



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

**DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO
PERTENECIENTE AL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008-2018**

Oscar Arnoldo Aldana Quiroa

Asesorado por el Ing. José Antonio Morataya Cerna

Guatemala, mayo de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO
PERTENECIENTE AL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008-2018**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OSCAR ARNOLDO ALDANA QUIROA

ASESORADO POR EL ING. JOSE ANTONIO MORATAYA CERNA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NOMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Morataya Ramos
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO
PERTENECIENTE AL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008-2018**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica, con fecha octubre de 2012.



Oscar Arnaldo Aldana Quiroa

Guatemala, 28 de enero de 2013

Ingeniero
Francisco Javier González López
Coordinador Área Potencia
Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero González:

Por este medio tengo a bien informarle que he realizado la revisión técnica del Trabajo de Graduación titulado "DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO PERTENECIENTE AL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008-2018" desarrollado por el estudiante Oscar Arnoldo Aldana Quiroa; carnet número 2001-21756, por lo cual considero que el trabajo de graduación cumple con el alcance y los objetivos definidos para su desarrollo, habiéndolo encontrado satisfactorio en su contenido y resultados, sometiendo a su consideración la aprobación del mismo, siendo responsables del contenido técnico el estudiante y el suscrito, en calidad de asesor.

Sin otro particular,

Atentamente,

José Antonio Morataya Cerna
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 8894


Ing. José Antonio Morataya Cerna
Colegiado 8894
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 15. 2013.

Guatemala, 8 de MARZO 2013.

Señor Director

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
“DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO PERTENECIENTE AL
PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008 –
2018” del estudiante Oscar Arnoldo Aldana Quiroa, que cumple
con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López,
Coordinador Área Potencia



SRO



REF. EIME 15. 2013.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; OSCAR ARNOLDO ALDANA QUIROA titulado: “DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO PERTENECIENTE AL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008 - 2018” procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 12 DE ABRIL 2013.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 346 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA EL RANCHO PERTENECIENTE AL PLAN DE EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE 2008-2018**, presentado por el estudiante universitario: **Oscar Arnoldo Aldana Quiroa**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 23 de mayo de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la vida, porque nunca decayeron sus misericordias, y su amor me ha permitido culminar este sueño.
- Mis padres** Gracias por el apoyo brindado durante tanto tiempo, gracias por los sacrificios, por el esfuerzo realizado para asegurar mi educación y sobre todo por los principios que me han enseñado.
- Mis hermanos** Por la ayuda que me brindaron, algunos renunciando a sus sueños para que lograra esta meta. Deseo que este acto sea una muestra de que con la búsqueda de Dios, esfuerzo, trabajo y actitud positiva, los objetivos pueden cumplirse.
- Mi abuela** Por la esperanza y confianza que siempre tuvo hacia mí, alentándome en la búsqueda de Dios para lograr todos mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS A:

- Mis padres** Carlos Aníbal Lemus Lemus y Irma Rosario Quiroa Carrillo, por darme su apoyo incondicional, enseñarme los principios, cristianos, éticos y morales que siempre me servirán pero sobre todo por su amor.
- Mis hermanos** Osman Magdiel, Libny Imer, Carlos Jacob, Zendi Eunice e Ilsi Abigail Lemus Quiroa, por darme cariño y hacerme sentir todo el tiempo en casa.
- Mi abuela** María Carrillo, por apoyarme en cada uno de esos momentos, por todos los cuidados y atenciones que me ha brindado en la vida.
- Mis tíos** Carlos Quiroa, por el apoyo incondicional en mi niñez y por aceptarme como uno de sus hijos, Edgar Quiroa, por sus consejos a enfocar mi vida en la búsqueda de Dios.
- Mi asesor** Por sus consejos y apoyo que me brindó en la elaboración de este trabajo de graduación, por el tiempo que dedico a la revisión así como las ideas compartidas para la mejora de este trabajo.

Mis amigos	Edgar de León Navarro, Oscar Robles Soria, Mario Morales Abril, con quienes compartimos proyectos, desvelos y satisfacciones en cada uno de los cursos.
Antonio García	Gracias por la confianza depositada en mi carrera profesional, y por impulsarme a culminar el presente trabajo.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria dentro de sus aulas.
La Comisión Nacional de Energía Eléctrica	Gracias por permitirme ingresar al campo profesional, ejercer mi carrera y por ser ese instrumento de aprendizaje constante.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES.....	1
1.1. Electromagnetismo	1
1.2. Carga eléctrica.....	2
1.3. Ley de Coulomb.....	2
1.4. Corriente eléctrica.....	3
1.5. Campo eléctrico	4
1.5.1. Intensidad de campo eléctrico.....	5
1.5.2. Flujo del campo eléctrico	6
1.6. Campo magnético.....	6
1.6.1. Flujo magnético.....	7
1.7. Potencial electrostático	8
1.8. Dipolo eléctrico	9
1.9. Dieléctrico	10
1.10. Carga inducida.....	10
1.11. Sobretensiones.....	10
1.11.1. Tipos de sobretensiones	11
1.11.2. Sobretensiones externas	17
1.11.3. Sobretensiones internas	18

1.11.4.	Tensiones continuas	18
1.11.5.	Sobretensiones temporales	18
1.11.6.	Sobretensiones de frente lento	19
1.11.7.	Sobretensiones por fallas y despeje de fallas.....	21
1.11.8.	Sobretensiones por descargas atmosféricas de frente lento.....	22
1.11.9.	Sobretensiones por descargas atmosféricas de frente rápido sobre las subestaciones	22
1.11.10.	Sobretensiones debidas a operaciones de maniobra y fallas.....	23
1.11.11.	Sobretensiones de frente muy rápido	25
2.	CONCEPTO DE APANTALLAMIENTO.....	27
2.1.	Apantallamiento	27
2.2.	Origen de la descarga atmosférica	27
2.2.1.	El líder y la formación del rayo.....	28
2.3.	Teoría de formación de una descarga atmosférica.....	30
2.3.1.	Teoría de Simpson	30
2.3.2.	Teoría de Elster Geitel	31
2.3.3.	Teoría de Wilson.....	31
2.3.4.	Teoría de los Cristales de Hielo.....	32
2.4.	Características de corriente durante una descarga	33
2.5.	Distribución probabilística de corriente de una descarga	34
2.6.	Determinación de la densidad de descargas atmosféricas.....	35
2.6.1.	Nivel isoceráunico.....	35
2.6.1.1.	Densidad de rayos eléctricos a tierra.....	36
2.6.1.2.	Mapa Isoceráunico de Guatemala	37
2.7.	La descarga atmosférica como onda viajera	39

2.8.	Efectos de las descargas atmosféricas en subestaciones	40
2.9.	Dispositivos utilizados para el apantallamiento	41
2.9.1.	Cables de guarda	41
2.9.2.	Puntas	42
2.9.3.	Mástiles	43
2.10.	Métodos de diseño de apantallamiento	43
2.10.1.	Método de ángulos fijos	43
2.10.2.	Método de curvas empíricas	46
2.10.3.	Modelo electrogeométrico	49
2.10.3.1.	Distancia de descarga crítica	49
2.10.3.2.	Corriente crítica de flameo	51
2.10.3.3.	Impedancia característica	52
2.10.3.4.	Radio corona	53
2.10.3.5.	Altura efectiva del cable de guarda	54
2.10.3.6.	Protección con un solo mástil	55
2.11.	Sistema de red de tierra	56
2.11.1.	Factores básicos para el diseño de una red de tierra	57
2.11.2.	Tensiones de paso y de contacto	58
2.11.3.	Disposiciones básicas de la red de tierra	60
3.	INFORMACIÓN BÁSICA DE LA SUBESTACIÓN	61
3.1.	Plan de Expansión del Sistema de Transporte (PET)	61
3.2.	Clasificación de la subestación	63
3.3.	Tecnología de la subestación	64
3.4.	Configuración de barra	65
3.5.	Equipo principal de la subestación	68
3.5.1.	Interruptor de potencia	68
3.5.2.	Seccionadores	71

3.5.3.	Pararrayos	74
3.5.4.	Transformadores de instrumento.....	76
3.5.5.	Transformador de potencia.....	79
3.6.	Nivel isocerámico de la región.....	81
4.	DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN	83
4.1.	Premisas de diseño	83
4.2.	Cálculo de la altura promedio de conductor	84
4.3.	Cálculo del radio corona	85
4.4.	Cálculo de la impedancia característica	88
4.5.	Cálculo de la corriente crítica de flameo.....	89
4.6.	Cálculo de la distancia de descarga crítica.....	90
4.7.	Cálculo de la altura efectiva del cable de guarda	91
4.8.	Apantallamiento de la subestación El Rancho.....	93
	CONCLUSIONES.....	95
	RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	APÉNDICE	101
	ANEXO	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fuerza de atracción y repulsión entre dos cargas	3
2.	Líneas de campo eléctrico entre dos cargas	5
3.	Líneas de campo magnético.....	7
4.	Clasificación de sobretensiones	13
5.	Desplazamiento del líder en la atmósfera.....	29
6.	Cargas en una gota de agua	31
7.	Escenarios de una descarga atmosférica	32
8.	Frente de onda de la corriente de una descarga	33
9.	Probabilidad de corriente pico de una descarga.....	35
10.	Curva de descargas en función de la latitud.....	36
11.	Onda de voltaje y corriente en línea de impedancias	39
12.	Ángulos fijos para cables de guarda.....	44
13.	Ángulos fijos para mástiles	44
14.	Protección con curvas para un mástil	47
15.	Protección con curvas para dos mástiles.....	47
16.	Protección con curvas para un hilo de guarda.....	48
17.	Protección con curvas para dos hilos de guarda	48
18.	Esfera con radio igual a la distancia de descarga.....	50
19.	Protección por un mástil	55
20.	Tensión de paso	59
21.	Tensión de contacto.....	59
22.	Unifilar configuración interruptor y medio.....	67
23.	Perfil configuración interruptor y medio.....	68

24.	Operación de un interruptor ante una falla	70
25.	Nivel de aislamiento a especificar para seccionadores	73
26.	Esquema de un pararrayos convencional	75
27.	Apantallamiento con cable de guarda	91

TABLAS

I.	Sobretensiones obtenidas en ensayos de tensión	17
II.	Sobretensiones y forma de ondas normalizadas	34
III.	Falla de apantallamiento en función de altura y ángulo	45
IV.	Detalle de las obras del PET 2008-2018.....	62
V.	Fuerzas mecánicas sobre terminales de seccionadores.....	72
VI.	Clasificación de pararrayos según IEEE Std. C62.11	75
VII.	Límites de error para PT's de medición.....	76
VIII.	Límites de error para PT's de protección	77
IX.	Límites de error para CT's de medición	78
X.	Límites de error para CT's de protección	79
XI.	Datos para cálculo de la altura promedio de conductor h_{av}	84
XII.	Datos para cálculo del radio corona R_c	86
XIII.	Radio corona 230 kilovoltios para una tolerancia de 0,001	87
XIV.	Radio corona 69 kilovoltios para una tolerancia de 0,001	87
XV.	Datos para cálculo de la impedancia característica Z_0	88
XVI.	Datos para cálculo de la corriente crítica de flameo I_c	89
XVII.	Apantallamiento para el campo de 230 kilovoltios	93
XVIII.	Apantallamiento para el campo de 69 kilovoltios	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h_{\min}	Altura a mitad del vano
h_e	Altura efectiva del cable de guarda
h_{av}	Altura promedio del conductor de fase
I_c	Corriente crítica de flameo
I	Corriente eléctrica
S_m	Distancia de descarga crítica
Φ	Flujo de campo eléctrico
$\delta(s)$	Flujo de campo magnético
F	Fuerza eléctrica
E_0	Gradiente de tensión límite
Z_0	Impedancia característica

E	Intensidad de campo eléctrico
kA	Kiloamperios
KHz	Kilohertzio
kV	Kilovoltios
w	Longitud de una cadena de aisladores
V_c	Máxima tensión soportada por el aislamiento
MHz	Megahertzio
m	Metros
N_g	Número de rayos por kilómetro cuadrado
Ω	Ohmio
P(I)	Probabilidad de magnitud de corriente
R_c	Radio corona
TCF	Tensión crítica de flameo
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers

GLOSARIO

Apantallamiento	Sistema de protección que se utiliza para proteger a personas e instalaciones eléctricas contra descargas atmosféricas.
BIL	Nivel básico de aislamiento al impulso de rayo.
Carga	Característica fundamental de las partículas elementales como los electrones y protones.
Castillete	Es la estructura o armazón diseñada para sostener el hilo o cable de guarda en el sistema de apantallamiento.
Coordinación de aislamiento	Proceso en el cual se coordina los niveles de protección con los niveles de aislamiento.
Descarga atmosférica	Transferencia de carga en la atmósfera, también conocida como rayo.
Diagrama unifilar	Simplificación de un sistema eléctrico, representado por medio de una línea y de símbolos normalizados, para equipos asociados a una subestación.

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.
Nivel isocerámico	Valor que indica el número promedio de días de tormenta al año en una región en particular.
Rigidez dieléctrica	Intensidad del campo eléctrico para el cual un material deja de ser un aislador y se convierte en un conductor.
Sistema o red de tierra	Conjunto de elementos conductivos en una subestación que sirven para drenar a tierra sobrecorrientes que pueden dañar los equipos.
Sobretensión	Variación repentina de voltaje con relación a un nivel establecido y que afecta a los sistemas eléctricos de potencia.
Tensión	Voltaje o diferencia de potencial efectiva, entre dos conductores o entre un conductor y tierra.
Valor por unidad (pu)	Es la razón del valor de una magnitud al valor base expresado como un decimal.

RESUMEN

Por medio del presente trabajo de investigación se da a conocer el diseño del sistema de apantallamiento, para la subestación eléctrica El Rancho, la cual pertenece a las obras del Plan de Expansión del Sistema de Transporte PET-2008-2018, dicha subestación debe cumplir con los parámetros de calidad en cuanto a continuidad del servicio de energía eléctrica, así como el aumento en la confiabilidad del Sistema Nacional Interconectado.

El propósito del sistema de apantallamiento, es proteger al personal y equipo de la subestación contra descargas atmosféricas directas, los dispositivos a seleccionar, así como los parámetros de diseño para realizar el apantallamiento, están directamente vinculados con el nivel isocerámico de la región donde se encontrará instalada la subestación, reduciendo así la probabilidad de que una descarga impacte directamente al personal o los equipos debido a la falla del sistema de apantallamiento.

Se realizó una breve explicación de los conceptos básicos y generalidades que describen los principios del sistema de apantallamiento, conceptos como el potencial electrostático, dieléctrico, entre otros. Además se dan a conocer los tipos de sobretensiones que existen así como las causas que pueden provocarlas, estos conceptos se encuentran contenidos en el capítulo 1.

Posteriormente en el capítulo 2 se describe el concepto del apantallamiento, para lo cual es necesario tener en consideración las implicaciones de una descarga atmosférica, los dispositivos que son generalmente utilizados en el diseño de un sistema de apantallamiento, así

como los métodos utilizados para el diseño de dicho sistema, acorde a las normas internacionales que son empleadas en el diseño de subestaciones eléctricas.

Es necesario para el diseño del sistema de apantallamiento, contar con la información básica de la subestación eléctrica El Rancho, dicha información la comprende el aislamiento de la subestación, nivel isoceraúnico de la región en la cual se encontrará instalada, el equipo principal a proteger por el apantallamiento, entre otros. Además, se expone de forma general el Plan de Expansión del Sistema de Transporte, en lo relacionado a la subestación anteriormente mencionada, lo anterior se puede observar en el capítulo 3.

Como se podrá observar se presentará el diseño del sistema de apantallamiento, para lo cual se dará a conocer la memoria de cálculo necesaria para el dimensionamiento de los parámetros, que influyen en el diseño del apantallamiento de la subestación eléctrica El Rancho. El cálculo es realizado con base en los niveles de tensión a los cuales estará operando la subestación, así como la consideración de la importancia del apantallamiento derivado a que dicha subestación se encontrará ubicada en una de las regiones con mayor índice de descargas atmosféricas en la República de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Determinar y conocer el sistema de apantallamiento, para evitar descargas atmosféricas directas a los equipos de la subestación El Rancho, perteneciente al Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008-2018.

Específicos

1. Conocer las generalidades del sistema de apantallamiento, para descargas atmosféricas directas.
2. Conocer los dispositivos utilizados para proteger los equipos energizados y lograr el sistema de apantallamiento requerido.
3. Conocer los conceptos, y métodos de diseño del sistema de apantallamiento a implementar en la subestación eléctrica El Rancho.
4. Diseñar el sistema de apantallamiento de la subestación eléctrica El Rancho.

INTRODUCCIÓN

Previo a que se promulgara la Ley General de Electricidad en Guatemala, el sector eléctrico de Guatemala se caracterizaba por ser un sistema verticalmente integrado, derivado a la promulgación de dicha ley, todo el esquema del sector eléctrico ha cambiado, dando como resultado un esquema de libre competencia.

Debido al cambio del esquema, se estableció la creación de un ente que velara por el cumplimiento de la ley y su reglamento, por lo cual se crea la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), fungiendo como órgano técnico del Ministerio de Energía y Minas (MEM). La CNEE ha elaborado Planes de Expansión del Sistema de Transporte, con la finalidad de reforzar la topología de la red del sistema de transporte existente, mejorando la calidad de servicio, e incentivando el crecimiento del índice de electrificación, la necesidad de proteger los equipos que forman parte del proyecto de expansión es muy relevante, por lo que en el presente trabajo de investigación se estudia el diseño del sistema de apantallamiento de la subestación eléctrica El Rancho, la cual pertenece al Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008-2018.

La descarga atmosférica o rayo, es una transmisión rápida de carga entre la atmósfera y la tierra, por lo cual es necesario analizar los efectos y repercusiones que pueden ocasionar, esto debido a que pueden poner en peligro la vida de las personas y ocasionar daños a los equipos que conforman las instalaciones de una subestación eléctrica.

Los sistemas de protección contra descargas son necesarios e importantes, principalmente en zonas de alta frecuencia de tormentas eléctricas, las subestaciones eléctricas, pueden ser sometidas a esfuerzos dieléctricos producidos por las sobretensiones que se presentan derivado a descargas atmosféricas.

Una sobretensión producida por una descarga atmosférica puede llegar a través de una línea de transmisión o en el peor de los casos, que dicha descarga impacte de forma directa sobre los equipos de la subestación, esta última condición puede ser producida por falla del sistema de apantallamiento y por lo tanto se estaría sometiendo a condiciones críticas el aislamiento de los equipos eléctricos.

Si la descarga provoca una sobretensión con un valor que excede el límite que puede soportar el aislamiento, aparecerá un arco de potencia que será mantenido por la tensión a la frecuencia del sistema, haciendo necesaria la operación de los equipos de protección como los interruptores de potencia para eliminar la falla. En la práctica la función del apantallamiento consiste en proteger a los equipos de la subestación contra las descargas atmosféricas directas.

1. CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES

1.1. Electromagnetismo

La descarga atmosférica, es un fenómeno natural que ha sido observado y estudiado por el ser humano desde el comienzo de los tiempos, una de las herramientas utilizadas para su estudio es el electromagnetismo, analizando la interacción entre cargas eléctricas inmóviles, conocida también como electrostática.

Por las características de una descarga atmosférica, también conocida como rayo, se podría asegurar que son propias de un fenómeno climático, considerando el ambiente en el cual ocurren los rayos y las causas que les dan origen, en general se puede afirmar que dichas descargas son fenómenos frecuentes e inevitables como el viento y la lluvia.

El estudio de una descarga atmosférica, aunque su comportamiento no sea estático, puede ser estudiado usando electrostática, los efectos derivados a interacciones magnéticas y termales que son debidas al movimiento de la carga y las partículas, pueden ser tratados como efectos adicionales a los electrostáticos.

El fenómeno de las descargas atmosféricas está estudiado desde hace más de un siglo, llegándose a medir y determinar hoy en día con un alto grado de minuciosidad, las características de las descargas eléctricas en la atmósfera, y aunque todas se parecen, no existen dos descargas atmosféricas que sean iguales.

1.2. Carga eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad fundamental de la materia debido a una interacción electromagnética, es importante mencionar que todos los cuerpos están formados por partículas cargadas, las cuales interactúan entre sí produciendo fuerzas de atracción o repulsión, según sea el caso.

Las partículas elementales que determina la carga eléctrica de un cuerpo, se conocen como electrón, protón y neutrón. Se dice que un cuerpo está cargado positivamente cuando tiene falta de electrones y está cargado negativamente cuando tiene abundancia de electrones, en general se puede definir la carga eléctrica como la abundancia o falta de electrones que un cuerpo posee respecto al estado neutro.

Para el caso del protón se considera una carga positiva, el electrón una carga negativa y el neutrón es eléctricamente neutro, la interacción eléctrica entre partículas puede ser de atracción, para el caso en el cual una partícula contenga carga negativa y la otra carga positiva, de igual forma la interacción puede ser de repulsión, para el caso en el cual ambas partículas posean una misma carga, es decir que ambas sean carga positiva o negativa.

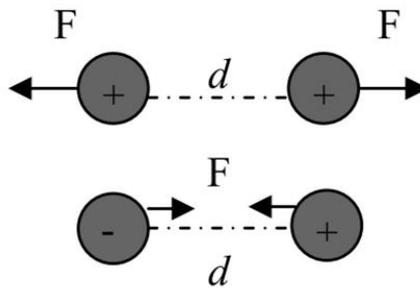
1.3. Ley de Coulomb

Charles Coulomb estudió la fuerza que ejerce una carga sobre otra de lo cual concluyó: la fuerza existe entre dos objetos muy pequeños separados en el vacío en medio del espacio libre por una distancia relativamente grande en relación con el tamaño de los objetos, es proporcional a la carga en cada uno e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, lo cual está representado en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 d^2}$$

(ec. 1.1)

Figura 1. **Fuerza de atracción y repulsión entre dos cargas**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

De acuerdo al postulado de Coulomb Q_1 y Q_2 son las cargas, sean positivas o negativas, y d es la separación que existe entre ambas cargas, y ϵ_0 es la permitividad del espacio libre, la fuerza eléctrica ó ley de Coulomb se mide en néwtons (N).

