



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

**ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA
DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA I – SANTA ANA 69 KV, ÁREA DE LA COSTA SUR DE
GUATEMALA**

Rony Aureliano Jucup Solís

Asesorado por el Ing. Manuel Eduardo Arita Sagastume

Guatemala, julio de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA
DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA I – SANTA ANA 69 KV, ÁREA DE LA COSTA SUR DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS

ASESORADO POR EL ING. MANUEL EDUARDO ARITA SAGASTUME

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

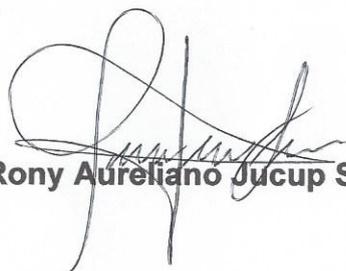
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA I – SANTA ANA 69 KV, ÁREA DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 21 de mayo de 2015.



Rony Aureliano Jucup Solís

Guatemala, 7 de mayo 2017

Ingeniero
Saul Cabezas Durán
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala

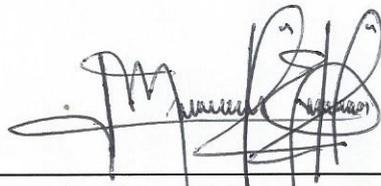
Muy atentamente lo saludo,

Por este medio me permito informarle que he revisado el trabajo de graduación del estudiante universitario RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS, con carné 2006-15090, titulado: **“ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA I – SANTA ANA 69KV, ÁREA DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA.”**

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo, cumple con el alcance y objetivos definidos para su desarrollo y considero que llena los requisitos para su aprobación final.

Sin otro particular me es grato suscribirme.

Atentamente,
“ID Y ENSAÑAD A TODOS”



Ing. Manuel Eduardo Arita Sagastume
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO No. 6012

Ing. Manuel Eduardo Arita Sagastume
Ingeniero electricista
Colegiado No. 6012
Asesor



REF. EIME 56. 2017.

11 de OCTUBRE 2017.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director
Ing. Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS
USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN
ESCUINTLA I- SANTA ANA 69KV, ÁREA DE LA COSTA SUR
DE GUATEMALA,** del estudiante Rony Aureliano
Jucup Solís, que cumple con los requisitos establecidos para tal
fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.



STO

Atentamente
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA
Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Saúl Cabezas Durán
Coordinador de Potencia

M.B.A. Ing. Saúl Cabezas Durán
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 4648



REF. EIME 56. 2017.

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; RONY AURELIANO JUCUP SOLÍS titulado: ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA I- SANTA ANA 69KV, ÁREA DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Otto Fernando Andriano González



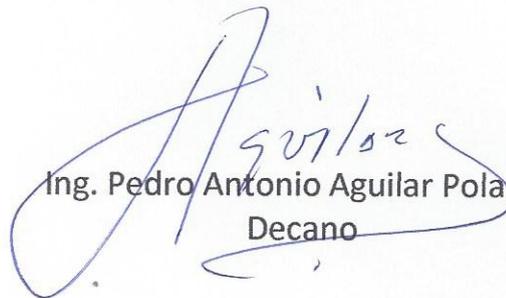
GUATEMALA, 18 DE AGOSTO 2017.



DTG. 214.2018

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: **ANÁLISIS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS USANDO ATP-EMTP EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ESCUINTLA I – SANTA ANA 69KV, ÁREA DE LA COSTA SUR DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Rony Aureliano Jucup Solís**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, julio de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por acompañarme en mi vida y darme sabiduría ayer, hoy y siempre.
- Mis padres** Aureliano Jucup y especialmente a mi madre Patricia Solís, por su apoyo incondicional, cariño y comprensión; este triunfo es de ustedes.
- Mis hermanos** Por su apoyo y comprensión durante mis años de estudio, espero que sigan con sus sueños.
- Mi familia** Mis abuelos, por darme su apoyo, consejos y amor; a mis tíos y tías por su cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi novia	Ingrid Sagastume, por su apoyo y amor y paciencia en todo momento.
Mis amigas	Por compartir alegrías, tristezas, historias, sueños y experiencias de vida.
Mis amigos	De estudio, trabajo y en general, por compartir conmigo y brindarme su ayuda.
Mi asesor	Por ser mi guía en la elaboración de este trabajo de graduación.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme los conocimientos y habilidades necesarias para crecer como profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y ser un guatemalteco orgulloso de esta casa de estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. SISTEMA ELÉCTRICO DE TRANSMISIÓN	1
1.1. Elementos y modelado del sistema de transmisión.....	2
1.1.1. Líneas de transmisión.....	3
1.1.1.1. Elementos de construcción.....	6
1.1.1.2. Cálculos de parámetros.....	14
1.1.1.2.1. Modelos de parámetros distribuidos	15
1.1.1.2.2. Modelos dependientes de la frecuencia.....	17
1.1.1.3. Equipos de compensación y maniobra.....	20
1.1.1.3.1. Interruptores	20
1.1.1.3.2. Descargadores de sobretensión.....	22
1.1.1.3.3. Reactores	25
1.2. Transitorios electromagnéticos en sistemas de transmisión....	26

1.2.1.	Transitorios en líneas de transmisión	27
1.2.1.1.	Tipos de sobretensiones	27
1.2.1.1.1.	Sobretensiones de frente rápido	28
1.2.1.1.2.	Sobretensiones de frente lento	29
1.3.	Coordinación de aislamiento por sobretensiones atmosféricas	30
1.3.1.	Fallas por flameo inverso	31
1.3.1.1.	Cálculo de la corriente y voltaje crítico de flameo	32
1.3.1.2.	Selección de la corriente crítica.....	33
1.3.1.3.	Número de salidas al año.....	34
1.4.	Introducción al programa ATP-EMTP.....	36
1.4.1.	Descripción del entorno de trabajo.....	38
1.4.1.1.	Compilador ATP	39
1.4.1.2.	Editor de texto	40
1.4.1.3.	Editor gráfico ATPDraw	44
1.4.1.3.1.	Componentes usados para modelación.....	49
1.4.1.4.	Visualizador de resultados	50
2.	METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS TRANSITORIO.....	53
2.1.	Modelación de línea de transmisión en ATP	54
2.1.1.	Modelo óptimo ATP	60
2.2.	Modelación de sobretensiones de origen atmosférico	62
2.2.1.	Modelos agrupados en ATP	66
2.2.1.1.	Modelo del estado actual de la línea de transmisión	67

2.2.1.2.	Modelo de cambios en el aislamiento.....	69
2.2.1.3.	Modelo con cambios en la puesta a tierra	71
2.2.1.4.	Modelo con descargadores de sobretensiones	73
2.2.2.	Modelo óptimo ATP	75
2.3.	Modelación por sobretensiones por maniobras	76
2.3.1.	Modelos agrupados en ATP	77
2.3.1.1.	Modelo con interruptores	77
2.3.1.2.	Modelo con descargadores de sobretensiones	79
2.3.2.	Modelo óptimo ATP	80
3.	RECOLECCIÓN DE DATOS DEL CASO DE ESTUDIO.....	83
3.1.	Descripción de la línea Escuintla I – Santa Ana 69 kV	83
3.1.1.	Trazo de la línea	84
3.1.2.	Tipos de estructuras	87
3.1.3.	Aisladores.....	91
3.1.4.	Tipo de conductor	93
3.1.5.	Hilo de guarda	94
3.1.6.	Puesta a tierra	94
3.2.	Selección y cálculo de variables en el área de estudio	96
3.3.	Descripción de las subestaciones asociadas	98
3.3.1.	Subestación Escuintla 1	98
3.3.2.	Subestación Santa Ana	99
3.3.3.	Características técnicas de los interruptores	99
4.	ANÁLISIS TRANSITORIO.....	101

4.1.	Análisis de los modelos de líneas de transmisión	101
4.1.1.	Modelo Bergeron.....	101
4.1.2.	Modelo JMarti.....	103
4.2.	Análisis por sobretensiones atmosféricas	105
4.2.1.	Análisis del desempeño actual de la línea	105
4.2.2.	Análisis del desempeño con cambios en la línea ..	108
4.2.2.1.	Análisis cambios en el aislamiento....	109
4.2.2.2.	Análisis con cambios en la puesta a tierra	110
4.2.2.3.	Análisis con descargadores de sobretensiones	112
4.2.3.	Análisis del modelo óptimo.....	117
4.3.	Sobretensiones por maniobras	120
4.3.1.	Análisis desempeño actual línea	120
4.3.2.	Análisis del desempeño cambios línea	122
4.3.2.1.	Análisis con descargadores de sobretensiones	122
4.3.3.	Análisis del modelo óptimo.....	124
5.	APLICACIÓN A LÍNEA ESCUINTLA I – SANTA ANA	127
5.1.	Análisis económico.....	127
5.1.1.	Cambios de aislamiento	127
5.1.2.	Cambios en la puesta a tierra.....	128
5.2.	Evaluación de alternativas	131
	CONCLUSIONES.....	133
	RECOMENDACIONES	135
	BIBLIOGRAFÍA.....	137
	ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Componentes del sistema de transmisión.....	3
2.	Sistema de transmisión de Guatemala (actual y proyectado)	5
3.	Estructuras típicas en transmisión	7
4.	Aisladores usados en líneas de transmisión	9
5.	Cables ACSR	10
6.	Cable OPGW	11
7.	Cable Copperweld.....	12
8.	Elementos que componen la puesta a tierra	13
9.	Circuito equivalente del modelo Bergeron.....	16
10.	Circuito equivalente modelo JMartí	19
11.	Descargador de sobretensión usado en líneas de transmisión.....	23
12.	Interacción entre los programas de ATP	39
13.	Formato general para el programa ATP/EMPT	43
14.	Menú ATP Options	45
15.	Menú ATP file.....	46
16.	Menú ATP edit	47
17.	Menú ATP	49
18.	Menú de componentes.....	50
19.	Procesador auxiliar ATP_LCC	55
20.	Conjunto de entrada MODEL	56
21.	Conjunto de entrada DATA	57
22.	Datos, modelo BERGERON.....	58
23.	Datos modelo JMARTI	60

24.	Módulo Verify Data	61
25.	Módulo de resultados de Verify Data	62
26.	Modelo de sobretensión por rayo.....	63
27.	Modelos para sobretensiones atmosféricas.....	65
28.	Modelo agrupado para sobretensiones atmosféricas	67
29.	Modelo para sobretensiones atmosféricas ATPDRAW.....	68
30.	Elemento modelar aislamiento.....	69
31.	Datos de entrada SWITCH	70
32.	TACS para voltajes de flameo en aislamiento	71
33.	Modelación de puesta tierra.....	72
34.	Curva C-I de un pararrayos	74
35.	Modelo descargador de sobretensión.....	75
36.	Modelo completo de descargas atmosféricas.....	75
37.	Modelo de onda de sobretensión por maniobra.....	76
38.	Modelo de interruptor trifásico (tripolar)	78
39.	Interruptor estadístico trifásico (tripolar).....	79
40.	Modelo con descargadores de sobretensiones	80
41.	Modelación, energización línea en vacío	81
42.	Trazo de la línea	85
43.	Vista aérea.....	86
44.	Vista de perfil de ruta	87
45.	Configuración tangente o tipo II	89
46.	Configuración doble remate o tipo V.....	90
47.	Aislador <i>post-type</i>	91
48.	Aislador de remate.....	92
49.	Característica de la resistencia.....	96
50.	Diagrama unifilar línea Escuintla 1 - Santa Ana.....	98
51.	Diagrama unifilar subestación Santa Ana	99
52.	Secuencia cero – modelo Bergeron.....	102

53.	Secuencia negativa – modelo Bergeron.....	102
54.	Secuencia cero – modelo JMarti	103
55.	Secuencia negativa modelo JMarti	104
56.	Distribución de las intensidades máximas sobre la línea	106
57.	Respuesta aislador descarga de 30KA	106
58.	Relación salidas al año y valor mínimo de intensidad rayo	107
59.	Respuesta aislador a 45 kA	108
60.	Aumento del voltaje de flameo	110
61.	Puesta a tierra vrs salidas al año	111
62.	Pararrayos fase inferior 45 kA.....	112
63.	Pararrayos fase inferior 65 kA.....	113
64.	Pararrayos fase superior 65 kA.....	114
65.	Pararrayos fase media 65 kA.....	114
66.	Pararrayos fase superior e inferior a 65 kA	115
67.	Pararrayos en las tres fases a 65kA.....	116
68.	Pararrayos en las 3 fases 80kA	116
69.	Voltajes vano anterior - pararrayos	117
70.	Voltaje aisladores vecinos - pararrayos.....	119
71.	Voltaje aisladores vecinos – puesta a tierra 15 ohm	119
72.	Energización de la línea, estado actual.....	121
73.	Energización de la línea, estado actual, final línea	121
74.	Energización, línea con pararrayos	123
75.	Energización línea con pararrayos, final línea.....	123
76.	Costos cambio de aislamiento	128
77.	Red tierra a instalar.....	129
78.	Comparación de costos.....	130

TABLAS

I.	Tensiones normalizadas para Guatemala	27
II.	Modelos y sistemas ATP_LCC	54
III.	Características técnicas.....	84
IV.	Altura de postes línea Escuintla I – Santa Ana	87
V.	Configuraciones de postes línea Escuintla I – Santa Ana.....	88
VI.	Disposición física, conductores tipo II	89
VII.	Disposición física, conductores tipo I	90
VIII.	Disposición física conductores tipo V.....	91
IX.	Datos técnicos del aislador <i>post-type</i>	92
X.	Datos técnicos del aislador remate	93
XI.	Datos técnicos 740 FLINT AAAC.....	94
XII.	Datos técnicos OPGW	94
XIII.	Característica de resistencia al pie del poste.....	95
XIV.	Datos meteorológicos del área	97
XV.	Variables según área y estructuras línea	97
XVI.	Interruptor línea 69 kV, 1 200 A	100
XVII.	Respuesta de la línea transmisión ante impactos de rayo	105
XVIII.	Número de salidas al año línea actual	107
XIX.	Aumento de aislamiento	109
XX.	Cambio aislamiento y salidas por flameo inverso	109
XXI.	Cambios de puesta a tierra	111
XXII.	Voltajes máximos energización de la línea actual.....	122
XXIII.	Energización línea con pararrayos.....	124
XXIV.	Niveles de tensión.....	124
XXV.	Costos cambio aislamiento	127
XXVI.	Valores diseño malla tierra postes	128
XXVII.	Costo de cambio de red de tierras	130

XXVIII. Análisis de alternativas..... 131

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<i>A</i>	Amperio, dimensional corriente S.I.
<i>θ</i>	Ángulo
<i>C</i>	Capacitancia
<i>τ</i>	Constante de tiempo
<i>I</i>	Corriente eléctrica
<i>ΔV</i>	Diferencia voltaje
<i>f</i>	Frecuencia
<i>ω</i>	Frecuencia angular
<i>sin</i>	Función trigonométrica coseno
<i>cos</i>	Función trigonométrica seno
<i>Hz</i>	Hertzio
<i>Z</i>	Impedancia
<i>L</i>	Inductancia
<i>kA</i>	Kiloamperios
<i>km</i>	Kilómetro
<i>kV</i>	Kilovoltio
<i>l</i>	Longitud
<i>μs</i>	Microsegundos
<i>T_d</i>	Nivel cerámico
<i>e</i>	Número de Euler
<i>N_f</i>	Número de salidas al año
<i>ps</i>	Picosegundos
<i>%</i>	Porcentaje

<i>P</i>	Potencia
<i>P</i>_%	Probabilidad
<i>R</i>	Resistencia eléctrica
<i>S.I.</i>	Sistema internacional
<i>T</i>	Tiempo
<i>V</i>	Voltaje, tensión eléctrica
<i>v</i>	Voltio

GLOSARIO

AAAC	Conductores de aluminio con aleación.
AAC	Conductores totalmente de aluminio.
ACAR	Conductores de aluminio con aleación reforzada.
ATP	<i>Alternative transients program.</i>
ATPDraw	<i>Graphical preprocessor to ATP.</i>
BIL	Nivel básico de impulso.
BPA	<i>Boneville power administration.</i>
CIGRE	Sistema grafico de información.
CNEE	Comisión nacional de energía eléctrica.
EMTP	<i>Electro magnetic transient program.</i>
EPRI	<i>Electric power research institute.</i>
FLINT	Palabra código para cable aéreo AAAC, 740MCM.
GEM	<i>Ground enhancement materials.</i>

IEC	<i>International electrotechnical commission.</i>
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.
INDE	Instituto nacional de electrificación.
INSIVUMEH	Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
NTDROID	Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución.
NTDOST	Normas técnicas de diseño y operación del servicio de transporte de energía eléctrica.
OPGW	<i>Optical guard wire.</i>
PETNAC	Plan expansión de transmisión nacional.
Servidumbre	Gravamen, impuesto sobre un predio para uso de otro predio de distinto dueño o para utilidad pública o comunal.
SIEPAC	Sistema de Interconexión eléctrica de los Países de América Central.
SIN	Sistema nacional interconectado.

TACS	<i>Trasient analysis of control system.</i>
TRECSA	Transportadora de Energía de Centroamérica S.A.
TRELEC	Transportista Eléctrica Centroamericana S.A.
Vano	Distancia horizontal entre dos estructuras consecutivas.

RESUMEN

La finalidad del siguiente trabajo es realizar el análisis de los fenómenos transitorios mediante un programa especializado y determinar qué elementos o fenómenos afectan la calidad y confiabilidad de una línea de transmisión. Se ha seleccionado para dicho fin una línea de transmisión existente del área de la Costa Sur, llamada Escuintla I-Santa Ana 69kV, propiedad de Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (TRELEC) afectada constantemente por sobretensiones atmosféricas y por maniobras.

Se establecen las consideraciones que restringen o condicionan la operación temporal de la línea de transmisión en estudio como su trazado, la altura sobre el nivel del mar, condiciones meteorológicas de la región, la disposición física de los conductores en las estructuras, el aislamiento existente, el ángulo de apantallamiento, el espacio físico para las puestas a tierra.

Se realiza el análisis del desempeño de la línea; se siguen las recomendaciones de la Electric Power Research Institute, se consideran los aspectos anteriormente mencionados, se calcula la probabilidad de falla para descargas atmosféricas y por maniobras para luego ser comparadas con los valores reales para validar los resultados. Al validar los resultados se realizan propuestas técnicas para mejorar la confiabilidad y calidad del servicio de esta línea de transmisión.

Sin embargo, para realizar la toma de decisiones no debe estar basado únicamente en los resultados técnicos, por lo tanto, se realiza un análisis

económico para sugerir a la transportista las acciones a implementar en esta línea de trasmisión.

OBJETIVOS

General

Implementar un programa computacional para el análisis de fenómenos transitorios que permitan resultados fiables y acordes al comportamiento real de los eventos estudiados.

Específicos

1. Implementar el programa ATP (*alternative transients program*) y su entorno gráfico ATPdraw para la modelación de una línea de transmisión del sistema nacional interconectado (SNI).
2. Analizar los modelos actuales para representar las líneas de transmisión a manera de seleccionar un modelo con el cual se obtengan resultados fiables en análisis transitorios.
3. Conocer los niveles de sobretensión a los que se ven expuestos los distintos componentes de una línea de transmisión cuando se ve afectada por el impacto de una descarga de origen atmosférico.
4. Conocer los niveles de sobretensión presentes en la línea de transmisión cuando se ve afecta por las maniobras propias del sistema.

5. Identificar aquellas condiciones constructivas en una línea de transmisión que hacen confiable su operación ante descargas de origen atmosférico según el caso estudiado.

6. Identificar aquellas condiciones constructivas en una línea de transmisión que hacen confiable su operación ante las distintas maniobras a la que se ve expuesta según el caso estudiado.

INTRODUCCIÓN

Dentro de un sistema eléctrico de potencia las líneas de transmisión tienen un lugar importante sin el cual el transporte de energía desde las centrales de generación hasta los puntos de carga no sería posible. Su diseño y construcción engloba problemas que competen a muchas especialidades dentro de los cuales se puede mencionar aspectos eléctricos, civiles, mecánicos, estructurales, ambientales y sociales, entre otros; dichos aspectos se tienen que considerar todos a la vez sin excluir a ninguno ya que en las condiciones actuales de países como en Guatemala la exclusión de uno podría provocar problemas muy complejos de resolver y finalmente evitar la construcción u operación de las líneas de transmisión.

Tomando en cuenta las condiciones y restricciones actuales que enfrentan los ingenieros, el análisis y la optimización de las líneas de transmisión nuevas o existentes son vitales para su correcta operación ya que se deben garantizar las inversiones realizadas que conlleven un beneficio para todos, desde el inversionista hasta los usuarios finales. Toda vez que una línea de transmisión está construida, el operador deberá garantizar la calidad y confiabilidad del servicio; dichos conceptos, relativamente nuevos, están reglamentados en Guatemala por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) la cual ha establecido normativas para garantizar y medir dichos parámetros.

El principal problema que afecta la confiabilidad y calidad del servicio en una línea de transmisión son las sobretensiones las cuales se dividen en sobretensiones por fenómenos atmosféricos o por maniobra, sin embargo, un problema de ingeniería se desarrolla cuando se pretenden analizar y modelar

los fenómenos presentes al ocurrir una sobretensión. Durante años se han utilizado estadísticas del comportamiento de las líneas de transmisión ante las sobretensiones para usarse como criterios de diseño, sin embargo, el resultado final muchas veces conlleva a resultados no deseados o sobredimensión de los distintos componentes.

