes:

- a) Para una onda incidente que llega a la subestación, se supone que tiene una pendiente constante S.

- b) El transformador se puede representar en forma aproximada como un circuito abierto, despreciando sus capacitancias concentradas.
- c) El pararrayos, por tener una característica de operación no lineal y una impedancia sensitiva a la tensión discontinua, se puede tratar en forma parecida a los diagramas de celosía (*lattice*) por el método de reflexión de ondas.

La distribución de ondas de tensión para un arreglo línea-pararrayos subestación, se puede obtener por el método de *lattice* (diagrama de celosía) y se llega a demostrar que la máxima tensión que aparece en el objeto a una distancia "X" del pararrayos es:

$$V_x = V_p + 2ST \dots\dots\dots \text{Ecc. 3.2}$$

Donde:

$T = \frac{X}{\mu}$ es el tiempo recorrido entre el pararrayos y el objeto, siendo μ la velocidad de la luz que es 300m/ μ seg.

S = Pendiente del frente de onda en KV/ μ seg, sin considerar la cresta de onda incidente.

El efecto de distancia es despreciable para ondas por maniobras de interruptores, debido a que el frente de onda tiene una pendiente muy baja.

3.5.4 Procedimiento para lograr una adecuada zona de protección con pararrayos

Para el cálculo de la distancia de protección del pararrayos, se parte de la ecuación:

$$V_x = V_p + 2ST \dots\dots\dots\text{Ecc. 3.2}$$

Sabiendo que la velocidad de la luz se puede expresar como:

$$\mu = \frac{X}{T} \quad T = \frac{X}{\mu} = \frac{X}{300}$$

Entonces:

$$V_x = V_p + \frac{2SX}{300} \dots\dots\dots\text{Ecc. 3.3}$$

Si despejamos x de la ecuación y si V_x es la tensión máxima permisible en el equipo por proteger se llega a lo siguiente:

$$X = \frac{300 (V_{max} - V_p)}{2s} \dots\dots\dots\text{Ecc. 3.4}$$

Siendo X la distancia máxima entre el equipo y el pararrayos. El valor de la pendiente del frente de onda "S" se puede calcular, o bien según la norma ANSI C 62.1-1973 (publicada en 1975) dando una interpretación antes mencionada con relación a "S" como:

$$S = \frac{100}{12} \times V_n \text{ ---- KV}/\mu \text{ seg } \dots\dots\dots\text{Ecc. 3.5}$$

Hasta una tensión nominal de 240 KV en el sistema donde:

V_n = es la tensión nominal de pararrayos y el valor de la pendiente "S" según esta norma, se obtiene en la forma indicada en la siguiente tabla.

Tabla II. **Valores de la pendiente del frente de onda**

Tensión nominal del sistema	Pendiente del frente de onda
Menor de 3 KV	10 KV/ μ seg.
3 - 240 KV	(100/12) KV/ μ seg. Por cada KV nominal del pararrayos
más de 240 KV	1200 KV/ μ seg.

4 CONSIDERACIONES TÉCNICAS Y TEÓRICAS DE LA INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRA EN LA BASE DE LAS ESTRUCTURAS

El sistema de tierra es un parámetro importante en la protección contra descargas atmosféricas, su función principal es mejorar la operación y continuidad del servicio de un sistema eléctrico y evitar riesgos de accidentes de personas que laboran en la instalación, ya que proporciona un camino fácil para que una corriente de descarga se disipe con rapidez para evitar elevaciones en el potencial tales que lleguen a producir arcos en los aisladores de cualquier equipo de la instalación.

El sistema de tierra puede ser simplemente una toma, o puesta a tierra o malla, dependiendo del tamaño de la subestación y de la calidad del suelo donde se ubique. El término aterrizado se define como “puesta a tierra” o algún cuerpo conductor que sirve en lugar de tierra, este cuerpo debe estar al mismo potencial de tierra.

Los circuitos y sistemas se conectan a tierra para:

- a) Fijar el nivel de potencial de todas las partes metálicas de la subestación o instalación con respecto al potencial del suelo.
- b) Proteger a los equipos de las sobretensiones.
- c) Asegurar la protección del personal a los peligros de la corriente eléctrica y tensiones de contacto.
- d) Para dar facilidades en la apertura de los dispositivos de protección instalados para proteger los conductores del circuito, en el caso de fallas a tierra.

Además una buena tierra tiene que cumplir con ciertos requerimientos:

- a) Baja resistencia.
- b) Adecuada capacidad de transporte de corriente.

4.1 Factores básicos a considerar en el diseño de un sistema de tierras

Algunos de los factores básicos que tienen un papel importante en el diseño del sistema de tierras son los siguientes.

4.1.1 Resistividad del terreno

La resistencia de la toma de tierra depende de la resistividad del terreno, lo cual varía de acuerdo a los materiales que la componen, de la profundidad, de la humedad, y de la temperatura. Por lo tanto, en todo lugar donde se tenga que instalar una subestación se debe hacer un estudio de homogeneidad y composición de la tierra.

Cuanto menor sea la resistividad del terreno, más fácilmente se puede alcanzar valores bajos para la resistencia de la instalación de los sistemas de tierra. En la siguiente tabla se representan diferentes valores de resistividad del suelo para diferentes tipos de terreno:

Tabla III. **Valores de resistividad del terreno**

Valores típicos de resistividad de los terrenos	
Tipo de suelo	Resistividad Ω / m
Húmedo o suelo orgánico	10 – 50
Cultivo arcilloso	100
Arenoso húmedo	200
Arenoso seco	1000
Con guijarro y cemento	1000
Rocoso	3000
Roca compacta	10000

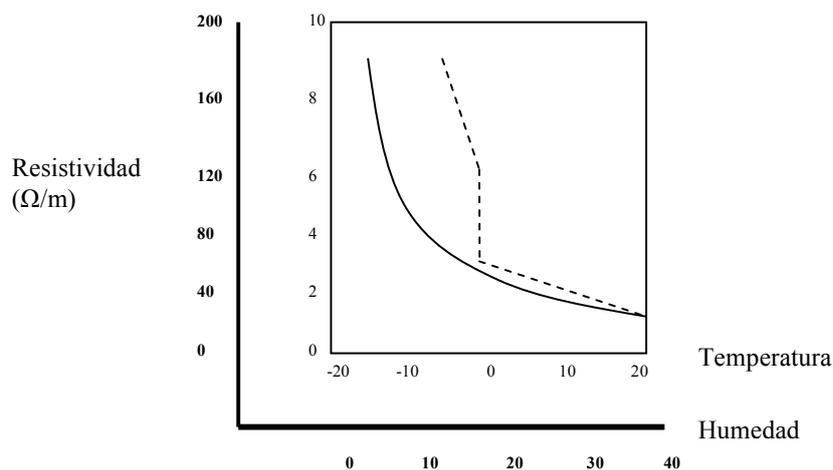
Teniendo los valores anteriores como una guía, deben hacerse siempre mediciones por medio de *megger* para obtener valores exactos.

La resistividad del suelo varía ampliamente con la cantidad y tipo de sales solubles, ácidas o alcalinas que contenga. Por ello es factible utilizar electrodos enterrados a una profundidad donde se asegure un contacto con tierra húmeda, si no es así se debe usar un sistema de varillas verticales o picas correctamente distribuidas, conectadas a la malla, debiendo alcanzarse con esto las capas más profundas del suelo. Usualmente, se usan capas de grava de 7 a 10 centímetros de espesor sobre los patios de las subestaciones para evitar pérdidas de humedad por evaporación en la estación seca.

La resistividad del suelo varía con la temperatura y el grado de humedad. Por lo que no es aconsejable efectuar mediciones de resistividad del terreno en condiciones altas de temperatura o en lluvias recientes.

También hay que tomar en cuenta que para corrientes altas y prolongadas se puede alcanzar alrededor del electrodo, temperaturas muy altas, obteniendo como resultado que el suelo se vuelva seco y por consiguiente de una alta resistividad. En las figuras se muestran las variaciones de la resistividad del suelo con la humedad y la temperatura.

Figura 19. **Variación de la resistividad en función de la temperatura y la humedad**



4.1.2 El tamaño o extensión del sistema de tierras

Este es un factor importante, ya que si el sistema es muy pequeño para manejar grandes corrientes de falla o de descarga, pueden existir gradientes de potencial sobre la superficie, haciendo riesgoso esto para el contacto con estructuras. En forma ideal la resistencia de un sistema de tierras debería de ser cero ohms para reducir cualquier voltaje o gradiente de potencial, debido a las corrientes de fuga, pero esto es prácticamente imposible.

En la práctica, las normas técnicas para instalaciones eléctricas establecen que la resistencia de una varilla o electrodo de tierra no debe exceder a 25 ohms. Esto se toma como límite superior y es una regla general; sin embargo, en muchos casos se requiere de una resistencia mucho menor por seguridad.

4.2 Diseño de sistemas de tierra para subestaciones eléctricas de acuerdo a la norma (IEEE -80)

Estos cálculos cubren principalmente subestaciones tipo exterior, con aislamientos convencionales o en gas, incluyendo subestaciones de distribución y transmisión, los propósitos específicos de esta guía son:

- a) Establecer como bases de diseño, los límites seguros de diferencias de potencial que pueda existir en una subestación bajo condiciones de falla entre puntos que puedan ser contactados por el cuerpo humano, por ejemplo las estructuras.
- b) Proporcionar un procedimiento para diseño de sistemas de tierra prácticos, basados en criterios de seguridad

En principio, un diseño de tierra seguro tiene dos objetivos:

- a) Proporcionar los medios para transportar las corrientes eléctricas hacia la tierra bajo condiciones normales y de falla, sin exceder algún límite de operación o de equipo, o afectar adversamente la continuidad del servicio.