1.4. Corriente eléctrica

La corriente eléctrica puede definirse como el movimiento neto de cargas eléctricas en una misma dirección, para el caso en particular a través de un conductor, el movimiento de cargas se mide en amperios (A), siendo el amperio el movimiento de un Coulomb de carga por segundo que pasa por un punto dado.

Para que la corriente fluya es necesario un camino cerrado, lo cual se conoce como circuito. Para el caso de una corriente directa, la corriente fluye en una dirección a un ritmo constante, para el caso de la corriente alterna tanto la dirección como la cantidad de flujo de corriente cambian periódicamente en el tiempo.

Si el cambio de la carga, es la carga neta que pasa a través de un área de cualquier conductor en un intervalo de tiempo, la intensidad de corriente se puede expresar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

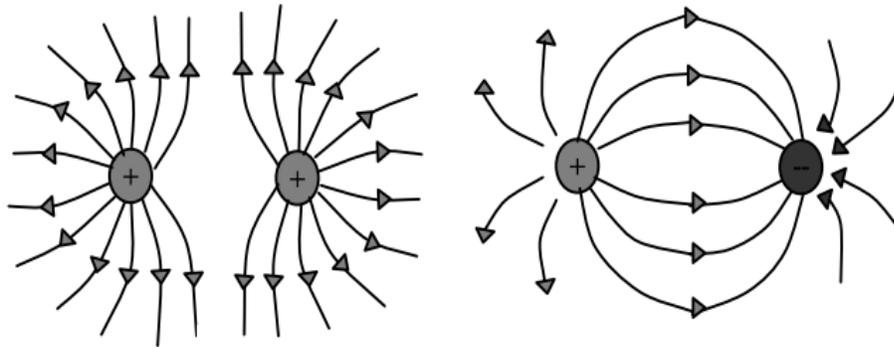
(ec. 1.2)

1.5. Campo eléctrico

El campo eléctrico en la teoría electromagnética explica las fuerzas que existen en las cargas eléctricas, el campo resulta de la intensidad de carga y determinan el movimiento de cualquier otra carga que se encuentre situada dentro del alcance del campo. Puede entenderse el campo eléctrico como la región en la cual se evidencian los fenómenos eléctricos, al momento de colocar una carga se observará la aparición de fuerzas eléctricas, las cuales serán de atracción si las cargas son de signo diferente y repulsión si son igual signo.

La intensidad del campo eléctrico se mide en voltios por metro (V/m) o en kilovoltios por metro (KV/m), el campo eléctrico nace en las cargas positivas, lo cual se conoce como fuente de campo, y muere en las cargas negativas llamadas también sumideros de campo.

Figura 2. **Líneas de campo eléctrico entre dos cargas**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

Si no existen cargas positivas o cargas negativas externas, las líneas de campo inician y terminan en el infinito, las líneas de fuerza no pueden cortarse así también el campo en cada punto tiene dirección y sentido único.

1.5.1. **Intensidad de campo eléctrico**

La intensidad del campo eléctrico puede ser función de una, dos, ó enésimas cargas, la intensidad de campo eléctrico debido a varias cargas puntuales puede encontrarse por superposición, sumando los campos causados por cada una de las cargas presentes cuando estas actúan individualmente, la intensidad del campo eléctrico puede expresarse a través de la siguiente ecuación:

$$E = \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{4\pi\epsilon_0|r - r_m|^2} \vec{a}_m$$

(ec. 1.3)

1.5.2. Flujo del campo eléctrico

El flujo del campo eléctrico es utilizado para medir el número de líneas de fuerza que atraviesan una superficie cualquiera, la superficie puede representarse mediante un vector S , el cual es perpendicular al plano que la contiene y cuyo módulo sea el área. El número de líneas que atraviesan la superficie dependerá de la orientación de la superficie con respecto al campo, por ejemplo, suponiendo que el vector campo E y el vector superficie S son perpendiculares el flujo neto es cero, caso contrario cuando los vectores son paralelos entonces el flujo tiene su valor máximo, el flujo se define por la siguiente ecuación:

$$\Phi = \int_s E \cdot ds$$

(ec. 1.4)

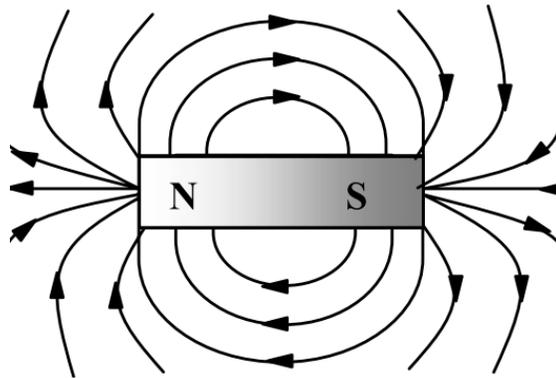
1.6. Campo magnético

El campo magnético explica las fuerzas existentes entre corrientes eléctricas, y se deriva del movimiento de las cargas, o lo que es lo mismo, de corrientes eléctricas. El campo es una magnitud vectorial, por lo cual tiene dirección, sentido y módulo, la intensidad del campo magnético se mide en amperios por metro (A/m), por lo regular suele expresarse en función de la inducción magnética que este produce, la cual se mide en teslas (T).

Michael Faraday representó el campo magnético en forma de líneas de fuerza, la dirección viene indicada por la dirección de las líneas de campo, y su magnitud por su densidad. Las líneas de fuerza se separan a partir de un polo y convergen en el otro dando como resultado un circuito cerrado, las líneas son

perpendiculares a la fuerza magnética sobre cualquier carga móvil, la fuerza magnética es mayor cerca de los polos donde se reúnen.

Figura 3. **Líneas de campo magnético**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

1.6.1. **Flujo magnético**

El flujo magnético es el número de líneas de fuerza de campo magnético que atraviesan una superficie cualquiera y depende de cómo se encuentre orientada la superficie respecto a la dirección de las líneas. El ángulo que forman las líneas de fuerza del vector de campo magnético con el vector perpendicular de superficie, determina la variación del flujo con respecto a la superficie que es atravesada, es decir, que cuando las líneas de fuerza atraviesan perpendicularmente la superficie, el valor del flujo es el máximo, mientras que si las líneas son paralelas a la superficie se tiene un valor nulo, la ecuación que representa el flujo magnético es la siguiente:

$$\Phi(s) = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{ec. 1.5})$$

1.7. Potencial electrostático

Anteriormente se dio a conocer que una carga Q' , si es colocada a una distancia de otra carga Q , ambas cargas experimentarían una fuerza eléctrica de atracción o repulsión dependiendo del signo de ambas cargas. Si se mantiene la carga Q' en su posición, entonces se debe ejercer una fuerza adicional para mantenerla en su posición, tal que la fuerza adicional aplicada balancee exactamente la fuerza eléctrica.

Si se deja mover la carga Q' una distancia, estando presente Q , entonces se estará realizando una cantidad de trabajo, el cual será directamente proporcional al producto de la fuerza que mueve la carga y la distancia recorrida. Mientras que el trabajo se define como la fuerza actuando una distancia, una fuerza aplicada trabaja en Q' cuando actúa contra una fuerza eléctrica que resiste mover Q' .

La energía del sistema anteriormente planteado, se escribe con la siguiente ecuación:

$$dW = -F \cdot dl = -Q' E \cdot dl \quad (\text{ec. 1.6})$$

La unidad de trabajo, así como de la energía, es el joule (J), si se divide el trabajo incremental por la carga de la unidad, entonces se puede definir como cambio en el campo electrostático.

$$\frac{dW}{Q'} = -E \cdot dl \quad (\text{ec. 1.7})$$

El potencial eléctrico de un punto A con respecto a un punto B, se puede definir como el trabajo realizado al mover una carga positiva unitaria Q' , desde A hasta B. Considerando una diferencia de potencial eléctrico entre los puntos, A y B, entonces la ecuación de potencial eléctrico, se expresa de la siguiente forma:

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

(ec. 1.8)

La diferencia de potencial no depende de la trayectoria que tome la carga Q' , por lo tanto únicamente depende de las localizaciones de los puntos A y B, la unidad de medida del potencial electrostático es el voltio (V).

El potencial eléctrico es un escalar, por lo cual no tiene dirección alguna, lo anterior permite que los potenciales de cargas múltiples se puedan combinar sin tener que considerar la dirección, entonces el potencial en cualquier punto y debido a un número de cargas puntuales, es la suma de los potenciales de las cargas.

1.8. Dipolo eléctrico

El dipolo eléctrico, se puede definir como un sistema formado por dos cargas iguales en módulo y de polaridad opuesta, separadas una distancia d cualquiera. La asimetría de cargas puede resultar de una distribución desigual de electrones, originando así un momento dipolar eléctrico, siendo este igual al producto de la carga por la distancia que las separa, además el momento es una magnitud dirigida, es decir, es una cantidad vectorial cuya dirección va de la carga negativa hacia la carga positiva.

1.9. Dieléctrico

Un material dieléctrico es conocido por tener la propiedad de no ser buen conductor de electricidad, a diferencia de los materiales que son aislantes, estos tienen la capacidad de almacenar energía, es decir, que un dieléctrico puede ser utilizado como aislante eléctrico, y toda vez sea sometido a un campo eléctrico externo, entonces se establecerá en él un campo eléctrico interno, el comportamiento de un dieléctrico es algo complejo debido a que pueden ocurrir cambios mecánicos y eléctricos en presencia de un campo eléctrico.

1.10. Carga inducida

Un campo eléctrico creado en una región conteniendo un conductor aislado de otros conductores, y este es movido a una segunda región en la cual ya existe un campo eléctrico, entonces las cargas eléctricas serán movidas a la superficie del conductor. La carga inducida es producida cuando un objeto que se encuentra cargado repele o atrae los electrones de la superficie de un segundo objeto, creando así en el segundo objeto una región que está más cargada positivamente.

1.11. Sobretensiones

Las diferencias de potencial que pueden aparecer entre conductores o entre conductores y tierra, pudiendo dicha diferencia llegar a ser mayor a la tensión de operación normal, se le conoce como sobretensión. El cálculo o estimación de las sobretensiones es muy importante en el diseño de subestaciones o redes eléctricas, debido a que los equipos que conforman dichas instalaciones pueden ser sometidos a estas sobretensiones y por lo

tanto serán de utilidad para escoger las protecciones y nivel de aislamiento de los equipos.

Todo estudio de sobretensiones debe establecer el origen y el tipo de sobretensiones que es necesario determinar, para una adecuada selección de los aislamientos y de los medios de protección.

Aunado a lo anterior, dentro del estudio se debe determinar la distribución estática de aquellas sobretensiones que serán empleadas en la selección de cada uno de los aislamientos.

1.11.1. Tipos de sobretensiones

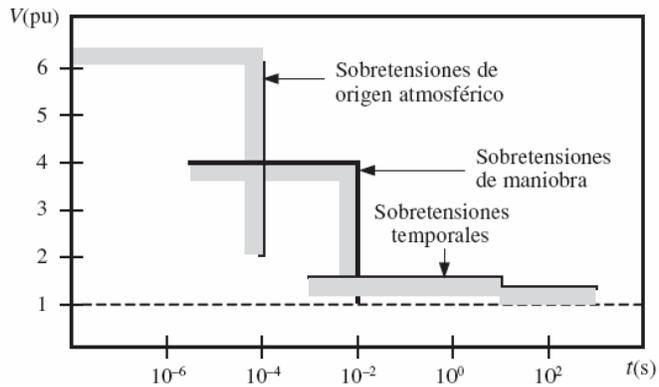
La clasificación de las sobretensiones debe estar basada en las características con las que se presenta el proceso transitorio: valor pico, duración y frecuencia o rango de frecuencias en el proceso transitorio, si este es oscilatorio, así como el tiempo al valor pico si el proceso es unidireccional. De acuerdo a lo anterior se pueden diferenciar las siguientes categorías:

- Tensiones continuas, las cuales son originadas por la operación del sistema en condiciones normales.
- Sobretensiones temporales, son de larga duración que pueden ir desde varios milisegundos hasta varios segundos, además son de frecuencia igual o próxima a la frecuencia de operación, dichas sobretensiones pueden ser originadas por fallas, maniobras como rechazo de carga, condiciones de resonancia, ferorresonancia y en el peor de los casos una combinación de éstas.

- Sobretensiones de frente lento, generalmente su origen es debido a maniobras, tienen corta duración (pocos milisegundos) y se presentan con una gama de frecuencias que varía entre 2 y 20 kilohertzios (KHz), además pueden originarse por fallas o descargas atmosféricas directas sobre los conductores de las líneas aéreas.
- Sobretensiones de frente rápido, son generalmente causadas por el rayo, son de duración muy corta y de amplitud superior a la tensión pico normal, pueden originarse por maniobras, descargas atmosféricas o por fallas.
- Sobretensiones de frente muy rápido, generalmente se originan con fallas y maniobras en subestaciones aisladas en gas (hexafluoruro de azufre SF₆), su duración es de pocos microsegundos, y su frecuencia es generalmente superior a 1 megahertzio (MHz).
- Sobretensiones combinadas, pueden tener algún origen de los mencionados anteriormente. Ocurren entre las fases del sistema, fase a fase, o en la misma fase entre partes separadas del sistema.

La figura 4 muestra una relación entre el tipo de sobretensiones, la duración y el orden de magnitud que puede alcanzar el valor pico.

Figura 4. **Clasificación de sobretensiones**



Fuente: Juan Antonio Martínez Velasco. Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. p. 4.

Aunque las causas de las sobretensiones son muchas, así como los parámetros y variables que intervienen en cada categoría, es posible distinguir unos pocos parámetros cuya influencia será decisiva en la mayoría de casos:

- Valor pico: además de la tensión nominal de la red, que siempre será una referencia, el valor máximo de una sobretensión dependerá de ciertos factores, según sea la causa u origen:
 - En sobretensiones temporales y de frente lento originadas por una falla o maniobra influirán el instante en el que se inicia el proceso transitorio, la carga atrapada en el lado del consumo en caso de maniobra, el amortiguamiento que introducen los distintos equipos de la red, y en algunos casos (maniobras de líneas y cables en vacío) los coeficientes de reflexión.

- En sobretensiones de frente rápido o muy rápido originadas por una maniobra, además de las causadas mencionadas anteriormente, habrá que añadir las impedancias características de los componentes que intervienen en el proceso transitorio.
- En sobretensiones de frente rápido o muy rápido provocadas por una descarga atmosférica, influirán las impedancias características de líneas, cables y otros equipos, los coeficientes de reflexión en puntos cercanos al punto de impacto, y el instante de impacto de la descarga.
- Frecuencia de las oscilaciones: las frecuencias que aparecerán en sobretensiones oscilatorias serán debidas a la frecuencia de las fuentes que alimentan la red, las frecuencias naturales que pueden originarse entre los distintos equipos, o la longitud de líneas, cables o conductores para los cuales el modelo matemático incluya una representación con parámetros distribuidos. La frecuencia natural de un circuito es el resultado de intercambio de energía entre el campo eléctrico y el campo magnético, y depende de los valores de sus parámetros no disipativos (L y C):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(ec. 1.9)

En el caso de una línea o cable, la frecuencia de las oscilaciones originadas por reflexiones de ondas en sus extremos viene dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{4\tau}$$

(ec. 1.10)

Siendo τ el tiempo de propagación en la línea, cable o conductor, si la sobretensión es unidireccional y originada por un rayo, el tiempo pico dependerá fundamentalmente del tiempo pico de la descarga atmosférica, y será del orden de microsegundos.

- Duración: la duración de una sobretensión dependerá fundamentalmente de dos factores, la causa y el amortiguamiento que introducen los equipos de la red.

La Norma IEC 60071-1 establece la clasificación de sobretensiones de acuerdo con una forma de onda y una duración normalizada, las cuales se pueden dividir en dos grupos:

- Sobretensión de baja frecuencia, la cual es de larga duración y se origina con frecuencia igual o próxima a la de operación. Este tipo de sobretensiones se divide a su vez en:
 - Sobretensión permanente a frecuencia industrial, con característica de tensión a frecuencia de operación de la red, con un valor eficaz constante y aplicada permanentemente.
 - Sobretensión temporal es de duración relativamente larga, pudiendo ser amortiguada o débilmente amortiguada, y dependiendo de la causa su frecuencia puede ser distinta o igual a la frecuencia de operación de la red.

- Sobretensión transitoria, su duración es de algunos milisegundos, oscilatoria o unidireccional, y generalmente muy amortiguada. Una sobretensión transitoria puede estar seguida por una sobretensión temporal, en tal caso ambas sobretensiones se analizan como sucesos separados. Las sobretensiones se dividen a su vez en:
 - Sobretensiones de frente lento, generalmente oscilatoria, con un tiempo de subida hasta el valor pico, T_p , comprendido entre 20 y 5 000 microsegundos y con un tiempo de cola, T_2 , igual o inferior a 20 milisegundos.
 - Sobretensión de frente rápido, por lo general es oscilatoria, con un tiempo de subida hasta el valor pico, T_1 , comprendido entre 0,1 y 20 microsegundos, y con un tiempo de cola, T_2 , igual o inferior a 300 microsegundos.
 - Sobretensión de frente muy rápido, generalmente oscilatoria, con un tiempo de subida hasta el valor pico, T_f , inferior a 0,1 μ s, una duración total inferior a 3 milisegundos, y con oscilaciones superpuestas de frecuencias comprendidas entre 30 kilohertzios y 100 megahertzios.

La tabla I presenta un resumen de las características más importantes de cada tipo de sobretensión.

Tabla I. **Sobretensiones obtenidas en ensayos de tensión**

TIPO	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_i \geq 3.600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_i \leq 3.600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5.000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizada					*)
	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ T_i *)	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_i = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2.500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Ensayo de tensión soportada normalizada	*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	*)

Fuente: Juan Antonio Martínez Velasco. Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. p. 7.

1.11.2. Sobretensiones externas

La primera clasificación de las sobretensiones se basa en el origen, ya que la causa puede ser interna o externa a la red. Las sobretensiones de origen externo, es decir debidas a causas ajenas al sistema, son originadas principalmente por el impacto de un rayo y son conocidas también como sobretensiones atmosféricas.

1.11.3. Sobretensiones internas

Las sobretensiones de origen interno son causadas en el propio sistema, y se dividen a su vez en sobretensiones temporales y de maniobra. Estas últimas son causadas por operaciones de cierre y apertura de interruptores o seccionadores, lo que en general provoca un proceso transitorio que puede terminar originando no sólo sobretensiones sino también sobreintensidades.

1.11.4. Tensiones continuas

Bajo condiciones de operación normal, la tensión a frecuencia industrial puede variar en el tiempo y ser diferente de un punto a otro del sistema. Sin embargo, para propósitos de diseño y coordinación de aislamiento, la tensión representativa a frecuencia industrial será considerada como constante e igual a la tensión máxima del sistema. En la práctica, para sistemas con tensión hasta de 72,5 kilovoltios, la tensión máxima del sistema, U_s , puede ser sustancialmente menor que la tensión máxima del equipo, U_m , mientras que para tensiones mayores, ambos valores tienden a ser iguales.

1.11.5. Sobretensiones temporales

Las sobretensiones temporales son caracterizadas por su amplitud, su forma de onda y su duración. Todos los parámetros dependen del origen de las sobretensiones y sus amplitudes y sus formas de onda pueden cambiar inclusive, mientras exista la sobretensión.

Para propósitos de la coordinación de aislamiento, se considera que la sobretensión temporal representativa tiene la forma de la tensión normalizada a frecuencia industrial desde varios milisegundos a varios segundos. Su amplitud puede ser definida por un valor (el máximo asumido), un grupo de

valores pico o una distribución estadística completa de valores pico. La amplitud seleccionada para la sobretensión temporal representativa debe tener en cuenta:

- La amplitud y duración de la sobretensión real en servicio.
- La característica amplitud/duración de la soportabilidad a la frecuencia industrial del aislamiento considerado.

Si la última característica no es conocida, a manera de simplificación puede tomarse la amplitud igual a la sobretensión máxima real con una duración menor de 1 minuto en servicio, y la duración puede tomarse como 1 minuto.

En casos particulares, puede adoptarse un procedimiento de coordinación estadístico describiendo la sobretensión temporal representativa por una distribución de frecuencias amplitud/duración de sobretensiones temporales esperadas en servicio.

1.11.6. Sobretensiones de frente lento

Las sobretensiones de frente lento tienen frentes de duración desde algunas decenas de microsegundos hasta miles de microsegundos y duraciones de cola del mismo orden y son oscilatorias por naturaleza. Ellas son ocasionadas generalmente por:

- Energización y recierres de línea
- Fallas y despejes de fallas
- Rechazo de carga

- Interrupción de corrientes capacitivas o inductivas
- Descargas atmosféricas distantes sobre un conductor de una línea aérea.

El esfuerzo de tensión representativo está caracterizado por:

- Una forma de onda de tensión representativa.
- Una amplitud representativa la cual puede ser una sobretensión máxima asumida o una distribución probabilística de las amplitudes de sobretensión.

La forma de onda de tensión representativa es la normalizada al impulso de maniobra (tiempo de pico 250 microsegundos, y tiempo a la mitad de la cola 2 500 microsegundos). La amplitud representativa es la amplitud de la sobretensión considerada independientemente de su tiempo de pico real. Sin embargo, en algunos sistemas en el rango II, pueden producirse algunas sobretensiones con frentes de onda muy largos y la amplitud representativa puede ser considerada teniendo en cuenta la influencia de la duración del frente sobre la resistencia dieléctrica del aislamiento.