Ante la complejidad de desarrollar estos modelos se ha recurrido a la tecnología, específicamente, al uso de computadoras y programas especializados para realizar estos análisis; en ese sentido el programa de transitorios electromagnéticos ATP (*alternative transients program*) es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, herramienta indispensable que ayudara a la toma de decisiones, por lo tanto, su aplicación es de vital importancia para el ingeniero electricista.

Considerando que la línea de transmisión Escuintla 1- Santa Ana 69kV es una línea de vital importancia para la región de la Costa Sur, afectada constantemente por sobretensiones, se ha seleccionado para analizar su condición actual y presentar propuestas para mejorar la calidad y confiabilidad del servicio; la metodología utilizada para dicho fin se basa en la utilizada por la Electric Power Research Institute (EPRI) que establece los parámetros para predecir la probabilidad de falla de una línea de transmisión, por lo tanto, se identifican los elementos que debieran modificarse, por ejemplo, las especificaciones del aislamiento (distancia de fuga, distancia de arco en seco, BIL, etc.), valores de puesta a tierra, dimensionamiento de la malla de puesta a tierra, instalación de pararrayos, etc., con base en esto realizar un presupuesto y tomar una decisión técnica económica cuyo fin es lograr la confiabilidad y calidad que se le exige a la operadora.

1. SISTEMA ELÉCTRICO DE TRANSMISIÓN

A partir del descubrimiento de la electricidad surgieron diferentes teorías que fueron desarrolladas poco a poco para satisfacer las necesidades humanas. Así, poco a poco, con las aplicaciones y uso de electricidad se fomentó en la vida cotidiana y en la industria; surgió entonces, la necesidad de llevar la electricidad desde las unidades generadoras hasta el punto de consumo.

Los procesos para llevar la energía eléctrica desde las fuentes hasta los consumidores requieren estructuras cada vez más complejas denominadas sistemas de potencia o, como se llamará en este trabajo, sistema de transmisión. Establecer una definición única es muy difícil pues varía según el criterio de cada autor; el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos lo define como “una red formada por unidades generadoras eléctricas, cargas y/o líneas de transmisión de potencia incluyendo el equipo asociado, conectado eléctricamente o mecánicamente a la red”¹.

El análisis del sistema de transmisión es importante debido a que por medio de este se suministra energía eléctrica a miles de usuarios, desde usuarios residenciales hasta los relacionados con la industria; debido a las características propias de la transmisión, dicho suministro debe ser en tiempo real por lo que el principal objetivo es mantener el equilibrio entre la demanda y la generación. Además de mantener este equilibrio, se debe mantener constante la frecuencia y el voltaje de operación; en general, un sistema de

¹ Westinghouse Electric Corporation. *Electrical transmission and distribution reference book*. p. 7.

transmisión es un sistema en equilibrio dinámico. Definido así es más fácil de entender porque cualquier perturbación puede poner en peligro el equilibrio dinámico existente que pone en peligro el suministro lo cual puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\text{Si } f \approx 60 \pm \Delta f \text{ Hz } \quad \text{y} \quad V \approx V_{op} \pm \Delta V$$
$$\text{Generación} \cong \text{Demanda} + \text{Pérdidas} \quad \text{[Ec. 1]}$$

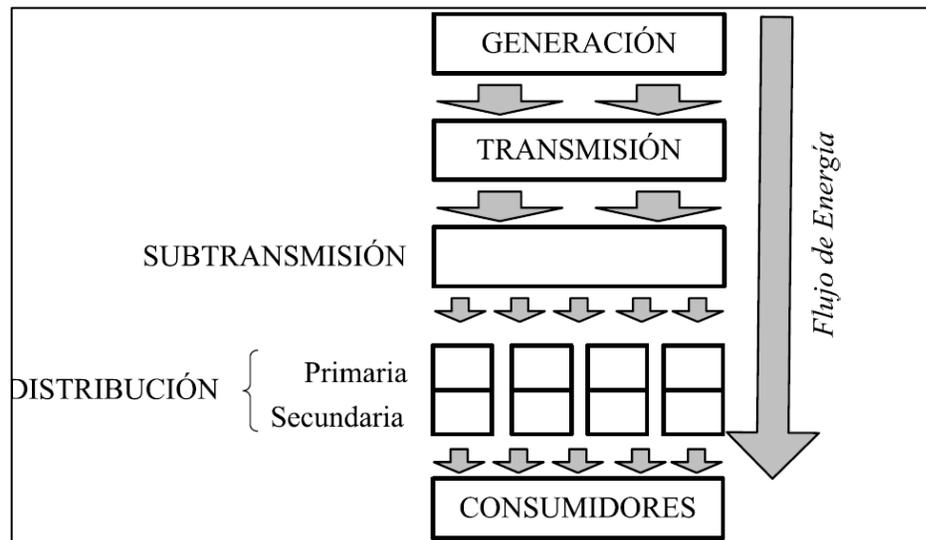
Cuando se habla de perturbaciones que pongan en peligro el equilibrio dinámico a la cual hace referencia la ecuación 1, se refiere a eventos o fallas en cada uno de los elementos del sistema de transmisión que según el enfoque de cada investigación puede estar ubicado en un lugar específico afectando a variables bien definidas. Por lo tanto, lo que procede, a continuación, es la definición y forma en que se modelan los elementos de interés de un sistema de transmisión

1.1. Elementos y modelado del sistema de transmisión

Un sistema eléctrico de potencia o, como se ha llamado, sistema de transmisión básicamente consta de tres subconjuntos bien específicos y diferenciados que realizan diferentes labores: generación, transmisión y demanda. Dados en ese orden básicamente por seguir el flujo de potencia y energía que inicia en las centrales generadoras convirtiendo energía mecánica en eléctrica seguidos por los distintos elementos que se encargan de transportar toda esa energía generada generalmente a kilómetros de distancia hasta los puntos de consumo que pueden ser desde la vivienda hasta fábricas e industrias en general, tal como lo muestra la figura 1. Cada uno de los subconjuntos tiene un sinnúmero de variables y maneras de analizar pero para el presente trabajo se enfocará en la transmisión y los elementos que la

componen. La modelación y descripción de estos elementos se concentran principalmente en dos categorías primero en la propia línea de transmisión y en segunda instancia en los equipos usados para su operación.

Figura 1. **Componentes del sistema de transmisión**



Fuente: GONZALES LONGATT, Francisco. *Definición de sistemas eléctricos de potencia*. p. 35.

1.1.1. Líneas de transmisión

Las centrales de generación generalmente se encuentran muy alejadas de los puntos donde se concentra el consumo, lo cual hace necesario que ese bloque de energía sea transportado de manera que lleguen a los centros de consumo. El conjunto de estructuras mecánicas diseñadas para tal fin recibe el nombre de líneas de transmisión. Según el Reference Book “el propósito de las líneas de transmisión radica en tres aspectos fundamentales”².

² Westinghouse Electric Corporation. *Electrical transmission and distribution reference book*. p. 7.

- Transmitir potencia desde las plantas generadoras hacia los puntos de consumo, generalmente, están separados por grandes distancias.
- Para el suministro a bloque de energía para los centros o estaciones relacionadas con la industria.
- Para propósitos de interconexión para transmitir energía de un sistema a otro en casos de emergencia o por venta de energía.

En el ámbito guatemalteco las líneas de transmisión cumplen con los tres propósitos; el primero y el segundo están relacionadas íntimamente con la electrificación del país y su desarrollo industrial y se ha desarrollado con base en los planes de expansión propuestos por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, (CNEE).

En el 2009 se adjudicó y está en proceso de construcción el Plan de expansión transmisión-2009 (PET-2009) cuyo objetivo principal es la ampliación hasta ese momento de la red de 230 kV cuyo propietario es el Instituto de Electrificación Nacional, (INDE) y obras complementarias a la red de 69 kV del área de la Costa Sur y metropolitana que pertenece en su mayoría a Transportista Eléctrica Centroamericana S.A. (TRELEC).

Este plan marcó el inicio de la diversificación la matriz energética del país y obviamente plantea mejorar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica; el diseño, construcción y operación del PET-2009 está a cargo de Transportadora de Energía de Centroamérica S.A. (TRECOSA). Recientemente salió a licitación el Plan de expansión de transmisión nacional-2014 (PETNAC-2014) que plantea elevar el índice de electrificación nacional. Se espera que nuevamente oferten empresas nacionales y extranjeras.

En cuanto al tercer objetivo, desde hace un par de años se ha puesto en operación las interconexiones a nivel centroamericano que se le conoce como sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central (SIEPAC), para el caso de Guatemala se tiene en operación comercial la interconexión con México con una línea de 400 kV; dicha línea tiene como destino final la subestación de Brillantes donde se realiza la transformación de 400/230 kV; el proyecto de interconexión se complementa con las interconexiones entre El Salvador y Honduras con líneas de 230 kV; está pendiente de completar la conexión Honduras, Nicaragua y Costa Rica.

Figura 2. **Sistema de transmisión de Guatemala (actual y proyectado)**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica, CNEE. *Resumen ejecutivo del plan de expansión transmisión*. p. 25.

Como se ha visto, el sistema de transmisión en Guatemala está en pleno crecimiento; no es de extrañar que se dedique tiempo e inversión en la ingeniería de diseño para la construcción y operación de las subestaciones y de las líneas de transmisión para que cumplan con las normas técnicas nacionales e internacionales.

Al ver las líneas de transmisión el objeto de análisis del presente trabajo, se puede afirmar que en su construcción y operación están involucradas tres disciplinas de la ingeniería civil, mecánica y eléctrica. Como el análisis que se pretende realizar está centrado en fenómenos estudiados por la ingeniería eléctrica, se tomará esta como eje central para su descripción, pero se describirán propiedades mecánicas o relacionadas con su estructura sin las cuales no se puede realizar una modelación integral.

1.1.1.1. Elementos de construcción

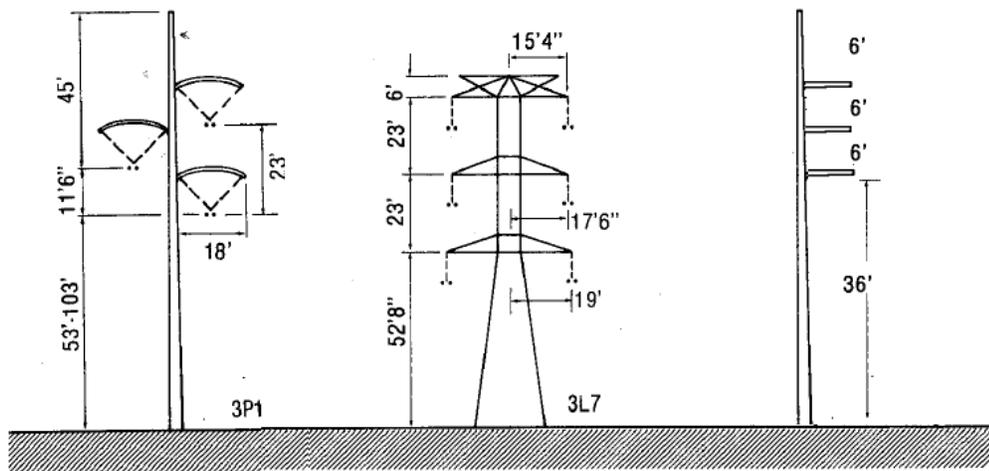
Los elementos constructivos que influyen en la modelación desde el punto de vista eléctrico de una línea de transmisión son:

- Estructuras de apoyo
- Puesta a tierra
 - Estructuras

Las estructuras influyen en la modelación de una línea de transmisión debido a que los fenómenos electromagnéticos dependen de la configuración geométrica en que están dispuestos los conductores. Es importante indicar que los apoyos, además de proporcionar la separación de conductores, es uno de los aspectos más importantes a considerar a la hora de la construcción ya que

son estos los que deben soportar todos los esfuerzos mecánicos. La disposición de los conductores depende del nivel de tensión, la geografía del terreno por donde pasa la línea y por las características contempladas en el diseño. En la figura 3 se presentan las estructuras más comunes empleadas en Guatemala. Sin embargo, es importante comprender que existen miles de variantes y se presentan solo para fines demostrativos.

Figura 3. Estructuras típicas en transmisión



a) Poste Metal

b) Torre auto soportada

c) Poste de hormigón

Fuente: Electric Power Research Institute. *Transmission line reference book 34 5kV and above.*

p. 56.

- Aisladores

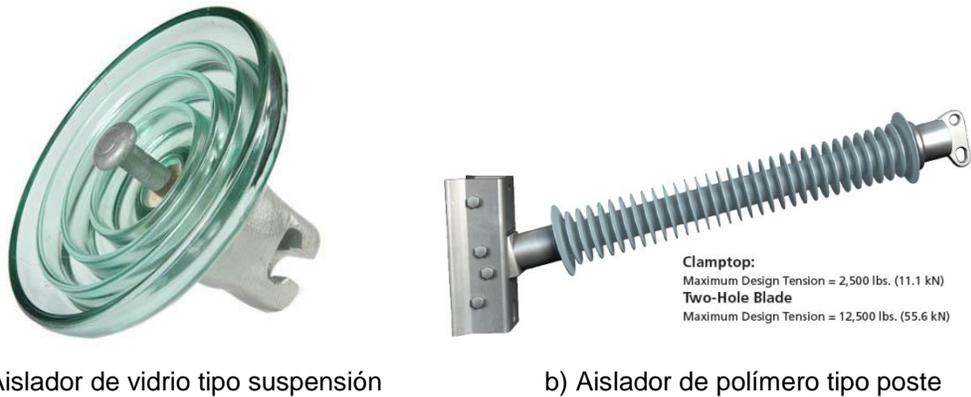
Tienen la misión de soportar al conductor de la línea a las torres o postes que la sostienen, proporcionando al mismo tiempo el aislamiento eléctrico según el nivel de voltaje del sistema. Dado un nivel de tensión aplicado, un cierto nivel de contaminación ambiental (según las categorías definidas en la

norma IEC 60815) y altitud de instalación respecto del nivel del mar, se requiere que los aisladores en su conjunto posean una cierta longitud mínima para asegurar que la línea sea adecuadamente aislada para evitar descargas a tierra a través de la estructura torre o poste. Esta se logra agrupando varios de estos aisladores en lo que se denomina una 'cadena de aisladores', además, tienen que operar y garantizar el aislamiento en las siguientes circunstancias:

- Voltajes del sistema
- Sobrevoltajes
 - Temporarios
 - De maniobra
 - Atmosféricos

Los materiales con los cuales eran fabricados originalmente los aisladores eran vidrio y cerámicas, cuyas propiedades aislantes son muy buenas, pero el peso del equipo significaba una limitante técnica a considerar; esto dio paso a que la ciencia de los materiales desarrollara materiales poliméricos con los cuales se obtiene una reducción de peso considerable sacrificando la vida útil, es decir, según el tipo de material del aislador, se tendrán ventajas y desventajas por lo que será criterio del diseñador seleccionar el aislamiento que mejor se adecue a sus condiciones técnicas y económicas.

Figura 4. **Aisladores usados en líneas de transmisión**



a) Aislador de vidrio tipo suspensión

b) Aislador de polímero tipo poste

Fuente: *Aisladores*. <http://right-electric.com.ar/product-1-3-composite-post-insulator/147853>.

Consulta: 4 de octubre de 2014.

- **Conductores**

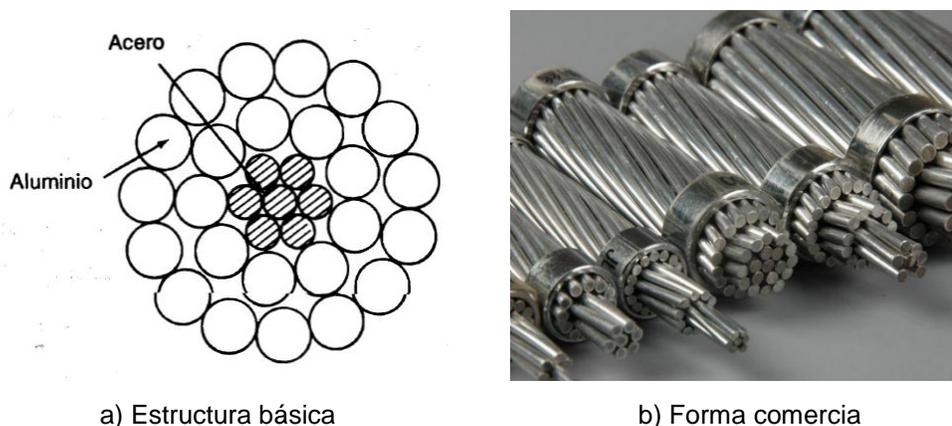
Juegan un papel muy importante desde el punto de vista técnico pues de sus características eléctricas depende la cantidad de energía a transportar, pérdidas, parámetros eléctricos, etcétera; con base en las características mecánicas que posea determina las estructuras, herrajes de sujeción, libranzas mínimas, cimentaciones y demás aspectos mecánicos.

Para transmisión de energía en las fases se usan cables con conductores a base de aluminio desnudos; existen varias maneras de clasificarlos, lo más común es por el tipo de aleación:

- Conductores de aluminio reforzado con acero (ACSR)
- Conductores totalmente de aluminio (AAC)
- Conductores de aluminio con aleación (AAAC)
- Conductores de aluminio con aleación reforzada (ACAR)

En la figura 4 a., se tiene el corte transversal de un cable ACSR y en la parte b., se aprecia como varían según el calibre; en ambas imágenes se aprecia que están formados por varios hilos que, según el calibre, varían en cuanto a sus propiedades físicas, eléctricas y mecánicas.

Figura 5. **Cables ACSR**

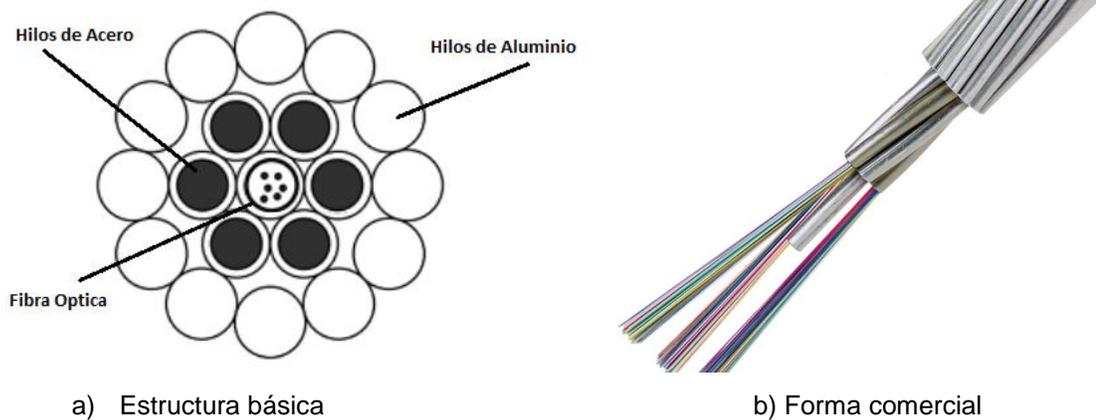


Fuente: *Conductores*. http://es.made-in-china.com/co_eescable/image_Aluminium-Conductor-Alloy-Reinforced-Acsr-Conductor_eynyououg_gjftuSsGhkqZ.html. Consulta: 4 de octubre de 2014.

Para el blindaje por medio de hilo de guarda generalmente se usa cable de acero galvanizado, pero, recientemente debido a los protocolos de comunicación donde se hace necesario el uso de fibra óptica entre subestaciones, se ha vuelto común el cable tierra con fibra óptica (OPGW) donde se combinan estos dos elementos; dicho cable contiene una estructura tubular con varios pares de fibra óptica en el mismo rodeadas por capas de cables de acero y aluminio. La fibra óptica se usa para la implementación de protocolos de comunicación que incluye control, protección y medición de las subestaciones. La capa de cables se utiliza para el blindaje y la conexión a

tierra de las estructuras; en la figura 6 se muestra un corte transversal para apreciar las características físicas.

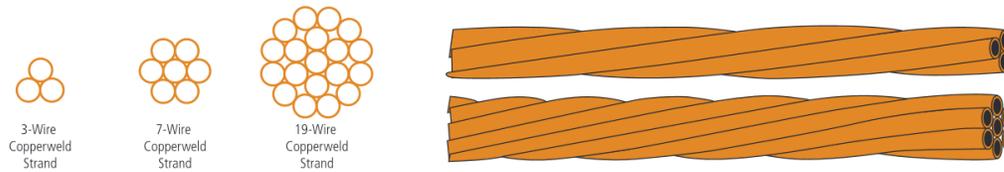
Figura 6. **Cable OPGW**



Fuente: *Fibra óptica*. <http://www.aflglobal.com/productlist/Product-Lines/Fiber-Optic-Cable/HexaCore-Optical-Ground-Wire-%28OPGW%29/img/HexaCore.aspx>. Consulta: 4 de octubre de 2014.

Por último, en cuanto a cables se tiene los que se usan para las puestas a tierra que en los últimos años se hacen con copperweld: un tipo de cable con varios hilos los cuales combinan la resistencia del acero con la conductividad y resistencia a la corrosión del cobre, básicamente el cobre se une metalúrgicamente alrededor de un núcleo de acero a un espesor constante y como resultado se tiene un cable que da las características eléctricas necesarias para garantizar un drenado de las tensiones hacia tierra.