- b) Asegurar que una persona dentro del área aterrizada no esté expuesta al peligro de descargas (o choques) eléctricas críticas.

Si no se toman las precauciones adecuadas en el diseño de redes de tierra, los gradientes de potencial a lo largo de la superficie de la tierra pueden ser de magnitud suficiente durante las condiciones de falla a tierra y de descargas atmosféricas en la instalación, para poner en peligro a una persona en el área. Además, diferencias de potencial peligrosos pueden desarrollarse entre estructura o equipos que estén aterrizados y próximos.

4.2.1 Desarrollo de los cálculos

Para el desarrollo de estos cálculos se deben tener los siguientes tres puntos en consideración:

Plano de la subestación. El plano de la subestación deberá mostrar el área que será ocupada por la red de tierras. Así mismo, deberá incluir la distribución física de los equipos de potencia con acotaciones a escala considerando ampliaciones a futuro.

Resistividad de tierra o (terreno). Se debe hacer mediciones de la resistividad del suelo de acuerdo al estándar ANSI/IEEE 81/1983, el cual recomienda dividir el terreno en 25 partes iguales, obtener mediciones de la resistividad del suelo en cada una de las 25 partes en dos capas (o dos niveles de profundidad)".

Evaluación de la resistencia de tierra. Un aterrizamiento ideal debe proporcionar una resistencia cercana a cero hacia tierra. En la práctica, la elevación del potencial de tierra en la subestación se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla. Para subestaciones de transmisión y otras subestaciones grandes, la resistencia de tierra deberá ser cercana a 1Ω o menos, en pequeñas subestaciones de distribución, el rango usualmente aceptable es de $1-5\Omega$, dependiendo de las condiciones del local.

4.3 Mallas o redes de tierras

En una subestación de cualquier tamaño, un único electrodo no es adecuado para proveer la conductividad necesaria. De todas formas, cuando varios de estos están conectados entre sí, y las estructuras de soporte de los equipos y los neutros que van aterrizados, el resultado es necesariamente una malla. Si esta red interconectada es enterrada, usualmente resulta una red de tierra excelente. Esto es, el uso de varios electrodos interconectados con conductores de cobre para formar la malla.

Los sistemas de tierra comprenden lo siguiente:

- El dispersor, constituido por un cuerpo metálico o un conjunto de cuerpos metálicos puestos en contacto directo con la tierra (electrodos o picas) destinados a dispersar las corrientes de falla por descargas u otro tipo de falla.
- El conductor de tierra. Lo constituye un conductor que sirve para unir las partes de puesta a tierra con el dispersor.

- Los colectores eventuales de tierra. Es el conjunto de elementos que sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos equipos o estructuras, con el objeto de asegurar la protección contra los contactos indirectos, los cuales se hacen dispersores y conductores de corriente las terminales de estos cuando ocurre una falla.

4.4 Medios para obtener tomas de tierra

Hay varios medios para obtener y mejorar las tomas de tierra; lo que se busca es básicamente disminuir en la mayor cantidad posible la resistencia del lugar, para que las corrientes de descarga se disipen con la mayor rapidez. Entre los medios utilizados se puede mencionar:

4.4.1 Cables compensadores

El término cable compensador, se puede usar en conexión con un hilo de guarda en una línea de transporte, se utiliza para el mejoramiento de la toma de tierra reduciendo la resistencia de la toma de tierra a incremento del factor de acoplamiento. Su aplicación es óptima en lugares donde el terreno es de muy alta resistividad y resulta inadecuado el uso de picas o varillas de tierra.

Los cables compensadores pueden colocarse en dos tipos de arreglos:

- a) Tipo continuo: consiste en uno o mas compensadores, separados una determinada distancia, enterrándolos aproximadamente a 30 centímetros de la superficie en dirección paralela a la línea y conectándolos al hilo de guarda en las tomas de tierra de las estructuras.
- b) Tipo radial: consiste en varios cables compensadores extendidos radialmente, enterrados a una profundidad de 40 centímetros.

4.4.2 Electrodo

Entre los electrodos, las varillas o picas son las más simples y mas utilizadas por su bajo costo, reducido espacio de instalación y porque en realidad llenan los requerimientos necesarios para obtener una baja resistencia de la toma de tierra, cuando la resistividad del terreno no es muy alta. Si el terreno es rocoso es recomendable hacer uso de cables compensadores y un tratamiento del terreno.

En la tabla 4 se muestran fórmulas para el cálculo de la resistencia de tomas de tierra basado en el diseño de la norma IEEE-80. Podemos notar que la dimensión más importante de la varilla y que afecta la resistencia de toma de tierra es la longitud, porque ella incrementa el área de contacto entre la pica y el suelo, ya que la resistividad del suelo decrece con la profundidad por el incremento de la humedad y la temperatura.

Frecuentemente se hace necesario el uso de varias varillas conectadas por medio de conductores instalados en paralelo, para bajar la resistencia de la red de tierra.

Tabla IV. Fórmulas para el cálculo de tomas de tierra

RESISTENCIA	FÓRMULA
Resistencia de todas las varillas de tierra	$R_2 = \left[\frac{\rho_a}{2n \pi L_2} \right] \left\{ L_n \frac{2L_1}{d^2} - 1 + 2K_1 \left[\frac{L_2}{\sqrt{A}} \right] (\sqrt{n-1})^2 \right\}$
Resistencia de los conductores de la red	$R_1 = \left[\frac{\rho_1}{\pi L_1} \right] \left\{ L_n \frac{2L_1}{h'} + K_1 \left[\frac{L_1}{\sqrt{A}} \right] - K_2 \right\}$
Resistencia mutua entre el grupo de conductores de la red y el grupo de varillas	$R_{12} = \left[\frac{\rho_a}{\pi L_1} \right] \left\{ L_n \frac{2L_1}{L_2} + K_1 \left[\frac{L_1}{\sqrt{A}} \right] - K_2 + 1 \right\}$
Resistencia total del sistema de tierras consistente de la combinación de la malla horizontal y la varillas (vertical)	$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2 R_{12}}$

Donde:

L_1 = Longitud total del conductor de la malla en metros.

L_2 = Longitud promedio de las varillas de tierra en metros.

ρ_1 = Resistividad del suelo para la red de conductores enterrada a una profundidad h , en Ω -m.

ρ_a = Resistividad aparente del suelo vista por una varilla de tierra.

ρ_2 = Resistividad del suelo desde una profundidad H hacia abajo en Ω -m.

H = Profundidad de la segunda capa de suelo a la superficie.

h = Profundidad de la malla enterrada en metros.

A = Área cubierta por una red de dimensiones a y b en m^2 .

N = Numero de varillas de tierra colocadas en el área A .

K_1, K_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema en base a su longitud y ancho. Las cuales se obtienen de las curvas de la relación longitud/ancho, dibujadas en un plano cartesiano.

d_1 = Diámetro del conductor de la red.

d_2 = Diámetro de las varillas de tierra en metros.

a = Longitud del lado corto de la red en metros.

b = Longitud del lado largo de la red en metros.

4.4.3 Tratamiento del suelo

El tratamiento del suelo alrededor de una varilla o pica es otro medio utilizado para bajar la resistencia de la toma de tierra. Consiste en agregar algún aditivo químico que incrementa la conductividad de la tierra.

Para terrenos de muy alta resistividad, se recomienda el uso de bentonita, la cual es una arcilla natural que contiene minerales, no es corrosiva y es estable, y tiene una resistividad de $2.5 \Omega\text{-m}$, en humedad de 300%; con esto se reduce enormemente la resistividad del suelo (y por ende, la cantidad de varillas requeridas para disminuir la resistividad del suelo). No es aconsejable en terrenos muy secos, debido a que ésta trabaja muy bien en terrenos húmedos.

Para realizar otros tratamientos se utilizan estos aditivos:

- Sal común (cloruro de sodio)
- Sulfato de magnesio
- Sulfato de cobre
- Sulfato de hierro
- Nitrato de sodio

El método utilizado para aplicar estos aditivos es hacer un agujero de un diámetro determinado e ir colocando capas alternas de carbón, sal y arena de río; esto ayuda a evitar la corrosión de la varilla, así como obtener una disminución en la resistencia de la toma de tierra. Con este tipo de método puede reducirse la resistencia desde un 15 hasta un 90%.

4.5 Resistencia de una puesta de tierra

En una subestación de distribución o de transmisión, una de sus protecciones más importante es contra descargas atmosféricas por lo que la resistencia de tierra debe ser lo más baja posible. Por lo tanto, deben unirse todos los sistemas de dispersión con el fin de disminuirse la resistencia global y evitar así que se originen en las superficies, peligrosas tensiones de paso.