La distribución probabilística de las sobretensiones sin la operación de pararrayos se caracteriza por el valor del 2 por ciento, su desviación y su valor de truncamiento. Aunque no es perfectamente válido, la distribución de probabilidad puede ser aproximada por una distribución Gaussiana entre el valor del 50 por ciento y el valor de truncamiento encima del cual se asume que no existen valores. Alternativamente, se puede usar una distribución Weibull modificada.

El valor asumido máximo de la sobretensión representativa es igual al valor de truncamiento de las sobretensiones o igual al nivel de protección al impulso de maniobra del pararrayos, cualquiera sea el valor más bajo.

1.11.7. Sobretensiones por fallas y despeje de fallas

Las sobretensiones de frente lento son generadas en el inicio y en el despeje de una falla por el cambio de la tensión de operación a sobretensión temporal, en las fases sanas y el retorno de un valor cercano a cero de la tensión de operación en la fase fallada. Ambos orígenes causan únicamente sobretensiones entre fase y tierra, las sobretensiones entre fases pueden ser despreciadas.

En el rango I, las sobretensiones causadas por fallas a tierra deberán ser consideradas para sistemas con neutros de transformadores aislados, o con tierra resonante en los cuales el factor de falla a tierra es aproximadamente igual a $\sqrt{3}$. Para estos sistemas la coordinación de aislamiento puede estar basada en la sobretensión máxima asumida y no es necesario considerar la probabilidad de ocurrencia de amplitudes de sobretensión.

En el rango II, cuando las sobretensiones debidas a la energización de la línea o reenergización son limitadas a valores por debajo de 2 valor por unidad, las sobretensiones de despeje de falla y falla requieren un cuidadoso examen si ellas no son limitadas al mismo valor.

1.11.8. Sobretensiones por descargas atmosféricas de frente lento

En sistemas con líneas largas (más largas de 100 kilómetros), las sobretensiones atmosféricas de frente lento son originadas por descargas atmosféricas directas sobre los conductores de fase, cuando la corriente del rayo es tan baja que no causa flameo en el aislamiento de la línea y cuando la descarga ocurre a una distancia suficiente para producir un frente lento.

Como las corrientes de descarga atmosférica tienen tiempos de mitad de onda que raramente exceden los 200 microsegundos, no ocurren sobretensiones con gran amplitud y tiempos de pico críticos para el aislamiento.

1.11.9. Sobretensiones por descargas atmosféricas de frente rápido sobre las subestaciones

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

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

La severidad de las sobretensiones atmosféricas para los equipos de la subestación está determinada por la combinación de los tres factores anteriores y se requieren varias etapas para asegurar una adecuada protección. Las amplitudes de las sobretensiones, sin limitación de pararrayos, son usualmente

muy altas para realizar alguna coordinación de aislamiento en estos valores, en algunos casos, sin embargo, en particular con los cables que se conectan en las subestaciones, la autoprotección provista por la baja impedancia de los cables puede reducir las amplitudes de las sobretensiones atmosféricas a valores suficientemente bajos.

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

1.11.10. Sobretensiones debidas a operaciones de maniobra y fallas

Las sobretensiones de maniobra de frente rápido ocurren cuando los equipos se conectan o desconectan del sistema por medio de conexiones cortas principalmente dentro de las subestaciones. Las sobretensiones de frente rápido también pueden ocurrir cuando flaquean los aislamientos externos. Tales eventos pueden causar esfuerzos particularmente severos en aislamientos internos cercanos.

Aunque en general se trata de fenómenos oscilatorios, para propósitos de coordinación de aislamiento puede considerarse que la forma de la sobretensión representativa corresponde al impulso atmosférico estándar (1,2/50 microsegundos). Sin embargo, se deberá tener atención especial en los equipos con arrollamientos debido a los altos esfuerzos entre espiras.

El máximo pico de sobretensión depende del tipo y comportamiento del equipo de maniobra. Como los valores pico de sobretensión son usualmente más pequeños que los debidos a descargas atmosféricas, su importancia es restringida a casos especiales. Por lo tanto, es técnicamente justificado caracterizar la amplitud de la sobretensión representativa por el máximo de los siguientes valores (en valor por unidad de $\sqrt{2}U_s/\sqrt{3}$):

- Maniobra de interruptores sin reconexión: 2 valor por unidad.
- Maniobra de interruptores con reconexión: 3 valor por unidad.

Cuando se maniobran cargas reactivas, algunos tipos de interruptores de media tensión pueden producir interrupciones múltiples de la corriente transitoria lo que puede ocasionar sobretensiones hasta de 6 valor por unidad, a menos que se tomen medidas de protección adecuadas.

- Maniobra de seccionador: 3 valor por unidad

Como es altamente improbable la ocurrencia de sobretensiones de maniobra de frente rápido en más de una fase, se puede asumir que no existen sobretensiones fase-fase de gran magnitud que las sobretensiones fase-tierra. Por lo anterior, los valores máximos asumidos previamente pueden ser usados para chequear la importancia de tales sobretensiones. Si ellas determinan la tensión de soportabilidad al impulso atmosférico, se recomienda realizar estudios más detallados.

1.11.11. Sobretensiones de frente muy rápido

Las sobretensiones de frente muy rápido se originan por la operación de los seccionadores o por fallas internas en las subestaciones aisladas en gas. Su amplitud es rápidamente amortiguada una vez sale de la subestación aislada en gas, por ejemplo en los bujes terminales, y su tiempo de frente se incrementa en el rango correspondiente a las sobretensiones de frente rápido. Pueden ocurrir, también, sobretensiones de frente muy rápido en transformadores de media tensión, tipo seco, con conexiones cortas a los interruptores.

La forma de la sobretensión se caracteriza por un rápido incremento de la tensión cerca de su valor de pico resultando un tiempo de frente por debajo de 0,1 microsegundos. Para operaciones de seccionadores este frente es seguido generalmente por una oscilación con frecuencias por encima de 1 megahertzio. La duración de las sobretensiones de frente muy rápido es menor de 3 milisegundos, pero estas pueden ocurrir varias veces. La amplitud de la sobretensión depende de la construcción del seccionador y de la configuración de la subestación. Puede estimarse que es posible limitar las amplitudes máximas a 2,5 valor por unidad. Estas sobretensiones pueden, crear sobretensiones elevadas en los transformadores directamente conectados.

Debido a fallas internas dentro de la subestación aislada en gas, los equipos conectados son sometidos a esfuerzos debidos a las sobretensiones. La forma y la amplitud de la sobretensión dependen del tipo de conexión del equipo a la subestación aislada en gas y de la localización de la falla en la subestación aislada en gas. Las sobretensiones tienen amplitudes hasta de 1,6 veces las tensiones de apertura y tienen frecuencias de hasta 20 megahertzios en la subestación.

En los terminales de los equipos conectados con líneas aéreas cortas a subestaciones aisladas en gas, las oscilaciones de las sobretensiones muestran frecuencias en el rango de 0,2 a 2,0 megahertzios y amplitudes hasta de 1,5 veces la tensión de flameo. En este caso es posible proteger el equipo con pararrayos. Sin embargo, la frecuencia de las sobretensiones puede aún causar esfuerzos internos altos en los devanados del transformador debido a resonancias en los mismos.

La sobretensión representativa no puede ser establecida ya que no existen normalizaciones adecuadas en el presente. Se considera, sin embargo, que las sobretensiones de frente muy rápido no tienen influencia en la selección de las tensiones nominales de soportabilidad.

2. CONCEPTO DE APANTALLAMIENTO

2.1. Apantallamiento

El apantallamiento, es el conjunto de equipos o elementos conectados eléctricamente, con el objetivo principal de interceptar toda descarga atmosférica (rayos) apartándola de conductores, personas y equipo en general, y así protegerlos de los daños provocados por dichas descargas.

Aunque la naturaleza de una descarga es incierta, esta impactará el objeto más cercano dentro de su trayectoria, por lo cual dicha suposición, es la base para diseñar el apantallamiento que ofrecerá protección a todo el equipo y personal que se encuentre dentro de la subestación.

El equipo que compone el sistema de apantallamiento, debe estar sólidamente conectado al sistema de puesta a tierra de la subestación, con el fin de evitar diferencias de potencial con otras partes de la subestación que se encuentran puestas a tierra.

2.2. Origen de la descarga atmosférica

La descarga atmosférica, también conocida como rayo, se define como la transferencia violenta de carga positiva o negativa, de un campo eléctrico que se ha creado dentro de una nube, de nube a nube, de nube a tierra o bien tierra a nube, la cual se produce a consecuencia del rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire y de la conductividad propia de la atmósfera.

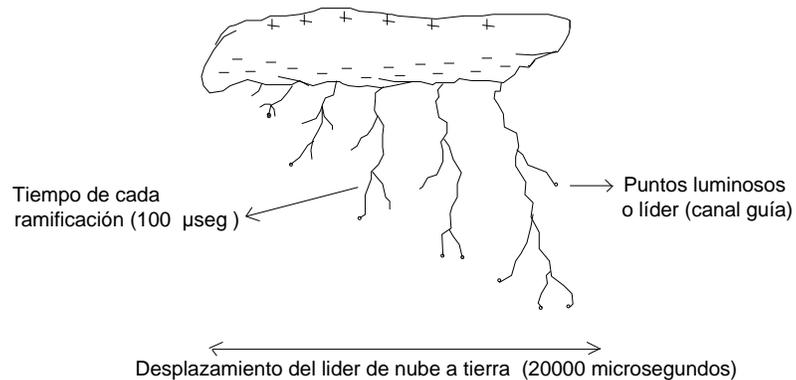
Una de las capas de la atmósfera es la troposfera, en esta se genera la formación de cargas y también se producen las lluvias, nubes, tormentas, vientos, etc. La carga se produce debido a cambios meteorológicos preponderantes que hacen variar constantemente el equilibrio eléctrico en el aire.

2.2.1. El líder y la formación del rayo

El campo eléctrico atmosférico en estado normal está dirigido hacia abajo y con una magnitud de 120 voltios por centímetro cuadrado, pero si hay nubes y sobre todo, si hay cumulonimbos (nubes de gran actividad tormentosa), el campo se invierte y queda dirigido hacia arriba; alcanzando una diferencia de potencial de 20 kilovoltios por metro, que induce a la separación de las cargas en la nube con dirección a la tierra. Por otra parte, en la nube se pueden alcanzar valores hasta de 10 000 Voltios por centímetro cuadrado en las regiones donde se origina el rayo.

El camino de una descarga eléctrica entre nube, de nube a tierra y de nube a nube, se denomina líder. La descarga no se produce siguiendo cualquier camino, sino que la descarga es precedida por un camino formado por un canal delgado conductor ionizado, en el cual se acumulan cargas eléctricas producidas por la ionización del aire. El camino sirve de guía para ramificaciones que avanzan en forma de zigzag a razón de 50 a 100 metros por microsegundo, con descansos de 100 microsegundos en la cual se observan puntos luminosos.

Figura 5. **Desplazamiento del líder en la atmósfera**



Fuente: Asociación electrotecnia argentina. Descargas atmosféricas. p. 20.

- El rayo, es la consecuencia del cortocircuito en el espacio entre la nube y tierra, que neutraliza la corriente de ambas cargas, cuando se rompe la rigidez dieléctrica del aire.
- El relámpago, es el brusco aumento de la presión causada por el calentamiento de la atmósfera, asociado con la descarga atmosférica, es el origen de luminosidad denominada relámpago.
- El trueno, es el efecto producido por la brusca elevación de la presión en el camino o canal de guía, contraída por las fuerzas electrodinámicas durante la duración de la descarga, las cuales constituyen las ondas de sonido.

2.3. Teoría de formación de una descarga atmosférica

Las descargas atmosféricas se clasifican por su polaridad en: positivas y negativas. Las descargas positivas tienen una duración de 20 a 50 microsegundos, con una amplitud de 5 a 100 kiloamperios, hasta un máximo de 200 kiloamperios, dichas descargas se producen por lo general en zonas montañosas. Las descargas negativas están formadas por varias descargas, la primera con un frente de onda de 10 a 15 microsegundos y amplitud de corriente más débil que los rayos positivos, el 90 por ciento de los rayos positivos se descargan en zonas llanas y climas templados.

2.3.1. Teoría de Simpson

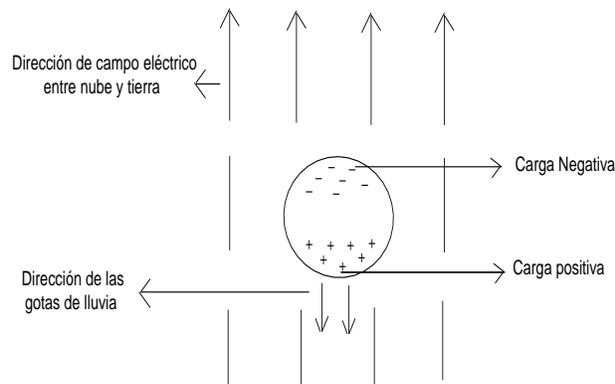
Las cargas eléctricas de las nubes se deben al movimiento de aire en su interior; se dice que, las corrientes ascensionales transportan vapor húmedo el cual se condensa y produce gotas de agua que por su peso caen, en su descenso estas gotas de agua encuentran otras corrientes ascensionales que las dividen formando gotas más pequeñas.

En el proceso de división de gotas de agua, en otras más pequeñas, se provoca la liberación de aniones que se dispersan en la atmósfera y son llevados a la parte inferior de la nube, por lo tanto se carga la parte superior de la nube con carga positiva. Al encontrarse de esta forma polarizada la nube, entonces en la superficie terrestre próxima a ella se produce una acumulación de carga positiva, lo que da lugar a la de un capacitor, cuyo dieléctrico es la capa de aire entre la tierra y la nube, y al romperse el dieléctrico, o perder el aire sus propiedades de aislamiento, se produce la descarga.

2.3.2. Teoría de Elster Geitel

La teoría de Geitel, establece que si se aplica un campo eléctrico a una gota de agua, entonces su superficie se polarizará positivamente en la parte superior y negativamente en la inferior; debido a la acción de las corrientes de aire, dicha gota se encuentra con otras aumentando su carga por adición; repitiéndose este proceso hasta que se tiene suficiente carga negativa y por consiguiente se produce la descarga.

Figura 6. Cargas en una gota de agua



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

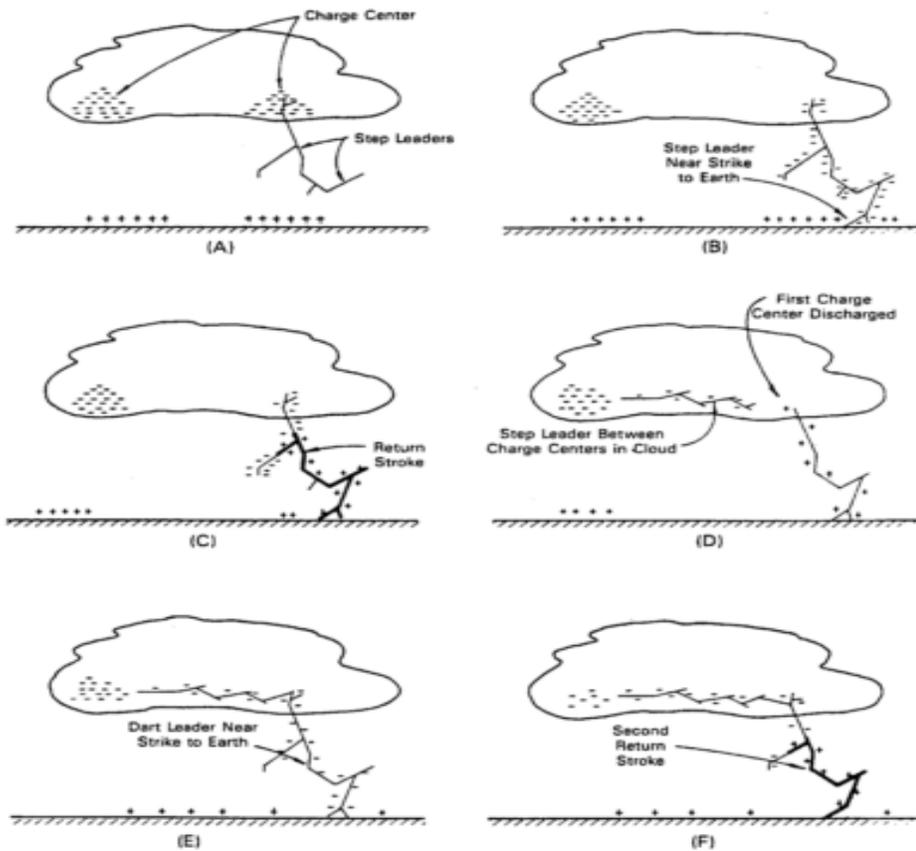
2.3.3. Teoría de Wilson

La teoría establece que la descarga, se debe al rompimiento de las gotas de agua de una tormenta, y por consiguiente, de la separación de su carga eléctrica debido a las corrientes de aire ascendentes y de la gravedad de la tierra, en el proceso de la lluvia las gotas hacen contacto con los iones presentes en la atmósfera, lo que aumenta la ionización facilitando la formación de la trayectoria del canal de la descarga, para que esta se descargue a tierra.

2.3.4. Teoría de los Cristales de Hielo

La teoría también es conocida como teoría de Robinson y Simpson, la cual establece que la presencia de cristales de hielo en la parte superior de las nubes, al chocar permiten la separación de cargas, quedando el aire con carga positiva y el cristal de hielo con carga negativa, lo que da lugar a la polarización en la nube que posteriormente, al romperse el aislamiento entre nube y tierra se produce la descarga.

Figura 7. Escenarios de una descarga atmosférica



Fuente: IEEE. *Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations*. p. 6.

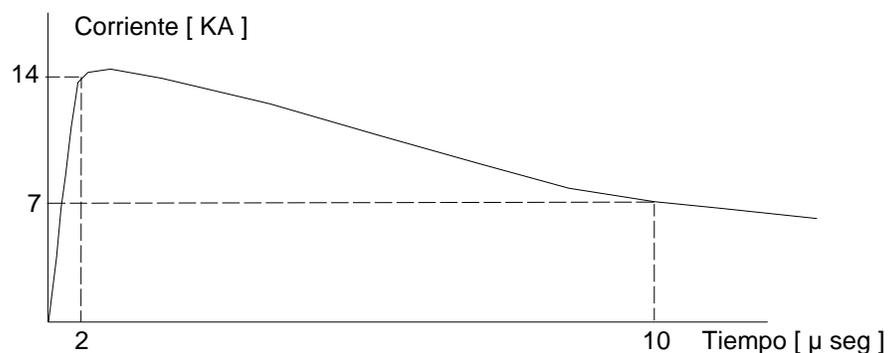
2.4. Características de corriente durante una descarga

La corriente de una descarga atmosférica inicialmente posee una parte de máxima corriente, generalmente se caracteriza por tener tiempos de frente de onda de hasta 10 microsegundos, seguidamente por una cola de baja de corriente la cual puede durar unos cientos de microsegundos, por lo cual dicha característica es la responsable de los daños térmicos causados a los equipos eléctricos.

La representación matemática que puede utilizarse para realizar el estudio del fenómeno de la corriente de una descarga, considerando que el período de la corriente es de gran interés, es decir, el instante de tiempo considerado desde el origen de la descarga, así como el valor pico de la corriente de descarga, la forma de onda se puede representar por la siguiente ecuación:

$$i(t) = i_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (\text{ec. 2.1})$$

Figura 8. Frente de onda de la corriente de una descarga



Fuente: Asociación Electrotecnia Argentina. Descargas atmosféricas. p. 22.

Tabla II. **Sobretensiones y forma de ondas normalizadas**

Descripción	Rayo descendente		Rayo ascendente	
	Medio	Máximo	Medio	Máximo
Valor de cresta de corriente	14 000 A	218 000 A	10 A	1 000 A
Tiempo del frente de onda (segundos)	1 μs	10 μs		
Tiempo hasta el valor medio (segundos)	10 μs	100 μs	0,01 s	0,1 s
Carga (Coulomb)			100 C	300 C
Carga de rayo directo positivo	50 C	100 C		
Carga de rayo directo negativo	15 C	160 C		

Fuente: Asociación Electrotecnia Argentina. Descargas atmosféricas. p. 23.

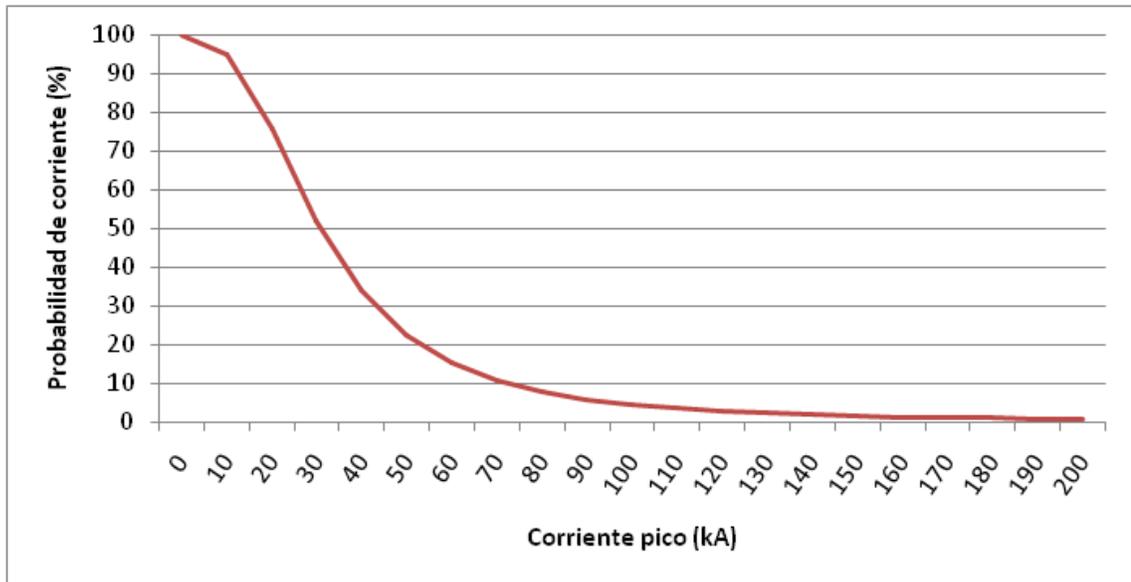
2.5. Distribución probabilística de corriente de una descarga

La distribución estadística de la corriente de las descargas atmosféricas debería conocerse, para cada región en la cual se desee realizar una estimación del número de rayos, con la finalidad de determinar los índices de falla de blindaje. Sin embargo, para fines prácticos, la magnitud aproximada de la corriente de una descarga, según lo establecido por el IEEE, se puede determinar por medio de la siguiente ecuación:

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}\right)}$$

(ec. 2.2)

Figura 9. **Probabilidad de corriente pico de una descarga**



Fuente: elaboración propia.