Figura 7. **Cable Copperweld**



a) Estructura básica

b) Forma comercial

Fuente: *Recursos y producciones*. <http://www.aflglobal.com/productionfiles/resources/catalogs/afl-copperweld.pdf>. Consulta: 4 de octubre de 2014.

- **Puesta a tierra**

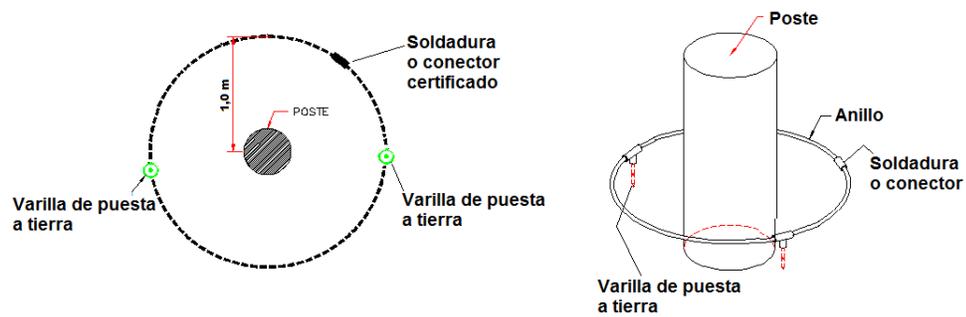
La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo, (características físicas y químicas); es decir, el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con un alto contenido de minerales conductores. Al contrario, se presentará una alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca y altamente rocosa, lo que implica que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año.

La resistencia ofrecida al paso de la corriente eléctrica a través de un electrodo hacia el suelo tiene tres componentes principales (ver figura 8):

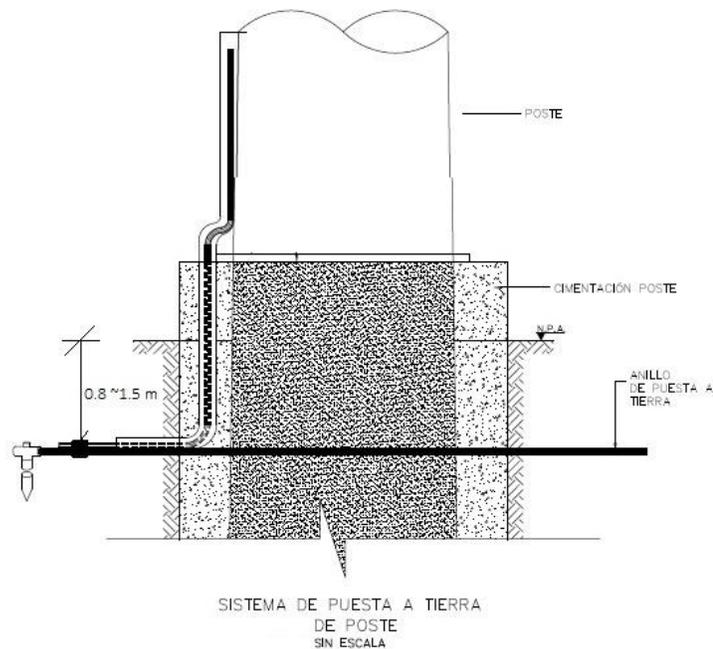
- Resistencia del electrodo (metal): es despreciable en comparación con la resistencia de la tierra.
- Resistencia de contacto entre el electrodo y el suelo. Se puede despreciar si el electrodo está exento de cualquier cubierta aislante como tintas, pinturas, grasa, etc., y si la tierra está bien compactada en la zona de contacto de sus paredes.

- Resistencia de la tierra circundante: es el componente que determina el valor de la resistencia de una puesta a tierra y depende básicamente de la resistividad del suelo y de la distribución de la corriente proveniente del electrodo.

Figura 8. Elementos que componen la puesta a tierra



a) Vista de planta e isométrica de la puesta a tierra



b) Vista de perfil

Fuente: TRELEC. *Medición de resistividad del suelo y resistencia de la puesta a tierra*. p. 88.

Alrededor del electrodo de puesta a tierra, la resistencia del suelo es la suma de las resistencias serie de las celdas o capas coaxiales circundantes del suelo, localizadas progresivamente hacia fuera del electrodo. Como se ilustra en la figura 8, a medida que aumenta la distancia, las capas del suelo presentan una mayor área transversal a la corriente y, por tanto, una menor resistencia. Se sigue entonces que la resistencia de puesta a tierra reside esencialmente en las capas de suelo más próximas al electrodo. Normalmente para una varilla de 2,4 metros, el 90 % del valor de la resistencia de puesta a tierra se encuentra dentro de un radio de 3,0 metros.

1.1.1.2. Cálculos de parámetros

Como se sabe, en cualquier circuito eléctrico están presentes tres parámetros básicos: resistencia, inductancia y capacitancia. Estos tres parámetros son la base de la modelación de los distintos componentes de un sistema de transmisión; dependiendo del análisis que se quiera realizar, se pueden hacer diferentes simplificaciones o condiciones de frontera para obtener un estudio certero y limitado en los fenómenos a estudiar.

Los elementos de un sistema eléctrico pueden representarse a través de impedancias lineales o impedancias no lineales. El primer caso corresponde a aquellos elementos en los que existe una relación proporcional entre la tensión y la corriente para los componentes frecuenciales; mientras que, en el segundo, los elementos no presentan esta relación de proporcionalidad en todo su espectro. Entre los elementos que pueden representarse a través de impedancias lineales se encuentran las líneas de transmisión, los transformadores, máquinas eléctricas y algunas cargas. Entre los elementos con impedancias no lineales se destacan los dispositivos de estado sólido, su técnica de modelamiento es conocida como modelamiento por inyección de

corriente la cual no está entre los alcances de este documento pero es importante su mención.

Para el estudio de sobretensiones transitorias usando las técnicas de simulación, se trata en principio de hacer una representación de las componentes del sistema: líneas de transmisión, transformadores de potencia, reactores en derivación, bancos de capacitores e interruptores o bien los dispositivos de protección que son los descargadores de sobretensiones. El problema de la representación o modelo de estos componentes se dividen en dos puntos: para elementos de red y para dispositivos de control y protección. Para elementos de red, ya sea por métodos digitales, como el que se pretende usar en este documento que es el ATP explicado más adelante, se pueden usar dos modelos:

- Modelos de parámetros distribuidos
- Modelos de parámetros dependientes de la frecuencia

En el caso de los elementos de control y protección la simulación puede incorporar dos modelos básicos:

- Modelos con parámetros lineales
- Modelos con parámetros no lineales

1.1.1.2.1. Modelos de parámetros distribuidos

Este método, también llamado de Bergeron, se basa en la propagación de las ondas en una línea de transmisión sin pérdidas y con parámetros L (inductancia) y C (capacitancia) constantes distribuidos a través de la línea de

transmisión. La figura 9 representa el modelo de Bergeron para una línea de transmisión, donde las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las ecuaciones:

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} v_k(t) + i_{hk}(t) \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z_c} v_m(t) + i_{mh}(t) \quad [\text{Ec. 2}]$$

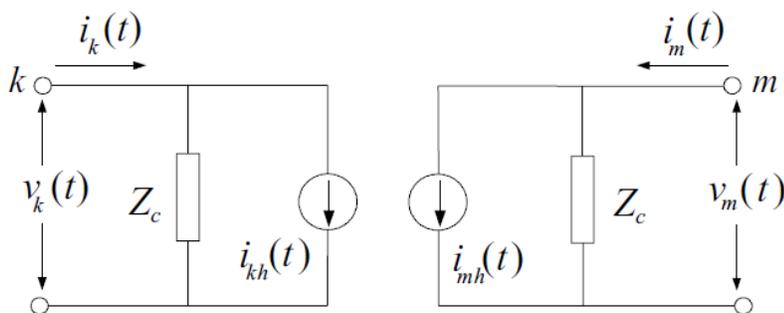
Donde:

$$i_{hk}(t) = -\frac{1}{Z_c} v_m(t - \tau) - i_m(t - \tau) \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$i_{mh}(t) = -\frac{1}{Z_c} v_k(t - \tau) - i_k(t - \tau) \quad [\text{Ec. 4}]$$

- τ = tiempo de desplazamiento de la onda viajera

Figura 9. **Circuito equivalente del modelo Bergeron**



Fuente: HERNÁNDEZ RESTREPO, Luis. *Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia*. p. 28.

La impedancia característica de la línea se representa mediante:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad [\text{Ec. 5}]$$

Para sistemas monofásicos, las líneas se desacoplan por medio del método de descomposición modal para estudiar cada modo como una línea monofásica. Esta descomposición se realiza por medio de matrices de transformación constantes con componentes reales dando resultados exactos para líneas balanceadas. Para líneas desbalanceadas el modelo no es útil, ya que la suposición de que la matriz de transformación sea constante no es válida, porque las matrices son dependientes de la frecuencia.

Debido a que en las líneas de transmisión se presentan fenómenos como el efecto piel y el efecto de retorno a tierra a medida que aumenta la frecuencia, es necesario considerar la dependencia en frecuencia de los parámetros para tener resultados más exactos máxime para el estudio de fenómenos transitorios.

1.1.1.2.2. Modelos dependientes de la frecuencia

La metodología usada por J. Martí evita problemas numéricos de estabilidad y dan un ancho rango de frecuencias de 0 Hz (condición DC) a 106 Hz sin la intervención del usuario, para las respuestas en computadora solo aumenta del 10 % al 30 % del tiempo al que se realizaban los análisis con parámetros fijos.

Las formulaciones en el dominio del tiempo son más complejas que en el dominio de la frecuencia, pero para un estudio completo con operaciones de maniobras o elementos no lineales y algunos otros fenómenos son más flexibles y generales. Utiliza también matrices de transformación constantes reales para la descomposición fase-modo; por lo tanto, también presenta inconvenientes de exactitud para líneas desbalanceadas.

Debido a la naturaleza distribuida de las pérdidas y a la dependencia en frecuencia de los parámetros, es más conveniente desarrollar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en las ecuaciones a continuación:

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega)I_k(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega)I_m(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad [\text{Ec. 7}]$$

Dónde:

$$E_{mh} = A(\omega)F_{pk} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$E_{kh} = A(\omega)F_{pm} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Son las fuentes historiales de voltaje en los nodos k y m .

La impedancia característica y la constante de propagación de las ecuaciones 9 y 10, se ilustran en las ecuaciones 11 y 12:

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}} \quad [\text{Ec. 10}]$$

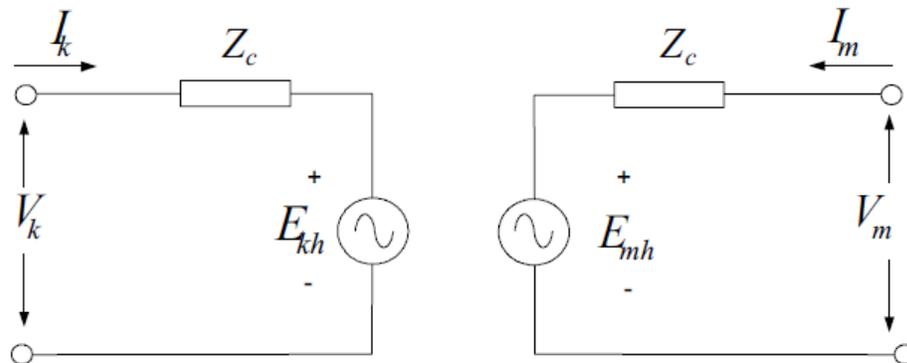
$$\gamma(\omega) = \sqrt{[R'(\omega) + j\omega L'(\omega)][G'(\omega) + j\omega C'(\omega)]} \quad [\text{Ec. 11}]$$

El circuito equivalente de las ecuaciones 7 y 8 en el dominio de la frecuencia se ilustran en la figura 10, donde se puede comprender de una mejor manera si transforman las ecuaciones 7 y 8 al dominio del tiempo:

$$v_k(t) = Z_c * i_k(t) + [v_m(t) + Z_c * i_m(t)] * a(t) \quad [\text{Ec. 12}]$$

$$v_m(t) = Z_c * i_m(t) + [v_k(t) + Z_c * i_k(t)] * a(t) \quad [\text{Ec. 13}]$$

Figura 10. **Circuito equivalente modelo JMartí**



Fuente: HERNÁNDEZ RESTREPO, Luis. *Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia*. p. 50.

En las ecuaciones 13 y 14 la evaluación numérica de la consolución dada por el símbolo * para el cálculo de transitorios es lenta. Para acelerar este proceso, es necesario sintetizar los elementos involucrados en la consolución: la impedancia característica Z_c y la función de propagación γ , debido a su naturaleza irracional. La síntesis por medio de funciones racionales permite que la evaluación numérica de la consolución se vuelva más rápida, ya que se obtienen exponenciales en el dominio del tiempo, aplicando así las técnicas de convolución recursiva. El método de aproximación usado por el autor es el procedimiento de trazado asintótico de Bode, donde el principio básico es

aproximar la curva dada o la curva original por segmentos de línea recta de los cuales son horizontales o tienen una pendiente de 20 dB/década. Los puntos donde la pendiente cambia, definen los polos y los ceros de la función racional. El modelo de J. Martí no es muy exacto en bajas frecuencias y para secciones de línea muy cortas, debido a las imprecisiones presentes para los cálculos en el dominio del tiempo.

Este modelo fue desarrollado para la modelación de líneas de transmisión en un rango completo de frecuencias; las rutinas de obtención de datos es sencilla de conseguir y ayudan a obtener una representación en transformaciones modales de líneas desbalanceadas y no transpuestas.

1.1.1.3. Equipos de compensación y maniobra

Para el estudio de las sobretensiones transitorios se trata de hacer una representación de los componentes del sistema empezando desde la propia línea de transmisión, transformadores de potencia, reactores en derivación, banco de capacitores e interruptores o bien los dispositivos de protección como los descargadores de sobretensiones. El problema de la representación o modelo de estos componentes se divide en dos puntos: para elementos de red (líneas, transformadores) y para equipos de compensación y maniobra como se plantea a continuación.

1.1.1.3.1. Interruptores

Uno de los principales elementos en un sistema de potencia son los interruptores por el uso tanto en fenómenos transitorios como aquellos que no están catalogados como tal. Su principal función por definición consiste en realizar aperturas y cierres bajo carga. Como se mencionó, es de vital

importancia representar en los estudios de transitorios electromagnéticos en forma trifásica a los interruptores, cuyo modelo es distinto en general a los modelos de los otros componentes del sistema ya que representan dos aspectos en un estudio.

El primero corresponde a la fuente del transitorio, por lo mismo tiene una inductancia equivalente de Thevenin detrás del mismo en el punto de instalación. El segundo punto de consideración radica en que el elemento de desconexión o de cierre de la LT, el transformador o componentes del sistema deben considerar los siguientes factores.

- Aleatoriedad en los polos para el corte o cierre.
- Energía inductiva o capacitiva que considerar en la maniobra o para efectos de las tensiones transitorias internas.
- Efecto de componentes de la red en el interruptor.

En cuanto a la representación de interruptores para trabajar con elementos de parámetros distribuidos, se pueden seleccionar diferentes representaciones dependiendo del objetivo del estudio, por ejemplo:

- Interruptores con control de tiempo
- Interruptores con manejo de cantidades en forma estadística
- Interruptores controlados por tensión

1.1.1.3.2. Descargadores de sobretensión

Los descargadores de sobretensiones son dispositivos de protección usados para limitar las sobretensiones debidas a descargas de rayos, fallos de equipo u otros eventos; su principal función es evitar daños al equipo y la interrupción del servicio. También se llama pararrayos.

Los descargadores de sobretensiones se instalan en muchas piezas diferentes de equipo, como postes de energía eléctrica y torres, transformadores de potencia, interruptores y otras partes de la subestación donde se consideren necesarias.

El descargador típico tiene un terminal de alta tensión y un terminal de tierra. Cuando una sobretensión viaja a lo largo de la línea a la cual está conectado el descargador de sobretensión, la corriente provocada por la sobretensión se desvía a través del descargador, en la mayoría de los casos, se drena a tierra.

Figura 11. **Descargador de sobretensión usado en líneas de transmisión**



Fuente: *Cargador de sobretensión*. <http://www.arresterworks.com/resources/photo.php>
Consulta: 15 de febrero de 2016.

Descargadores de sobretensiones en condiciones normales tienen una impedancia muy elevada y solo fluye una pequeña corriente del orden de 1 miliamperio. En presencia de una sobretensión, la impedancia cambia de un valor elevado a un valor muy bajo, descargando una corriente a tierra. El producto de la corriente nominal de descarga por la impedancia (no lineal) se llamará voltaje residual, llamado nivel de protección, que es el valor al cual se limita la sobretensión. La tecnología actual para la fabricación de descargadores se concentran en los de óxido de zinc (ZnO) encapsulados en aislamiento polimérico; el pararrayo de ZnO tiene resistencias no lineales de óxidos

metálicos, principalmente, el óxido de zinc y no tiene explosores. La construcción de los de ZnO es más simple; como tiene menos piezas, la confiabilidad es mayor. Lo anterior establece diferencias constructivas entre los dos tipos de fabricación. Los descargadores de ZnO pueden ser simulados por medio de una aproximación de su característica no lineal de voltaje versus corriente la cual está dada por la siguiente expresión:

$$I = P * \left[\frac{V_n}{V_{ref}} \right]^q \quad [\text{Ec. 14}]$$

Los conceptos más importantes a la hora de la selección de un descargador son los siguientes:

- Tensión asignada: es la tensión eficaz máxima permisible de la tensión a frecuencia industrial aplicada entre terminales entre el descargador para el cual debe de operar correctamente, bajo condiciones de sobretensiones temporales.
- Tensión de operación continúa: es el mayor valor de tensión eficaz a frecuencia industrial que soporta el descargador continuamente.
- Corriente de referencia del descargador: es el valor pico de la componente resistiva de la corriente a la frecuencia industrial utilizada para determinar la tensión de referencia de un descargador.
- Tensión de referencia de un descargador: es el valor pico más alto, independientemente de la polaridad de tensión a frecuencia industrial, dividido por 2, medido a la corriente de referencia del descargador.

- Tensión residual de un descargador: es el valor pico de tensión que aparece entre los terminales de un descargador durante el paso de la corriente de la descarga.

De manera general se tiene el siguiente procedimiento general para la selección del pararrayos:

- Determinar la tensión de operación continua del descargador con base la máxima tensión de operación del sistema.
- Determinar la tensión asignada del descargador con base en las sobretensiones temporales previstas.
- Estimar la magnitud y probabilidad de las corrientes de descarga atmosférica esperadas a través del descargador y la clase del descargador.

1.1.1.3.3. Reactores

Los reactores en derivación son el medio más económico y atractivo para compensar los excedentes de reactivos de LT cuando se encuentran en bajo carga. Para capacidades grandes, por lo general, son sumergidos en aceite. Se pueden conectar directamente en las LT en barras de subestaciones o en terciarios de transformadores de sistema.

La razón fundamental de utilizar reactores es controlar los voltajes de régimen permanente (de frecuencia fundamental); no representan el medio idóneo para controlar sobretensiones transitorias. El dimensionamiento de estos

dispositivos se define con base en estudios de flujo del sistema para distintas condiciones de operación.

La conexión de los reactores puede ser permanente (mediante cuchillas) o desconectables (mediante interruptores). En caso de ser permanente se tiene el inconveniente de que en cargas altas los reactores degradan la cargabilidad de las líneas de transmisión. Como criterio general se puede establecer que los reactores de las LT de sistemas débiles deben ser dotados con medios de conexión/desconexión, a menos que exista el riesgo de autoexcitación durante contingencias severas que impliquen rechazo de carga. En líneas más cortas, el problema de sobretensiones es menos severo y los reactores pueden conectar/desconectar frecuentemente para ayudar en la administración horaria de los reactivos según varia la demanda del sistema.

1.2. Transitorios electromagnéticos en sistemas de transmisión

Los transitorios son manifestaciones independientes del control humano; cuando se habla de transitorios electromagnéticos se refiere a aquellos fenómenos donde se ven afectados los parámetros eléctricos como la corriente, diferencial de voltaje de fase a tierra o entre fases inclusive la frecuencia, dando como resultado cambios repentinos en la configuración de un circuito energizado, los cuales generalmente ocasionan sobrevoltajes transitorios de magnitudes impredecibles que a pesar de lo breve de su duración, pueden ser peligrosas por las amplitudes que se producen y que pueden originar la ruptura o el deterioro del aislamiento.

1.2.1. Transitorios en líneas de transmisión

Al originarse un transitorio en una línea de transmisión se generan tensiones y corrientes compuestas por señales de diversas frecuencias, las cuales se atenúan o aparecen conformes se desarrolla el transitorio, lo que significa que la composición de armónicos de las tensiones y corrientes varía con el tiempo.

La sobretensión transitorias es toda alteración de voltaje en función del tiempo entre un conductor de fase y tierra o entre 2 conductores de fase; su magnitud es elevada y de naturaleza transitoria cuyo valor de cresta sobrepasa el valor de la tensión nominal o la tensión máxima normalizada que para Guatemala está definida en las normas técnicas de diseño y operación de servicio de transporte (NTDOST).

Tabla I. **Tensiones normalizadas para Guatemala**

Tensión	
Nominal (kV)	Máxima de diseño (kV)
69	72,5
138	145
230	245

Fuente: elaboración propia.