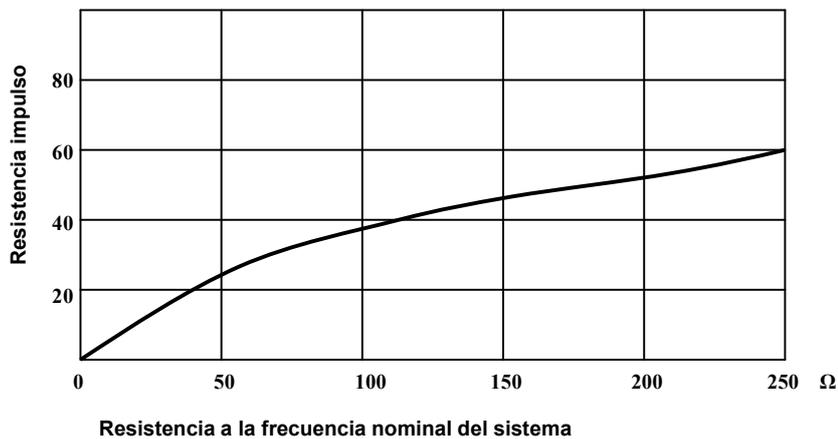
En la tabla se muestran los rangos de los valores admisibles de la resistencia de tierra, para subestaciones, según su capacidad instalada entre las cuales se encuentran las de distribución.

Tabla V. **Valores de tomas de tierra según la capacidad instalada**

CAPACIDAD	RESISTENCIA
Menores que 2 MVA	De 5 a 10 Ω
De 2 MVA a 10 MVA	De 2 a 5 Ω
Mayor a 10 MVA	De 1 a 2 Ω

El valor de la resistencia de una puesta a tierra es importante ya que es el camino que sigue la corriente durante una descarga y forma parte de la impedancia al impulso de la resistencia, al pie de las estructuras o pórticos de la subestación. Bajo la influencia de altas densidades de corriente, el suelo que rodea los electrodos se ioniza o puede tener descargas parciales. Como consecuencia, el valor impulso de la resistencia del pie de los pórticos o estructuras con (dispensadores), es menor que el valor medido a frecuencia del sistema. La figura siguiente puede ser utilizada para estimar el valor de la resistencia impulso a partir del valor de la resistencia a frecuencia nominal del sistema.

Figura 20. **Valores de la resistencia impulso a partir de la resistencia de frecuencia nominal del sistema**



4.6 Materiales que se emplean en los sistemas de dispersión

Para cualquier tipo de instalación y en especial las subestaciones eléctricas, es conveniente emplear en la construcción de los dispersores, metales resistentes a la corrosión. Bajo esta consideración el cobre es, sin lugar a dudas, el metal mas adecuado.

Se pueden utilizar, sin embargo, metales ferrosos protegidos con un baño de zinc. Los perfiles, las varillas y los conductores que se usen como dispersores deben tener un diámetro no inferior a 8 mm; los platillos y planchas un espesor no menor de 3 mm, los perfiles no menor de 5 mm y las otras dimensiones transversales como mínimo 50 mm.

El diámetro de los hilos elementales de los conductores no debe ser inferior a 1.8 mm; el diámetro de los hilos correspondientes de la red debe ser de 3 mm o más. En caso de que se utilicen materiales ferrosos no protegidos con zinc, los espesores mínimos arriba indicados deberán ser aumentados en un 50%. Las uniones entre un dispersor o conductor de tierra deben ser lo suficientemente robustas y fuertes para soportar las fuerzas mecánicas debidas a movimientos eventuales y tener buena superficie de contacto, como mínimo un área cuando menos de 300 mm². De cualquier modo se debe poner mucho cuidado en los puntos de unión entre conductores y dispersores para evitar la posibilidad de alteraciones de los materiales por la presencia de reacciones electrolíticas y corrosión.

5 ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS PARA SUBESTACIONES MODULARES

5.1 Subestaciones modulares

El diseño de subestaciones modulares es una solución para áreas pequeñas, ventajosa que está siendo introducido en Guatemala, debido a que los equipos de maniobra y protección para líneas vienen en un conjunto modular, esto hace que sean más compactas y sencillas en el montaje, mantenimiento y operación. La instalación de este tipo de subestación puede ser en el ámbito urbano y rural, ya que el área que ocupa es mucho más reducido que el de una subestación convencional. Como toda subestación éstas sirven para elevar o bajar el nivel de tensión y manejar cantidades de potencia para transportar o distribuir energía eléctrica.

El uso de estas subestaciones tiene ciertas ventajas como:

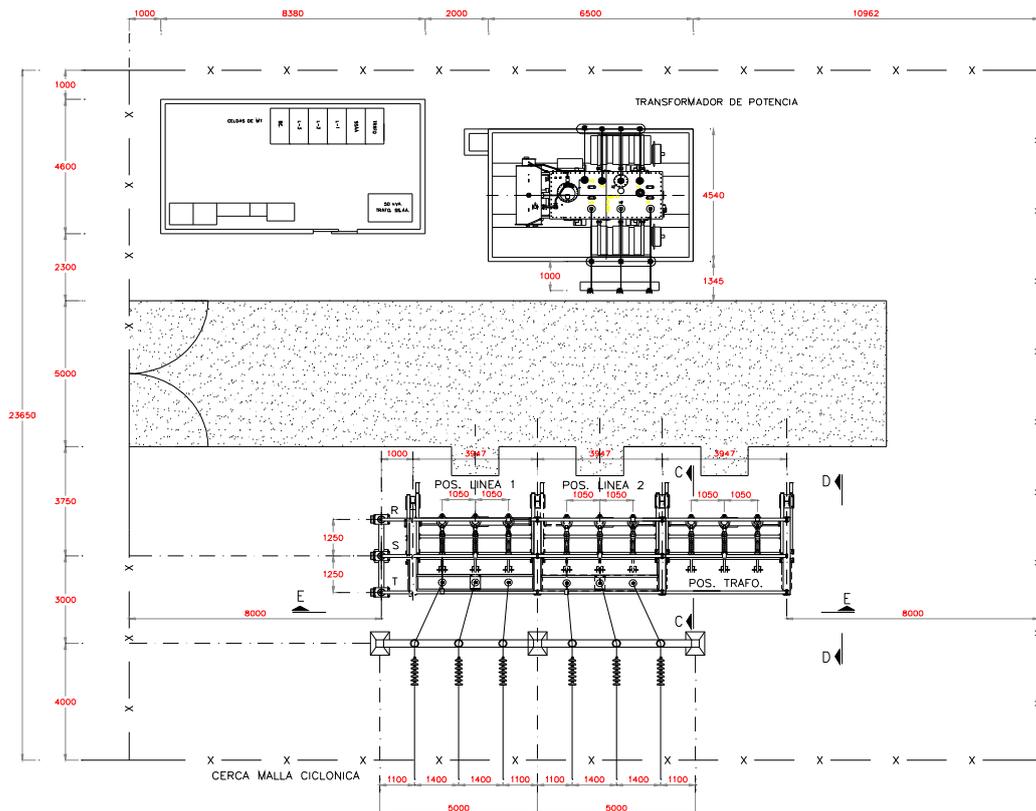
- a) Facilidad en la acometida de ampliaciones.
- b) Minimización del impacto ambiental.
- c) Facilidad y rapidez en el montaje.
- d) Alta fiabilidad al ser los armarios cableados en fábrica.
- e) Reducción de costes y tiempos en ingeniería, montaje y puesta en servicio.
- f) Reducción del área del terreno donde se ubique la subestación.

En este tipo de diseño, los campos de alta tensión de la subestación están a la intemperie, y la acometida de las líneas de alta tensión es aérea, formado por conjuntos modulares en los que se encuentran los equipos como el interruptor, los seccionadores, transformadores de tensión, transformadores de corriente y equipo de protección y medición.

Los campos de media tensión están dentro de una caseta y todos los equipos de maniobra y protección están en celdas encapsuladas en cámaras de gas SF₆, la acometida de las líneas de media tensión es subterránea y se realiza con cable blindado.

Los servicios auxiliares y control para media tensión se encuentran dentro de la misma caseta. En la figura 20 se muestra la planta de una subestación tipo con tres posiciones en el lado de alta tensión y ocho posiciones en el lado de media tensión.

Figura 21. Subestación modular vista de planta



5.2 Aplicación de modelos matemáticos para el análisis de la protección contra descargas atmosféricas

En esta sección se aplicará los modelos, que se estudiaron en los capítulos anteriores, para obtener resultados que sirvan posteriormente, para realizar una comparación técnica de los diferentes sistemas de protección contra descargas atmosféricas. Así como la utilización del paquete informático ATP.

Para determinar un sistema adecuado de protección utilizando pararrayos autovalvulares.

5.2.1 Sistema con pararrayos Franklin, utilizando el modelo electrogeométrico

Como se explicó en el capítulo dos, su esquema de protección es un cono en el cual el radio de protección de los equipos depende de la altura en donde se coloque el dispositivo de protección y de la corriente de descarga.

Valores de cálculo

Lo primero que es preciso determinar es la distancia de cebado D , para ello hay que tomar como punto de partida los valores de la corriente de descarga normalizados considerados en cada red.

Para la subestación modelo que se analizará, consideraremos los siguientes datos:

- Subestación modular, de 69/13.8 KV y de una capacidad instalada de 10/14 MVA.
- El lado de 69KV o de alta tensión tiene 2 posiciones de línea y una posición de transformador, las tres posiciones están a la intemperie.
- El área que ocupa la subestación es de 931 m².
- El campo de media tensión está compuesto por seis posiciones en donde tres son de línea, una de servicios auxiliares, otra de los condensadores y la posición de barra; éstas se encuentran dentro de una caseta y las salidas de línea hacia la red de distribución son en acometida subterránea.
- Altura del pórtico de entrada de línea 13 metros.