2.6. **Determinación de la densidad de descargas atmosféricas**

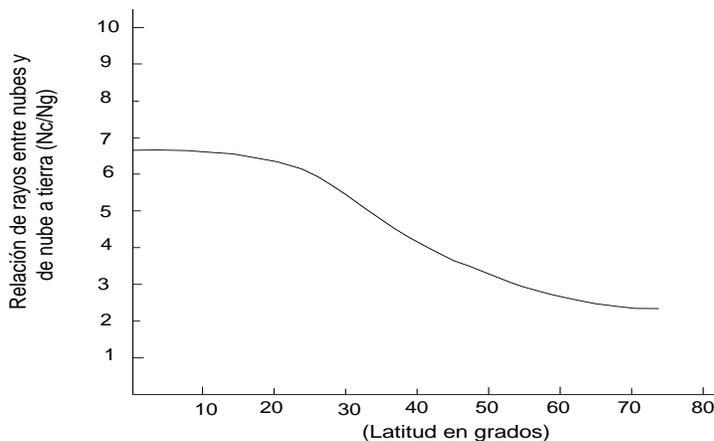
El estudio para la determinación de la densidad de descargas atmosféricas, tiene su importancia en el diseño y construcción de protecciones de nuevas subestaciones eléctricas y líneas de transmisión eléctrica, asimismo es un aporte para determinar el tipo de protección en edificios.

2.6.1. **Nivel isoceráunico**

El nivel isoceráunico es el número de días promedio por año, en los cuales existe actividad de tormentas eléctricas, o se escuche al menos, un trueno en una región determinada, además es el nombre utilizado por los meteorólogos, para referirse a la actividad eléctrica en la atmósfera.

Las regiones próximas al Ecuador, presentan un nivel isoceráunico muy alto, sin embargo, en los continentes y océanos la presencia de la misma es baja, debido a los vientos del norte que tienden a mover las nubes hacia el océano Pacífico, con el desarrollo de la tecnología moderna, es posible tener mejores elementos para definir el concepto del nivel isoceráunico sobre una base más precisa.

Figura 10. **Curva de descargas en función de la latitud**



Fuente: elaboración propia, con programa de Matlab 2010.

2.6.1.1. **Densidad de rayos eléctricos a tierra**

La densidad de rayos eléctricos a tierra (DRT), es el número de rayos a tierra (descargas eléctricas) por unidad de área (kilómetros cuadrados) y por unidad de tiempo (año), y es la probabilidad que tiene un punto del terreno de ser alcanzado por una descarga atmosférica; además, es un parámetro complementario del nivel isoceráunico que permita cuantificar la incidencia de rayos en una zona.

La densidad de rayos se obtiene evaluando el valor isoceraúnico de una zona específica, por medio de relaciones matemáticas empíricas para determinar la misma. Con propósitos de aplicación el Comité de Coordinación de Aislamiento (CCA), del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), ha definido la relación matemática para hallar la densidad de descargas a tierra, utilizando el número de días de tormenta al año, T_d , y así determinar el número de rayos por kilómetro cuadrado en un año, la ecuación es la siguiente:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25}$$

(ec. 2.3)

2.6.1.2. Mapa Isoceraúnico de Guatemala

El mapa isoceraúnico es la representación gráfica de la frecuencia de descargas atmosféricas, en zonas de observación meteorológicas, efectuadas en el territorio de la República de Guatemala. El procedimiento para la elaboración del mapa climatológico, consiste en valores iguales de una variable, en forma continua, abarcando diferentes posiciones geográficas dentro de una cuenca topográfica o región en particular (método de isoceras). Para la elaboración del mapa es necesario tener en consideración los siguientes requerimientos:

- Cada estación climatológica debe estar identificada o etiquetada con sus respectivas coordenadas geográficas.
- Los datos registrados de una variable dada, deben ser ploteados en un mapa topográfico, es conveniente incluir valores de las cotas geodésicas, para su posterior interpolación.

- Se deben unir linealmente los puntos que identifican a cada estación climatológica, formando grupos o redes en forma triangular.
- Interpolar gráficamente los catetos en cada triángulo, pero tomando en cuenta la variación de los valores de las curvas de nivel o topográficas.
- Enlazar los valores iguales entre catetos adyacentes de triángulos continuos, generalmente son líneas curvas suavizadas.
- Las isolíneas de preferencia deben trazarse en un mapa de mayor escala y luego trasladarlas a aun mapa de menor escala, para fines de presentación y reducción de errores.
- El mapa en papel o formato análogo, debe digitalizarse para poder desarrollar un mapa digital tipo vectorial o tipo matricial, y así utilizarlo en aplicaciones múltiples a través de un sistema de información geográfico SIG o GIS.

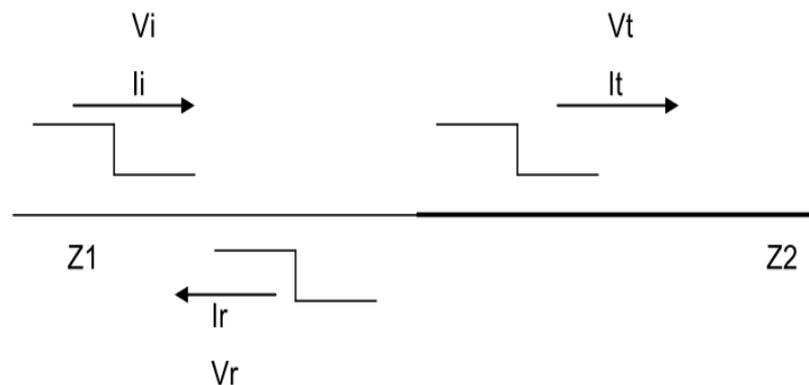
Las regiones tropicales son las que presentan mayor actividad electroatmosférica, al contrario de las zonas de alta montaña, de intenso frío o zonas marítimas. Sin embargo, en las regiones de la boca costa las descargas son regulares, debido al cambio brusco de la presión atmosférica resultante del cambio del aire tropical, al aire frío de las montañas.

2.7. La descarga atmosférica como onda viajera

La descarga atmosférica, momentos antes de hacer contacto, puede ser considerada como una superposición de dos ondas de magnitud viajando en sentidos opuestos. Cuando una onda viaja a través de un medio transmisor, como el aire, un cable conductor, tierra, etc. Y en algún lugar del espacio cambia de medio con diferentes características en su estructura, entonces se producirá una onda reflejada.

Cuando la onda incidente (onda viajera) alcanza una discontinuidad en su medio de transmisión, una parte esta onda es reflejada (onda reflejada) hacia atrás, mientras que la otra parte es transmitida (onda transmitida) a través del nuevo medio.

Figura 11. Onda de voltaje y corriente en línea de impedancias



Fuente: elaboración propia.

2.8. Efectos de las descargas atmosféricas en subestaciones

Se debe tener en cuenta que en un radio de 1,5 kilómetros del punto de impacto de una descarga, toda instalación eléctrica es perturbada y en algunas ocasiones destruida. Los principales efectos de una descarga atmosférica en una subestación son los siguientes:

- Cebaduras: creación de diferencias de potencial entre algunos elementos metálicos de la subestación.
- Térmicos: puntos de fusión a nivel de los impactos para los materiales conductores, así como la elevación de temperatura en dispositivos que tengan mal contacto, para malos materiales de gran resistividad.
- Electrodinámicos: debido a la descarga, surgen fuerzas de atracción y repulsión en los conductores y dieléctricos muy cercanos.
- Inducción: creación de un flujo magnético, debido al acercamiento de un rayo y su descarga a través de los conductores, generando tensiones inducidas elevadas en las líneas de transmisión que parten de la subestación.
- Luminosos: deslumbramiento de proximidad que provoca durante pocos segundos pérdida de visión.
- Indirectos: tensiones de paso y contacto peligrosas, así también potenciales desfasados, en el área donde se ubica la subestación y el perímetro metálico que la rodea.

2.9. Dispositivos utilizados para el apantallamiento

En el sistema de apantallamiento de una subestación, generalmente se pueden manejar tres dispositivos, en la mayoría de los casos se utiliza únicamente uno, siendo este el que mejor se apegue al diseño y optimización de recursos para lograr un buen apantallamiento.

2.9.1. Cables de guarda

Estos cables están diseñados para rodear literalmente la subestación a proteger, se encuentran ubicados por encima del equipo eléctrico a proteger. Los cables de guarda deben estar conectados al sistema de red de tierras de una subestación para que cumpla su función de dispositivo apantallador, dentro de sus principales características se encuentran las siguientes:

- Ofrecen protección a lo largo de todo el cable.
- Son económicos debido a que son conductores livianos y por lo tanto no requieren estructuras muy fuertes.
- Aprovechan el diseño de los pórticos de la subestación.
- Reducen la corriente a disipar debido a que las corrientes de rayo viajan en las dos direcciones.
- Mejora las condiciones de disipación a la malla de tierra al transportar parte de la corriente de secuencia cero en casos de cortocircuito a tierra.

2.9.2. Puntas

También conocidas como puntas de Franklin, se encuentran colocadas sobre los pórticos y requieren una estructura adicional conocida como castillete. Las puntas se basan en los efectos de alta concentración de cargas, su zona de protección se debe calcular aproximadamente en un radio igual a su altura de instalación del suelo, y al igual que los cables de guarda se deben encontrar conectadas con la red de tierras de la subestación para su correcto funcionamiento, logrando el apantallamiento necesario para proteger todo el equipo y personal que se encuentre dentro de la subestación.

Las puntas pueden competir económicamente con los cables de guarda, debido a que presentan menores problemas durante su instalación y mantenimiento. Además, presentan características eléctricas ligeramente inferiores a la de los cables de guarda, las cuales se presentan a continuación:

- Tienen tendencia a aumentar las corrientes de retorno, siendo llamativas a los rayos.
- Presentan mayores problemas para la disipación de la corriente del rayo.
- A mayor área de la subestación, el apantallamiento con puntas se hace más costoso en comparación con los cables de guarda.
- La protección efectiva se logra únicamente con distancias relativamente cortas entre las puntas, esto debido a que el área a proteger debe tener una forma aproximadamente cuadrada.

2.9.3. Mástiles

Los mástiles generalmente son los dispositivos más costosos, debido a que estos requieren una estructura propia. Regularmente la utilización de los mismos se restringe a los casos en los cuales se deben proteger equipos aislados, es decir, que tiene pórticos aledaños.

En lo referente a las ventajas y desventajas, presentan las mismas que las de las puntas, sin embargo, presentan una desventaja adicional, la cual trata sobre la gran cantidad de disipación de corriente requerida, dada su tendencia a incrementar las corrientes de retorno, ya que la corriente se debe disipar a través de una sola estructura por el desconocimiento sobre la zona de protección del mástil.

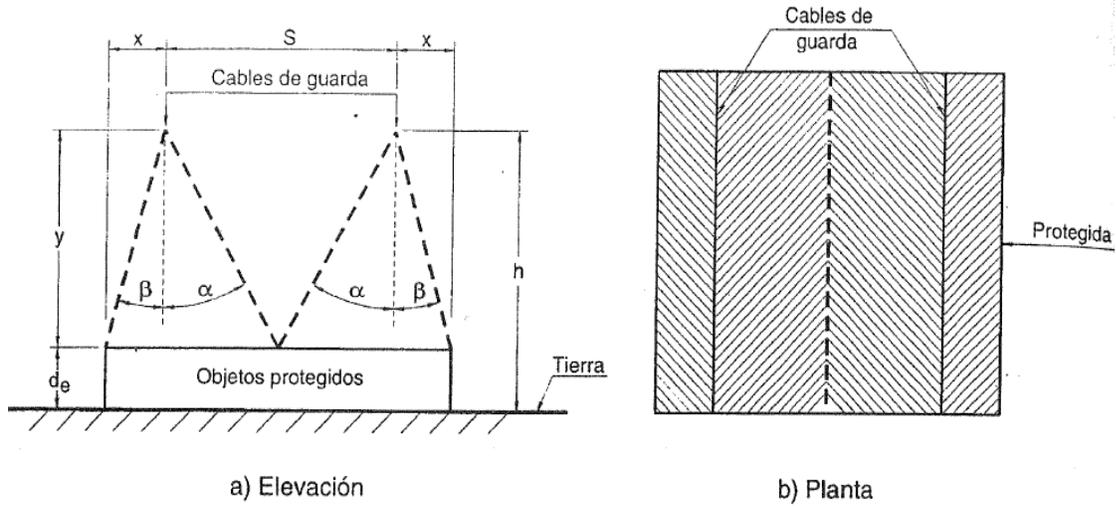
2.10. Métodos de diseño de apantallamiento

Existen métodos que han sido utilizados históricamente para el diseño del sistema de apantallamiento, con la finalidad de proteger las subestaciones contra las descargas directas, y con los cuales generalmente se obtiene un nivel aceptable de protección.

2.10.1. Método de ángulos fijos

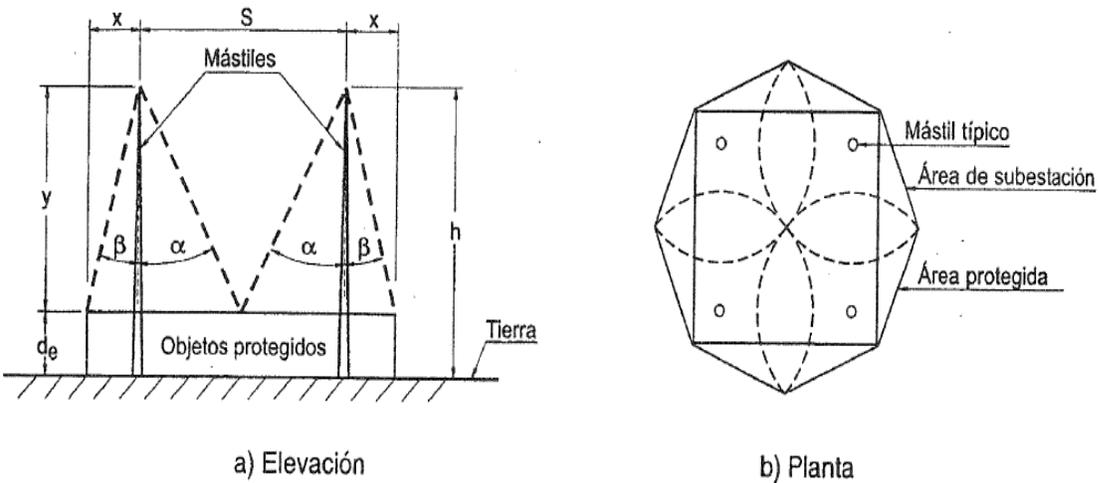
El método está basado en la utilización de ángulos verticales determinando la altura, posición y cantidad de dispositivos a utilizar para lograr el apantallamiento, dentro de los cuales se encuentran los cables de guarda, y mástiles. El método está caracterizado por ser un método de diseño empírico o conocido también como método de diseño geométrico.

Figura 12. **Ángulos fijos para cables de guarda**



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 124.

Figura 13. **Ángulos fijos para mástiles**



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 124.

El método de diseño supone que los mástiles y cables de guarda proyectan una zona de protección al equipo que se encuentra debajo de ellos. Con la finalidad de mantener una baja ocurrencia de falla, los ángulos de apantallamiento se reducen a medida que la altura de las estructuras de la subestación incrementa. Para el ángulo α se utiliza un valor de 45 grados y para el ángulo β valores de 30 y 45 grados.

En algunos casos dependiendo de la rata de falla, para estructuras de hasta 15 metros de altura se recomiendan un ángulo de protección de 40 y 45 grados, para alturas entre 15 y 25 metros un ángulo de protección de 30 grados, y un ángulo menor a 20 grados para alturas de hasta 50 metros.

Tabla III. **Falla de apantallamiento en función de altura y ángulo**

Altura del cable de guarda (m)	Falla de apantallamiento por cada 100 Km / año						
	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
10	0	0	1E ⁻⁴	0,0087	0,0383	0,1032	0,2288
15	0	6,4E ⁻⁵	0,0068	0,0351	0,0982	0,2182	0,4483
20	8,3E ⁻⁶	0,0026	0,0214	0,0711	0,1695	0,3466	0,6903
25	0,0011	0,0087	0,0404	0,1123	0,2466	0,4819	0,9429
30	0,0035	0,0170	0,0620	0,1565	0,3275	0,6208	1,2008
35	0,0069	0,0269	0,0853	0,2024	0,4100	0,7616	1,4608
40	0,0109	0,0378	0,1096	0,2494	0,4936	0,9035	1,7214
45	0,0155	0,0493	0,1345	0,2969	0,5776	1,0462	1,9820
50	0,0204	0,0612	0,1598	0,3447	0,6619	1,1892	2,2423

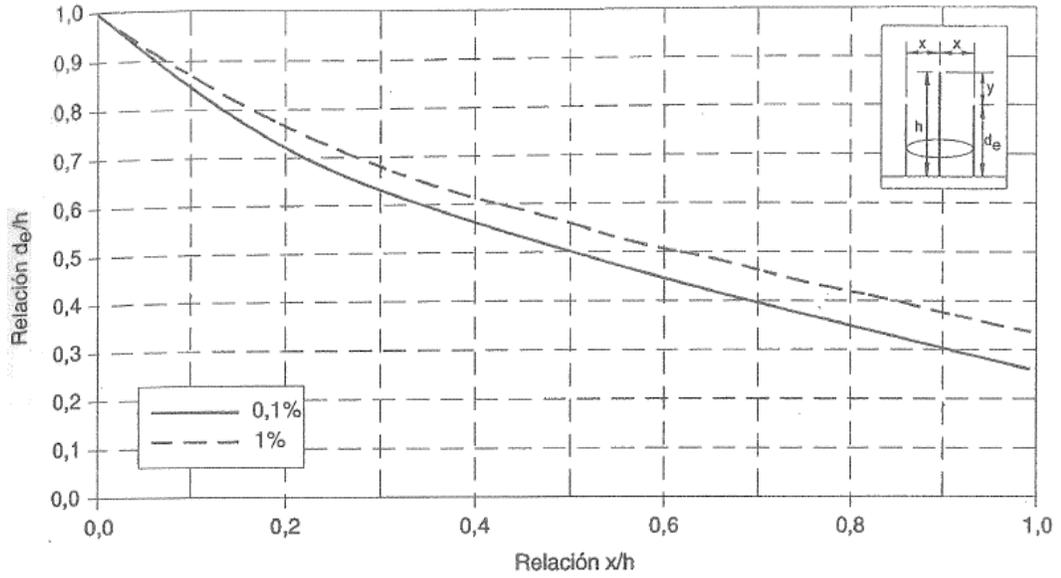
Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 125.

2.10.2. Método de curvas empíricas

Al igual que método de ángulos fijos, el método de curvas empíricas es considerado un método de diseño empírico. El método fue desarrollado en pruebas de laboratorio, las cuales fueron realizadas con modelos a escala de subestaciones y electrodos simuladores, los resultados obtenidos se continúan utilizando, debido a que proveen datos estadísticos que relacionan las dimensiones de una subestación con un porcentaje de rayos no apantallados de forma efectiva P_c . Para la aplicación del método se debe seguir el siguiente procedimiento:

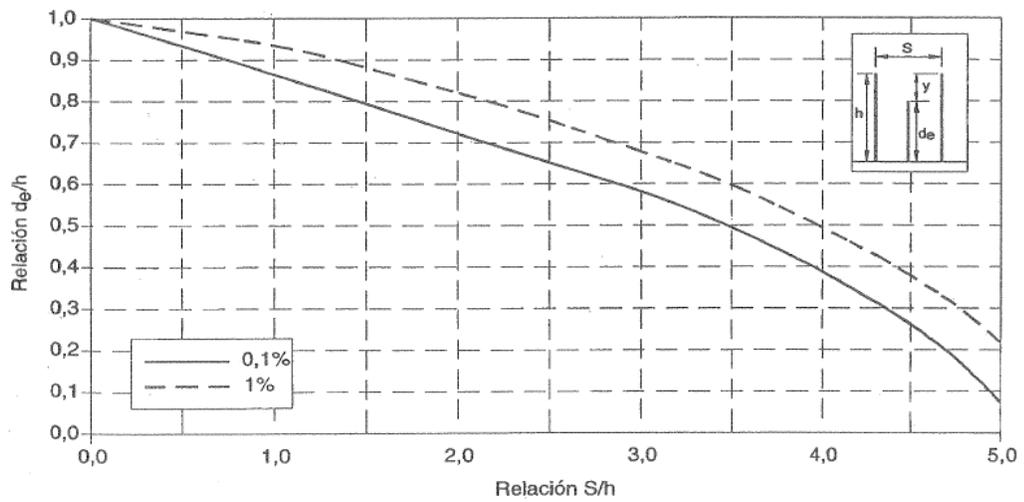
- Se debe seleccionar un nivel de exposición P_c , por lo general se utiliza una exposición del 0,1 por ciento.
- Determinar la altura d_e , de cables, equipos o estructuras a proteger.
- Determinar el ancho del campo S , o la distancia horizontal X , desde el mástil o cable de guarda, hasta el equipo a proteger, dependiendo del tipo de apantallamiento que se utilizará.
- Se debe asignar una altura h , del cable de guarda o mástil.
- Si no se obtuviera el nivel de protección deseado, entonces es necesario realizar modificaciones a la altura o localización de los mástiles o cable de guarda, o en el peor de los casos es necesario adicionar elementos hasta lograr el nivel de protección deseado.