1.2.1.1. Tipos de sobretensiones

Toda onda de sobretensión está acompañada de una onda de sobrecorriente con la misma forma con amplitud distinta en un mismo instante. Las sobretensiones transitorias se trasladan a lo largo de una línea de

transmisión en forma de ondas cuya amplitud se va amortiguando al alejarse del punto de partida hasta que recuperan la normalidad después de múltiples reflexiones.

Existen varias formas de clasificar las sobretensiones ya sea por su origen o por el tiempo de duración, cada clasificación es correcta y depende del punto de vista del análisis que se quiera realizar. En esta oportunidad se analizarán las sobretensiones por el tiempo de duración, por lo que debe realizarse una distinción entre sobretensiones muy amortiguadas y de corta duración y sobretensiones poco amortiguadas y de larga duración.

1.2.1.1.1. Sobretensiones de frente rápido

Son sobretensiones de corta duración, varios microsegundos y que normalmente llevan asociados picos de tensión superiores a los valores máximos de la tensión máxima del sistema.

La principal causa de una sobretensión de frente rápido es un rayo; también, pueden ocasionarse por maniobras, en situaciones donde las distancias entre interruptor y equipo son muy cortas.

Un rayo puede ser representado como una fuente de corriente capaz de atravesar cualquier impedancia, esto se asume para simplificar el análisis. El voltaje desarrollado por el rayo será el producto de la corriente y la impedancia por la cual pasará. En el rayo hay una serie de picos de corrientes denominados relámpagos: primero se la llama relámpago inicial y a los demás, relámpagos subsecuentes.

Observaciones realizadas han mostrado que el relámpago inicial es de polaridad negativa con una amplitud pico cerca de 40 000 A, aunque puede variar desde cientos hasta cientos de miles de amperios.

El tiempo pico de la onda de corriente es del orden de 3 ps a 10 ps. Luego del pico de corriente, decae con una constante de tiempo del orden de 10 ps. Sin embargo, cada rayo tiene características diferentes por lo que se debe realizar un análisis estadístico.

1.2.1.1.2. 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 (poco amortiguadas).

Una de las principales causas de sobretensiones de frente lento son las provocadas por maniobras, debido al accionamiento de los equipos de los equipos presentes en los sistema de transmisión resumidos en interruptores y seccionadores, los sobrevoltajes dependen de los parámetros como la configuración del sistema, la carga conectada, inclusive en el mismo equipo se comporta de una manera distinta cada vez. La obtención del valor de la sobretensión por un método estadístico no predice la condición por la cual fue generada la sobretensión, pero brinda la probabilidad con la certeza de exceder cierto valor de tensión. Aunque no es perfectamente válido, la distribución de probabilidad puede ser aproximada por una distribución gaussiana entre el valor del 50 %.

1.3. Coordinación de aislamiento por sobretensiones atmosféricas

Las sobretensiones de origen atmosférico son una de las principales causas de falla en las líneas de transmisión, las descargas atmosféricas pueden caer en el hilo de guarda, en alguna de las fases o en alguna de las torres. Por lo que la adecuada selección de aislamiento es de vital importancia para la línea de transmisión y para el sistema de transmisión. Tal como se describió anteriormente, existen tres posibles puntos de impacto de un rayo; la probabilidad de que se produzca flameo debe ser determinada para cada caso en particular, el método empleado para conocer la probabilidad de impacto de un rayo en una línea se denomina modelo electrogeométrico el cual se puede resumir en dos áreas específicas para analizar: probabilidad de fallas por apantallamiento y por flameo inverso. La siguiente expresión es una aproximación de la probabilidad acumulada de la corriente de un rayo, la cual ha sido especificada desde varias fuentes.

La probabilidad que la corriente de rayo (I) sea superada, está dada por la siguiente expresión:

$$P_{\%} = \frac{1}{1 + \left[\frac{I}{34}\right]^{1.5}} \quad [\text{Ec. 16}]$$

Orientado a los objetivos de este trabajo se describirá a continuación el método orientado a calcular la probabilidad de fallas por flameo inverso.

1.3.1. Fallas por flameo inverso

Para obtener la tasa de fallas por flameo inverso se utilizará el método de los dos puntos recomendado por el EPRI para evaluar el comportamiento de una línea de transmisión ante descargas atmosféricas; específicamente, para flameo inverso, se siguen los siguientes pasos:

- Calcular las impedancias características del cable de guarda y de la estructura, factores de acople y resistencia impulsiva de puesta a tierra.
- Calcular los tiempos de viaje en el vano, en la estructura y en las crucetas.
- Calcular el voltaje en la punta y en la base de la estructura.
- Calcular el voltaje en la cadena de aisladores.
- Calcular la corriente y el voltaje crítico de flameo.
- Selección de la corriente crítica incluyendo el efecto del voltaje a frecuencia industrial.
- Calcular el número de salidas de la línea por flameos inversos.

Como se puede intuir, las ecuaciones y los métodos para calcular los numerales 1, 2, 3 y 4 tienen un cierto grado de complejidad debido a la cantidad de variables y reflexiones en la estructura de transmisión, por lo que para su cálculo se deben utilizar programas digitales especializados. Por lo que dichos

cálculos se realizarán usando el ATP, queda por determinar los puntos 5 y 6 que se detallan a continuación.

1.3.1.1. Cálculo de la corriente y voltaje crítico de flameo

El voltaje crítico que puede producir flameo en los aisladores está dado por:

$$V_c = \left[0.4 + \frac{0.71}{(t * 10^6)^{0.75}} \right] * d * 10^6 \quad [\text{Ec. 17}]$$

Donde:

- V_c – voltaje crítico que producira flameo en V
- t – tiempo en μs
- d = distancia de arco en seco para polimeros

La corriente crítica que puede producir flameo en los aisladores está dada por:

$$I_{c_i} = \frac{F_t * L}{V_{f_i}} \quad [\text{Ec. 18}]$$

Donde θ depende de la fase a la cual se están refiriendo; i depende del tiempo en que se realice el cálculo. Siguiendo el método de los dos puntos, se está hablando de que se tendrían para cada fase la siguiente expresión:

- Corriente crítica de flameo a los $2\mu s$:

$$I_{C_2} = \frac{820 * L}{V_{f_2}} \quad [\text{Ec. 19}]$$

- Corriente crítica de flameo a los $6\mu s$:

$$I_{C_6} = \frac{585 * L}{V_{f_6}} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Donde L es la distancia de fuga del aislador y el voltaje V_f es el voltaje que atraviesa al aislador por fase.

1.3.1.2. Selección de la corriente crítica

Con los valores de corriente anteriormente obtenidos se analiza el efecto del voltaje a frecuencia industrial; esto implica que se requiere un valor menor de corriente de descarga de rayo para producir un arco superficial sobre la cadena de aisladores. Tomando en cuenta que la probabilidad de que la corriente pico sea excedida aumenta cuanto menos sea el pico de corriente de rayo que se genere. Se debe realizar un análisis donde se selecciona las corrientes críticas menores por fase calculada para los tiempos ya indicados, para proceder a construir la gráfica de las corrientes que producirán flameo inverso con la siguiente ecuación:

$$I_{2\theta} = \left[\frac{V_c - V_0(\sin(\theta_f - \alpha))}{V_c} \right] * I_c \quad [\text{Ec. 21}]$$

Donde:

- θ_f es el ángulo en radianes instantáneo.
- α es el desfase que existe en sistemas trifásicos (0° , 120° , 240°).
- V_0 es el voltaje de fase a tierra del sistema en rms el cual está dado por la siguiente expresión:

$$V_0 = \frac{V_{LL} * \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad [\text{Ec. 22}]$$

Como la corriente crítica calculada en el paso anterior es una función del tiempo, su valor cambia en el intervalo designado, por lo tanto, se necesita un solo valor, entonces se realiza un promedio en ese intervalo y se obtiene la corriente crítica dada por la siguiente expresión:

$$I_{p\theta} = \left[1 + \left(\frac{V_0}{V_c} \right) \left(\frac{\cos(\theta_2 - \alpha) - \cos(\theta_1 - \alpha)}{\theta_2 - \theta_1} \right) \right] * I_c \quad [\text{Ec. 23}]$$

Dónde:

- θ_2 y θ_1 representa el ángulo en radianes del límite mayor y menor, respectivamente, donde cambia la fase predominante.

1.3.1.3. Número de salidas al año

El resultado final del método de los dos puntos es obtener la cantidad de salidas por fallas por flameo inverso por cada 100 km de línea por año; con las corrientes antes calculadas, se obtiene la probabilidad de que cada una de las

corrientes sea superada, como se indica en la ecuación 16; seguido, se obtendrá la cantidad de salidas por flameo inverso la cual está dada por:

$$N_{f\theta} = p(I > I_c) * 0.6 * N_l \quad [\text{Ec. 24}]$$

Donde:

- θ es la fase objeto de análisis
- N_l cantidad de rayos a la línea que está dada por la siguiente ecuación:

$$N_l = N_g * \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad [\text{Ec. 25}]$$

Donde:

- b es la distancia entre cables de guarda
- h es la altura del cable de guarda
- N_g es la densidad de rayos en la zona (rayos/km²) que está dado por:

$$N_g = 0,04 * T_d^{1,25} \quad [\text{Ec. 26}]$$

Donde:

- T_d es el nivel cerámico o número de tormentas al año de la región

Finalmente para la estructura en la cual se está haciendo el análisis el número de salidas por flameo inverso está dado por la siguiente expresión:

$$N_{Tf} = N_{Af} + N_{Bf} + N_{Cf}$$

[Ec. 27]

1.4. Introducción al programa ATP-EMTP

El programa de transitorios electromagnéticos EMTP (*electromagnetic transient program*), es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos y sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia; el EMTP fue desarrollado a fines de la década del 60 por el Dr. Dommel quien cedió el programa a la Bonneville Power Administration (BPA), desde entonces el EMTP fue expandido y distribuido bajo la dirección de la BPA. Algunos modelos han sido desarrollados dentro de la misma y otros han sido desarrollados por otras empresas y universidades. En la actualidad, el desarrollo del programa está a cargo de un equipo dedicado a tal fin en la Universidad de Leuven, en Bélgica, el cual tras algunos cambios lo han rebautizado como ATP (*alternative transient program*), del cual existe tanto una versión para PC como para computadoras grandes.

Los estudios que involucran el uso del ATP tienen objetivos encuadrados dentro de dos categorías. Una es el diseño que incluye la coordinación de la aislación dimensionamiento de equipos, especificación de equipos de protección, diseños de sistemas de control, etc. La otra es la solución de problemas de operación como fallas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema.

Una de las mayores ventajas del ATP es su flexibilidad para modelar sistemas, por lo tanto, un usuario experimentado puede aplicar el programa a una gran variedad de estudios. Los tipos de componentes que pueden ser utilizados son:

- Resistencias, capacitores e inductancias concentradas. Monofásicas o secciones polifásicas consistentes en matrices R, L, C.
- Modelos de ondas viajeras para representar líneas aéreas o cables más exactamente que con secciones PI, se disponen de distintos tipos de modelos que permiten considerar las transposiciones, la variación de los parámetros con la frecuencia.
- Impedancias no lineales, por ejemplo, inductores para representar dispositivos con saturación magnética.
- Fuentes ideales de corriente y tensión, las cuales pueden ser sinusoidales de cualquier frecuencia, exponenciales o de cualquier otra especie definida por el usuario.
- Sistemas de control, las señales eléctricas medidas pueden ser transferidas a un programa auxiliar denominado TACS (*transient analysis of control system*) donde se emula una computadora analógica y se calculan las variables de control que son retornadas a la red eléctrica principal.

Las entradas del programa consisten en el intervalo de tiempo para el cálculo, el tiempo máximo de simulación, las variables de salida deseadas y los datos del modelo.

Los datos de entrada requeridos por el ATP son diferentes y superiores en cantidad a los necesarios para otros programas como flujo de carga, cortocircuito y estabilidad. Esto se debe a que el ATP utiliza métodos más detallados que dichos programas, para simular en forma precisa los transitorios de alta frecuencia que ocurren en cortos periodos de tiempo. El método de

resolución o cálculo utilizado por el ATP es la regla de integración trapezoidal sobre ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de la mayoría de los elementos que componen una red eléctrica.

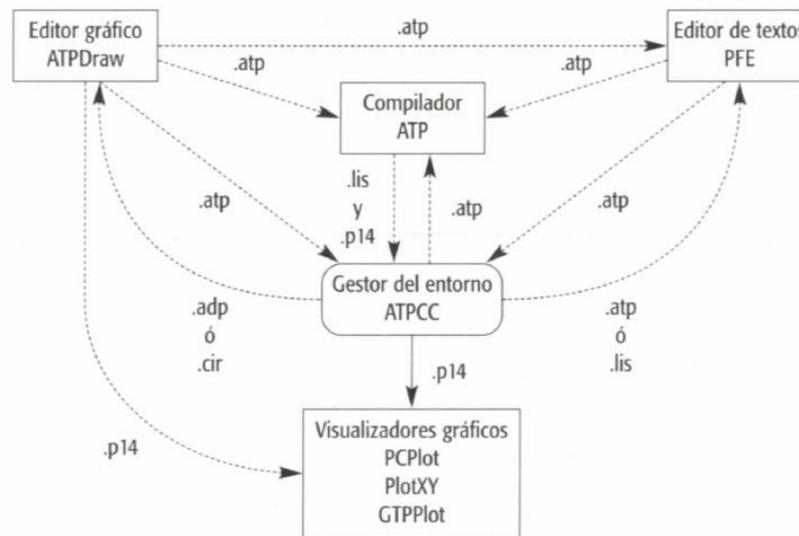
Debido a que el programa fue escrito inicialmente en Fortran, la interacción con el usuario es mediante un rígido archivo que debe cumplir con ciertas normas de dicho lenguaje. Para facilitar la entrada de datos existen programas auxiliares que ayudan al usuario en la entrada de datos de líneas, cables, interruptores, transformadores, etc. Uno de los más difundidos, dado su entorno gráfico y amigable, es el ATPDRAW el cual se analizará su funcionamiento más adelante.

1.4.1. Descripción del entorno de trabajo

Con el fin de facilitar su uso, el ATP permite la integración de una serie de programas complementarios: editores de texto, un editor gráfico de aplicaciones específicas para la visualización gráfica de los datos de entrada como de los resultados obtenidos. De esta manera, la simulación de un sistema eléctrico o electromecánico puede iniciarse con:

- La creación del modelo en el editor gráfico (fichero de extensión .adp o .cir).
- La ejecución (run ATP) del modelo en el mismo editor genera el fichero .atp
- los ficheros de salida .lis y .pl4, ficheros necesarios para graficar los resultados obtenidos.

Figura 12. Interacción entre los programas de ATP



Fuente: CARDONA CORREA, Leonardo. *Guía de prácticas fenómenos transitorios electromagnéticos*. p. 23.

1.4.1.1. Compilador ATP

El compilador se encarga de traducir los datos que se configuran con el ATPDRAW mediante un ambiente gráfico y amigable a archivos de bajo nivel con una estructura ya definida necesaria para ser procesada y así realizar los cálculos o métodos numéricos que son extremadamente complejos sino se realizan de esta manera. Este programa constituye el núcleo fundamental de la aplicación y se trata del compilador que permite procesar los datos del circuito objeto de estudio, maneja ficheros de tipo de texto de extensión .dat o .atp.

Las dos versiones de compiladores ATP más habituales son:

- Watcom ATP. Admite nombres de ficheros de gran longitud, ficheros de datos de más de 150 000 líneas y puede ejecutar simultáneamente varios casos.
- GNU ATP. Permite utilizar nombres largos para ficheros, proporciona un arranque rápido y requiere menos memoria.

En el esquema como fue ideado el ATP que incluyen los módulos de simulación disponibles en ATP, las subrutinas de apoyo y la interacción entre estos. Con todos estos elementos se pueden crear modelos de menor a mayor complejidad, que representan los diferentes equipos y componentes encontrados en los sistemas eléctricos.

1.4.1.2. Editor de texto

El desarrollo del procesador gráfico ATPDraw ha simplificado enormemente la creación de los ficheros que son compilados posteriormente con ATP. Sin embargo, para los usuarios expertos sigue siendo necesario el empleo de un editor de textos que permita trabajar, entre otros, con los ficheros de entrada a ATP (.atp o .dat) o de salida del mismo (.lis). Conviene señalar que la estructura de los ficheros .atp es muy rígida, ya que toda la información del sistema eléctrico a simular debe ocupar una posición específica en cada fila del fichero. Para facilitar la escritura de los datos en el fichero se incluye una serie de plantillas (template). Además, resulta indispensable tener a mano el manual de usuario *ATP-EMTP rule book*.

Para profundizar en el análisis del formato usado en el programa es necesario definir algunos términos los cuales serán útiles más adelante:

- Tarjetas: se le denominará tarjeta a cada uno de los registros de 80 columnas del archivo que con los datos de entrada.
- Tarjeta en blanco: se le denomina así aquella que tiene la palabra *blank* en las columnas 1 a 6 (la columna 6 debe de estar en blanco). El resto de las columnas (7 a 80) puede utilizarse para indicar cualquier comentario.

La mayoría de los modelos tienen la opción de indicar un número en la columna 80 (variable IOU) con el que se puede solicitar alguna variable de salida según la siguiente convención:

- IOU = 0 → ninguna variable de salida
- IOU = 1 → corriente de rama
- IOU = 2 → tensión de rama
- IOU = 3 → corriente y tensión de rama

El ingreso de todas las tarjetas de datos, necesarios para la representación digital completa de un sistema está organizado según una estructura determinada. Es decir, el conjunto de datos puede ser considerado como dividido en grupos, los cuales se indican a continuación y cuya secuencia debe ser respetada.

- Las tarjetas que indican el comienzo de un nuevo caso, las cuales están compuestas por:
 - Tarjeta con la frase *begin new data case*.
 - Tarjetas para solicitar de algún requisito especial (son opcionales consultar con el manual).

- Tarjetas de datos misceláneos.
- Tarjetas de ramas lineales o no lineales, transformadores, descargadores, líneas de transmisión, cables, etc., terminadas en una tarjeta en blanco.
- Tarjetas de interruptores, diodos, etc., terminadas con una tarjeta en blanco.
- Tarjetas de fuentes de tensión, corriente y/o máquina síncrona, terminadas con una tarjeta en blanco.
- Tarjetas para sobrescribir condiciones iniciales.
- Tarjetas que definen nodos cuyas tensiones serán impresas en la salida, terminadas con una tarjeta en blanco.
- Tarjetas para la graficación terminadas con una tarjeta en blanco.
- Dos tarjetas que indican el fin del lote de datos las cuales son:
 - Una tarjeta con la frase *begin new data case*
 - Una tarjeta en blanco

En la figura 13 se ve la estructura general de un archivo ATP con las diferentes tarjetas anteriormente descritas generalmente en el mismo orden; la importancia de comprender esta estructura se debe a que es un archivo generado por el ATPDRAW, nunca existirá una simulación sin un archivo como este. Y si existiera algún tipo de error en el proceso de simulación,

1.4.1.3. Editor gráfico ATPDraw

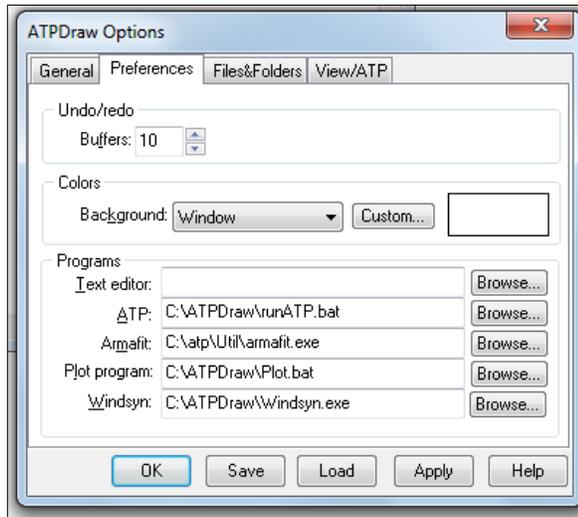
El ATPDraw es en esencia una interfaz gráfica que interpreta los gráficos correspondientes a modelos y conexiones y a partir de estos codifica el archivo plano que lee el ATP. El programa ATPDraw, además de generar el archivo plano, se encarga de cargar el ATP y hacer que procese el archivo plano correspondiente a la simulación; toda esta labor requiere que también se encargue de la gestión de archivos; por ello, necesita una configuración de directorios además de la configuración para cargar el ATP.

Es importante anotar que el ATP no se instala, básicamente, el proceso de instalación consiste en configurar el ATPDraw para que pueda llamar al ATP y hacer que procese el archivo plano correspondiente a la simulación deseada.

La versión del ATP que se usará es GNU-Mingw32 (TPBIG.exe); este ejecutable debe tener en la carpeta que se encuentre los dos archivos de arranque: el startup y el listsize.dat.

En primer lugar se accede al ATPDraw, en el menú 'tools' se da clic en 'options' y se selecciona la pestaña 'preferences'; en esta pestaña se deben asignar las rutas de: el ejecutable del editor de texto, el archivo de enlace del atp y el ejecutable del programa graficador, al terminar se debe dar clic 'save'; esto es importante y no debe olvidarse, de lo contrario, se tendrá que reconfigurar de nuevo el ATPDraw cuando se vuelva a utilizar. La figura 14 muestra un ejemplo.