- Se considera una corriente de descarga de 10 KA.

Para este valor de corriente se parte de la ecuación 2.9 para obtener el valor de la distancia de cebado "D":

$$D_{(m)} = 8 \times i^{2/3} \dots\dots\text{Ecc. 2.9}$$

$$D = 8 \times 10^{2/3} = 37.5 \text{ m}$$

Conocida la distancia de cebado, es posible determinar los radios de protección (Rp) que ofrece la colocación de una punta de Franklin en determinado punto de la subestación.

Para obtener un resultado satisfactorio en la protección se propone instalar una punta Franklin en un poste metálico cerca del transformador de potencia y otras dos en el pórtico de llegada de línea, aplicando la ecuación 2.10 se tiene:

Para una altura del equipo (he) de 6m, y una altura del pórtico de entrada de línea (h) de 13m, distancia de cebado (S) = 37.5 m; el radio de protección (Rp) por cada punta franklin se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Rp = \sqrt{D^2 - (D - h)^2} - \sqrt{D^2 - (D - he)^2}$$

$$Rp = 8.1 \text{ m. para cada punta Franklin.}$$

Por lo tanto el área de protección es de 206 m² por cada punta Franklin.

Tabla VI. **Costos de suministro e instalación**

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio P/unidad	Total
2	Puntas Franklin de 6' x 5/8", con sistema de sostenimiento	ud.	Q 890.00	Q 1,780.00
1	Poste metálico de (12 metros)	ud.	Q 5,900.00	Q 5,900.00
1	Cimentación de concreto armado	ud.	Q 1,450.00	Q 1,450.00
8	Varillas de tierra cobre de 5/8 " x 10"	ud	Q 90.00	Q 720.00
60	Soldaduras <i>cadweld</i> para cable 4/0 para interconexión de la red de tierra	ud	Q 220.00	Q 13,200.00
830	Metros de cable de cobre desnudo 4/0 para bajadas y red de tierra.	ml	Q 40.50	Q 33,615.00
12	Conectores compresión paralelos para cable 4/0	ud	Q 40.00	Q 480.00
2	Conectores cable varilla GRC para cable de cobre 4/0.	ud	Q 60.00	Q 120.00

La inversión para llevar a cabo la instalación de este sistema en la subestación es de **Q 57,265.00**

5.2.2 Aplicación del modelo electrogeométrico para el análisis utilizando hilo de guarda

Siguiendo las normas de instalación y aplicando el modelo electrogeométrico se encuentra el esquema de protección deseado. Para ello es necesario saber la altura máxima del equipo a proteger.

La altura de las barras es de 6 m; localizadas a 5 m en la horizontal con respecto al hilo de guarda más cercano que se propone instalar para este sistema. Para obtener una protección adecuada se propone la instalación de dos hilos de guarda paralelos como se muestra en la figura 23. Es por eso que se utiliza las siguientes ecuaciones para definir gráficamente esta área adicional.

$$X1 = [S^2 - (d/2)^2 - (S - hw)^2]^{1/2} \dots\dots\text{Ecc. 5.1}$$

$$r = [S^2 - (S - he)^2]^{1/2} \dots\dots\text{Ecc. 5.2}$$

Para una altura del equipo (he) de 6m, y una altura del cable de guarda en el punto medio del claro (hw) de 13m, distancia de cebado (S) = 37.5 m y una separación entre cables (ds) de 14 m; el radio de protección y su área de protección utilizando la ecuación 5.1 y 5.2 son:

$$X1 = 23.2 \text{ m}$$

$$r = 17.75$$

$$\text{El área de protección } A = (17.75) (19) (2) + (19) (14) (2)$$

$$A = (674.5 + 532) \text{ m}^2 = \mathbf{1206.5 \text{ m}^2}$$

Con estos resultados se puede visualizar la zona de protección vista de planta y una sección en la figura 23.

Figura 23. Planta y elevación de la protección en la subestación con hilo de guarda

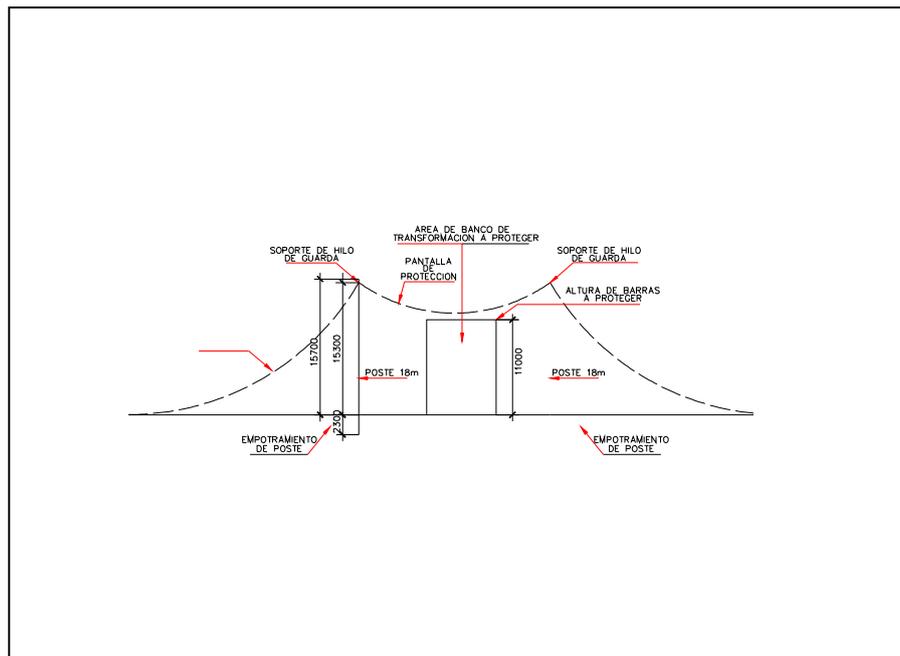
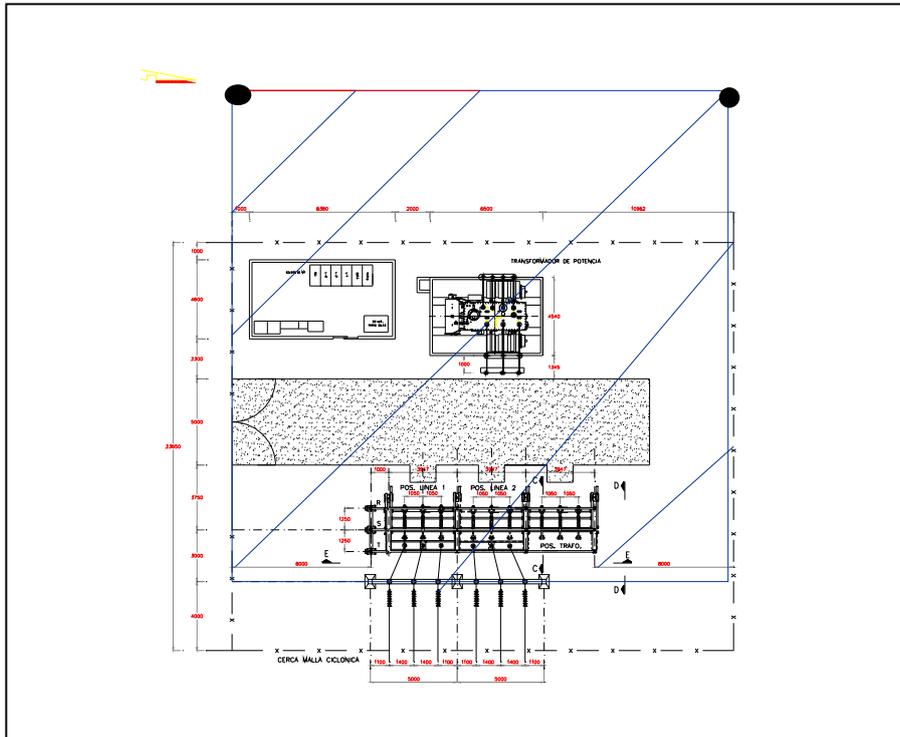


Tabla VII. **Costos de suministro e instalación de unidades constructivas**

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio P/unidad	Total
2	Postes de acero galvanizado por inmersión en caliente con platina de 14 m.	ud	Q 12,000.00	Q 24,000.00
50	Metros de cable de acero de 3/8" incluyendo herrajes para sujeción.	ml.	Q 75.80	Q 3790.00
860	Metros de cable de cobre desnudo 4/0 para bajadas y red de tierra.	ml.	Q 40.50	Q 34,830.00
62	Soldaduras <i>cadweld</i> para cable 4/0 para interconexión de la red de tierra.	ud.	Q 220.00	Q 13,640.00
8	Conectores de compresión para cable de acero de 3/8".	ud.	Q 25.00	Q 200.00
4	Remate preformado para cable de 3/8".	ud.	Q 35.00	Q 140.00
4	Conectores para cable 4/0 con derivación para 3/8".	ud.	Q 40.00	Q 160.00
8	Varillas de tierra	ud.	Q 90.00	Q 720.00
4	Conector paralelo para cable de Cu 4/0.	ud.	Q 100.00	Q 400.00
2	Cimentaciones de concreto armado.	ud.	Q 1,450.00	Q 2,900.00

La inversión para implementar este sistema en la subestación es de **Q 80,780.00**

5.2.3 Sistema de protección con pararrayos ionizantes

Como se describió anteriormente, su esquema de protección es un cono con una altura incrementada por el efecto ionizante, su radio de operación depende de la altura de instalación.