Figura 14. Protección con curvas para un mástil



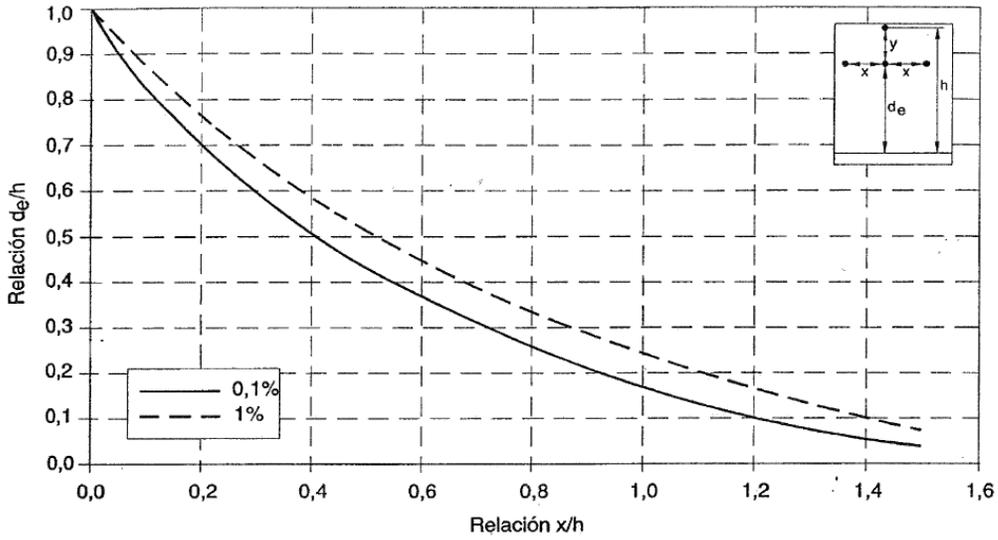
Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p.127.

Figura 15. Protección con curvas para dos mástiles



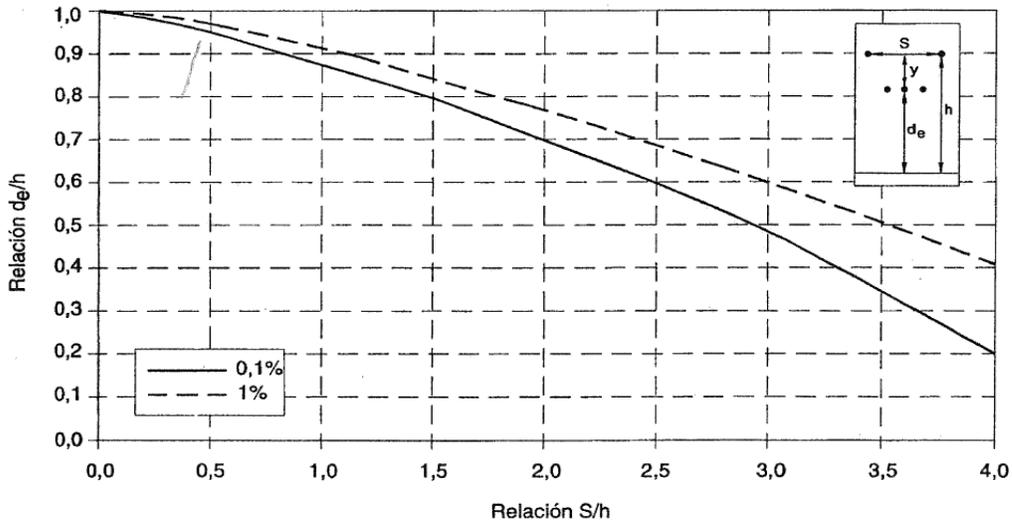
Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 127.

Figura 16. Protección con curvas para un hilo de guarda



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 128.

Figura 17. Protección con curvas para dos hilos de guarda



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 128.

2.10.3. Modelo electrogeométrico

A diferencia de los métodos anteriormente expuestos, el modelo electrogeométrico es un modelo matemático de aplicación a las descargas negativas descendentes, basado en la propagación de una descarga que desciende en línea recta desde la nube hasta el suelo. El modelo fue desarrollado con la finalidad de determinar la efectividad de los apantallamientos, pretendiendo que el equipo o personal a ser protegido sean menos atractivos a las descargas, que los elementos que conforman el sistema de apantallamiento.

Es necesario para su correcto funcionamiento, determinar la distancia de descarga (S_m) del rayo a un objeto, dicha distancia es la que determina la posición de la estructura que conforma el apantallamiento con respecto al objeto a proteger, y se debe tomar en cuenta la altura de cada uno con respecto al suelo.

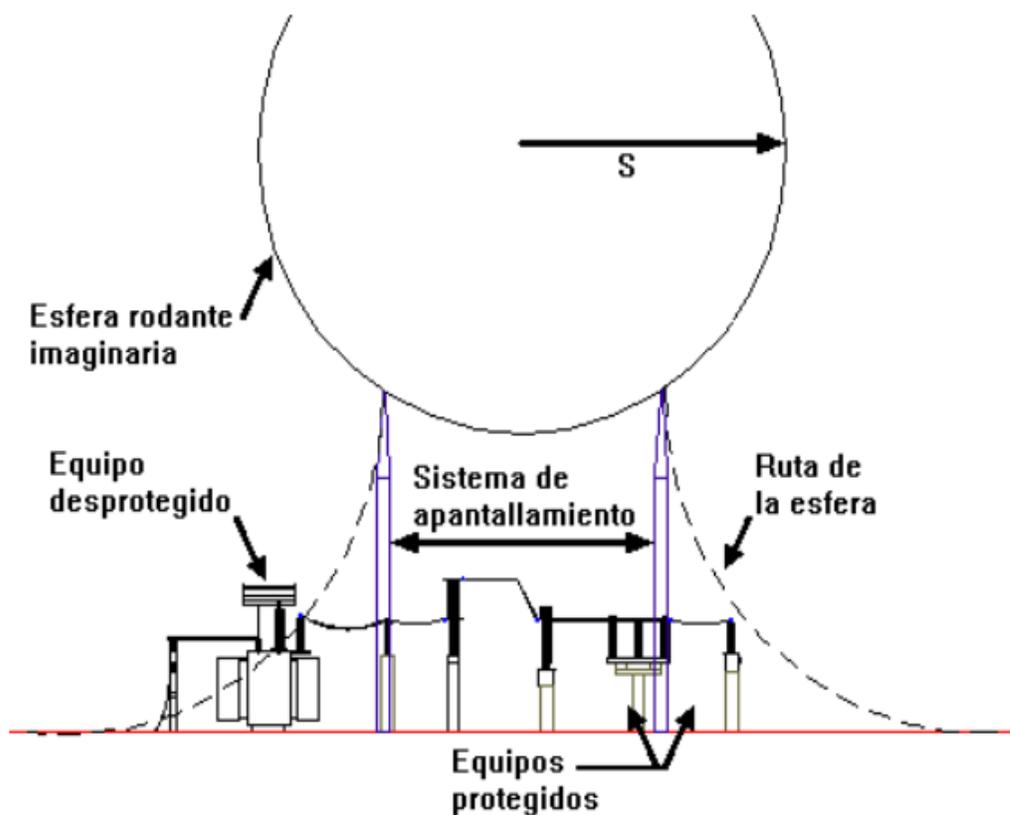
2.10.3.1. Distancia de descarga crítica

Es la distancia de impacto de un rayo, distancia sobre la cual la descarga atmosférica es atraída para impactar un objeto, y corresponde al último paso del líder de la descarga atmosférica para la corriente crítica. La distancia de descarga crítica se expresa en función de la corriente crítica de flameo I_c , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S_m = 8 k I_c^{0,65} \quad (\text{ec. 2.4})$$

La distancia de descarga crítica se mide en metros (m), el coeficiente k tiene en cuenta las diferentes distancias de descarga, siendo un valor de 1 para cables de guarda y 1,2 para mástiles y punta pararrayos. Debe observarse que la distancia de descarga crítica no está en función de la altura del objeto impactado.

Figura 18. **Esfera con radio igual a la distancia de descarga**



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 131.

2.10.3.2. Corriente crítica de flameo

Es necesario calcular la corriente crítica de flameo I_c , debido a que una vez impactado el objeto por la descarga atmosférica, la magnitud del valor de la corriente puede incrementarse, de tal manera que ocasiona una sobretensión peligrosa y por consiguiente puede ser dañina para el aislamiento pudiendo ocasionar flameo en el objeto impactado, la corriente crítica de flameo se mide en kiloamperios (KA).

Para el caso en el cual el apantallamiento protege un barraje soportado por aisladores de poste o equipo, se utiliza la tensión en kilovoltios (KV), soportada al impulso tipo atmosférico del aislamiento del equipo (BIL), y la impedancia característica (Z_0) del barraje a proteger.

$$I_c = \frac{2,2 \text{ BIL}}{Z_0}$$

(ec. 2.5)

Cuando el apantallamiento protege un barraje soportado por cadenas de platos aisladores, se debe utilizar la tensión crítica de flameo inverso de los aisladores y explosores (TCF), la cual se mide en kilovoltios (KV). Debe considerarse la longitud de la cadena de aisladores (w) medida en metros, y al igual que en el caso anterior, la impedancia característica del barraje a proteger.

$$I_c = \frac{2,068 \text{ TCF}}{Z_0} = \frac{2,068 \times 0,94 \times 585w}{Z_0}$$

(ec. 2.6)

2.10.3.3. Impedancia característica

La impedancia característica es uno de los parámetros importantes en el diseño del sistema de apantallamiento, debido a que la corriente crítica de flameo es inversamente proporcional al valor de la misma. La impedancia característica en el apantallamiento se mide en ohmios (Ω) y depende de la altura promedio del conductor h_{av} , el radio del cable r , así como el radio corona R_c . La ecuación que representa la impedancia característica en el sistema de apantallamiento es la siguiente:

$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2h_{av}}{R_c} \ln \frac{2h_{av}}{r}}$$

(ec. 2.7)

La altura promedio del conductor o también llamado cable de fase se calcula, en función de la altura del cable de fase h_{max} , y altura en la mitad del vano h_{min} . La altura se mide en metros (m) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_{av} = \frac{1}{3} h_{max} + \frac{2}{3} h_{min}$$

(ec. 2.8)

Para el caso en el cual no se conoce la altura en la mitad del vano, h_{min} puede calcularse utilizando la longitud del vano L , medida en metros, y la constante ω que relaciona la flecha máxima y la longitud del vano, cuyos valores usualmente se encuentran entre 0,02 y 0,06. La alternativa de cálculo es la siguiente:

$$h_{\min} = h_{\max} - \omega L$$

(ec. 2.9)

2.10.3.4. Radio corona

De acuerdo a lo establecido en la norma internacional IEEE Std. 998-1996 (revisión 2002), la ecuación que describe el radio corona para un solo conductor por fase (calculado en metros), debe considerar la altura promedio del conductor h_{av} , el gradiente de tensión en la superficie del conductor E_0 (se toma valor igual a 1 500 kilovoltios por metro), y la máxima tensión V_c (medida en kilovoltios), soportada por el aislamiento de los aisladores para una onda de impulso con polaridad negativa con un frente de onda de 6 microsegundos.

$$R_c \times \ln\left(\frac{2h_{av}}{R_c}\right) - \frac{V_c}{E_0} = 0$$

(ec. 2.10)

Para el caso de un haz de conductores por fase, el radio corona se calcula considerando el radio corona por un solo conductor R_c , y el radio del haz de conductores R_0 , y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_c' = R_c + R_0$$

(ec. 2.11)

El radio del haz de conductores, debe calcularse en función del radio del subconductor r , y la distancia entre subconductores adyacentes l . Para un haz de dos conductores, la ecuación que representa el radio de haz de conductores se describe a continuación:

$$R_0 = \sqrt{rl}$$

(ec. 2.12)

Considerando el caso en el cual el haz está conformado por cuatro conductores, entonces la ecuación se escribe de la siguiente forma:

$$R_0 = \sqrt[4]{\sqrt{2} r l}$$

(ec. 2.13)

2.10.3.5. Altura efectiva del cable de guarda

Tal y como se indico en el numeral 2.9, el cable de guarda es uno de los dispositivos utilizados para el diseño del sistema de apantallamiento. Los cables pueden ser ubicados cada campo o cada dos campos de la subestación, la altura efectiva para lograr el apantallamiento, es la altura de dicho cable sobre el equipo o personal que se pretende proteger dentro de la subestación, está en función de la distancia de descarga crítica S_m , y la mitad de la distancia entre cables de guarda d . La altura efectiva se mide en metros y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_e = S_m - \sqrt{S_m^2 - d^2}$$

(ec. 2.14)

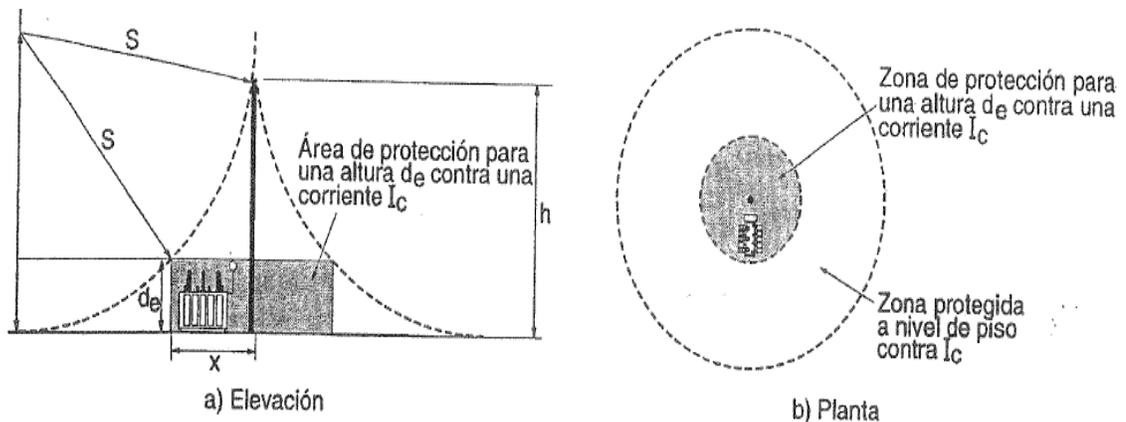
2.10.3.6. Protección con un solo mástil

El uso de mástiles no es muy recomendado por las razones expuestas en el numeral 2.9, sin embargo debido al costo de apantallar con cables de guarda, en ocasiones es necesario recurrir al apantallamiento con mástiles. Para determinar el área de protección de un solo mástil, se utiliza un modelo geométrico el cual toma en consideración la altura del mástil h , la altura del equipo d_e , y la distancia de descarga crítica S_m . En el procedimiento lo que se busca obtener es la distancia horizontal máxima x , desde el mástil hasta el equipo que se desea proteger, la ecuación para determinar la distancia horizontal máxima es la siguiente:

$$x = \sqrt{S_m^2 - (S_m - h)^2} - \sqrt{S_m^2 - (S_m - d_e)^2}$$

(ed. 2.15)

Figura 19. Protección por un mástil



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 136.

2.11. Sistema de red de tierra

La red de tierra es parte del diseño de una subestación, su función es muy importante en la protección contra descargas atmosféricas. La red de tierras proporciona un camino fácil para que la corriente de una descarga se disipe con rapidez para evitar elevaciones de potencial, las cuales pueden llegar a producir arcos en los aisladores de cualquier equipo de la subestación.

El sistema de red de tierra, es una necesidad en toda subestación y cumple las siguientes funciones:

- Establecer el nivel de potencial de todas las partes metálicas de la subestación con respecto al potencial del suelo.
- Asegurar la protección del personal contra la tensión de paso y de contacto.
- Proteger el equipo de la subestación contra sobretensiones.
- En el caso de fallas a tierra, facilitar la apertura de los dispositivos de protección instalados y lograr así salvaguardar los conductores del circuito.
- Estabilizar el voltaje durante operaciones normales.
- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, bajo condiciones de falla a tierra.
- Aumentar la confiabilidad y continuidad del servicio eléctrico.

2.11.1. Factores básicos para el diseño de una red de tierra

Los factores que tienen un papel importante en el diseño del sistema de tierra es el siguiente:

- Resistividad del terreno, la cual puede variar según los materiales que componen el terreno.
- La humedad y temperatura del terreno pueden ocasionar variaciones de la resistividad del terreno, por lo cual es aconsejable realizar mediciones en condiciones de alta temperatura o cuando han existido lluvias recientes.
- Extensión del sistema de tierra, para corrientes de falla o de descarga que alcanzan valores relativamente muy elevados, el sistema debe tener el dimensionamiento adecuado, y así evitar gradientes de potencial sobre la superficie del suelo.
- Determinación de la corriente máxima, es necesario determinar la corriente máxima que fluirá por la red de tierra, lo anterior se obtiene con el análisis de cortocircuito.
- Cálculo de tensiones de paso y de contacto.
- Cálculo de la longitud del conductor para realizar dicha malla, incluyendo la longitud y número de electrodos enterrados.

2.11.2. Tensiones de paso y de contacto

Las tensiones de paso y de contacto, son las diferencias de potencial máximo que pueden presentarse entre una mano y un pie o entre los dos pies, ambas bajo cualquier condición dentro de la subestación. Para el cálculo de las tensiones de paso y de contacto de deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Las resistencias del suelo (área de contacto del pie) es considerada significativa, mientras que la resistencia de contacto de la mano y del pie son despreciables.
- Se toma cada pie como un electrodo en forma de plato con una resistencia de 3 ohmios-metro.
- Para el cuerpo humano se estima un valor de resistencia total de 2 300 ohmios entre manos y 1 100 Ohmios de mano a pie, en ambos casos se usa 1 000 Ohmios como un valor razonable y que brinda seguridad.

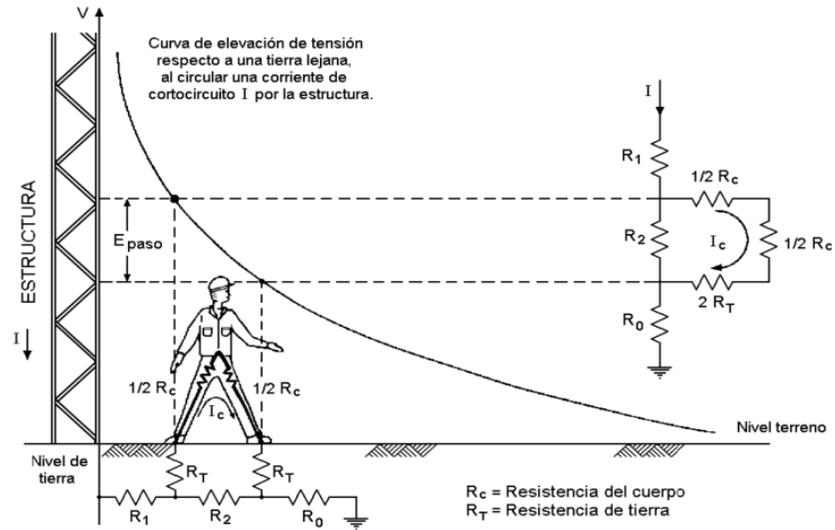
La ecuación que describe la tensión de paso en función de la resistividad del suelo ρ_s (ohmios-metro), es la siguiente:

$$E_p = \frac{(116 + 0,696 \rho_s)}{\sqrt{t}} \quad (\text{ec. 2.16})$$

La ecuación de la tensión de contacto es:

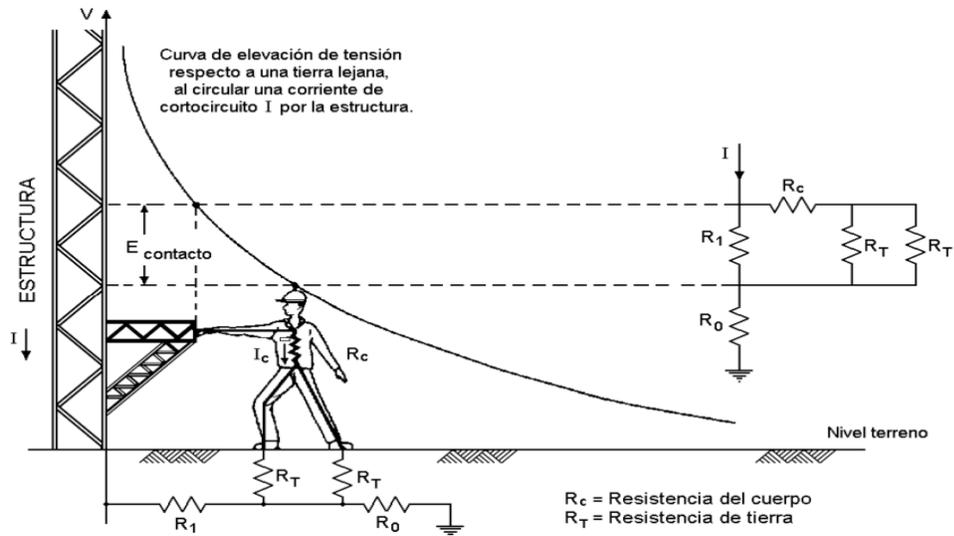
$$E_t = \frac{(116 + 0,174 \rho_s)}{\sqrt{t}} \quad (\text{ec. 2.17})$$

Figura 20. Tensión de paso



Fuente: José Raúl Martín. Diseño de subestaciones eléctricas. p. 241.

Figura 21. Tensión de contacto



Fuente: José Raúl Martín. Diseño de subestaciones eléctricas. p. 242.