Figura 14. Menú ATP Options

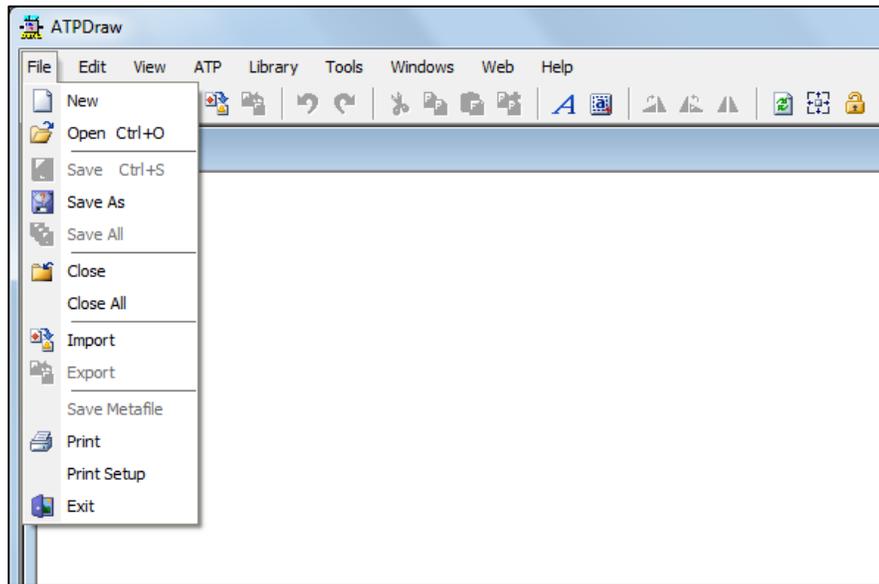


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

- Menú 'file'

La figura 15 presenta las opciones del menú 'file' que contiene las opciones generales para crear, abrir o guardar archivos; también, se cuenta con la opción 'import' que extrae de un archivo seleccionado el contenido al área de trabajo del archivo actual.

Figura 15. Menú ATP file



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

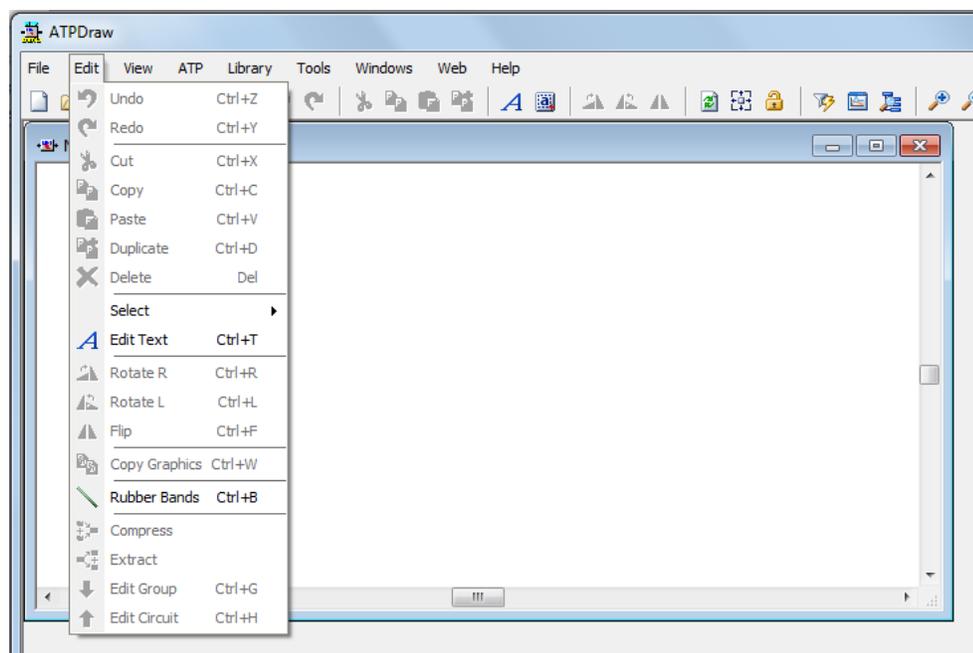
- Menú 'edit'

La figura 16 presenta las opciones del menú 'edit' en el cual se tienen las opciones generales de deshacer, rehacer, cortar, copiar y pegar elementos del área de trabajo, duplicar y eliminar.

- La opción 'seleccionar' permite filtrar lo que se quiere seleccionar.
- La opción 'edit text' permite modificar comentarios realizados en el modelo.
- Cualquier elemento puede ser rotado con las opciones 'rotate' R o L; también, puede copiarse en forma simétrica.

- La opción 'copy graphics' se usa para copiar la ventana de trabajo como imagen para efectos de documentación.
- La opción 'compress' se usa para crear grupos, esto se estudiará más adelante; esta opción tiene asociado los comandos extraer, editar grupo y editar circuito.
- La opción 'comentario' se usa para describir la simulación.

Figura 16. **Menú ATP edit**



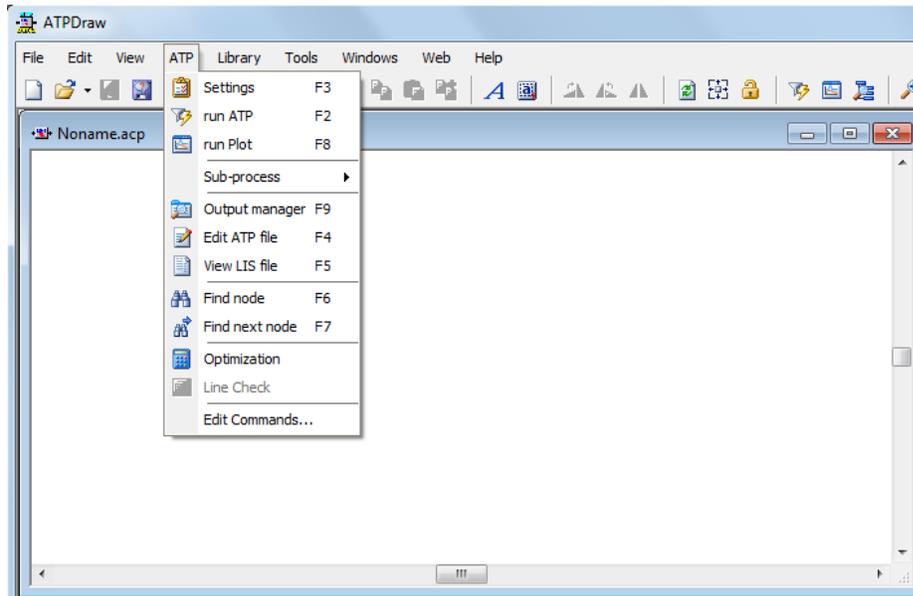
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

- Menú ATP

La figura 17 presenta las opciones del menú ATP en el cual se encuentra la opción 'configuraciones' que permite establecer el tipo de simulación y ajustar parámetros de acuerdo a la simulación.

- La opción 'run ATP' ejecuta la simulación.
- La opción 'run plot' abre el graficador y carga el archivo de resultados de la simulación actual.
- En la opción 'sub procesos' se encuentran opciones como generar el archivo 'atp' y generar asignación de nombres de nodos.
- La opción 'output manager' activa el administrador de variables de salida en el cual se puede ver qué está configurado para visualización.
- La opción 'edit ATP file' permite ver y editar el archivo plano '.atp' y la opción 'view lis file' permite ver el reporte de la simulación actual.
- En ocasiones es importante localizar nodos, si no se han asignado por parte del usuario el ATPDraw da una asignación tipo XX001 y en ocasiones es importante hallar un nodo para resolver un problema para lo cual se usa la opción 'find node'.

Figura 17. Menú ATP



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

1.4.1.3.1. Componentes usados para modelación

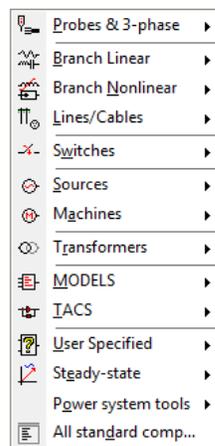
Se visualiza al dar clic derecho en el área de trabajo, la figura 18 muestra la ventana principal de este menú.

En orden se encuentran las siguientes opciones:

- Elementos de medida y conexiones para circuitos trifásicos
- Elementos lineales
- Elementos no lineales
- Líneas y cables
- Interruptores

- Fuentes
- Máquinas eléctricas
- Transformadores
- MODEL, opciones para uso del lenguaje
- Especificaciones del usuario
- Componentes para análisis en frecuencia
- Todos los componentes estándar

Figura 18. **Menú de componentes**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

1.4.1.4. **Visualizador de resultados**

Existen varias formas para analizar los resultados que se obtienen en el ATP; una y la forma más rápida para el análisis de esa gran cantidad de datos es la graficación en coordenadas, para lo cual se tienen diversos programas entre estos y el que se usará en este trabajo será el PlotXY.

Permite representar hasta ocho curvas en la misma gráfica, realizar la transformada de Fourier de una señal; representar en la misma hoja curvas de tres ficheros diferentes; representar las curvas en función del tiempo o hacer una representación X-Y; hacer un escalado automático de ejes; acceder al valor instantáneo de forma numérica; exportar datos, etc.

2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS TRANSITORIO

La metodología optada para el análisis de los fenómenos transitorios abordados en este trabajo será:

- Determinación de los modelos a usar para líneas de transmisión, forma de onda del rayo y equipos asociados.
- Aplicación de los modelos usados para líneas de transmisión, condiciones actuales y cambios en la línea, forma de onda del rayo y equipos asociados.
- Análisis de resultados.

En este capítulo se abordarán los distintos modelos disponibles en el ATP, el principal objetivo será tener un único modelo con el cual se obtenga resultados fiables en análisis transitorios. Es decir, se procurará obtener un modelo óptimo.

Se puede afirmar que el modelo que más importancia tiene es el relacionado con la línea de transmisión pues se deberá analizar cuál de los modelos disponibles (Bergeron o JMartin) se comporta de una manera real ante los fenómenos transitorios.

2.1. Modelación de línea de transmisión en ATP

Para la modelación de la línea de transmisión, el ATPDRAW cuenta con un módulo específico para dicho fin llamado ATP_LCC el cual integra objetos del programa LINE CONSTANTS; para esto el usuario debe describir la geometría del sistema o, en este caso, de las estructuras a utilizar existen las suficientes opciones para generar modelos geométricos de hasta varios conductores y circuitos; el otro modulo especifica las constantes del material; después, el ATP correrá y procesará la información para convertirla en un archivo con los parámetros eléctricos que modelan la línea de transmisión.

Después de seleccionar las propiedades constructivas de la línea, se deberá proceder a seleccionar los modelos eléctricos según el estudio que se procederá a realizar. En la siguiente tabla se muestra un detalle de los sistemas y modelos disponibles.

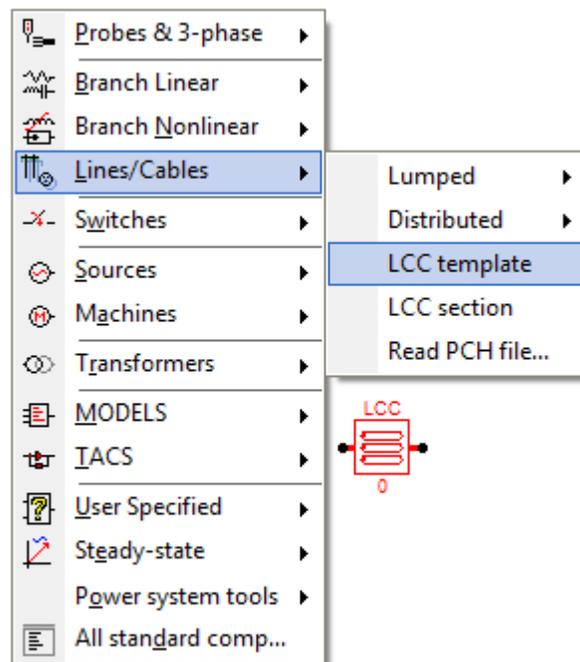
Tabla II. Modelos y sistemas ATP_LCC

Tipo de sistema (subprograma)	Modelo/ Tipo
Líneas aéreas (LINE CONSTANTS)	Bergeron: Parámetros constantes
Cables de aislados: (CABLE PARAMETERS o CABLE CONSTANTS)	PI: modelo equivalente (líneas cortas) JMarti: modelos dependientes de la frecuencia con matriz de transformación constante.
Cables de potencia (CABLE PARAMETERS o CABLE CONSTANTS)	Noda: modelo dependiente de la frecuencia. Semlyen: dependiente de la frecuencia, modelo sencillo.

Fuente: HOIDALEN, Hans Kristian. *Manual usuario ATPDRAW version 5.6 para Windows 9x/NT/2000/XP/Vista 2009*. p. 175.

Los datos para el cálculo de los parámetros de la línea se pueden ingresar a través de un preprocesador auxiliar llamado ATP_LCC, en el cual se pueden preparar los datos para la elaboración del archivo ATP para cualquier modelo de línea que se requiera.

Figura 19. **Procesador auxiliar ATP_LCC**

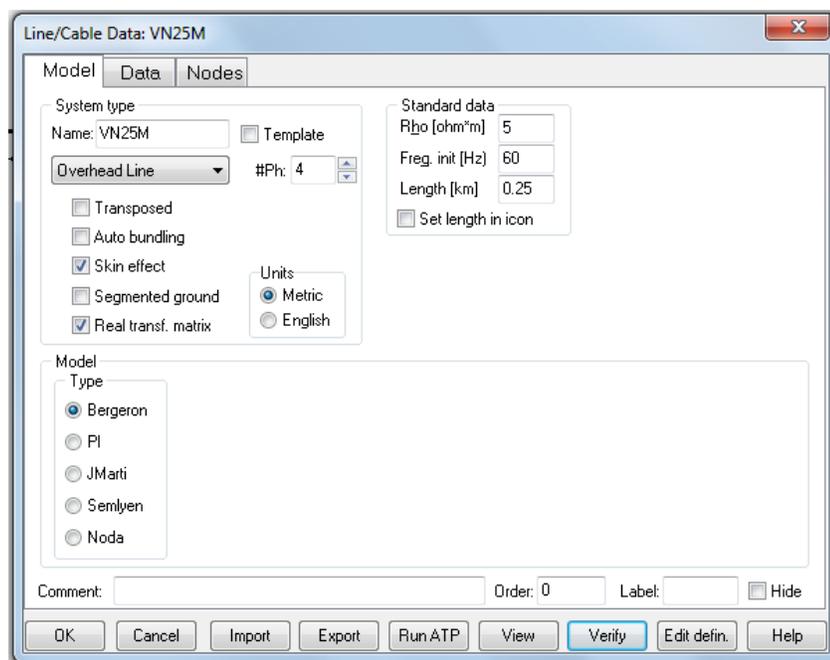


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

En el ATP_LCC se tienen dos conjuntos de datos de entrada: el primero es el MODEL donde se ingresan los datos requeridos para el modelo seleccionado; en este caso será el Bergeron y JMARTI, en cada uno de los modelos variarán los datos a ingresar, sin embargo, también hay datos característicos de la línea como la longitud de la línea, resistividad del suelo,

número de conductores y datos de inclusión de parametros como el efecto piel, transformadas reales etc.; en DATA se ingresan las características físicas de los conductores de fase y de guarda, la configuración física de las estructuras soporte, el valor de resistencia por kilómetros; todos estos datos son los mismos para cualquier modelo elegido.

Figura 20. Conjunto de entrada MODEL



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 21. Conjunto de entrada DATA

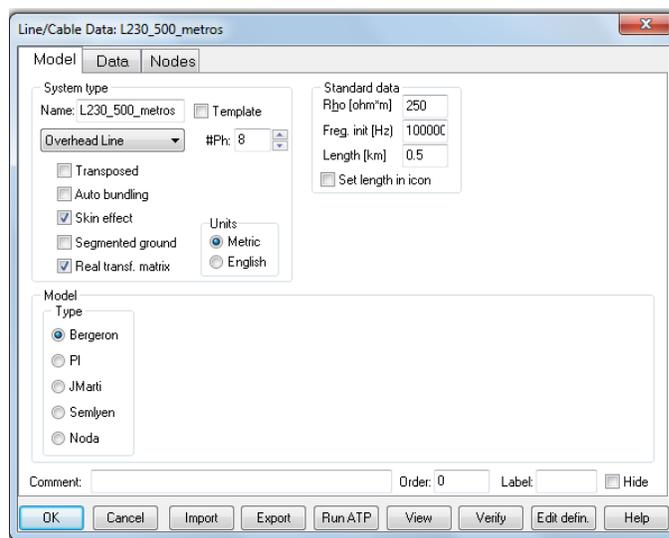
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	0	1.549	0.050086	4.7	32	32	
2	0	1.549	0.050086	4.7	26	26	
3	0	1.549	0.050086	4.7	20	20	
4	0	0.489	1.9014	-4	36	36	

Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

- Modelo Bergeron: el formato del conjunto de datos 'LINE MODEL' para el modelo Bergeron se muestra en la figura 22 y la descripción de los parámetros es la siguiente:
 - R_{ho} : resistividad del suelo en ohm*m de suelo homogéneo.
 - Freq.init: el punto más bajo de la frecuencia en los parámetros de ajuste.
 - Metric/English: para seleccionar entre unidades del sistema internacional o inglés.

- Transposed: si esta seleccionado se supone la transposición de la línea.
- Auto bundling: cuando esta seleccionado se activa la función automática de 'LINE CONSTANS'.
- Skin effect: si se selecciona esta opción se considera el efecto piel en los cálculos.
- Real trans. matrix: recomendado para simulación de transitorios.

Figura 22. Datos, modelo BERGERON



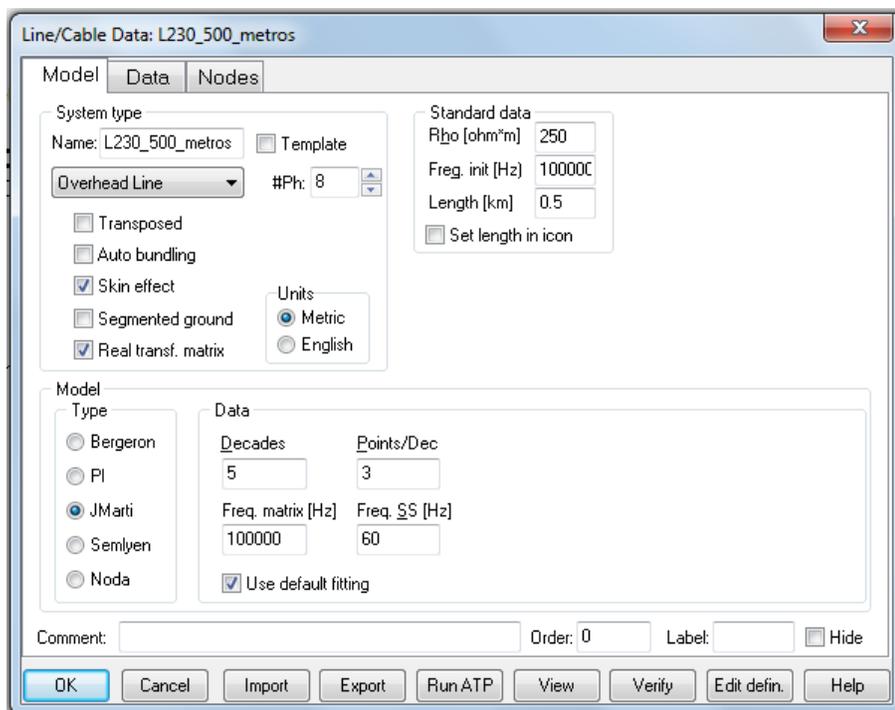
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

- Modelo JMARTI: el formato del conjunto de datos 'LINE MODEL' para el modelo JMARTI se muestra en la figura 23 y la descripción de los parámetros es la siguiente:

- R_{ho} : Resistividad del suelo en ohm*m de suelo homogéneo (teoría de Carson).
- Freq.init: el punto más bajo de la frecuencia en los parámetros de ajuste.
- Metric/English: para seleccionar entre unidades del sistema internacional o inglés.
- Transposed: si esta seleccionado, se supone la transposición de la línea.
- Auto bundling: cuando esta seleccionado se activa la función automática de 'LINE CONSTANS'.
- Skin effect: si se selecciona esta opción se considera el efecto piel en los cálculos.
- Real trans. matrix: recomendado para simulación de transitorios.
- Decades: número de décadas de la escala logarítmica.
- Points/Dec: número de puntos de frecuencia por década.
- Default fitting: ajuste por defecto (recomendado para usuarios sin experiencia).
- Freq.SS: frecuencia a la que se calcula los valores en estado estable.

- Freq.matrix: frecuencia a la cual se calcula la matriz de transformación. Esta frecuencia debe ser seleccionada de acuerdo a la componente de la frecuencia dominante del estudio transitorio. En el programa se muestran los valores por defecto.