Como el área de protección que se necesita en la subestación es total, entonces se basa en el radio total del área que cubra toda la subestación.

h = altura eficaz del pararrayos

k = coeficiente de extensión del dispositivo

Para el siguiente estudio se utilizará un pararrayos ionizante tipo dinaspere a una altura de instalación de 7 metros colocado a un costado de la caseta de media tensión, el radio de protección para este pararrayos es de 45 metros a la redonda, cubriendo así toda el área de la subestación a proteger. El área de protección vista de planta es la que se muestra en la figura 24.

Figura 24. Esquema de protección vista de planta con pararrayos ionizante

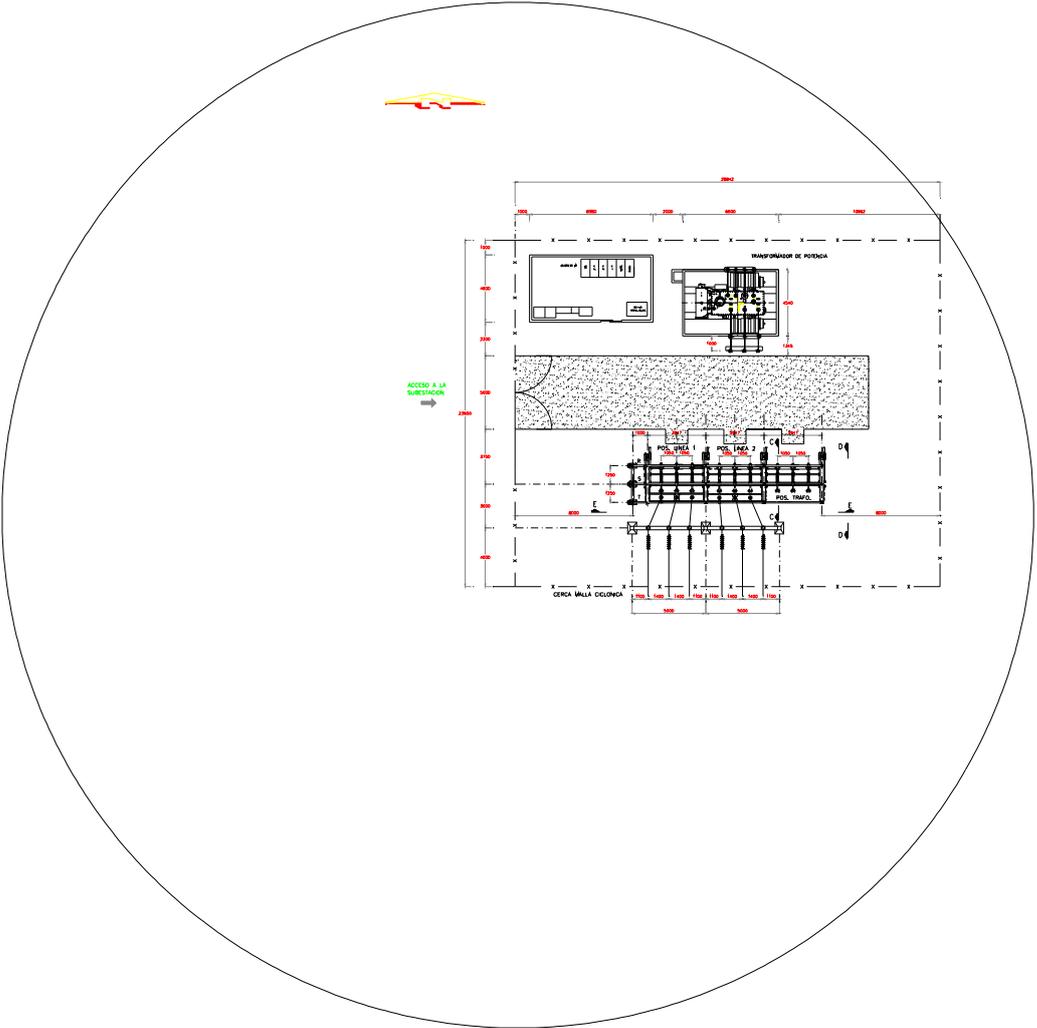


Tabla VIII. **Costos de suministro e instalación de unidades constructivas**

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio P/unidad	Total
1	Pararrayos ionizante, dinaspere sistema 3000 con mástil y sistema para PAT.	ud.	Q 45,000.00	Q 45,000.00
810	Metros de cable de cobre desnudo 4/0 para bajadas y red de tierra.	MI	Q 40.50	Q 32,805.00
8	Varillas de tierra	ud.	Q 90.00	Q 720.00
52	Soldaduras cadweld para cable 4/0 para interconexión de la red de tierra	ud.	Q 220.00	Q 11,440.00

La inversión para implementar este sistema en la subestación es de **Q 89,965.00**

5.2.4 Aplicación del paquete informático ATP para el análisis de la protección utilizando pararrayos autovalvulares.

En esta sección analizaremos la protección de la subestación modular de 69 KV frente a descargas atmosféricas, utilizando pararrayos autovalvulares, mediante simulaciones de impacto de rayos normalizados.

En la primera parte de este análisis se exponen los modelos de los elementos de la subestación utilizados en las simulaciones. En la segunda parte se exponen los resultados de las simulaciones realizadas para subestación tipo que se analiza en los otros sistemas.

5.2.4.1 Modelos utilizados

En este apartado se recogen los modelos de los elementos de la subestación utilizados en la simulación ATP. Se considera que:

- La resistividad del terreno donde se asienta la subestación es $\rho = 100 \Omega\text{-m}$.
- La frecuencia asociada al fenómeno transitorio producido por el rayo es de 50 KHz. Esta frecuencia es representativa de los fenómenos transitorios asociados a las “sobretensiones de frente muy rápido” producidas por rayos (CEI 71-1).

5.2.4.1.1 Modelo de línea aérea

La alimentación de la subestación es en 69 KV tensión nominal del sistema. La distancia entre las subestaciones de alimentación y de estudio es de 20 Km. La subestación de alimentación se modela como una fuente de tensión alterna equilibrada tipo AC-14 de ATP.

La entrada a la subestación se realiza mediante pórtico. La longitud del vano de línea que remata al pórtico es de 100 m. La descarga atmosférica tipo rayo se hace incidir en el apoyo del último vano antes de la entrada a la subestación.

5.2.4.1.2 Modelo de línea de media tensión

El modelo de línea de entrada de media tensión ha sido calculado a una frecuencia de 50 KHz., la entrada a las celdas se realiza con cable subterráneo.

5.2.4.1.3 Modelos de conductores

- Los tramos de cable de conexión de elementos de la subestación de longitud menor de 3m se modelan como una autoinducción $L = 1 \mu\text{H/m}$ (IEEE 1996).
- Los tramos de conductor de barra de tubo de aluminio 63/47 se modela como una línea de parámetros concentrados en PI. En longitudes cortas, en el estudio de transitorios, ATP aproxima las líneas de parámetros distribuidos por una conexión en cascada de cortos elementos en PI de parámetros concentrados. El modelo en PI es trifásico a una frecuencia de 50 KHz.

5.2.4.1.4 Modelo del cable subterráneo

El cable empleado es aluminio 150/80 de 69 KV. Los parámetros necesarios para el modelado de este cable han sido tomados de la hoja técnica Cálculos de líneas subterráneas según UNE 21144 de UFISA. La configuración geométrica de la terna es en trébol enterrada a 1.1m la frecuencia de cálculo de los parámetros es de 50 KHz.

5.2.4.1.5 Modelo de pararrayos de línea de 69KV

El modelo de pararrayos que propone el ATP es una resistencia no lineal, su característica tensión-corriente es un conjunto de tramos exponenciales.

La rutina auxiliar ZnO Fitter distribuida con el paquete ATP convierte los datos de la característica tensión-corriente residual del pararrayos (entrada) en los parámetros de la resistencia no lineal que describe el pararrayos.

Para todas las posiciones, el pararrayos es ABB P-EXLIM Q de tensión asignada $V_r = 69$ KV y tensión de servicio continuo $V_c = 53$ KV.

5.2.4.1.6 Modelo del pararrayos de línea de 13,8 KV (MT)

Los pararrayos seleccionados por UF son *soule (alstom)* de tensión asignada 13.2 KV, las autovalvulas cumplen con la especificación UNESA 6505, la corriente de descarga asignada es 10 KA.

5.2.4.1.7 Modelo de transformadores de medida y protección

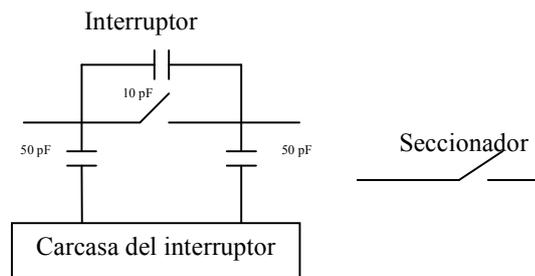
Los transformadores de tensión e intensidad han sido modelados por su capacidad a tierra, siguiendo las recomendaciones del IEEE para el modelado de fenómenos transitorios muy rápidos en subestaciones.