2.11.3. Disposiciones básicas de la red de tierra

En la construcción de una subestación eléctrica, generalmente se utilizan tres sistemas de red de tierras, los cuales se presentan a continuación:

- Sistema radial, es considerado uno de los sistemas de menor costo y al mismo tiempo menos confiable, debido que al presentarse una falla se producen grandes gradientes de potencial. Este sistema se construye a través de una o más varillas de cobre, las cuales se unen de forma lineal, y por consiguiente no se forman trayectorias cerradas.
- Sistema de anillo, es considerado un sistema económico y eficiente, este se obtiene colocando un cable alrededor de la superficie que está ocupada por el equipo a proteger, conectando derivaciones a cada equipo. Con dicho sistema se disminuyen los potenciales peligrosos al momento de disipar la corriente de falla, debido a que se tienen varios caminos en paralelo.
- Sistema red o mallas, es considerado el sistema más eficiente y al mismo tiempo el más costoso. El sistema consiste en una malla formada por cables conectados a través de varillas de cobre que interconectan por medio de conductores que pueden ser de cobre, aluminio o acero, su distribución es en forma de círculo, triángulo, rectángulo, etc.

3. INFORMACIÓN BÁSICA DE LA SUBESTACIÓN

3.1. Plan de Expansión del Sistema de Transporte (PET)

De acuerdo a lo establecido en el artículo 54 del Reglamento de la Ley General de Electricidad, modificado mediante Acuerdo Gubernativo 68-2007, se establece que el plan de expansión del sistema de transporte se debe elaborar cada 2 años, y debe cubrir un horizonte mínimo de 10 años, el plan debe considerar proyectos de generación en construcción, así como aquellos presenten evidencia que entran en operación dentro del horizonte anteriormente mencionado.

La subestación El Rancho, como parte del plan de expansión del sistema de transporte, es una obra que debe ser desarrollada para:

- Incrementar la capacidad de transmisión, y así hacer posible el desarrollo de un plan de expansión indicativo del sistema de generación.
- Que el Sistema Nacional Interconectado (SNI), pueda cumplir los criterios de seguridad, calidad y desempeño establecido en las Normas Técnicas que regulan el subsector eléctrico guatemalteco.

La subestación El Rancho, se encuentra ubicada en el municipio San Agustín Acasaguastlán, perteneciente al departamento de El Progreso y la misma conformará parte del sistema principal del SNI.

Tabla IV. **Detalle de las obras del PET 2008-2018**

Lote	Subestaciones		Líneas
	Nuevas	Ampliaciones	Nombre
A	Lo de Reyes 230 kV	Palín 69 kV	Lo de Reyes- Guatemala oeste
	Guatemala oeste 230/69 kV		Guatemala oeste- Las Cruces
	Las Cruces 230 kV		Las Cruces - Palín
	Palín 230/69 kV		Palín - Pacífico
	Pacífico 230 kV		
	La Vega II 230 kV		
B	San Juan Ixcoy 230 kV	Covadonga 230 kV	Covadonga – Uspantán
	Santa Eulalia 230 kV	Huehuetenango II 230/138 kV	San Juan Ixcoy – Covadonga
		Uspantán 230 kV	Santa Eulalia – San Juan de Ixcoy
		La Esperanza 230 kV	Santa Eulalia– Huehuetenango II
			Huehuetenango II – Esperanza
C	La Ruidosa 230/69 kV	Panaluya 230 kV	La Ruidosa – Panaluya
		La Ruidosa 69 kV	
D	El Estor 230/69 kV	El Estor 69 kV	Táctic – El Estor
		Táctic 230 kV	El Estor – La Ruidosa

Continuación de la tabla IV.

Lote	Subestaciones		Líneas
	Nuevas	Ampliaciones	Nombre
E	El Rancho 230/69 kV	El Rancho 69 kV	Chixoy II - El Rancho
		Chixoy II 230 kV	
F	Sololá 230/69 kV	Guate Sur 230 kV	Guatemala Sur – Las Cruces
			Las Cruces – Sololá
			Sololá – La Esperanza

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, Planes de Expansión.

3.2. Clasificación de la subestación

La subestación El Rancho, se puede clasificar de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- Nivel de tensión, la subestación es considerada de alta tensión debido a que la misma contará con campos de 230 y 69 kilovoltios.
- De acuerdo a su función, debido a los niveles de tensión que se manejarán en la subestación, esta tendrá dos funciones principales:
 - Transformación, la subestación tendrá la función de transformar la tensión de 230 kilovoltios proveniente de la línea Chixoy II 230 kV, a una tensión de 69 kilovoltios, para dar salida a la línea El Rancho 69 kV.

- Maniobra, la subestación permitirá realizar maniobras a la línea Guate Norte 230 kV y línea Panaluya 230 kV.
- Por su operación, esta clasificación hace referencia al tipo de tensión con la cual estará operando la subestación, para el caso en particular la misma estará diseñada para operar con corriente alterna.
- Por su construcción, la construcción de la subestación será realizada del tipo intemperie o exterior, es decir, es considerada como aislada en aire.

Como parte de las disposiciones técnicas establecidas en el plan de expansión del sistema de transporte, la subestación debe contar con 4 campos de reserva y un campo para ampliaciones futuras en 230 kilovoltios.

3.3. Tecnología de la subestación

La tecnología de la subestación se puede definir también como el tipo de aislamiento utilizado por el equipo de patio de la subestación, la diferencia de tecnología implica una serie de condiciones, ventajas y desventajas en la implementación de una subestación.

La subestación El Rancho es aislada en aire (AIS), dicha tecnología es generalmente la más utilizada. La aparamenta (equipo de patio), cables y barrajes se encuentran aislados en aire, por este motivo cada equipo se encuentra de manera individual y separado del resto. Debido al tipo de aislamiento, el tamaño de la aparamenta y barrajes resultan ser mucho mayores en conjunto, debido a que las distancias de seguridad a tener en consideración deben ser mayores.

3.4. Configuración de barra

Como parte del Plan de Expansión del Sistema de Transporte, la subestación eléctrica El Rancho, funcionara como punto de conexión o desconexión de las líneas de transporte del Sistema Nacional Interconectado, por lo cual dicha subestación debe conseguir la máxima seguridad flexibilidad y continuidad del servicio eléctrico.

La selección de configuración de barra y de conexión de una subestación, debe considerar diversos factores para satisfacer los requisitos del Sistema Nacional Interconectado. La subestación debe funcionar con regularidad, debe ser relativamente económica, segura y lo más sencilla posible.

El diseño de la subestación debe permitir un alto nivel de continuidad del suministro de energía eléctrica, se debe prever futuras ampliaciones y permitir un funcionamiento flexible. Además, debe disponer con medios necesarios para realizar mantenimientos a líneas, interruptores, seccionadores, entre otros, sin poner en peligro el personal que realizará dicho mantenimiento, así como poner en riesgo la continuidad del servicio.

De acuerdo a los requerimientos establecidos dentro del Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008-2018, las nuevas subestaciones que conformarán dicho plan, como es el caso de la subestación El Rancho, deben tener una configuración de interruptor y medio. Está configuración fue seleccionada debido a su versatilidad para continuar operando ante cualquier mantenimiento o falla.

La configuración interruptor y medio, es conocida también de triple conexión, su nombre se deriva en la disposición de tres interruptores en serie

entre dos barras principales, entre los tres interruptores se encuentran conectados dos circuitos, de aquí el nombre de interruptor y medio, es decir, tres interruptores por cada dos salidas.

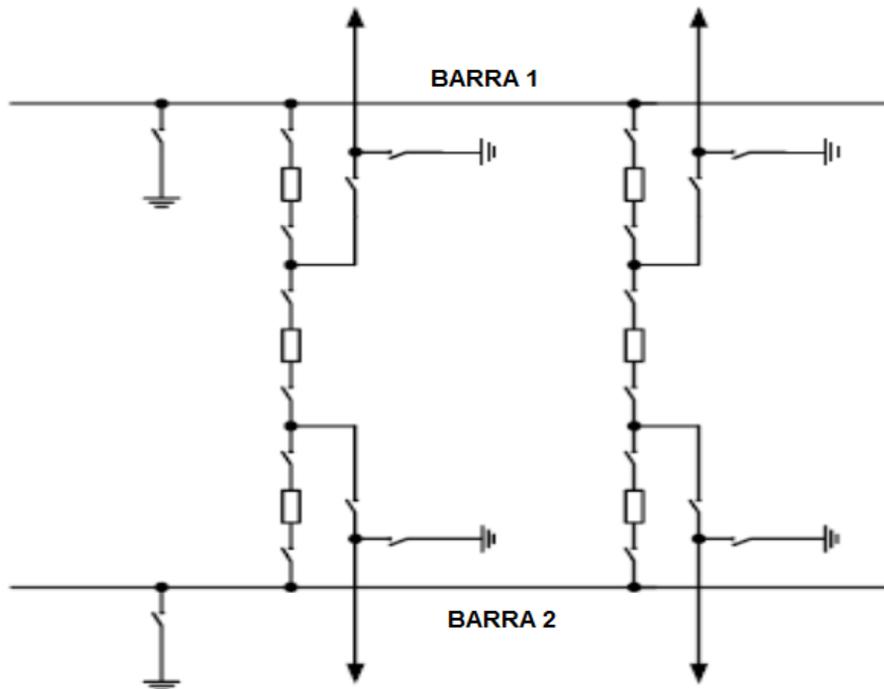
Generalmente los interruptores se encuentran cerrados y las dos barras se encuentran a la misma tensión. En condiciones de falla, existe la probabilidad de que el circuito en el que se produce la falla quede fuera de servicio, toda vez que se produzca falla en el interruptor de enlace ó dicho interruptor se encuentre en mantenimiento, sin embargo no se produce la pérdida adicional del segundo circuito.

La configuración de interruptor y medio requiere una inversión más onerosa en comparación con otras configuraciones (barra simple, barra simple con barra de transferencia, barra doble, etc.), a excepción de la configuración doble interruptor doble barra. Sin embargo es superior en los siguientes aspectos:

- Confiabilidad, es la probabilidad de que la subestación pueda suministrar energía durante un período de tiempo dado, con al menos un componente fuera de servicio.
- Flexibilidad, es la propiedad de la subestación para acomodarse a diferentes condiciones que se pueden presentar, especialmente por cambios operativos, contingencias o mantenimiento de sistema eléctrico de potencia.
- Seguridad, es la propiedad de la subestación de dar continuidad de servicio sin interrupción alguna, durante fallas de los equipos de potencia, especialmente interruptores y barrajes.

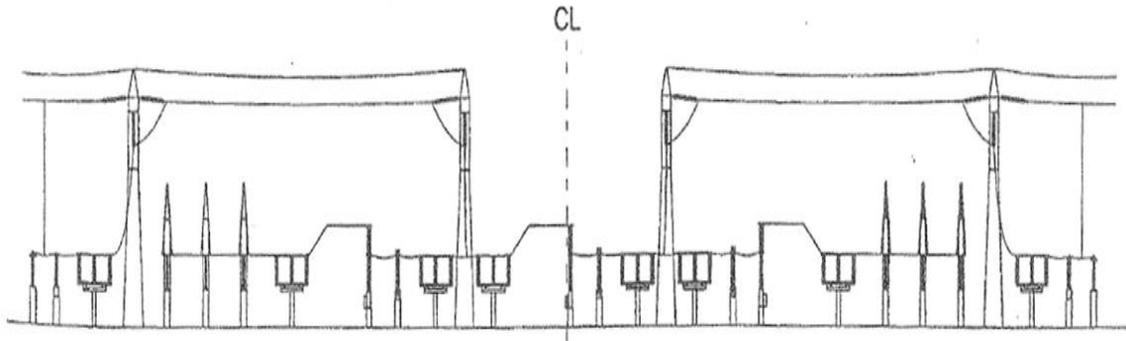
Se puede realizar un mantenimiento a cualquier interruptor o barraje sin necesidad de suspender el servicio y sin alterar el sistema de protección, y como se menciono anteriormente, una falla en un barraje no interrumpe el servicio, a ningún circuito, por lo cual presenta un alto índice de confiabilidad y de seguridad tanto por fallas en los interruptores, así como en los circuitos y en las barras.

Figura 22. **Unifilar configuración interruptor y medio**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

Figura 23. **Perfil configuración interruptor y medio**



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 155.

3.5. Equipo principal de la subestación

El equipo o aparamenta, son todos los dispositivos que actúan o tienen contacto con los conductores principales con la finalidad de manejar y operar la subestación. En el presente apartado se describirá de forma general el equipo que será instalado en la subestación El Rancho.

3.5.1. Interruptor de potencia

Son dispositivos mecánicos de interrupción, con la capacidad de conducir, interrumpir y establecer corrientes en condiciones normales, así como interrumpir y establecer corrientes en condiciones anormales o de falla. El accionamiento de dicho interruptor puede ser manual o mediante relés de maniobra y protección.

Una de sus funciones es poner en servicio o fuera de servicio un circuito eléctrico, además están capacitados para garantizar la protección de la instalación contra corrientes de cortocircuito. La elección de dicho interruptor

depende principalmente de la potencia de cortocircuito de la subestación a proteger, y no de la corriente que dicho interruptor debe soportar en condiciones de operación normal.

Otro parámetro a tener en consideración es la duración de su funcionamiento, lo anterior se debe al momento en el cual se produce una falla, todo el equipo se verá sometido a esfuerzos electrodinámicos, esfuerzos térmicos, de esta razón cuanto mayor sea la duración para la liberación de la falla, el equipo corre un mayor riesgo de daño.

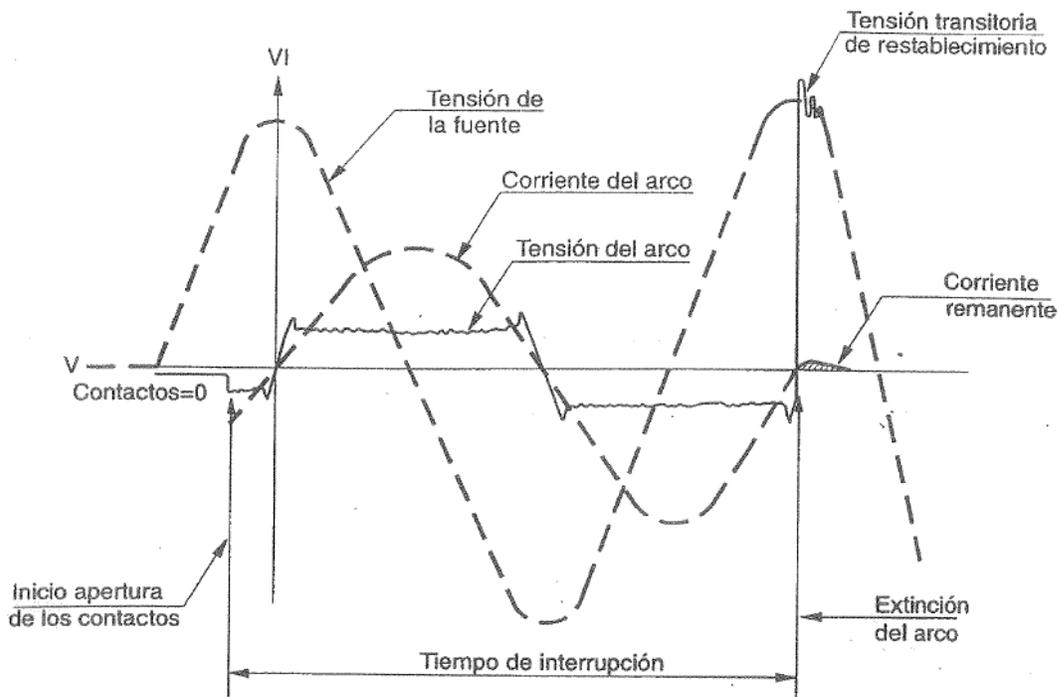
Los interruptores se pueden clasificar en los siguientes grupos, de acuerdo a su modo de desconexión:

- Interruptor de desconexión de aire, estos no necesitan fluido auxiliar alguno para la extinción del arco, lo cual también se conoce como desconexión en seco. Mediante soplado magnético alargan el arco, incrementando su resistencia hasta el punto en el cual llega a ser considerable en la impedancia del circuito, por consiguiente la tensión y la corriente se encuentran en fase, y como resultado el arco se extingue a su primer paso por un valor cero.
- Interruptor de gran volumen de aceite, en este tipo de interruptor el aceite sustituye al aire, ejerciendo las funciones de dieléctrico y agente extinto. Constan de un recipiente grande de aceite cuyo interior dispone de dos pares de contactos por fase y al momento de circundar el arco, se limita la producción de gases.
- Interruptor de pequeño volumen de aceite, este tipo de interruptor consta de una cámara de desconexión fabricada con material aislante y en cuyo

interior se evapora un pequeño volumen de aceite, por lo cual se crea un aumento de presión el cual es producto de la extinción del arco.

- Interruptor de aire comprimido, en este tipo de interruptor se utilizan las cualidades dieléctricas del aire sometido a presión, debido a la velocidad del barrido, se facilita la evacuación de las moléculas ionizadas consiguiendo la desconexión con una escasa separación de los contactos.

Figura 24. **Operación de un interruptor ante una falla**



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 237.

3.5.2. Seccionadores

Se deben observar las características del sistema en el cual los seccionadores serán aplicados y la función que desempeñaran para una adecuada selección y utilización, características térmicas y eléctricas como la capacidad de conducción de corrientes de carga, corrientes de cortocircuito, resistencia a esfuerzos dieléctricos, entre otras, son las que se deben tener muy en cuenta, además es necesario tomar en consideración los esfuerzos mecánicos producidos por el viento y corrientes de cortocircuito.

La función principal de los seccionadores es la de aislar tramos de circuito, de forma visible, los circuitos que sean interrumpidos por un seccionador deben encontrarse libres de corriente, es decir, que el seccionador debe operar todo el tiempo en vacío. Además, deben tener la capacidad de soportar las corrientes nominales de operación, así como sobreintensidades y corrientes de cortocircuito durante un tiempo determinado, los seccionadores deben asegurar que los tramos de un circuito aislado se encuentren libres de tensión, para que el personal que se encuentre trabajando dentro de la subestación pueda tener libre contacto durante los trabajos de inspección o mantenimiento.

Generalmente la ubicación típica de un seccionador es en ambos lados de un interruptor para aislarlo, una vez que el interruptor se encuentra abierto, su accionamiento puede ser manual o motorizado. A continuación se presentan los tipos de seccionador utilizados en una subestación:

- Seccionador de línea, este tipo de seccionador es utilizado para aislar la línea de transmisión de los interruptores, para que de esa forma no suceda presencia de tensión en la línea.

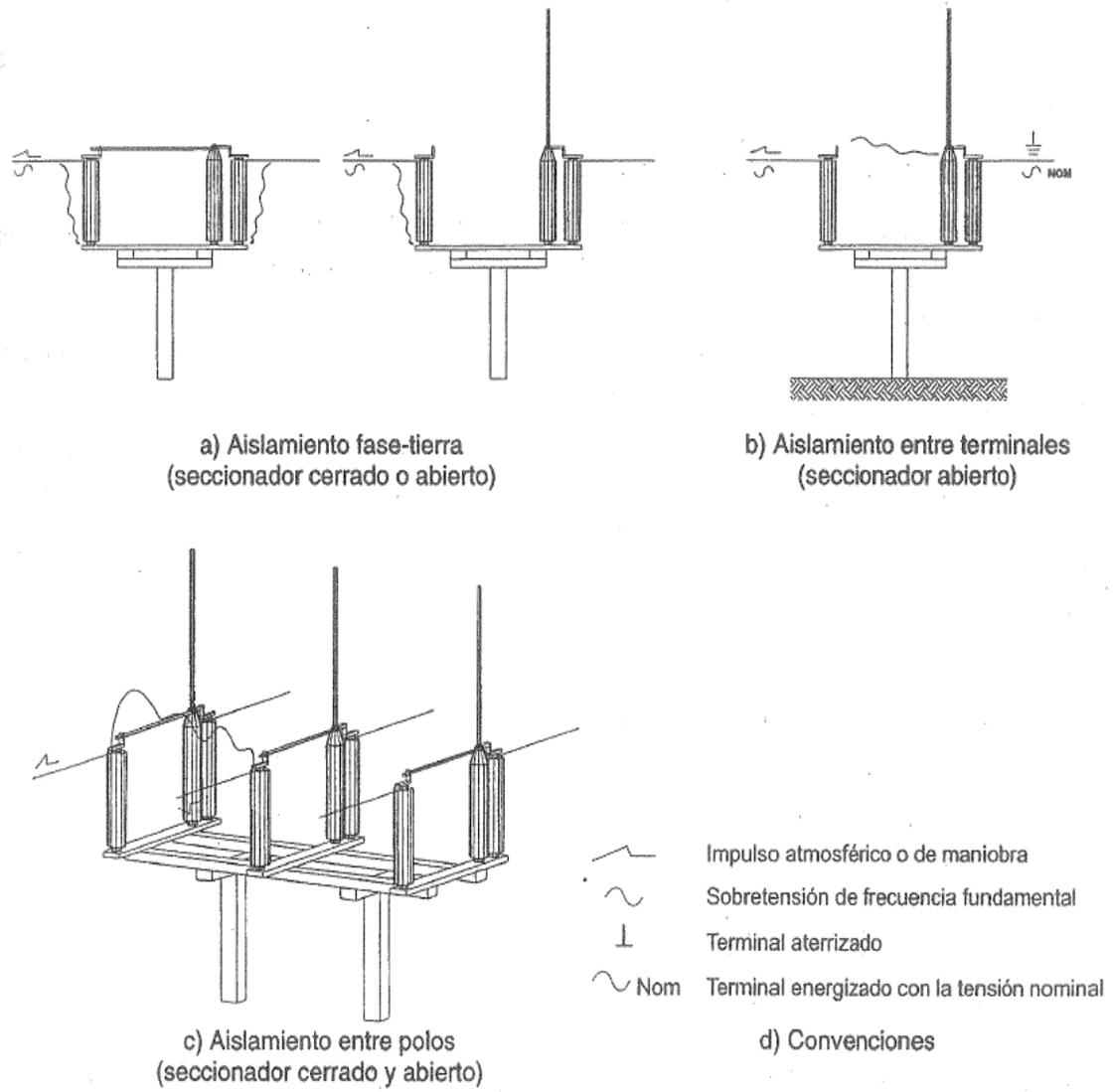
- Seccionador de barra, este tipo de seccionador se encuentra ubicado entre la barra y el interruptor de barra, aislando de esa manera eléctricamente el interruptor de barra.
- Seccionador de puesta a tierra, este se encuentra ubicado únicamente en módulos de línea, por lo general forma parte del seccionador de línea, su función es no permitir que la línea tenga presencia de tensión por inducción una vez que esta se encuentra aislada.
- Seccionador de medio diámetro, es utilizado en el esquema de doble barra con interruptor y medio, y se encuentra ubicado en ambos lados del interruptor de medio diámetro.