Figura 23. Datos modelo JMARTI



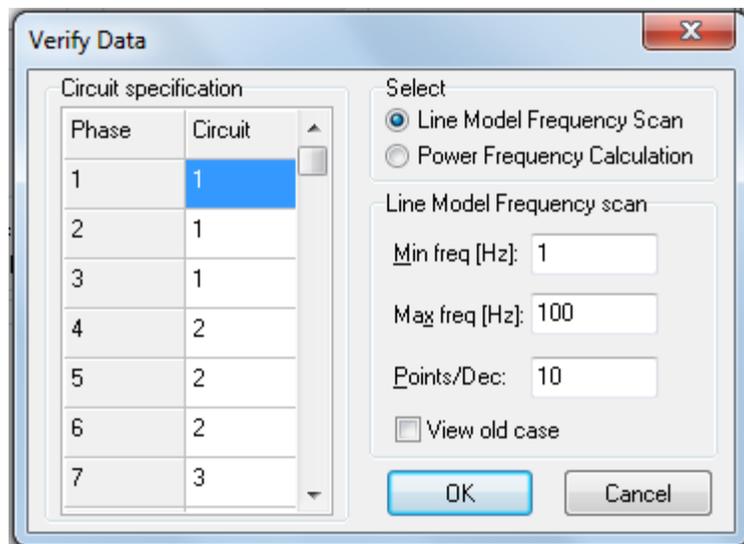
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

2.1.1. Modelo óptimo ATP

Para seleccionar el modelo óptimo para este tipo de fenómenos transitorios, el ATP cuenta con el subprograma dentro del procesador auxiliar ATP_LCC el cual permite verificar y obtener una visión general de la actuación del modelo en el dominio de la frecuencia llamado 'VERIFY'. Esta característica

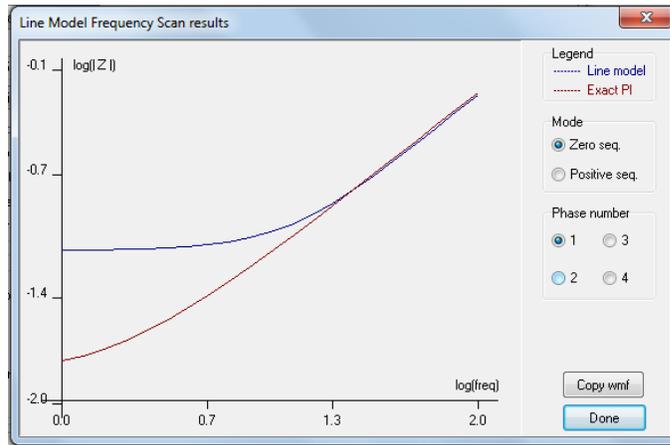
de ATPDraw permite al usuario comparar la línea con un modelo exacto PI-equivalente como una función de la frecuencia o comprobar los datos de referencia de frecuencia para varias impedancias, el acoplamiento mutuo de secuencia cero. El módulo es compatible con dos tipos de frecuencia para pruebas.

Figura 24. **Módulo Verify Data**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 25. **Módulo de resultados de Verify Data**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

2.2. Modelación de sobretensiones de origen atmosférico

Dentro de la modelación de los fenómenos transitorios y los efectos que causan sobre las líneas de transmisión, uno de los aspectos a considerar y que resulta ser fundamental es la modelación de la descarga atmosférica, es decir, modelar el nivel de tensión originado en el lugar donde impacta el rayo, el tiempo que dura la sobretensión, etc. La característica del sobrevoltaje transitorio ocasionado por una descarga atmosférica puede ser simulada mediante una onda de impulso de tensión normalizada la cual, según las especificaciones dadas por la IEC – 61-1 para pruebas de alto voltaje, está dada por la siguiente fórmula:

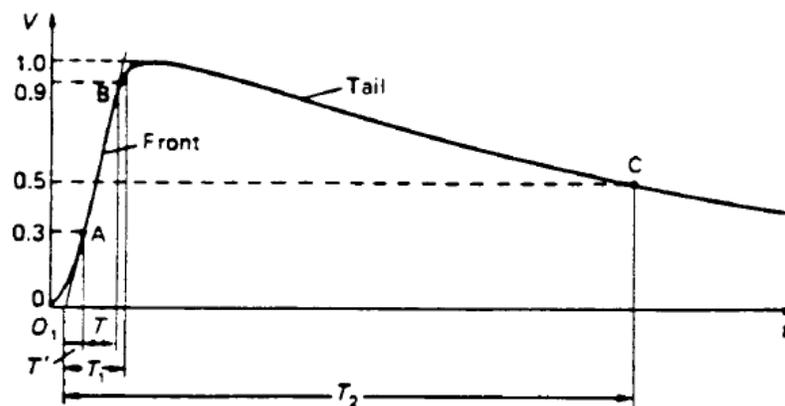
$$i_{(t)} = I(e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad [\text{Ec. 28}]$$

Es básicamente una función rampa donde I es el valor pico de la corriente del rayo con un tiempo de cresta de frente dado a los $T_1 = 1,2\mu\text{s}$ y el tiempo de

valor medio o de cola en $T_2 = 50\mu s$; esto es tomando en cuenta las condiciones más extremas para una onda estandarizada para pruebas de alto voltaje; en la figura 25 se observa que el frente de onda es el tiempo que demora la onda en ir del 10 % al 90 % del valor pico (T_1), mientras que el tiempo de cola es el tiempo que demora la onda en caer al 50 % del valor pico(T_2).

Una descarga atmosférica puede semejar a una fuente de corriente la cual tendrá una polaridad positiva o negativa conocida como ondas monopolares. Existen, también, descargas que presentan polaridad positiva y negativa que se conocen como bipolares pero son poco frecuentes. En líneas de transmisión las descargas más comunes son las negativas descendentes.

Figura 26. **Modelo de sobretensión por rayo**



Fuente: Bonneville Power Administration. *Electro-magnetic transients program theory book*.
p. 243.

El ATP dispone de varios modelos de fuentes para la simulación de transitorios. Los más usados son el modelo HEIDLER TYPE 15 y el modelo SLOPE RAMP TYPE 13; ambos modelos son ampliamente usados, ambos presentan ventajas y desventajas según el estudio que se esté realizando, la

forma de onda última toma en cuenta las características de corriente propuesta por la norma IEC 61-1 y la ecuación 28. Se analizarán ambos modelos para obtener el modelo que más conveniente para este trabajo. La forma de onda de la corriente suministrada por la fuente HEIDLER está dada por la expresión

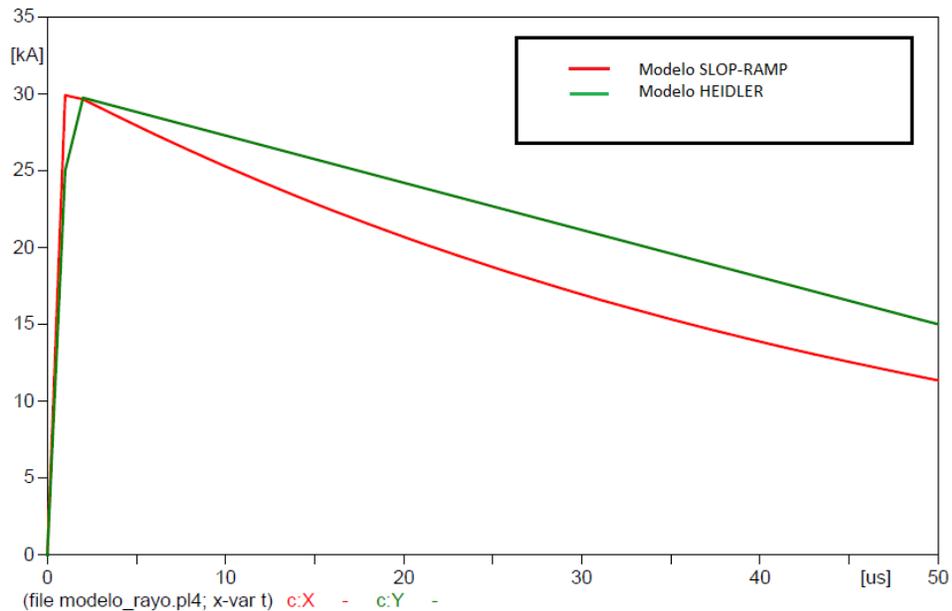
$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} * \frac{k^n}{1 + k^n} * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad [\text{Ec. 29}]$$

Donde $k = \frac{t}{\tau_1}$

- π_1 : constante de tiempo de frente, es proporcional a la duración del frente (Intervalo de tiempo entre $t=0$ y el tiempo del pico de la función).
- τ : es proporcional a la duración de la descarga (intervalo de tiempo entre $t=0$ y el punto de la cola donde la amplitud de la función decae al 37 % de su valor pico).
- I_0 : Valor pico.
- η : Constante de ajuste.
- n : Influencia de la tasa de crecimiento y el instante de tiempo de la máxima tasa de crecimiento.

Este modelo se usa cuando se requiere analizar los efectos de los armónicos y usar por ejemplo la transformada de Fourier. Véase cómo se comportan ambos modelos con los mismos valores de entrada.

Figura 27. Modelos para sobretensiones atmosféricas



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Ambos modelos fueron establecidos con una corriente máxima de 30 kA y una relación de tiempo de $1,2 \mu s / 50 \mu s$; sin embargo, como se ve el modelo SLOP-RAMP se asemeja más a los requerimientos establecidos en el norma IEC cuando se ve que el pico de la corriente está en aproximadamente 1 y el valor de decaimiento hasta los 15 kA se da exactamente en los $50 \mu s$ según la figura 27.

Dado que no se necesita usar la transformada de Fourier para realizar este análisis, se usará el modelo SLOP-RAMP para la descarga atmosférica.

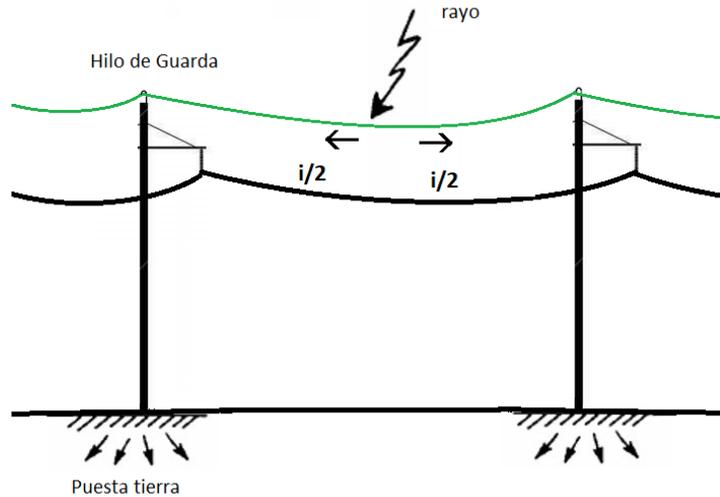
2.2.1. Modelos agrupados en ATP

Como se vio en el primer capítulo, el cálculo o la simulación de procesos transitorios en cualquier sistema eléctrico debe realizarse teniendo en cuenta la representación de la línea aérea, aspectos como la onda normalizada para modelar la corriente del rayo, la modelación de la impedancia de la estructura, la resistencia a tierra; ahora la tarea es agrupar estos modelos y obtener un modelo general tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- La representación debe extenderse a un máximo de 3 o 4 vanos desde el punto de impacto de la descarga atmosférica.
- Se debe incluir la representación de los apoyos y de sus impedancias de puestas a tierra.
- Es necesario desarrollar un modelo que evite reflexiones de ondas en cualquiera de los extremos de la línea representada.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente descritos se tiene como resultado la siguiente propuesta:

Figura 28. **Modelo agrupado para sobretensiones atmosféricas**

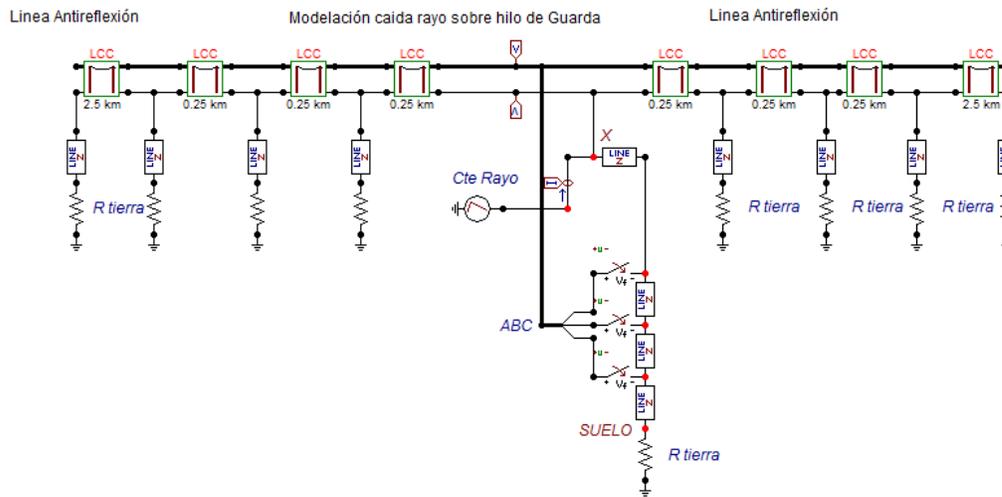


Fuente: elaboración propia.

2.2.1.1. **Modelo del estado actual de la línea de transmisión**

Tal como se ha venido modelando cada componente y cada efecto a considerar en el análisis de transitorios por descargas atmosféricas, se ha llegado en un punto donde se puede presentar un modelo que represente la línea de transmisión con las condiciones actuales, partiendo de este modelo, se identifican los problemas que aquejan a las líneas que para este trabajo de investigación están relacionadas a la Costa Sur para un nivel de voltaje de operación de 69 kV. El modelo para realizar el análisis de los efectos provocados en una línea de transmisión por descargas atmosféricas se presenta a continuación:

Figura 29. **Modelo para sobretensiones atmosféricas ATPDRAW**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

En este modelo se presentan los siguientes componentes:

- Modelación de la onda normalizada para descargas atmosféricas
- Impedancias de las estructuras adyacentes a donde cae el rayo
- La impedancia de la estructura donde cae el rayo
- La modelación del hilo de guarda
- La modelación del aislamiento en la estructura donde cae el rayo
- La resistencia del suelo en donde se aterriza la estructura
- La impedancia de anti reflexión
- Instrumentos de medición

Como se ve el modelo puede ser adaptado para diferentes niveles de tensión de operación de la línea; sin embargo, según los objetivos planteados para este trabajo de investigación, se orientará al nivel de tensión de 69 kV.

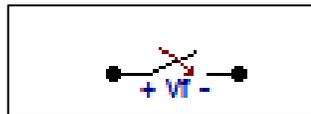
En el capítulo 3 se ven los datos de entrada usados para modelar las condiciones actuales de la línea.

2.2.1.2. Modelo de cambios en el aislamiento

Un factor a tomar en cuenta para realizar cambios en una línea de transmisión para mejorar el comportamiento de la línea de transmisión recae sobre el aislamiento. El modelo que se usará en el ATPDRAW se describe a continuación y se verá qué factores se pueden cambiar para que ayude a realizar un análisis de los efectos que se provocan al aumentar o disminuir el aislamiento en la línea de transmisión.

La cadena de aislamiento se puede simular con un switch tipo GAP que es controlado por voltaje. De esta manera se podrán ver los niveles de voltaje a los cuales están siendo sometidos los aisladores, por cada fase, cuando ocurre una descarga atmosférica.

Figura 30. Elemento modelar aislamiento



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 31. Datos de entrada SWITCH

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl		0	SWF	1	
T-de		1E-8	SWT	1	
Imar		0			
V-fl		50000			

Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Adicionalmente, se aplicará el modelo que muestra el comportamiento del aislador en función del tiempo, esto sería el voltaje máximo antes del flameo del aislador. De esta manera, se apreciará si el valor de la tensión, según la descarga atmosférica, provoca un flameo en el aislador. Este comportamiento es según la IEEE por la siguiente expresión:

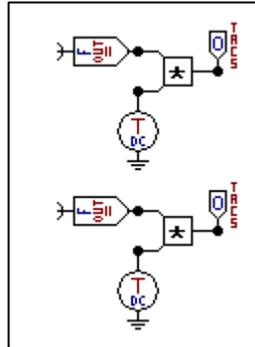
$$V_{flameo} = \left[0,4 + \frac{0,71}{(t * 10^6)^{0,75}} \right] * d * 10^6 \quad [\text{Ec. 30}]$$

Donde:

- V_{flameo} – voltaje de flameo en V
- t – tiempo en μs
- d = distancia de aislamiento (distancia de arco en seco polimeros)

Esta respuesta del aislamiento se ha simulado mediante la opción de los TACS del ATP que permite implementar fórmulas matemáticas y bloques de control.

Figura 32. TACS para voltajes de flameo en aislamiento



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

2.2.1.3. Modelo con cambios en la puesta a tierra

Uno de los factores a modificar en las líneas de transmisión, aparte de los ya vistos, esta la puesta a tierra la cual resulta de los más convenientes a ser remplazada o modificada; el valor pico de sobrevoltaje que aparece en la parte superior del poste está principalmente determinado por la impedancia de pie del poste aparente en el momento de la descarga; debido a que la reflexión de la base del poste puede llegar mucho más rápido al tope del poste que las reflexiones de los postes adyacentes. La influencia de la resistencia al pie del poste sobre el voltaje en el tope del poste es determinada por su respuesta que depende de la corriente y el tiempo. La respuesta del tiempo es generalmente despreciada y la impedancia es determinada por su dependencia de la corriente por la siguiente expresión:

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad [\text{Ec. 31}]$$

Donde:

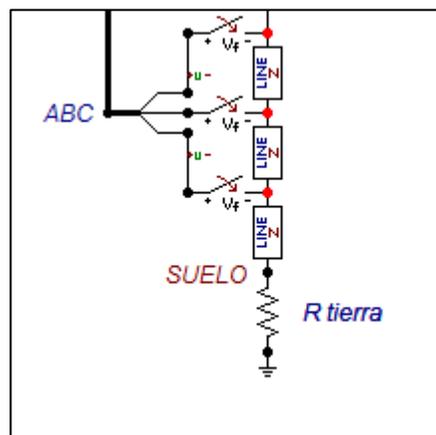
- R_0 es la resistencia de pie de la torre a baja corriente y a baja frecuencia
- R_T es la resistencia de puesta a tierra
- I_g es la corriente limitante para ionización suficiente del suelo
- I es la corriente del rayo a través de la resistencia de pie de la torre

La corriente limitante es función de la ionización del suelo y está dada por:

$$I_g = \frac{E_0 * \rho}{2\pi R_0^2} \quad [\text{Ec. 32}]$$

Se modelarán, resultado de las mediciones un valor promedio que esté de acuerdo a la realidad y más adelante se verá como técnicamente sería posible obtener los valores que ayudan a la línea de transmisión a superar sin daños mayores una sobretensión atmosférica.

Figura 33. **Modelación de puesta tierra**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

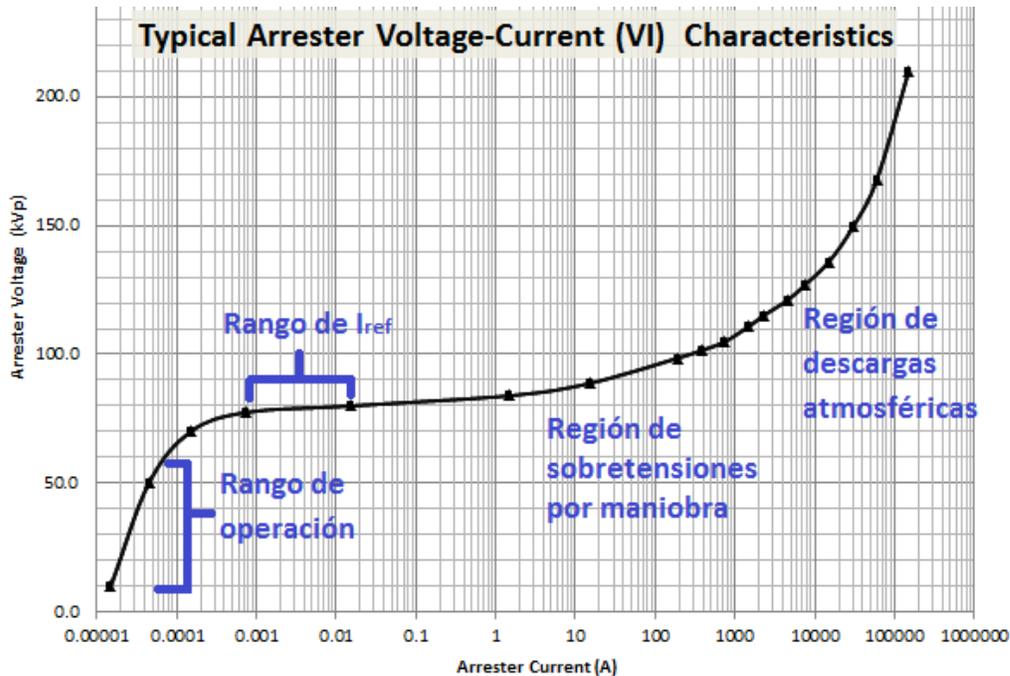
2.2.1.4. Modelo con descargadores de sobretensiones

Como se vio en el anterior capítulo, se resumen las funciones del descargador de sobrecorriente son:

- No conducir para voltajes de operación normal
- Conducir corriente durante sobre voltajes sin causar falla

Para cumplir con las condiciones anteriores es necesario que la característica del descargador sea una resistencia extremadamente alta en operación normal y una resistencia relativamente baja en sobrevoltajes transitorios; es decir, la característica corriente voltaje debe ser no lineal. Un ejemplo de la característica de un pararrayos se muestra a continuación donde se ha identificado cada una de las regiones de operación que tendrá el pararrayos durante su vida útil.