- Modelo del transformador de tensión. Éste se modela como una capacidad entre el punto de medida y tierra de 500pF.
- Modelo del transformador de intensidad. Éste se modela como una capacidad entre el punto de medida y tierra de 250pF.

5.2.4.1.8 Modelo del interruptor y seccionador

El modelo de interruptor adoptado es el propuesto por la IEEE 1996. El seccionador es un simple contacto abierto o cerrado. La figura 25 muestra los modelos monofásicos del interruptor y seccionador.

Figura 25. **Esquemas monofásicos de los modelos de interruptor-seccionador empleados en simulación**



5.2.4.1.9 Modelo del transformador de potencia

El transformador de potencia se modela como la capacidad a tierra de sus arrollamientos. Este modelo es la representación más sencilla posible en el margen de frecuencia de interés producidas por impulsos tipo rayo.

En este análisis no se estudia la transferencia de tensión al secundario del transformador producida por la sobretensión de rayo. En este caso, el modelo propuesto de capacidad a tierra resulta válido.

5.2.4.1.10 Modelo de la red de puesta a tierra

La red de tierras se ha modelado conforme a que la red de tierras lo compone una malla de conductores de cobre y de picas de puesta a tierra. Los conductores son de cable desnudo de cobre 4/0; enterrados 0.8m. Las varillas son de acero-cobre de diámetro de una pulgada y longitud de 4m.

Para calcular la resistencia e inductancia de los tramos de conductor horizontal el modelo desarrollado evalúa la resistencia, inductancia, capacidad y conductancia para una determinada configuración geométrica.

Los tramos de conductor horizontales se pueden aproximar por una rama formada por una resistencia y una inductancia, una primera formulación de la red de tierras puede despreciar los parámetros paralelo de capacitancia y conductancia. Entonces los valores de R y L se obtienen con las siguientes expresiones así como las resistencias de las varillas.

$$R = \frac{\rho c}{\pi (r^2 c - (rc - \delta)^2)} \dots\dots\dots \text{Ecc. 5.1}$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \left[\frac{2h}{rc} \right] \dots\dots\dots \text{Ecc. 5.2}$$

Donde ρc es la resistividad del conductor, δ es la profundidad de penetración, rc es el radio del conductor enterrado, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío.

5.2.4.2 Resultados del análisis con simulación para la subestación de 3 posiciones en el lado de AT

En esta sección se simula con el paquete ATP el comportamiento de la subestación de 69 KV con tres posiciones en configuración de barra simple, (configuración básica) al ser atacada por un rayo en cada una de las entradas de alta tensión.

Los rayos se modelan mediante descargas normalizadas de 10 KA y 8/20 μ s. En cada caso se presentan los resultados de la simulación de la descarga en la fase más desfavorable (la que produce mayores sobretensiones en el elemento más crítico de la subestación en cada caso).

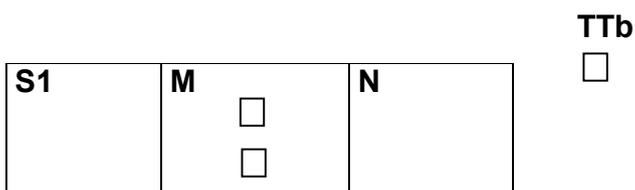
En este análisis las posiciones de las barras se han nombrado con la nomenclatura en la siguiente tabla.

Tabla IX. **Nomenclatura de las posiciones de AT**

Plano	TRAFO 1	LINEA 2	LINEA 1
Documento	S1	M	N

Los transformadores de medida de tensión están en el extremo de las barras más próximas a la posición N. La figura 26 muestra la disposición física de las posiciones en la subestación.

Figura 26. **Disposición física de las posiciones de AT en la subestación**



Todos los resultados se expresan en magnitudes unitarias tomando como base el nivel de aislamiento a impulso tipo rayo para el nivel de tensión de 72.5 KV. El nivel básico de aislamiento (BIL) considerado es 350 KV.

Todas las descargas atmosféricas se hacen incidir sobre la línea aérea de entrada a la subestación a 100m de la misma.

Las sobretensiones se expresan en valores por unidad del BIL correspondiente al nivel básico de aislamiento de la subestación. Se consideran peligrosas las sobretensiones superiores al 80% del BIL. En cada caso se presenta la sobretension de la fase más desfavorable.

La configuración modificada propone la siguiente protección frente a sobretensiones atmosféricas.

- Un juego de pararrayos en cada entrada de la línea de 69 KV a la subestación. Los pararrayos se sitúan junto al transformador de medida de tensión de línea previo al seccionador de barras de la posición.
- Pararrayos en el transformador de potencia T1. Los pararrayos se sitúan entre las bornas de alta tensión del transformador y su cuba.

La tabla 10 muestra sintéticamente los resultados de las sobretensiones en el transformador de potencia T1 y en los transformadores de tensión (PT's), cada fila de la tabla corresponde a las sobretensiones producidas por descargas de 10 KA y 8/20 μ s que entran a la subestación por cada líneas de alimentación de 69 KV (N y M).

Tabla X. **Resultados de la simulación de la protección**

Línea	Elemento	T1	PT's Barras
	N	0.367	0.528
	M	0.379	0.517

El esquema de protección propuesto en este análisis garantiza que ningún elemento de la subestación se ve afectado peligrosamente por sobretensiones debidas a descargas atmosféricas. Por lo tanto, el esquema de protección adecuado es el de la configuración modificada y es la que se propone para la protección contra las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas.

Tabla XI. **Precios de suministro e instalación de unidades constructivas**

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio P/unidad	Total
3	Pararrayos autovalvulares.	ud.	Q 8,700.00	Q 26,100.00
1	Estructura metálica de acero galvanizado	ud.	Q 15,000.00	Q 15,000.00
1	Cimentación de concreto armado.	ud.	Q 1,900.00	Q 1,900.00
8	Conectores paralelos para cable 4/0.	ud	Q 120.00	Q 960.00

La inversión de este sistema de protección contra sobretensiones, que es necesario para completar la protección a las descargas atmosféricas directas e indirectas es de **Q 43,960.00**

5.3 Análisis técnico de sistemas de protección

Con el objeto de efectuar una comparación entre los sistemas de protección se realizará una serie de comparaciones técnicas en las cuales se toman los siguientes puntos:

- Área de protección
- Montaje
- Mantenimiento
- Seguridad
- Estética

5.3.1 Área de protección

Como se ha visto anteriormente el área de protección de los sistemas pasivos está determinada por la altura donde se instalen los dispositivos de protección y de la cantidad de estos que se emplean en el diseño de la zona de protección; es claro observar que el sistema con pararrayos ionizante es el que proporciona un área mayor de protección que los otros sistemas por cantidad de unidades a emplear en la instalación. Sin embargo, para una mejor protección contra sobretensiones de origen interno es necesario instalar pararrayos autovalvulares como se analizó en el simulador ATP.

Para la protección total en la subestación modelo, se observa que el sistema con puntas Franklin es el que sigue al sistema ionizante, luego el hilo de guarda; debido a que el radio de protección del pararrayos ionizante es grande puede que esté sobrada el área de protección para la subestación. Y así el sistema que mejor conviene para la protección de la subestación por su tamaño es el de puntas Franklin.

5.3.2 Montaje

El sistema con pararrayos franklin presenta facilidad en la instalación en subestaciones, debido a que su peso y manipulación no presentan complicaciones para el montaje del dispositivo, y como se planteó anteriormente, en su esquema de protección, sólo es necesario instalar tres de estas puntas para lograr la protección adecuada en la subestación. El tiempo de ejecución con este esquema de protección es corto debido a que la cantidad de accesorios y dispositivos que forman el sistema es una cantidad pequeña, y como los dispositivos y accesorios se puede obtener con los proveedores locales, el suministro de los mismos no requiere de un tiempo de espera, con lo que la realización de un sistema con este dispositivo es una buena alternativa.

Para el sistema con hilo de guarda como se observa en el esquema de la figura 24, por lo cual protege completamente la subestación contra descargas atmosféricas es necesario la instalación de postes metálicos adicionales con su sistema de sostenimiento, esto conlleva a que la instalación de este sistema de protección, se vuelva más complicado que con puntas franklin y con ello el tiempo de ejecución es levemente más largo.

El sistema de protección utilizando pararrayos ionizantes no necesita una cantidad grande de accesorios para su montaje, por lo que éste se convierte en un sistema de fácil montaje, pero existe una exigencia en la manipulación y transporte, y es que debe hacerse con mayor cuidado en comparación con los otros tipos de dispositivos. Debido a que su área de protección es bastante grande sólo es necesario instalar uno de estos dispositivos en un mástil en un lugar alejado donde proteja a todo el equipo de la subestación y no produzca inducción en los equipos y barras de alta tensión.