Tabla V. **Fuerzas mecánicas sobre terminales de seccionadores**

Tensión asignada (kV)	Corriente asignada (A)	Seccionadores de 2 y 3 columnas		Seccionadores con soportes individuales	
		Fuerza longitudinal (N)	Fuerza transversal (N)	Fuerza longitudinal (N)	Fuerza transversal (N)
72,5	800-1 250	400	130	800	200
100-123-145	1 250	500	170	800	200
245	800-1 250	800	270	1 250	400
	2 000	1 000	330	1 600	500
420-500	2 000	1 600	530	2 000	800
	4 000	2 000	660	4 000	1 600

Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 262.

Figura 25. Nivel de aislamiento a especificar para seccionadores



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 259.

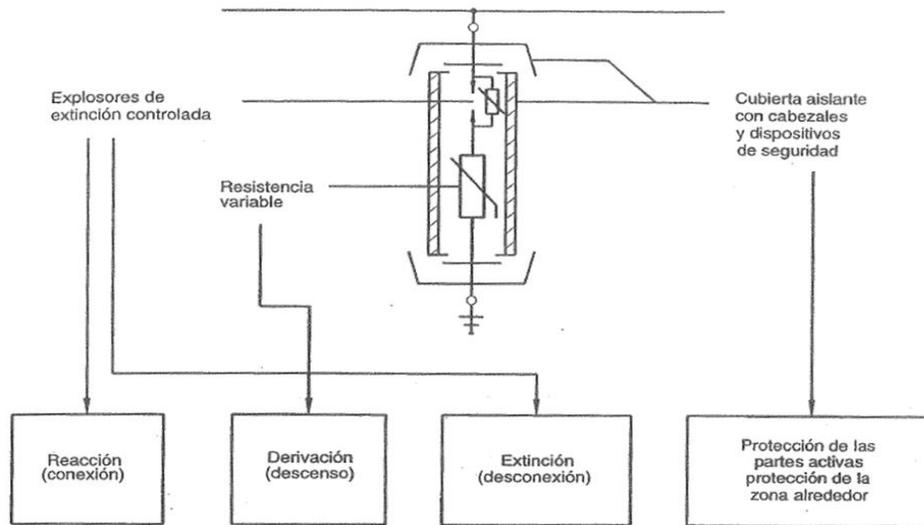
3.5.3. Pararrayos

Los pararrayos son elementos de protección de los equipo de la subestación contra sobretensiones, están formados por una serie de elementos resistivos no lineales y explosores que limitan la amplitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, operación de interruptores u oscilaciones de potencia. Los pararrayos cumplen las siguientes funciones:

- Descargar las sobretensiones cuando su magnitud llega al valor de la tensión disruptiva de diseño.
- Conducir a tierra las corrientes de descarga producidas por las sobretensiones.
- Debe desaparecer la corriente de descarga al desaparecer las sobretensiones.
- No deben operar con sobretensiones temporales de baja frecuencia.
- La tensión residual debe ser menor que la tensión que resisten los aparatos que protegen.

El pararrayos para su correcto funcionamiento debe estar conectado todo el tiempo a los circuitos que protege, para entrar en operación justo en el instante en el cual una sobretensión alcance un valor superior a la tensión máxima del sistema. Justo en la operación produce un arco de los entrehierros limitando así la corriente resultante, hasta que la onda de la corriente pase por cero, así los explosores interrumpen definitivamente la corriente.

Figura 26. **Esquema de un pararrayos convencional**



Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 311.

Tabla VI. **Clasificación de pararrayos según IEEE Std. C62.11**

Clasificación de pararrayos	Valor del impulso (valor pico en A)
Estación (800 kV)	20 000
Estación (500 kV)	15 000
Estación (menor a 500kV)	20 000
Intermedio	5 000
Distribución	
• trabajo pesado	10 000
• trabajo normal	5 000
Secundario	1 500

Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 314.

3.5.4. Transformadores de instrumento

Los transformadores de instrumento son utilizados para poder controlar cambios energéticos en el sistema eléctrico al cual se encuentran conectados. Los transformadores de instrumento pueden ser utilizados para medición y/o protección, de acuerdo a su utilización se pueden clasificar en:

- Transformadores de potencial (PT's), se instalan generalmente con tensiones nominales superiores a los 600 voltios, debido a que las mediciones de tensión no son realizadas directamente de la red primaria sino a través de estos, con la finalidad de aislar el circuito de baja tensión (secundario) del circuito de alta tensión (primario). El transformador reproduce lo más fielmente posible los efectos transitorios y de régimen permanente del circuito de alta tensión en el circuito de baja tensión.

Tabla VII. Límites de error para PT's de medición

Clase de precisión	Error de tensión (%)	Desfase (min)
0,1	$\pm 0,1$	± 5
0,2	$\pm 0,2$	± 10
0,5	$\pm 0,5$	± 20
1,0	$\pm 1,0$	± 40
3,0	$\pm 3,0$	No especificada

Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 275.

Tabla VIII. **Límites de error para PT's de protección**

Clase de precisión	Error de tensión (%)	Desfase (min)
3P	± 3,0	± 120
6P	± 6,0	± 240

Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 275.

- Transformadores de corriente (CT's), son utilizados para realizar mediciones de corriente en los sistemas eléctricos, tienen el devanado primario conectado en serie con el circuito de alta tensión. Su impedancia vista desde el lado del devanado primario, es despreciable comparada con la del sistema en el cual estará instalado aún si tiene en cuenta la carga que se conecta en su secundario, de esta forma la corriente que circula por el primario está determinada por el circuito de potencia. Los tipos de transformadores de corriente son:
 - Tipo primario devanado, consta de dos devanados primarios y secundarios totalmente aislados y montados permanentemente sobre el circuito magnético.
 - Tipo barra, es similar al tipo devanado, excepto que el primario es un solo conductor recto de tipo barra.
 - Tipo toroidal (ventana), tiene un devanado secundario totalmente aislado y montado permanentemente sobre el circuito magnético y una ventana a través de la cual puede hacerse pasar un conductor que proporciona el devanado primario.

- Tipo para bornes, es un tipo especial toroidal proyectado para colocarse en los bornes aislados de los aparatos, actuando el conductor del borne como devanado primario.

Tabla IX. Límites de error para CT's de medición

Clase de precisión	± % de error de corriente (al % de corriente asignada) indicado				± Desplazamiento de fase en minutos (al % de la corriente asignada) indicado					
	5	20	100	120	5	20	100	120		
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5		
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10		
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30		
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60		
Clase de precisión										
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30
± % de error de corriente (al % de corriente nominal) indicado										
Clase	5				20					
3	3				3					
5	5				5					

Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 285.

Tabla X. **Límites de error para CT's de protección**

Clase de precisión	Error de corriente para la corriente primaria asignada (%)	Desplazamiento de fase para la corriente primaria asignada (min)	Error compuesto para la corriente límite de precisión (%)
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	-	10

Fuente: Mejía Villegas S.A. Subestaciones de alta y extra alta tensión. p. 287.

3.5.5. Transformador de potencia

El transformador de potencia, es una máquina electromagnética cuyo objetivo es transformar los valores de tensión y corriente manteniendo la potencia y frecuencia relativamente constante, es considerado el equipos más importante en los sistemas eléctricos de transmisión y el de mayor costo debido al tamaño y diseño del mismo.

Las partes principales que conforman el transformador de potencia, son el núcleo magnético, los devanados primario y secundario, el cambiador de derivaciones, boquillas, y el tanque o dispositivos de enfriamiento. Los transformadores pueden clasificarse de acuerdo a lo siguiente:

- Por su utilización en los sistemas eléctricos, en transformadores de central, transformadores de distribución y transformadores de red.
- Por la forma de instalación, en transformadores para instalaciones exteriores y transformadores para instalaciones interiores.

- Por el aislamiento utilizado, en transformadores al aire, transformadores de aceite y encapsulados (GIS).
- Por la clase de refrigeración o enfriamiento, en transformadores autorefrigerados, transformadores con refrigeración por ventilación independiente y transformadores con refrigeración por circulación forzada.

Los métodos de enfriamiento de los transformadores se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Clase OA, son transformadores inmersos en aceite auto enfriado.
- Clase OA/FA, transformadores en los cuales el enfriamiento se da por circulación natural y forzada del aire en la superficie del transformador.
- Clase OA/FA/FA, son los transformadores inmersos en aceite auto enfriados con aire forzado y aceite forzado.
- Clase OA/FA/FOA, transformadores cuyo enfriamiento se da por circulación natural del aire, por circulación forzada del aire y circulación forzada de aceite.
- Clase OA/FOA/FOA, son transformadores inmersos auto enfriados sumergido en líquido aislante con enfriamiento propio, con aceite forzado y aire forzado, únicamente con aceite forzada, y únicamente con aire forzado.

- Clase FOA, son transformadores sumergidos en líquido aislante con enfriamiento por aceite forzado.
- Clase OW, son transformadores inmersos en aceite enfriados con agua.
- Clase OW/A, son transformadores inmersos en aceite, enfriados con agua y/o auto enfriados.
- Clase FOW, estos transformadores tiene enfriamiento por circulación forzada de aceite y agua.

3.6. Nivel isoceráunico de la región

El nivel isoceráunico de un lugar es el número promedio de días al cabo del año en los que hay tormenta, tal y como se mencionó en el numeral 2.6.1, al realizar una investigación de la densidad de tormentas eléctricas que caen en la república de Guatemala en el transcurso del año, para San Agustín Acasaguastlán, municipio del departamento de El Progreso, se tiene un promedio de 100 tormentas eléctricas al año. Ver mapa de niveles isoceráunicos en anexo 4.

4. DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN

4.1. Premisas de diseño

Las condiciones del aislamiento en subestaciones de transmisión, como es el caso de la subestación El Rancho, requieren la consideración de las sobretensiones transitorias producidas por las descargas atmosféricas que inciden de forma directa en los equipos de la subestación, las cuales pueden ser producidas por fallas del sistema de apantallamiento. Este tipo de descargas conlleva a unas condiciones difíciles para los aislamientos.

Como se ha mencionado anteriormente, la función principal del sistema de apantallamiento consiste en proteger los equipos de la subestación. Generalmente las empresas dedicadas al diseño de subestaciones utilizan el modelo electrogeométrico para diseñar el apantallamiento.

En el presente capítulo se presentará la memoria de cálculo necesaria para diseñar el apantallamiento de la subestación El Rancho, el diseño del apantallamiento está basado en el modelo electrogeométrico, utilizando hilo de guarda como dispositivo apantallador para los equipos de patio y puntas franklin para el edificio de control, la metodología de cálculo utilizada está basada en la norma internacional IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations revisión 2002.

4.2. Cálculo de la altura promedio de conductor

Para poder realizar el cálculo de la altura promedio del conductor o también llamado cable de fase, es necesario considerar la altura de conexión del cable de fase (h_{\max} en metros), la altura en la mitad del vano (h_{\min} en metros), sin embargo para el caso en particular no se conoce la altura en la mitad del vano, por lo cual se utilizará la longitud del vano (L en metros) y la constante que relaciona la flecha máxima y la longitud del vano (ω).

Tabla XI. Datos para cálculo de la altura promedio de conductor h_{av}

Parámetros para cálculo	Campo de 230 (kV)	Campo de 69 (kV)
h_{\max} (metros)	18	12
L (metros)	40	20
W	0,03	0,03

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la ecuación 2.9, y los datos de la tabla XI, entonces la altura a mitad del vano es la siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$h_{\min} = 18 - 0,03 \times 40 = 16,8 \text{ m} \quad (\text{ec. 4.1})$$

- Para el campo de 69 kilovoltios

$$h_{\min} = 12 - 0,03 \times 20 = 11,4 \text{ m} \quad (\text{ec. 4.2})$$

Posterior a calcular la altura en la mitad del vano, de acuerdo a la ecuación 2.8 y los datos de la tabla XI, la altura promedio del conductor de fase es la siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$h_{av} = \frac{1}{3} 18 + \frac{2}{3} 16,8 = 17,2 \text{ m}$$

(ec. 4.3)

- Para el campo de 69 kilovoltios

$$h_{av} = \frac{1}{3} 12 + \frac{2}{3} 11,4 = 11,6 \text{ m}$$

(ec. 4.4)

4.3. Cálculo del radio corona

Para el cálculo del radio corona, se utilizará la metodología establecida en la norma IEEE Std. 998-1196 (revisión 2002), por lo cual es importante conocer el gradiente de tensión en la superficie del conductor E_0 , la altura promedio del conductor h_{av} , y la máxima tensión V_c en kilovoltios (kV), soportada por el aislamiento para una onda negativa tipo impulso con un frente de onda de 6 microsegundos, es decir, la tensión crítica de flameo (TCF). La tensión crítica de flameo para la subestación El Rancho, de acuerdo a la ecuación 2.6 queda de la siguiente manera:

- Para el campo de 230 kilovoltios, se considera una longitud de aisladores $w=2,336$ metros, por lo cual la tensión crítica de flameo es la siguiente:

$$TCF = 0,94 \times 585 \times 2,336 = 1\,284,6 \text{ kV}$$

(ec. 4.5)

- Para el campo de 69 kilovoltios, se considera una longitud de aisladores $w=1,320$ metros, por lo cual la tensión crítica de flameo es la siguiente:

$$TCF = 0,94 \times 585 \times 1,320 = 725,8 \text{ kV}$$

(ec. 4.6)

Tabla XII. **Datos para cálculo del radio corona R_c**

Parámetros para cálculo	Campo de 230 (kV)	Campo de 69 (kV)
h_{av} (metros)	17,2	11,6
$V_c = TC$ (kilovoltios)	1 284,6	725,8
E_0 (Kilovoltios/metro)	1 500	1 500

Fuente: elaboración propia.

Tal y como se indicó en el numeral anterior, el diseño del apantallamiento está basado en la utilización del hilo de guarda, y para el caso en particular, el diseño contempla la utilización de un solo conductor, por lo cual para el cálculo del radio corona se utilizara la ecuación 2.10 y los datos de la tabla XII. El método numérico utilizado para encontrar la solución es el método de Newton Raphson, y por consiguiente el valor del radio corona es el siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$R_c \times \ln\left(\frac{2 \times 17,2}{R_c}\right) - \frac{1\,284,6}{1\,500} = 0$$

(ec. 4.7)

Tabla XIII. **Radio corona 230 kilovoltios para una tolerancia de 0,001**

ITER.	R _c inicial	F(R _c)	F'(R _c)	Solución de R _c	Error	Análisis
1	0,000120	-0,854892	11,566075	0,074034	0,073914	Otra lter.
2	0,074034	-0,401737	5,141291	0,152173	0,078139	Otra lter.
3	0,152173	-0,031501	4,420793	0,159299	0,007126	Otra lter.
4	0,159299	-0,000164	4,375030	0,159336	0,000038	Solución

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la solución encontrada, aplicando el método de Newton Raphson, el radio corona para el campo de 230 kilovoltios con una tolerancia de 0,001 es de aproximadamente 0,1593 metros.

- Para el campo de 69 kV

$$R_c \times \ln\left(\frac{2 \times 11,6}{R_c}\right) - \frac{725,8}{1500} = 0$$

(ec. 4.8)

Tabla XIV. **Radio corona 69 kilovoltios para una tolerancia de 0,001**

ITER.	R _c inicial	F(R _c)	F'(R _c)	Solución de R _c	Error	Análisis
1	0,00012	-0,48241	11,56608	0,04183	0,04171	Otra lter.
2	0,04183	-0,21958	5,71223	0,08027	0,03844	Otra lter.
3	0,08027	-0,02902	5,06043	0,08600	0,00573	Otra lter.
4	0,08600	-0,00246	4,99142	0,08650	0,00049	Solución

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la solución encontrada, aplicando el método de Newton Raphson, el radio corona para el campo de 69 kilovoltios con una tolerancia de 0,001 es de aproximadamente 0,0865 metros.

4.4. Cálculo de la impedancia característica

Previo a realizar el cálculo de la impedancia característica de los barrajes, es necesario considerar el radio del tipo de conductor que será utilizado en el apantallamiento, para el campo de 230 kilovoltios se utilizará conductor Gladiolus y para el campo de 69 kilovoltios conductor Cowslip. A continuación se presentan los parámetros necesarios para el cálculo:

Tabla XV. Datos para cálculo de la impedancia característica Z_0

Parámetros para cálculo	Campo de 230 (kV)	Campo de 69 (kV)
h_{av} (metros)	17,2	11,6
R_c (metros)	0,1593	0,0865
r (radio conductor en metros)	0,018	0,0205

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los datos de la tabla XV y la ecuación 2.7, la impedancia característica para cada uno de los campos es la siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2 \times 17,2}{0,1593} \ln \frac{2 \times 17,2}{0,018}} = 382,4 \Omega$$

(ec. 4.9)

- Para el campo de 69 kilovoltios:

$$Z_0 = 60 \sqrt{\ln \frac{2 \times 11,6}{0,0865} \ln \frac{2 \times 11,6}{0,0205}} = 376,2 \Omega$$

(ec. 4.10)

4.5. Cálculo de la corriente crítica de flameo

Es importante realizar el cálculo de la corriente que puede ocasionar una sobretensión peligrosa para el aislamiento, es de esta razón que se hace necesario calcular la corriente crítica de flameo, la cual es directamente proporcional a la tensión crítica de flameo (para un barraje soportado por cadenas de aisladores) e inversamente proporcional a la impedancia característica. Los parámetros necesarios para calcular la corriente crítica de flameo son los siguientes:

Tabla XVI. Datos para cálculo de la corriente crítica de flameo I_c

Parámetros para cálculo	Campo de 230 (kV)	Campo de 69 (kV)
TCF (kilovoltios)	1 284,6	725,8
Z_0 (ohmios)	382,4	376,2

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los datos de la tabla XVI y la ecuación 2.6, la corriente crítica de flameo para cada uno de los campos es la siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$I_c = \frac{2,068 \times 1\,284,6}{382,4} = 6,95 \text{ kA}$$

(ec. 4.11)

- Para el campo de 69 kilovoltios:

$$I_c = \frac{2,068 \times 725,8}{376,2} = 3,99 \text{ kA}$$

(ec. 4.12)

4.6. Cálculo de la distancia de descarga crítica

En la práctica, para determinar gráficamente la altura mínima de los dispositivos de protección, se trazan arcos de circunferencia, con radio igual a la distancia de descarga a los objetos, o tangentes entre los objetos. Cualquier equipo por debajo de los arcos estará protegido por él o por los objetos que conforman el arco y cualquier objeto que sea tocado por el arco estará expuesto a descargas directas. Debido a que el diseño del apantallamiento de la subestación El Rancho está basado en la utilización de un hilo de guarda, el coeficiente $k=1$, así mismo se utilizarán las corrientes críticas de flameo (en kiloamperios) calculadas en el numeral anterior, el cálculo para cada uno de los niveles de tensión de la subestación son de acuerdo a la ecuación 2.4.

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$S_m = 8 (1) (6,95)^{0,65} = 28,2 \text{ m}$$

(ec. 4.13)

- Para el campo de 69 kilovoltios:

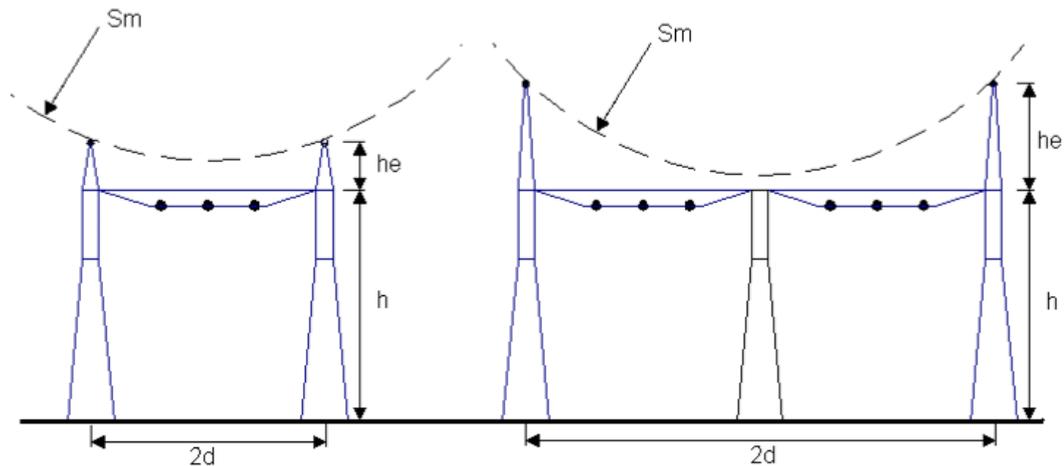
$$S_m = 8 (1) (3,99)^{0,65} = 19,6 \text{ m}$$

(ec. 4.14)

4.7. Cálculo de la altura efectiva del cable de guarda

Debido a que el diseño del apantallamiento, considera la utilización del hilo o cable de guarda como dispositivo apantallador, es necesario calcular la altura efectiva del apantallamiento, la cual es la altura del hilo de guarda sobre el sistema que está protegiendo. Previo a realizar el cálculo de la altura efectiva del cable de guarda, es necesario tener en consideración el parámetro d , el cual corresponde a la mitad de la distancia en metros entre cables de guarda tal y como se observa en la siguiente figura.