Figura 34. Curva C-I de un pararrayos

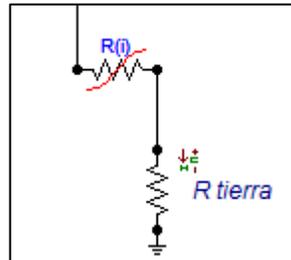


Fuente: Características XLS. http://www.arresterworks.com/arresterfacts/pdf_files/typical_characteristic.xls. Consulta: 20 de mayo de 2016.

Para modelar este comportamiento, el modelo más utilizado en el ATPDRAW para la simulación de descargadores es la resistencia no lineal con característica exponencial (Type 92, 5555). En este modelo, la característica del descargador es representada por algunos segmentos exponenciales los cuales se modelan según la ecuación 15.

Para usar este modelo es necesario ingresar la característica de operación que en la mayoría de los casos es proporcionada por el fabricante del pararrayo; también, puede ser consultada en páginas especializadas en selección de pararrayos.

Figura 35. **Modelo descargador de sobretensión**

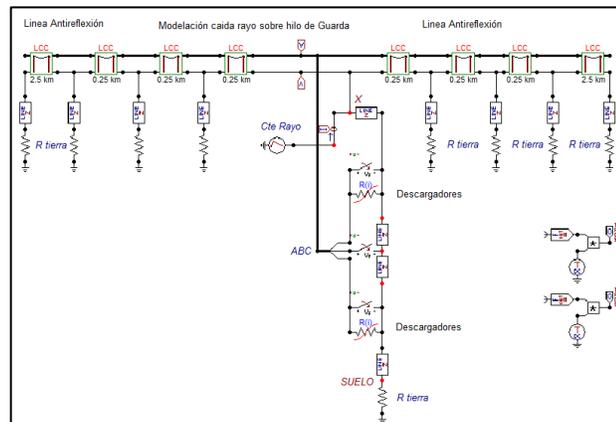


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

2.2.2. Modelo óptimo ATP

Con base en el análisis comparativo se buscará la combinación de factores y modelos anteriormente descritos para obtener un modelo con el cual se obtengan resultados fiables en análisis transitorios relacionados a sobretensiones de origen atmosférico. El modelo a evaluar se presenta a continuación:

Figura 36. **Modelo completo de descargas atmosféricas**

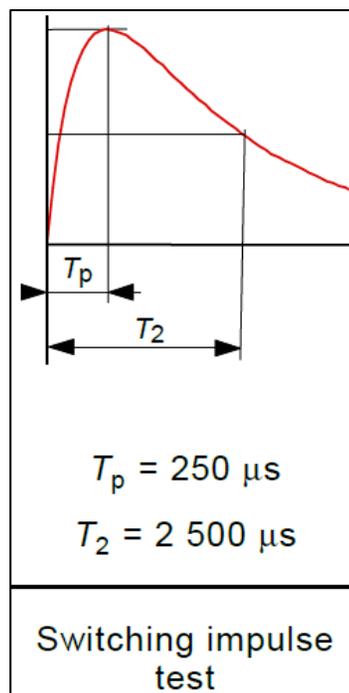


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

2.3. Modelación por sobretensiones por maniobras

Se seguirá con la modelación de los fenómenos transitorios; en este caso, se analizará los modelos relacionados a las sobretensiones temporales ocasionadas por maniobras; estas son internas al sistema y directamente proporcionales al voltaje del sistema; además, tienen, por lo general, alto amortiguamiento y corta duración; la onda normalizada para este tipo de sobretensión es de 250/2500 μs , según la IEC-60071 INSULATION COORDINATION en la sección 33 *clasificación de tensiones y sobretensiones* que se muestra en la siguiente figura.

Figura 37. **Modelo de onda de sobretensión por maniobra**



Fuente: Norma internacional IEC-60071-1. *Insulation coordination - part 1 definitions, principles and rules*. p. 21.

Para la simulación de este fenómeno no se usará una fuente externa más que la que se encuentra en la barra de alimentación ya que como se ve las sobretensiones por maniobras dependen directamente del nivel de voltaje de la fuente. Para este tipo de sobretensiones se concentrará en el tipo de interruptor.

2.3.1. Modelos agrupados en ATP

Como se vio en el primer capítulo, el cálculo o la simulación de procesos transitorios en cualquier sistema eléctrico deben realizarse teniendo en cuenta la representación de varios aspectos; en este caso se tomarán en cuenta los principales elementos que intervienen en los sobrevoltajes por maniobras, también, aquellas condiciones que a nuestro criterio se presentan más frecuentemente según las condiciones de la línea objeto de estudio.

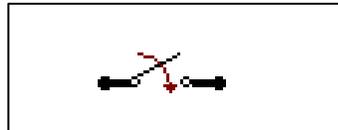
- Energización de líneas de transmisión en vacío sin pararrayos
- Energización de líneas de transmisión en vacío con pararrayos

2.3.1.1. Modelo con interruptores

Uno de los factores más importantes a considerar en cuanto a sobretensiones por maniobras es el modelo de interruptor presente en el sistema de potencia objeto de estudio; para esto el ATPDRAW cuenta con varios modelos: interruptores controlados por tiempo, monoplares y tripolares, interruptores monoplares estadísticos y sistemáticos. Dependen mucho de los equipos usados o que van a ser modelados. Para el caso de Guatemala, generalmente, se usan interruptores tripolares para nivel de tensión de 69 kV.

El primer modelo a evaluar será el interruptor con un comando de apertura y cierre general, trifásico o tripolar; se debe tener en cuenta que en este modelo, la maniobra apertura/cierre, las fases actúan al mismo tiempo según la orden. La siguiente figura muestra las ventanas de configuración asociado a este elemento.

Figura 38. **Modelo de interruptor trifásico (tripolar)**

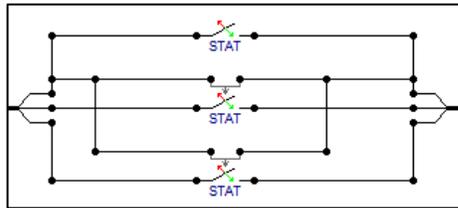


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Dentro de los parámetros de este interruptor hay que destacar la I_{mar} (corriente marginal) lo cual indica que el interruptor corta la corriente si se cumple la condición $t > T_{op}$ y $|I| < I_{mar}$. Es importante comprender que aunque un interruptor comience la maniobra de apertura alejando sus contactos esto no significa que la corriente deja de circular.

Los otros modelos son útiles considerando estudios estadísticos en magnitud de fallas o en discrepancias de cierre; uno de estos modelos el interruptor estadístico, el cual se refiere a un modelo con el cual es posible realizar estudios de sobrevoltajes tomando como referencia el hecho que exista un polo principal y dos esclavos; cada uno modelado con una curva probabilística del tiempo de cierre, en la mayoría de los casos una curva normal, con la cual se podría analizar hasta 100 operaciones de cierre de una manera aleatoria y de esta forma obtener una distribución probabilísticas de magnitudes de sobrevoltajes ocasionados por la discrepancia de cierre entre polos y discrepancia de tiempo de cierre del interruptor esclavo.

Figura 39. **Interruptor estadístico trifásico (tripolar)**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

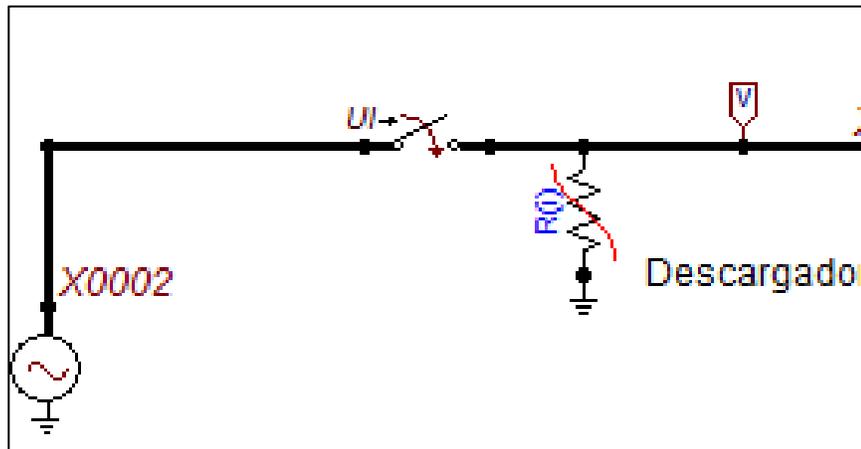
Es importante aclarar que es un modelo bastante útil, pero tomando en cuenta las características constructivas de la red a modelar no es un modelo adecuado en este caso; por lo tanto, no se considerara.

2.3.1.2. Modelo con descargadores de sobretensiones

Tal como se ha venido discutiendo, los descargadores de sobretensión son equipos que teniendo claro el modo de operación y partiendo de un análisis de los fenómenos para los cuales están diseñados; este caso, principalmente, los fenómenos transitorios su importancia y presencia en líneas y subestaciones es imprescindible; sin embargo, hay que realizar estudios que contemplen todos los parámetros disponibles y modelables para lograr los objetivos para los cuales se está instalando. De lo contrario, la instalación y selección de un pararrayo no funcionará.

En esta parte del estudio se analizará y modelará el comportamiento de la sobretensión con la presencia de un descargador de sobretensiones o pararrayos al inicio o a la mitad de la línea y determinar así la factibilidad de su presencia.

Figura 40. **Modelo con descargadores de sobretensiones**

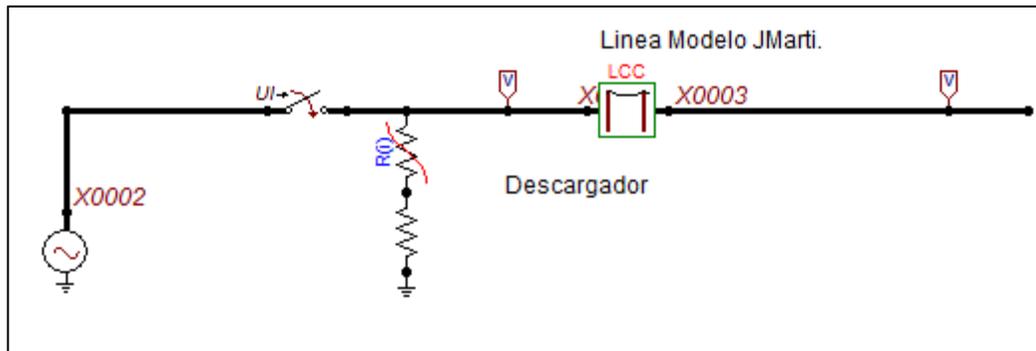


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

2.3.2. Modelo óptimo ATP

Con base en el análisis comparativo, se buscará la combinación de factores y modelos anteriormente descritos para obtener un modelo con el cual se obtengan resultados fiables en análisis transitorios relacionados a sobretensiones de originadas por maniobras. El modelo a evaluar se presenta a continuación:

Figura 41. Modelación, energización línea en vacío



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

3. RECOLECCIÓN DE DATOS DEL CASO DE ESTUDIO

El principal objetivo de este trabajo de investigación es la aplicación real de los métodos anteriormente descritos, para el análisis de fenómenos transitorios es necesario realizar todos los cálculos con las características de los materiales y estructuras instalados en la línea de transmisión escogida para el análisis. En este caso se enfocará en la línea de transmisión de 69 kV entre la subestación Escuintla I y Santa Ana propiedad de TRELEC .S.A., la cual fue seleccionada debido a que está ubicada en un área geográfica donde al tener un nivel isoceráunico alto, la probabilidad de ser afectada por descargas atmosféricas es bastante alta y su importancia para el SNI es indudable; tomando en cuenta que en el área de la Costa Sur del país existe una importante presencia de generación; las líneas y subestaciones presentes en esta área se encargan de trasladar esa generación hacia el principal centro de carga: el departamento de Guatemala. Por lo tanto, se está hablando que las líneas presentes en el área tienen una gran importancia; por esta razón, existe la necesidad de garantizar la continuidad y calidad del servicio más allá de solo evitar sanciones por parte de la CNEE.

3.1. Descripción de la línea Escuintla I – Santa Ana 69 kV

La línea de Escuintla I – Santa Ana es una línea propiedad de TRELEC S.A., ubicada en el departamento de Escuintla; inicia desde la subestación Escuintla I propiedad de ETCEE-INDE su ruta atraviesa en 95 % de terrenos propiedad de ingenios que son usados para el cultivo de caña y la topografía de la ruta es plana.

La línea de transmisión consta de una longitud aproximada de 8,7 km en circuito sencillo en disposición vertical conductor FLINT 740MCM AAAC con un hilo de guarda OPGW; las estructuras son postes de concreto centrifugado de 18 a 24 metros de altura según la necesidad del trazo; los aisladores son de polímero *post-type* o de remate según los vértices que posee el trazo. Las condiciones ambientales son típicas de un área costera donde la salinidad es un factor importante a considerar para la especificación de los materiales. La temperatura promedio aproximadamente llega a los 32 °C, la máxima promedio a los 35° y la altura media sobre el nivel del mar es de 270 metros.

Las características técnicas de dicha línea se describen a continuación:

Tabla III. **Características técnicas**

Voltaje nominal fase a fase (RMS)	69 kV
longitud	8 685 km
Temperatura ambiente máxima promedio	34 °C
Ancho de la zona de servidumbre	15 m
Máxima tensión de diseño entre fases de un mismo circuito $V_{máx}F-F$	72,5 kV
Núm. de circuitos	1
Cantidad de cables de guarda	1
Configuración de la línea	Vertical
Elevación máxima sobre el nivel del mar (msnm)	270

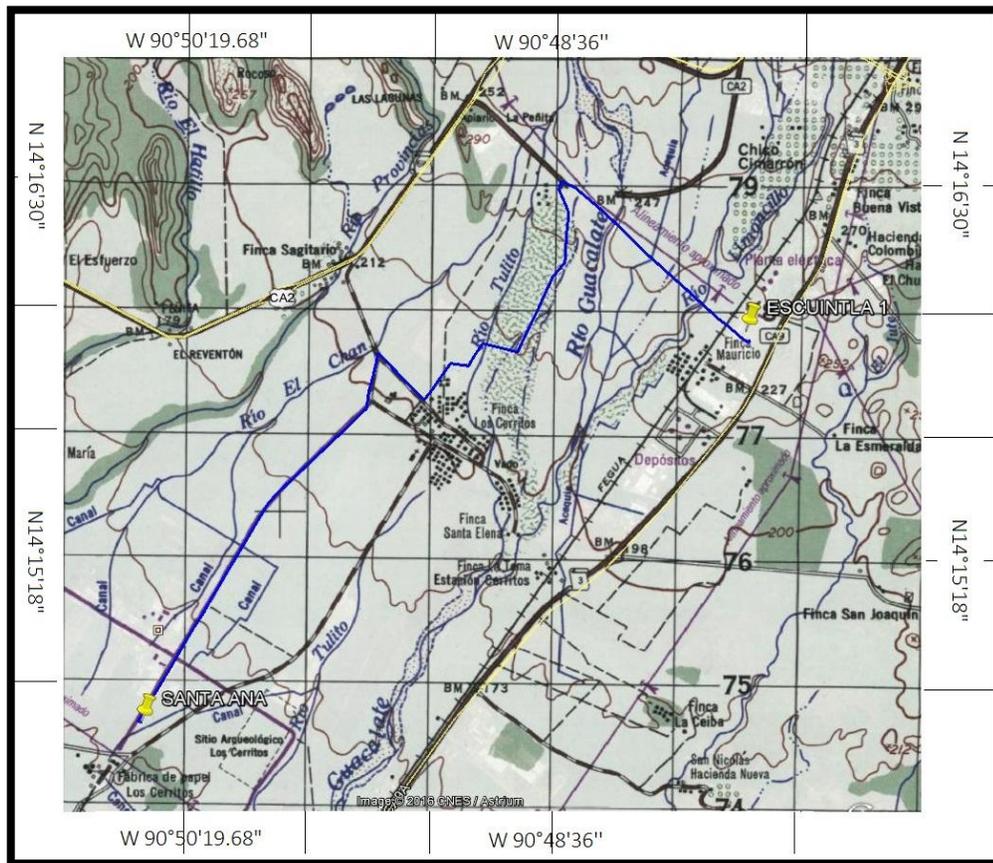
Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Trazo de la línea

Tal como se indicó anteriormente, la línea inicia en la subestación llamada Escuintla I, la cual está ubicada en la finca Mauricio; se dirige en dirección noreste atravesando terrenos con cultivos de caña, cruza un pequeño río llamado limoncillo para después cruzar otro río llamado Guacalate; después de este tramo, cruza hacia el sureste hasta llega a la finca llamada Cerritos;

finalmente, la línea entra en la finca Santa Ana, donde se ubica el ingenio Santa Ana, donde finaliza en la subestación Santa Ana propiedad de TRELEC. S.A. Este recorrido se puede apreciar en la figura 41.

Figura 42. Trazo de la línea

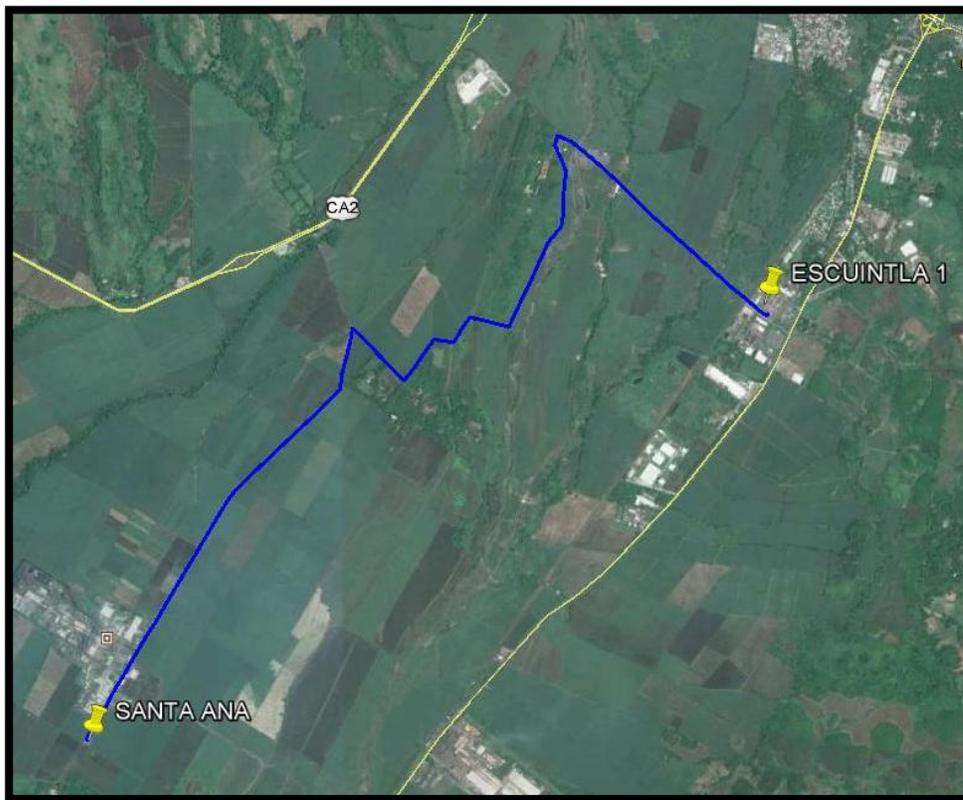


Fuente: *Google Earth*. <https://www.google.es/entl/es/earth/index.html>. Consulta: 20 de mayo de 2016.

En el recorrido de la línea no se encuentran condiciones topográficas que obliguen a considerar algún tipo de estructura especial o de gran altura ya que durante la mayor parte del trazo hay presencia de cultivos de caña los cuales no llegan a superar los 7 metros de altura, no se atraviesan comunidades, aldeas

o caseríos y el terreno en su mayoría, según observaciones del área, es arenoso. Por tal motivo para toda la línea para su diseño y construcción se consideraron postes de concreto pretensado y centrifugado.

Figura 43. Vista aérea



Fuente: *Google Earth*. <https://www.google.es/entl/es/earth/index.html>. Consulta: 20 de mayo de 2016.

A continuación, se presenta el perfil de la ruta donde se muestra la variación de altura del nivel de suelo que tiene el recorrido de la línea; un dato importante a apreciar es la altura sobre el nivel del mar promedio de la línea de transmisión, aproximadamente, 270 m.s.n.m.

Figura 44. Vista de perfil de ruta



Fuente: *Google Earth*. <https://www.google.es/entl/es/earth/index.html>. Consulta: 20 de mayo de 2016.

3.1.2. Tipos de estructuras

Tal como se indicó anteriormente, las estructuras usadas para esta línea son postes de concreto centrifugado y pretensado de diferentes alturas; principalmente, se usaron postes de 21 metros; según las tablas de construcción el 90 % de los postes son de 21 metros de altura y el resto varía entre 18 y 24 metros.

Del total de estructuras, que la mayor parte tiene una configuración en tangente con un total de 76 % del total de estructuras, el resto posee configuraciones usadas cuando se presentan vértices mayores a 20°, representando el 24 %, del total de estructuras. Los datos anteriormente descritos se detallan a continuación:

Tabla IV. **Altura de postes línea Escuintla I – Santa Ana**

Altura	Cantidad	Porcentaje
Postes de 18 m	4	5 %
Postes de 21 m	73	91 %
Postes de 24 m	3	4 %
Total de estructuras	80	100 %

Fuente: elaboración propia.