En la aplicación del paquete ATP se pudo analizar que para tener un sistema de protección efectivo, la opción modificada es la indicada; para una buena protección contra sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, pero con esta opción se debe colocar pararrayos autovalvulares cercanos a las bornas de alta tensión del transformador, debido a que la conexión entre el equipo de maniobra y el transformador se realiza con cable de potencia con acometida subterránea o con barras aéreas, para ello es necesario utilizar cabezas terminales (mufas). Para instalar los pararrayos se hace necesario montar una estructura de soporte cerca de las bornas de alta tensión, por lo que el montaje de estos dispositivos para tal configuración, se hace más complicado que el de los otros sistemas.

5.3.3 Mantenimiento

Los sistemas formados con pararrayos franklin y con pararrayos autovalvulares presentan una gran ventaja en comparación con los otros sistemas, ya que el mantenimiento es mínimo, debido a que sólo es necesaria una inspección externa de las bajadas a tierra y los puntos de conexión en periodos de 6 meses. En cambio, para el sistema formado con hilo de guarda o jaula de Faraday se hace necesario realizar una inspección visual de los cables que lo forman y verificar los puntos de conexión en la parte superior con los demás cables y con la red de tierras, así como los puntos de sostenimiento del cable de acero en la parte superior de la jaula.

A veces se hace necesario cambiar algunos cables de guarda si estos presentan algún deterioro, lo que conlleva a la suspensión del servicio de energía, por lo que el mantenimiento con respecto a los otros dos sistemas antes mencionados es mayor.

Con el sistema formado con el pararrayos ionizante, el mantenimiento es menor pero más frecuente, debido a lo sofisticado del dispositivo ya que para verificar su correcta operación y funcionamiento es necesario realizar una inspección periódica tanto externa como interna, también es necesario revisar sus conexiones con la red de tierra, como del mástil que sostiene el dispositivo.

5.3.4 Seguridad

En la protección de subestaciones contra descargas atmosféricas el sistema formado con puntas franklin es bueno debido a que su medio de operación es bastante confiable complementado con pararrayos autovalvulares colocados en la entrada de las líneas para las sobretensiones internas. Como el área que ocupa la subestación no es grande, y teniendo la ventaja que en el diseño de este tipo de subestaciones el campo de media tensión está dentro de una caseta con todas sus acometidas de línea subterráneas, hace que la protección sea sólo en el campo de alta tensión. En lo que corresponde a su instalación en la subestación y la forma de sujeción con los pórticos no presenta riesgos de accidentes en el personal y en los equipos de alta tensión.

El hilo de guarda es un medio efectivo para blindar la subestaciones, pero presenta ciertos riesgos a la hora de una rotura de cualquier cable que forme el sistema, ya sea por envejecimiento o alguna mala sujeción del mismo. Por ejemplo, si el cable cayera sobre algún equipo o en las barras energizadas en el parque de alta tensión, podría causar accidentes y perjuicios en las personas y equipos que se encontrasen en la instalación, por lo que presenta más riesgos instalar este sistema en este tipo de subestación en comparación con el otro sistema antes mencionado.

La utilización de pararrayos ionizantes tiene cierta ventaja ya que no permite la formación de la descarga cerca de la subestación por la forma en que opera, pero si éste se averiara por cualquier motivo , cuando se presentaran tormentas o descargas en el lugar donde se encuentra situada la subestación, cabe la probabilidad de que alguna descarga incida en la subestación sin que la protección actúe. Debido a esto, podría presentarse perjuicios en los equipos si incidiera una descarga en la subestación.

Los pararrayos autovalvulares en buenas condiciones son de alta confiabilidad en su operación para eliminar y drenar cualquier sobretensión ocasionada por descargas y maniobra de interruptores. Este dispositivo se puede, a veces, visualizar cuando estos presentan algún defecto ya que pueden estar flameados, esto se puede observar superficialmente. Como en el sistema que se propone la instalación del dispositivo estaría en puntos en donde las personas no corren mayor peligro si se encuentran dentro de la instalación, un sistema utilizando este tipo de dispositivo para la protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas no presenta mayores riesgos en las personas y equipos.

5.3.5 Estética

El aspecto estético de una subestación no conlleva en sí, mucho tecnicismo y podría obviarse al hacer un análisis comparativo entre varias alternativas de ejecución. Pero al involucrarse mayores tensiones y cargas de distribución de energía eléctrica, la subestación entra ya dentro del perímetro urbano y su integración dentro del conglomerado arquitectónico, este es un punto a considerar.

Dentro de los cuatro sistemas que se comparan, los que presentan mayores atributos para mantener la arquitectura en la subestación son el sistema con pararrayos franklin y el ionizante, ya que su instalación no cambiaría en mucho el diseño de la subestación modular, pero los otros dos sistemas cambian un poco el esquema arquitectónico de la subestación y con ello no se mantendría el diseño modular y estético de la subestación dentro de un perímetro urbano.

Tabla XII. **Resumen de factores técnicos de cada sistema**

Sistema Factor	Puntas franklin	Hilo de guarda	Ionizante
Área de protección	Pequeño	Pequeño	Grande
Montaje	Fácil	Complicado	Fácil
Mantenimiento	Mínimo	Grande	Mínimo
Seguridad	Muy buena	Buena	Muy buena
Estética	Buena	Mala	Buena

5.4 Análisis económico

En la realidad al hacer un estudio de un proyecto o mejoras en el mismo, en el que se consideran varias alternativas posibles, es necesario tomar en cuenta los aspectos económico y técnico.

Desde el punto de vista técnico deben efectuarse todos los cálculos que nos conduzcan a conocer todos los parámetros en la protección contra descargas y muchos datos más que sirven para llegar a una solución técnica tendiente a lo ideal.

En la práctica debe existir una conjugación entre lo técnico y lo económico, dado que la solución técnica ideal siempre resulta ser honerosa, nunca es totalmente aceptada y la solución más económica tampoco es totalmente recomendable porque a veces no cumple con algunas de las especificaciones técnicas.

Debido a las razones anteriores, se tratará de analizar los sistemas de protección contra descargas atmosféricas, en subestaciones, también desde el punto de vista económico.

En la tabla XII, se muestra la inversión para la implementación de cada sistema de protección en una subestación modular, basados en los resultados que se obtuvieron en las secciones anteriores de este capítulo, así como los costos de mantenimiento, como otros datos que nos servirán para el análisis económico de alternativas.

Tabla XIII. **Cuadro de resumen de inversión y costos de sistemas**

Sistema	Precio de suministro e instalación	Costo mantenimiento y operación anuales	Años de vida
Alternativa 1. Puntas franklin	Q 57,265.00	Q 800.00	20 años
Alternativa 2. Hilo de guarda (jaula de Faraday)	Q 80,780.00	Q 1,200.00	16 años
Alternativa 3. Pararrayos ionizante	Q 89,965.00	Q 1,000.00	18 años
Sistema con. Pararrayos autovalvulares	Q 43,960.00	Q 800.00	20 años

Para el análisis de alternativas se empleará el método del valor presente cuando el periodo de estudio de las vidas de los sistemas es desigual. Se utilizará una tasa de interés del 10%; los demás datos para realizar el estudio se tomará de la tabla 13.

Para la aplicación del método del valor presente, es necesario conocer lo siguiente:

A = Inversión inicial

D = costos de mantenimiento anual

n = Años de vida del sistema a emplear

I = Tasa de interés

P/A = USPWF = Factor del valor presente serie uniforme

A/P = CRF = Factor de recuperación de capital

AC = Costo anual de cada alternativa

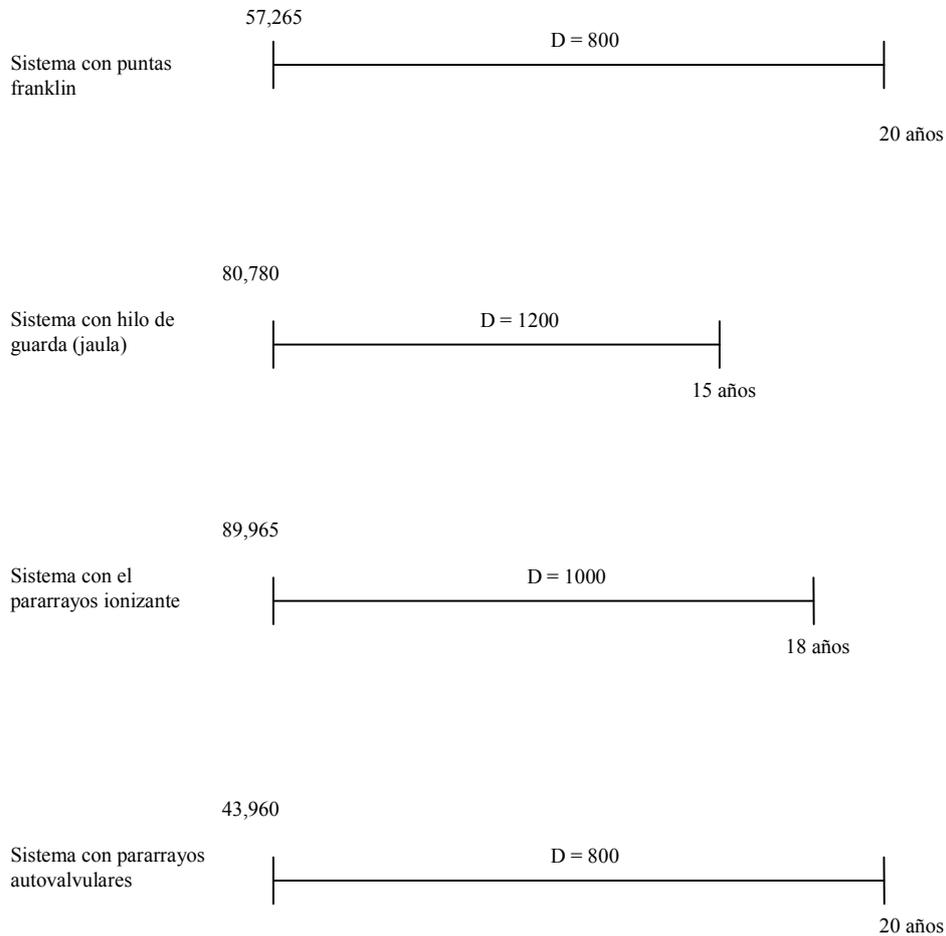
PW = Costo del valor presente de cada alternativa.