Figura 27. Apantallamiento con cable de guarda



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

Para la subestación eléctrica El Rancho la distancia entre cables de guarda es 18 metros para el campo de 230 kilovoltios y 10 metros para el campo de 69 kilovoltios. De acuerdo a la ecuación 2.14 la altura está en función de la distancia de descarga crítica y la mitad de la distancia entre cables de guarda. La altura efectiva del cable de guarda es la siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$h_e = 28,2 - \sqrt{(28,2)^2 - \left(\frac{18}{2}\right)^2} = 1,47 \text{ m}$$

(ec. 4.15)

- Para el campo de 69 kilovoltios:

$$h_e = 19,6 - \sqrt{(19,6)^2 - \left(\frac{10}{2}\right)^2} = 0,65 \text{ m}$$

(ec. 4.16)

El límite práctico para la separación entre cables de guarda adyacentes esta determinado como 1,5 veces la distancia de descarga crítica. Para la subestación El Rancho, el límite de separación es el siguiente:

- Para el campo de 230 kilovoltios:

$$2d_{\max} = 1,5 (28,2) = 42,3 \text{ m}$$

(ec. 4.17)

- Para el campo de 69 kilovoltios:

$$2d_{\max} = 1,5 (19,6) = 29,4 \text{ m}$$

(ec. 4.18)

4.8. Apantallamiento de la subestación El Rancho

Para el desarrollo del apantallamiento de la subestación eléctrica el Rancho, se utilizarán castilletes con una altura de 2 metros para el campo de 230 kilovoltios, y una altura de 1,5 metros para el campo de 69 kilovoltios. A continuación se presenta el detalle del apantallamiento propuesto para la subestación eléctrica El Rancho.

Tabla XVII. Apantallamiento para el campo de 230 kilovoltios

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Radio del conductor gladius	0,018 metros	Radio Corona	0,1593 metros
Gradiente de Tensión en la superficie del conductor	1 500 kilovoltios	Impedancia característica	382,4 Ω
Número de conductores de fase	1	Corriente crítica de flameo	6,95 kiloamperios
Distancia efectiva entre cables de guarda	18 metros	Distancia de descarga crítica	28,2 metros
Tensión crítica de flameo	1 284,6 kilovoltios	Altura efectiva del cable de guarda	1,47 metros

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Apantallamiento para el campo de 69 kilovoltios**

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Radio del conductor cowslip	0,0205 metros	Radio Corona	0,0865 metros
Gradiente de Tensión en la superficie del conductor	1 500 kilovoltios	Impedancia característica	376,2 Ω
Número de conductores de fase	1	Corriente crítica de flameo	3,99 kiloamperios
Distancia efectiva entre cables de guarda	10 metros	Distancia de descarga crítica	19,6 metros
Tensión crítica de flameo	725,8 kilovoltios	Altura efectiva del cable de guarda	0,65 metros

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El sistema de apantallamiento tiene por finalidad, proteger contra descargas atmosféricas, a las personas e instalaciones que se encuentran dentro de una subestación, reduciendo la probabilidad de falla debida a una descarga atmosférica.
2. El hilo o cable de guarda es el dispositivo más utilizado en el diseño de un sistema de apantallamiento, debido a que rodea literalmente la subestación ofreciendo protección a lo largo del cable; sin embargo su utilización estará restringida al alto costo que representa el diseño con dicho dispositivo.
3. El modelo electrogeométrico es el método de diseño que generalmente se utiliza para establecer el apantallamiento de una subestación, debido a que dicho modelo fue desarrollado con la finalidad de determinar la efectividad de los apantallamientos.
4. Los parámetros calculados para el sistema de apantallamiento de la subestación eléctrica El Rancho, son los adecuados teniendo en consideración que fueron determinados conforme las disposiciones de la norma internacional IEEE Std. 998-1996 (revisión 2002).
5. El sistema de apantallamiento de la subestación eléctrica El Rancho es muy importante, debido a que dicha subestación se encuentra ubicada en una región que de acuerdo al mapa isocerámico de Guatemala, presenta mayor actividad electroatmosférica.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar el diseño del sistema de apantallamiento, utilizando programas desarrollados al diseño de dicho sistema, y así determinar las zonas que necesitan un mayor nivel de protección, teniendo en consideración el nivel cerámico de la región en la cual se encuentra ubicada la subestación eléctrica El Rancho.
2. Es necesario un sistema de red de tierras, para que el sistema de apantallamiento pueda liberar de forma rápida, todas las descargas que impacten directamente en el apantallamiento de la subestación, y así evitar cualquier tipo de sobretensión que pueda dañar al personal o equipo de la subestación, derivado a la falla de la red de tierras.
3. Para los casos en los cuales existe equipo vulnerable cerca de los bordes del área protegida por el apantallamiento, se deben colocar conductores sobre los bordes o puntas tipo Franklin, con la finalidad de evitar la incidencia de descargas directas en las zonas de dichos equipos.
4. Evaluar la factibilidad de la utilización del hilo de guarda como dispositivo apantallador, teniendo en consideración que las inversiones en el Sistema Nacional Interconectado son onerosas y por lo tanto tienen un impacto en la operación económica del subsector eléctrico guatemalteco.

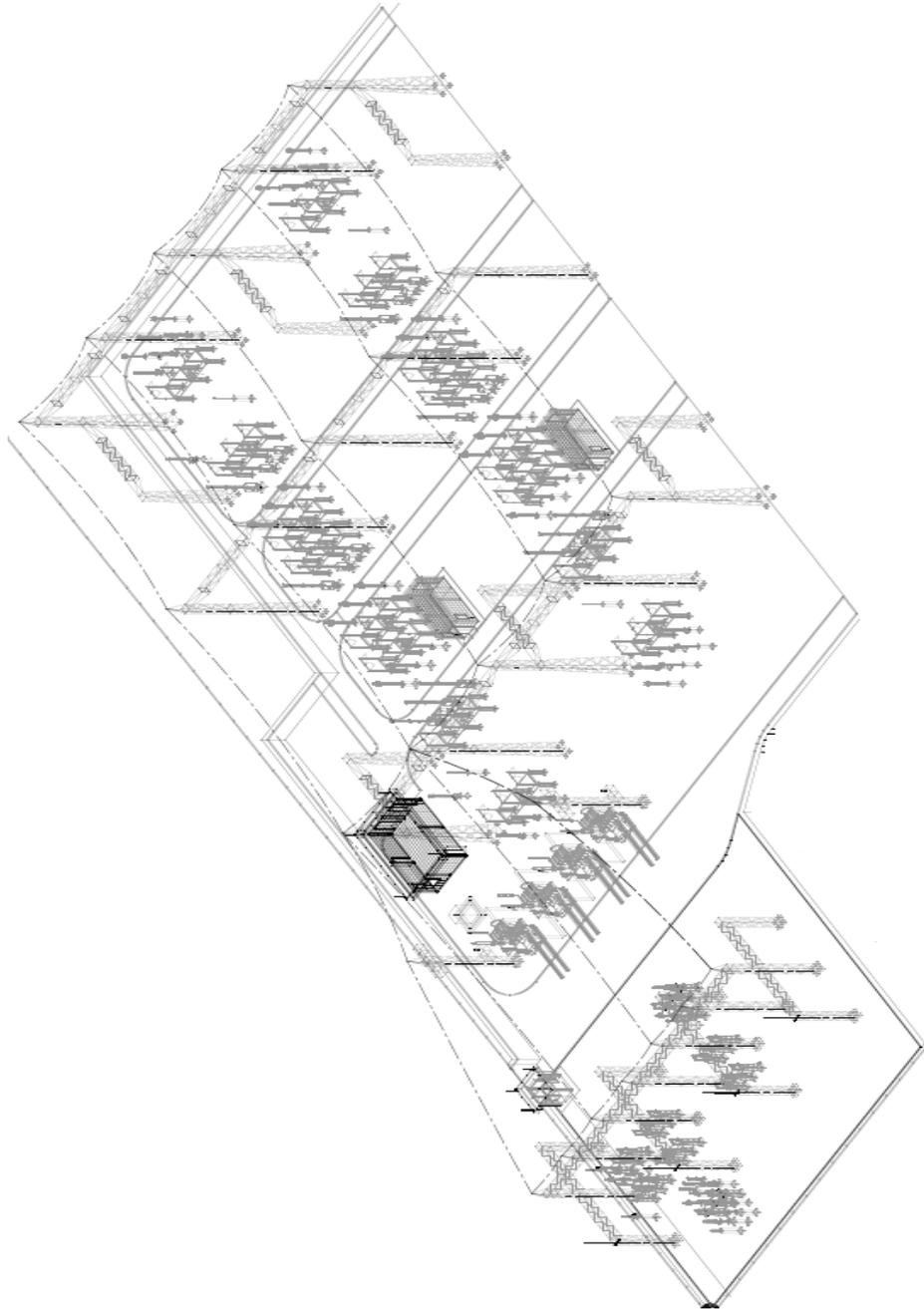
BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Electrotecnia Argentina. Descargas atmosféricas. Argentina: AEA, 1990. 35 p.
2. BASSO, Eduardo. *Fenómenos eléctricos en la atmosfera*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1995. 13 p.
3. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Publicación planes de expansión del sistema eléctrico guatemalteco una visión a largo plazo* [en línea]. Guatemala CNEE 2009, <http://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/index.html>. [Consulta: 12 de diciembre de 2012].
4. ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *Elementos de diseño de subestaciones eléctricas*. México: Limusa, 2006. 626 p.
5. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Atlas climatológico* [en línea]. Guatemala 2012, http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Clima. [Consulta: 5 de enero de 2013].
6. MARTINEZ VELASCO, Juan Antonio. *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*. España: McGraw-Hill, 2008. 608 p.

7. McDONALD, John D. *Electric power substations engineering*. USA: Taylor & Francis Group, 2006. 370 p.
8. RAÚLL MARTÍN, José. OROZCO PÉREZ, Enrique. *Diseño de subestaciones eléctricas*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2000. 510 p. ISBN: 9684222327.
9. *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Mejía Villegas S.A. Colombia: HVM Ingenieros Mejía Villegas, 2003. 778 p.
10. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Guide for direct lightning stroke shielding of substations*. USA: IEEE, 2002. 148 p.
11. United States Department of Agriculture. *Design guide for rural substations*. USA: USDA, 2001. 764 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. **Isométrico del sistema de apantallamiento**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad 2012.

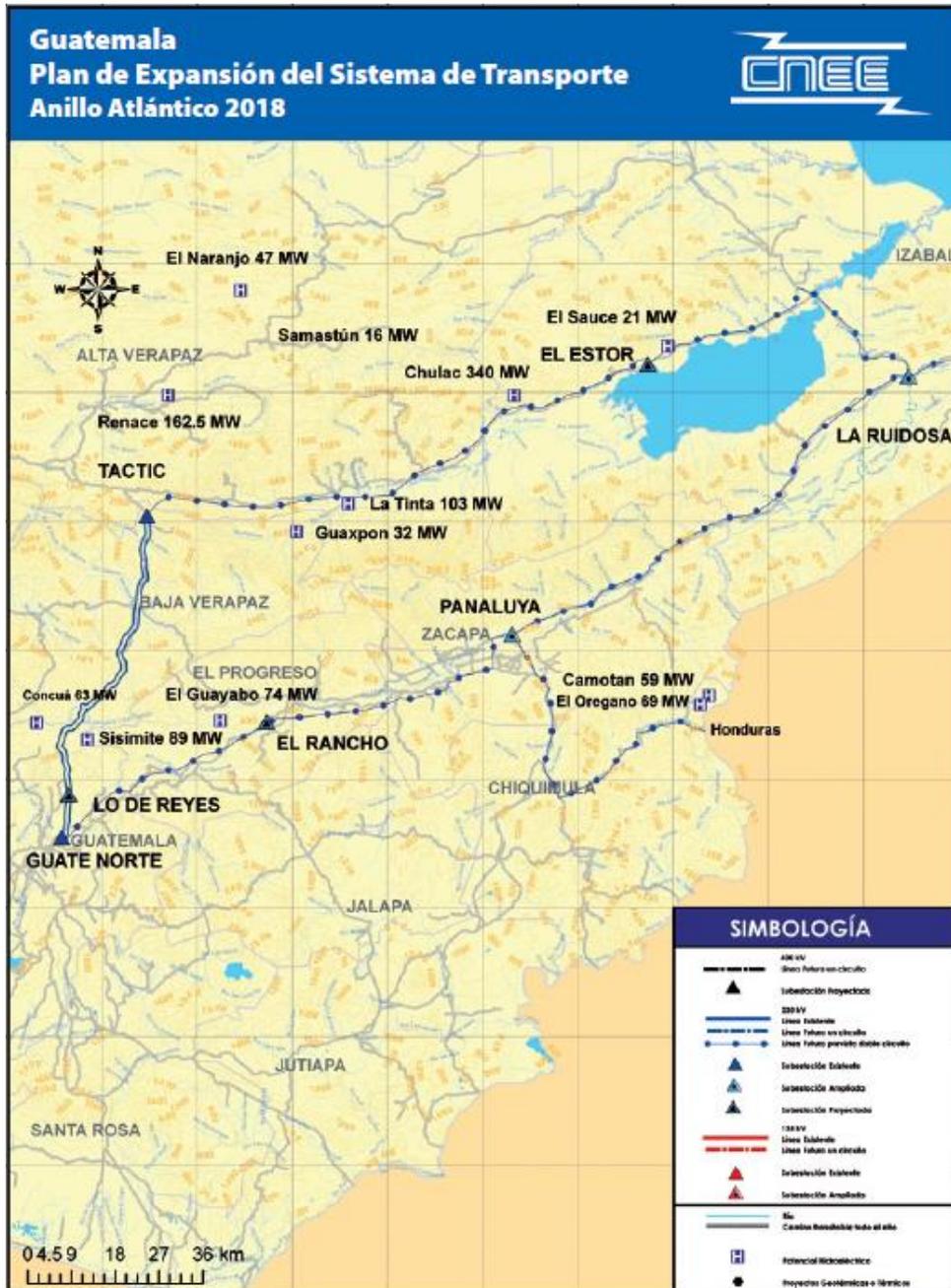
ANEXO

Anexo 1. Obras pertenecientes al PET-2008-2018



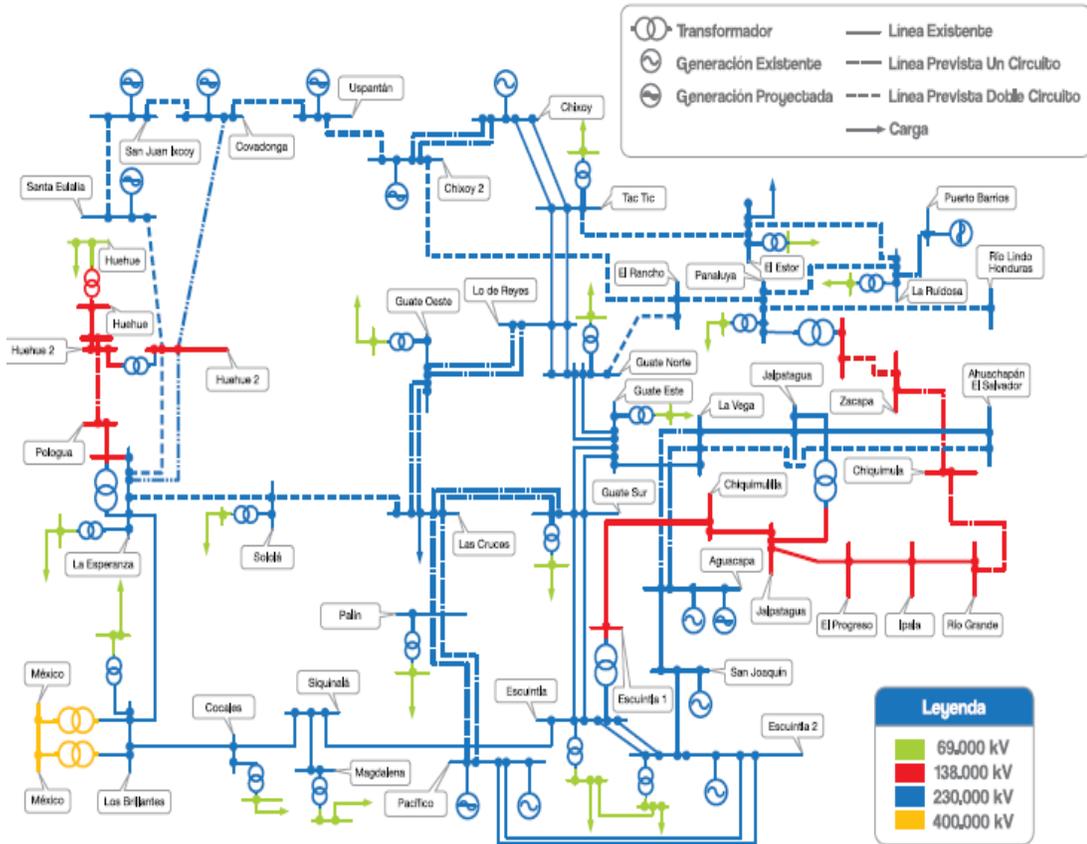
Fuente: <http://www.cnee.gov.gt/PlanesExpansion/index.html>. Consulta: diciembre 2012.

Anexo 2. Obras del anillo atlántico pertenecientes al PET-2008-2018



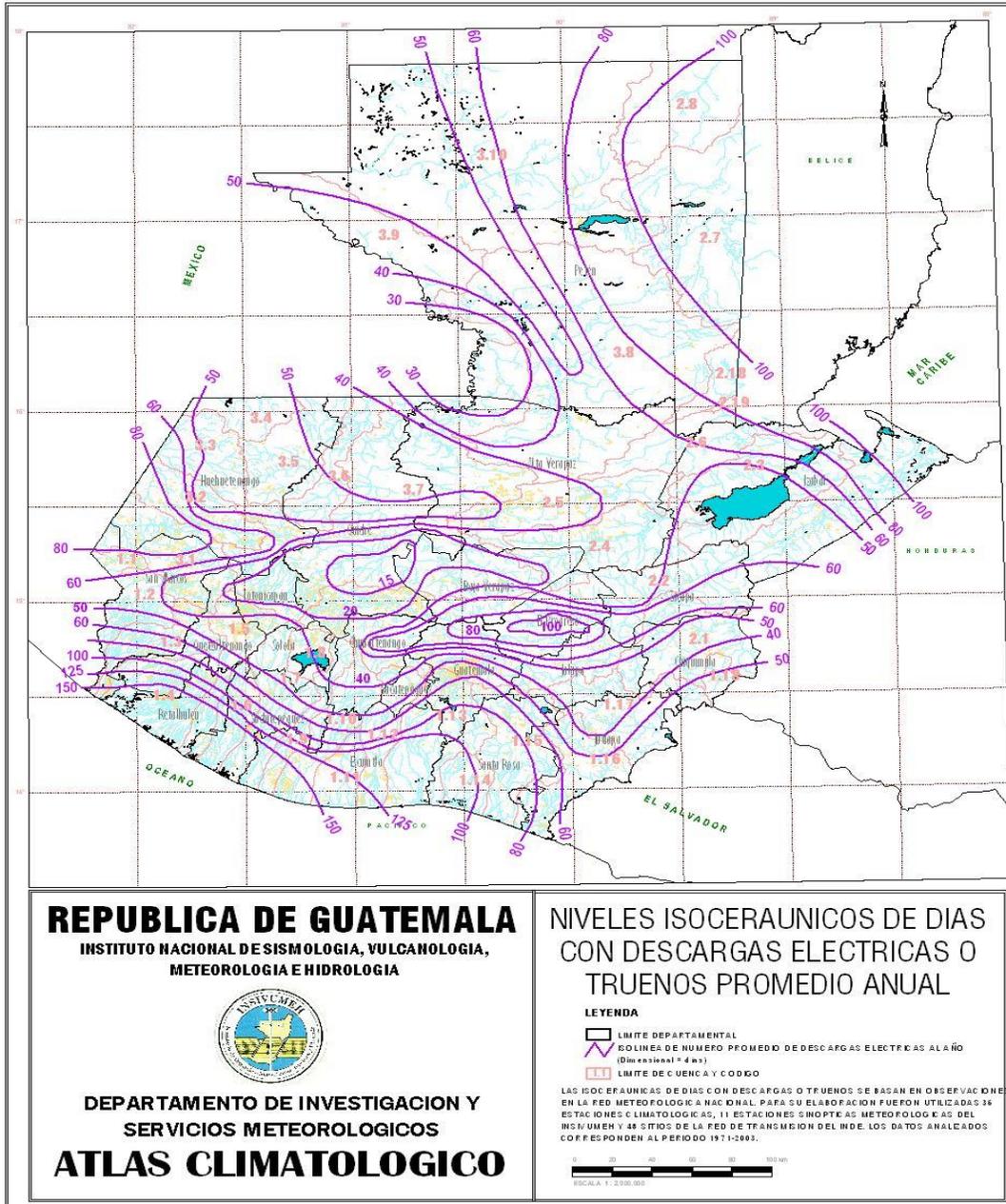
Fuente: <http://www.cnee.gob.gt/PlanesExpansion/index.html>. Consulta: diciembre 2012.

Anexo 3. Diagrama Unifilar del PET-2008-2018



Fuente: <http://www.cnee.gov.gt/PlanesExpansion/index.html>. Consulta: diciembre 2012.

Anexo 4. Mapa Isoceráunico de la República de Guatemala



Fuente: http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/Atlas_Hidrometeorologico/Atlas_Clima.htm.

Consulta: enero 2013.