Donde:

$$P/A = USPWF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \dots\dots\text{Ecc. 5.3}$$

$$A/P = CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \dots\dots\text{Ecc. 5.4}$$

Con los datos de la tabla 12 del resumen económico, se esquematiza las siguientes series uniformes de vida y costos de los sistemas de protección.



Para la evaluación de las alternativas se hará con el método del valor presente y así se sabrá cual es la mejor opción económica. Para el análisis con el método económico del valor presente, se tomará como base el sistema con la vida económica más corta. Para encontrar el valor presente equivalente (PWe) para cada sistema, como se muestra a continuación.

Sistema con puntas franklin

$$PWe_1 = [57265 (A/P , 20) + 800] (P/A, 16) = \mathbf{Q 59,006.20}$$

Sistema con hilo de guarda o jaula de Faraday

$$PWe_2 = 80780 + 1200 (P/A, .10, 16) = \mathbf{Q 88,955.60}$$

Sistema con pararrayos ionizante

$$PWe_3 = [89965 (A/P , 18) + 1000] (P/A, 16) = \mathbf{Q 81,213.00}$$

Sistema complementario con pararrayos autovalvulares

$$PWe_4 = [43960 (A/P , 20) + 800] (P/A, 16) = \mathbf{Q 46,753.80}$$

Entonces tenemos que, el valor presente equivalente para cada una de las tres alternativas, considerando el sistema complementario con pararrayos autovalvulares seràn los siguientes:

$$\mathbf{PWe (alternativa 1) = PWe_1 + PWe_4 = Q 105,760.00}$$

$$\mathbf{PWe (alternativa 2) = PWe_2 + PWe_4 = Q 135,709.40}$$

$$\mathbf{PWe (alternativa 3) = PWe_3 + PWe_4 = Q 140,593.45}$$

Comparando los resultados para los tres sistemas, para la protección contra descargas atmosféricas en las subestaciones modulares, se podría deducir rápidamente que resulta más económico utilizar las puntas franklin, después tenemos el sistema con hilo de guarda, y por último tenemos la protección con el sistema de pararrayos ionizante, que por el tipo de protección que se necesita es necesario invertir más en accesorios para su instalación.

Es evidente que a estos tres sistemas de protección contra impactos directos de rayo deba asociar, el costo del sistema con pararrayos autovalvulares, debido a que ninguno de estos tres sistemas protege contra sobretensiones ocasionadas por las descargas atmosféricas.

El sistema que presenta costos más elevados es el sistema de jaula de faraday o hilo de guarda, principalmente por las estructuras que hay que instalar en la subestación y por sus costos de mantenimiento anual; en el análisis que se llevó con los dos métodos muestra que para este tipo de subestaciones el sistema con pararrayos ionizantes es un poco más elevado debido a lo sofisticado que es el equipo y a que el área de protección es grande y sobrada aunque sólo se utilice un dispositivo. Quizá en otro tipo de instalación o subestaciones con mayor área, este sistema sea más económico que los otros.

CONCLUSIONES

1. La teoría electromagnética es de suma utilidad para ir comprendiendo de una forma más completa, el fenómeno y las consecuencias que puede causar el impacto de una descarga atmosférica en las instalaciones eléctricas, así como la elaboración de nuevos modelos matemáticos.
2. Las descargas atmosféricas por su naturaleza y por sus efectos directos e indirectos causan daños, sin embargo, existen varios sistemas de protección que ayudan a minimizar estos daños dependiendo de la localización de los dispositivos de protección.
3. Para mantener la continuidad del servicio eléctrico y disminuir los riesgos en las personas e instalaciones, se hace necesario protegerlas contra cualquier descarga atmosférica y sobretensiones, ya que éstas de una u otra manera provocan incidencias en las redes eléctricas de las cuales las subestaciones forman parte. Las sobretensiones pueden alcanzar valores tales que dañen el aislamiento de los equipos que están dentro de la subestación, produciendo así un arco de voltaje o (flameo) que puede ocasionar una falta en el sistema, lo cual implicaría una incidencia en la continuidad del servicio de transmisión y distribución de energía eléctrica. Es por ello que una buena coordinación de aislamiento es importante para minimizar estas incidencias en las subestaciones.

4. Los sistemas pasivos de protección, utilizados desde mucho tiempo atrás, siguen siendo los métodos más utilizados para controlar la energía del rayo. Por las necesidades y por el crecimiento en la tecnología se han ido modificando los mecanismos y formas de instalación y operación. Con el avance en la tecnología se han creado los sistemas de protección activos, que han mejorado el área de protección, pero algunos son dañinos para el ambiente, estos quizás sean más eficientes y eficaces en instalaciones que tengan mayor área, pero en subestaciones resultan no ser tan ventajosos.
5. Por las ventajas económicas y técnicas el sistema con puntas franklin es más adecuado para la protección de las subestaciones eléctricas tipo modular seguido del pararrayos ionizante y el hilo de guarda, debido a que este tipo de subestación el área que ocupa es pequeña en comparación con otras instalaciones, este sistema tiene más ventajas que los otros.
6. Con el avance de los programas de computación es posible realizar simulaciones de las descargas y sus efectos que producirían en las subestaciones, el ATP es un programa de simulaciones que ayuda a realizar un mejor análisis técnico para evaluar la localización de los dispositivos de protección contra sobretensiones y así hacer que sea más eficiente su protección.

RECOMENDACIONES

1. Seguir investigando y realizando programas de simulación para el análisis de la protección contra descargas atmosféricas y sobretensiones en subestaciones y equipos eléctricos.
2. Estudiar y analizar las formas de operación de los dispositivos nuevos de protección que ofrecen los mercados y los nuevos sistemas no convencionales, para la protección de descargas atmosféricas en las subestaciones.
3. En nuestro país se deben obtener más datos estadísticos, en regiones con niveles cerámicos altos para elaborar mejor los sistemas de protección.
4. Debido a las ventajas económicas y técnicas para la protección contra descargas directas de rayo en subestaciones modulares es importante utilizar el sistema con puntas franklin y para sobretensiones internas los pararrayos autovalvulares en las entradas y salidas de líneas.
5. Cuando se construya cualquier sistema de protección contra descargas atmosféricas, todas las uniones, derivaciones y empalmes deben fijarse o soldarse de la mejor manera posible para evitar falsos contactos y tensiones de contacto.

6. Para una subestación es necesario establecer un programa de mantenimiento anual para el sistema de protección, con el objeto de mantener un buen funcionamiento del sistema, debido a la importancia que tiene una subestación en un sistema interconectado.

7. En cualquier sistema de protección antes de instalar la red de tierras se debe establecer las características de los equipos de la subestación a proteger y del suelo, de acuerdo a los estándares de las normas ANSI/IEEE 81/1983.

BIBLIOGRAFÍA

1. Enríquez Harper Gilberto. **Fundamentos de instalaciones eléctricas de media y alta tensión**. México: Editorial Limusa, s.a.
2. *Electrical Insulation Magazine*. “**A publication of dielectrics & electrical insulation society**”. Revista IEEE, Estados Unidos January/February 2000.
3. Eriksoon A, J. “**An improbad electrogeometric model for transmission line shielding analysis**”, IEEE Trans. On power delivery, vol pwr-d-2, pag 871, julio 1987.
4. Hermoso, B. y Martínez del Cid, **Riesgos por impactos de rayos en las instalaciones eléctricas, montajes e instalaciones**. s.l., s.e., 1998.
5. Hayt W. H. **Teoría electromagnética**. México: Editorial McGraw Hill ,1974.
6. Hermoso, B. y Martínez del Cid. **Protección contra el rayo de redes eléctricas de media y baja tensión, sobretensiones eléctricas**. España: Iberdrola, Universidad Publica de Navarra, 1996.
7. Instituto de investigación Tecnológica-Unión Fenosa, **Protección frente a sobretensiones de origen atmosférico**. Madrid: s.e., 1996.
8. Instituto de Investigación Tecnológica-Unión Fenosa. **Utilización del hilo de guarda en líneas de 69 KV**. Madrid: s.e., 2000.

9. Martínez Velasco Juan A.. **Cálculo de sobretensiones en sistemas eléctricos**, (curso sobre coordinación de aislamiento en alta tensión), Madrid: s.e., 1999.
10. Taylor George A. **Ingeniería Económica, toma de decisiones**. México: Editorial Limusa,1994.
11. Torres H. “Qué tan eficaces son los modernos dispositivos no convencionales de protección contra rayos”, **Revista AEIUN**, (Bogotá), pag 10-25. julio 2000.