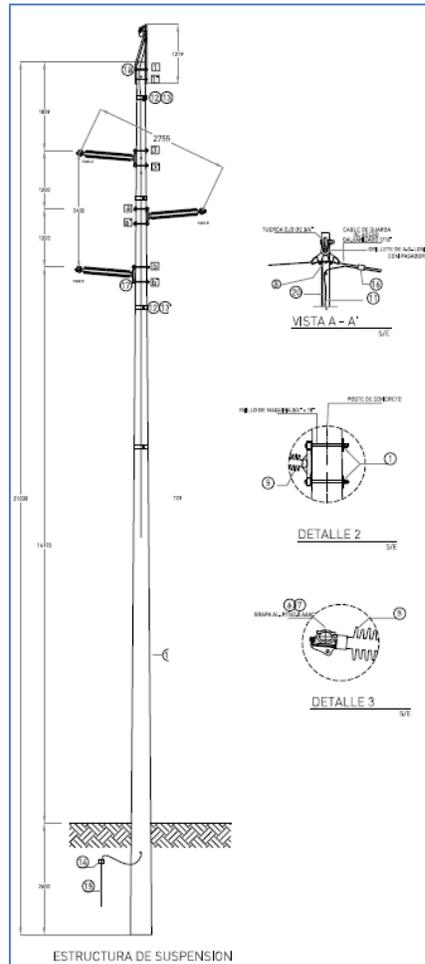
Tabla V. **Configuraciones de postes línea Escuintla I – Santa Ana**

Configuración	Cantidad	Porcentaje
Tangentes (<20°)	61	76 %
Remates (>20°)	19	24 %
Total de estructuras	80	100 %

Fuente: elaboración propia.

De los factores más importantes para el análisis de transitorios son los datos a ingresar en el programa ATP, como las distancias de los conductores a nivel de suelo, por lo tanto, se presentan los detalles de las configuraciones que TRELEC usó en la construcción de la línea Escuintla I – Santa Ana; la primera es la configuración tangente o tipo 'I' usada desde los 0° a 20° de deflexión, la cual según la tabla V, representa el 76 % del total de estructuras; esto refleja como anteriormente se indicó que la mayor parte de la línea no presenta deflexiones; este tipo de configuración usa aisladores tipo poste con lo cual los conductores están en suspensión; seguido de esta configuración, la de mayor uso es la configuración en remate o tipo IV usada para ángulos de 20° - 90° de deflexión, la cual representa el 24 %; esta configuración usa aisladores de remate con los cuales los conductores están amarrados a la estructura.

Figura 45. Configuración tangente o tipo II



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Tabla VI. Disposición física, conductores tipo II

	Distancia horizontal (m)	Distancia vertical (m)
Fase A	1,14	16,57
Fase B	- 1,14	15,37
Fase C	1,14	14,17
SW - OPGW	0	18,89

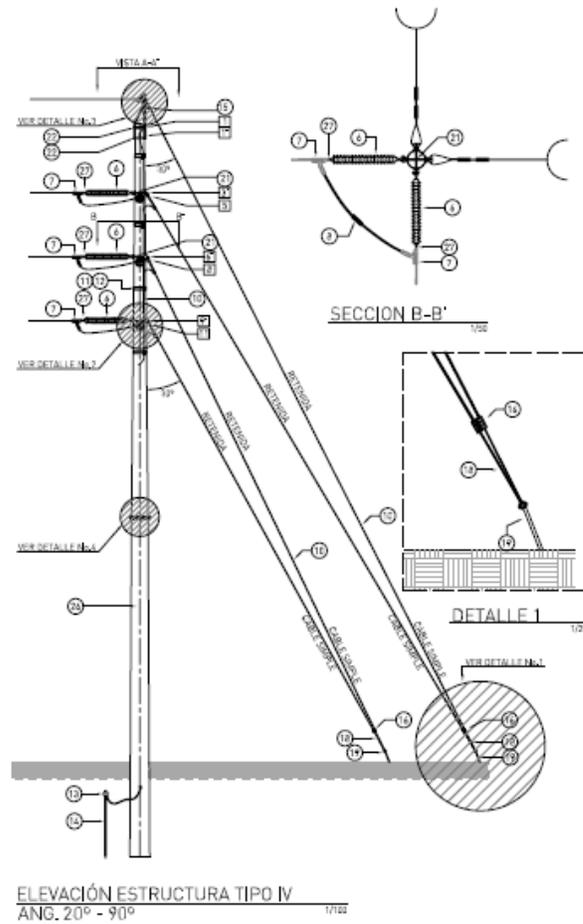
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Disposición física, conductores tipo I

	Distancia horizontal (m)	Distancia vertical (m)
Fase A	1,14	16,57
Fase B	1,14	14,74
Fase C	1,14	12,91
SW - OPGW	0	18,89

Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Configuración doble remate o tipo V



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Tabla VIII. **Disposición física conductores tipo V**

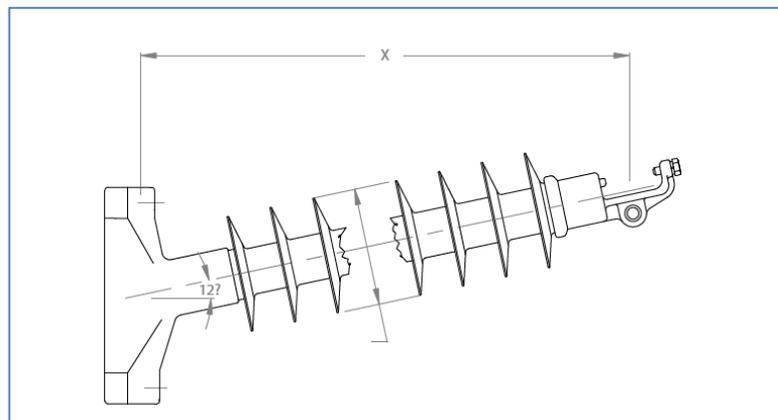
	Distancia horizontal (m)	Distancia vertical (m)
Fase A	0	16,57
Fase B	0	14,74
Fase C	0	12,91
SW - OPGW	0	18,89

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Aisladores

Tal como se describió anteriormente, uno de los factores a considerar para la selección de aislamiento es el área geográfica, factor que impacta considerablemente en la línea objeto de estudio; para esta línea se seleccionó un aislamiento de alta contaminación donde la distancia de fuga se aumentó considerablemente para los valores normales de una línea de 69 kV; se presentan los datos de los aisladores usados para remate y para los tangenciales.

Figura 47. **Aislador *post-type***



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Este tipo de aislador posee para la parte sin tensión una base dispuesta para ser colocada en postes, para la parte energizada posee una base dispuesta para colocar una grapa de suspensión según el diámetro del cable hasta un ángulo de 20°.

Tabla IX. **Datos técnicos del aislador *post-type***

Marca OHIO BRASS	Longitud de la sección "X"	Distancia de arco seco	Distancia de fuga
	ln (mm)	ln (mm)	ln (mm)
P250031S1070	44,0 (1117)	32,2 (818)	82 (2083)

a) Distancias del aislador según catálogo

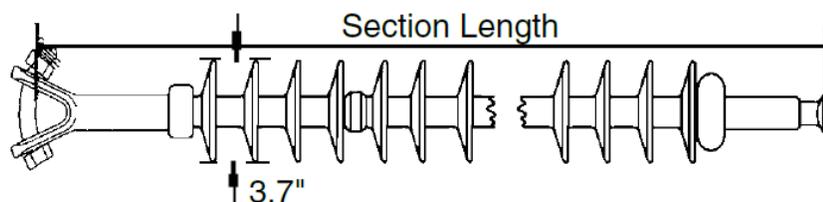
	Voltaje industrial a 1 min.	Impulso positivo	Impulso negativo	Voltaje de fuga
Marca OHIO BRASS	(kV)	(kV)	(KV)	(KV)
P250031S1070	255	480	580	84kV

b) Niveles de tensión según catálogo

Fuente: elaboración propia.

Los aisladores de remate poseen en el lado sin tensión un accesorio para ser sujetado al poste mientras en el lado con tensión poseen un accesorio para sujetar una grapa de remate según el diámetro del conductor.

Figura 48. **Aislador de remate**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

Tabla X. **Datos técnicos del aislador remate**

Marca OHIO BRASS	Longitud de la sección ln (mm)	Distancia de arco seco ln (mm)	Distancia de fuga ln (mm)
S025030H2010	41,9 (1064)	30,2 (767)	77 (1956)

a) Distancias del aislador según catálogo

	Voltaje industrial a 1 min.	Impulso positivo	Impulso negativo	Voltaje de fuga
Marca OHIO BRASS	(kV)	(kV)	(KV)	(KV)
S025030H2010	210	445	430	78kV

b) Niveles de tensión según catálogo

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Tipo de conductor

Uno de los más importantes elementos de la línea es el conductor; para esta línea en particular se eligió el conductor tomando en cuenta las condiciones geográficas, como la salinidad; en ese sentido los conductores AAAC tienen una gran resistencia a la corrosión ya que están hechos con base en una aleación de aluminio; también, tienen una gran resistencia mecánica, una muy buena relación resistencia-peso y un menor peso por unida de longitud.

Es importante mencionar que generalmente la capacidad de conducción se ve limitada con este tipo de aleaciones ya que la aleación de aluminio tiene una conductancia menor al aluminio puro (AAC); sin embargo, las condiciones de la ruta en este caso hacen que prevalezcan más las características mecánicas que las eléctricas, todos estos criterios de deben evaluar para otros proyectos y no se deben tomar como regla general el uso de conductores AAAC

para ambientes salinos; a continuación, se presenta los datos del conductor AAAC seleccionado:

Tabla XI. **Datos técnicos 740 FLINT AAAC**

Conductor	Diámetro	Tamaño	Área	Peso	R DC 20°C	R AC 75 °C
740 AAAC	in (mm)	(Kcmil)	In ²	lb/ft (kg/m)	Ohm / mile (Ohm/Km)	Ohm / mile (Ohm/ Km)
FLINT	0,99	740,8	0,5818	0,6908	0,0272	0,0327
	(25,146)			(1,028)	(0,0169)	(0,0203)

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Hilo de guarda

Recientemente, la CNEE dispuso que todas las líneas nuevas de transmisión deberán contar con OPGW; por tal razón, esta línea su hilo de guarda tiene conductor adecuado para las condiciones imperantes del área. Los datos técnicos para dicho conductor se presentan a continuación:

Tabla XII. **Datos técnicos OPGW**

Conductor	Diámetro	Área	Peso	R DC 20°C	R AC 75°C
OPGW	in (mm)	in ² (mm ²)	lb/mile (kgf/km)	Ohm / mile (Ohm/Km)	Ohm / mile (Ohm/ Km)
DNO-8442	0,474	0,1264	1,528	1,0326	1,2628
	12,05	81,52	431	0,6416	0,7846

Fuente: elaboración propia.

3.1.6. Puesta a tierra

Según las mediciones que se realizan periódicamente a la línea Escuintla I – Santa Ana, como parte del mantenimiento preventivo para el periodo de 2014-2016, y según el análisis, se puede concluir que un valor adecuado para realizar

las simulaciones podrían ser los 25 ohm ya que este tiene una desviación de 10 % con respecto a todos los datos. Aplicando la fórmula 31 y 32 con una variación desde los 5 y 80 kA en intervalos de 5kA, se tienen los siguientes datos:

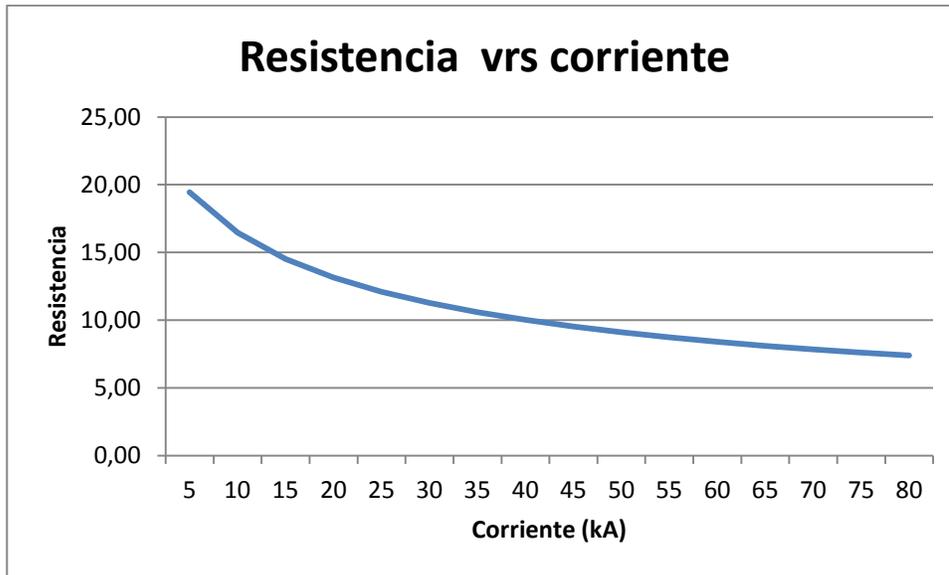
Tabla XIII. **Característica de resistencia al pie del poste**

I	Rt	Voltaje
5 000	19,44	97179,9851
10 000	16,45	164523,648
15 000	14,52	217835,742
20 000	13,14	262867,013
25 000	12,09	302370,467
30 000	11,26	337886,147
35 000	10,58	370367,615
40 000	10,01	400449,147
45 000	9,52	428575,744
50 000	9,10	455072,751
55 000	8,73	480185,961
60 000	8,40	504106,098
65 000	8,11	526984,467
70 000	7,84	548943,369
75 000	7,60	570083,25
80 000	7,38	590487,747

Fuente: elaboración propia.

Esta información será de vital importancia para realizar la modelación en el ATP; como se aprecia en la siguiente imagen, el comportamiento de la resistencia es del tipo no lineal y variará conforme el valor de R_0 tenga variación. Este tipo de comportamiento se puede modelar fácilmente con las curvas de parametrización que permite ingresar el ATPDRAW.

Figura 49. **Característica de la resistencia**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Selección y cálculo de variables en el área de estudio

Tal como se indicó en el capítulo 1 de este trabajo, se realizará para el área de interés una selección de los datos a usar para el análisis objeto de este trabajo de investigación; con base en el área geográfica y tomando en cuenta datos que se encuentran a disposición de la población. Según el *Atlas meteorológico 1928 – 2003* del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de la República de Guatemala (Insivumeh), se tienen los siguientes parámetros ambientales:

Tabla XIV. **Datos meteorológicos del área**

Descripción	valor	Dimensional
Temperatura máxima promedio	34	°C
Días tormenta al año	150	Un.
Humedad relativa	75	%

Fuente: elaboración propia.

Según los datos meteorológicos del área se tienen los siguientes datos calculados para la línea Escuintla I – Santa Ana:

Tabla XV. **Variabes según área y estructuras línea**

Descripción	Valor	Unidad
Densidad de rayos	21,00	rayos/Km ² /año
Cantidad de rayos a línea	342,82	rayos/100 Km/año
I mínima*	5,95	kA

Fuente: elaboración propia

La corriente de la tabla XV se refiere a la corriente mínima que caerá sobre el guarda; es decir los valores arriba de esta corriente caerán sobre el hilo de guarda, si se analiza la probabilidad que este valor de descarga sea superada ,según la ecuación 16, se tiene que:

$$P = \frac{1}{1 + \left[\frac{I}{34}\right]^{1,5}} = 93 \% \quad [\text{Ec. 33}]$$

Es decir, que se está 93 % seguro de que las descargas que caerán en la línea serán al hilo de guarda.

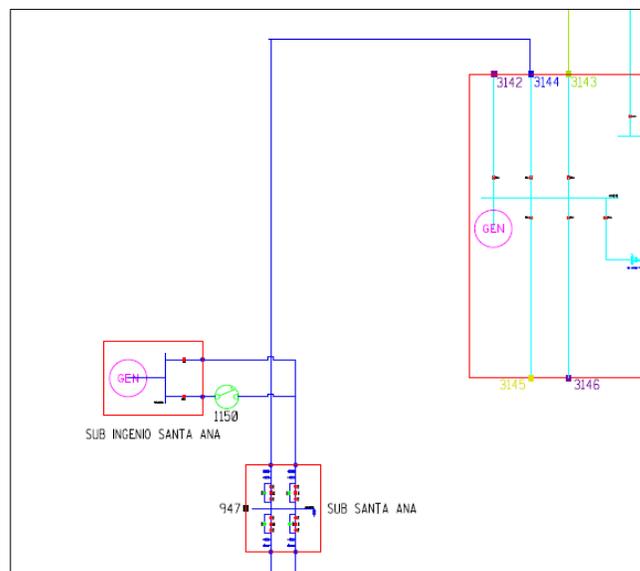
3.3. Descripción de las subestaciones asociadas

Según el caso de estudio, se tienen dos subestaciones asociadas las cuales se describen a continuación:

3.3.1. Subestación Escuintla 1

La subestación de transformación Escuintla 1 es propiedad de INDEETCEE; tiene dos bancos de transformadores monofásicos de relación 230/138 kV y 230/69 kV, una capacidad de 300 y 150 MVA respectivamente, 6 campos de entrada de línea en 69 kV, 2 campos de entrada de línea de 138 kV y 5 campos de entrada de línea de 230 kV todas con interruptor. Está ubicada en el departamento de Escuintla, km 61,5 carretera de Masagua al puerto San José.

Figura 50. Diagrama unifilar línea Escuintla 1 - Santa Ana

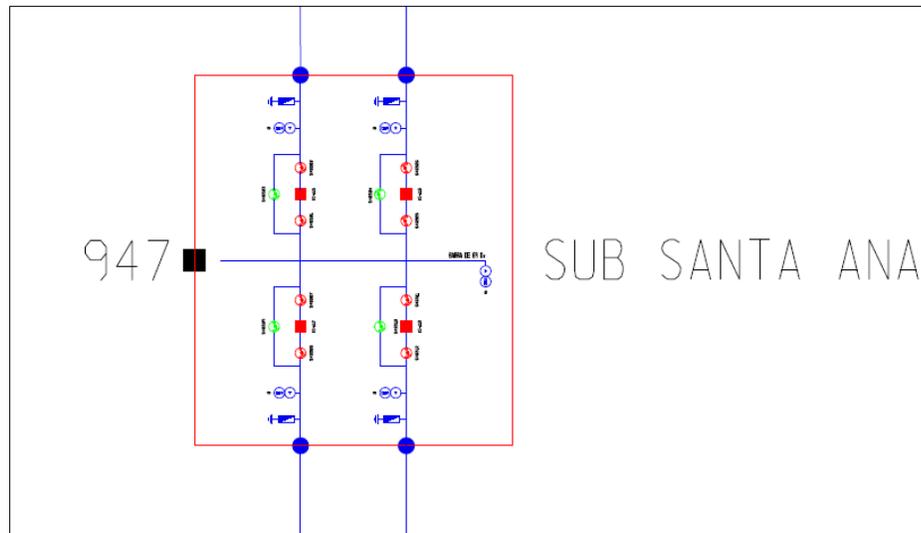


Fuente: elaboración propia, empleando CIGRE.

3.3.2. Subestación Santa Ana

La subestación de maniobras Santa Ana es propiedad de TRELEC y tiene 4 campos de entrada de línea en 69 kV equipados con sus seccionadores e interruptores; a continuación, se presenta el diagrama unifilar de la subestación.

Figura 51. Diagrama unifilar subestación Santa Ana



Fuente: elaboración propia, empleando CIGRE.

3.3.3. Características técnicas de los interruptores

A continuación, se presentan las características técnicas usadas por TRELEC para interruptores de línea 69 kV de 1 200 amperios usados en la subestación Santa Ana:

Tabla XVI. Interruptor línea 69 kV, 1 200 A

Núm.		Unidad	características exigidas
Características eléctricas			
1	Tensión nominal	kV	69
2	Núm. fases	--	3
3	Frecuencia nominal	Hz	60
4	Sistema	Y	Sólidamente aterrizado
Condiciones de servicio			
5	Altitud S.N.M.	m	1800
6	Humedad relativa	%	5 a 100
7	Temperatura	C°	0/40
8	Coeficiente sísmico	G	0.5 por IEEE
9	Tipo de instalación	--	Intemperie, clima tropical
Características eléctricas del interruptor			
10	Norma	--	ANSI-C37
11	Voltaje de diseño	kV	72.5
12	Voltaje nominal	kV	69
13	Corriente nominal	A	1 200
14	Corriente nominal de interrupción de c.c.	kA	40
15	Tipo de tanque	--	Muerto
16	Terminales para conexiones	--	Universal, Nema 4
17	Medio de extinción del arco	--	SF6
18	Tiempo de cierre	ms	45 a 60
19	Tiempo de apertura	ms	20 a 33 (3 ciclos)
20	Nivel de aislamiento a 1 000 msnm	kV	350
21	Distancia de fuga	--	De acuerdo a la especificada
características de operación			
22	Tipo de accionamiento	--	Resortes
23	operación en caso de falla en el sistema	--	Trifásico
24	ciclo de operación	--	O – 0,3s - CO – 3 min - CO
25	rango de voltaje de operación de las bobinas de cierre y apertura	VDC	80 - 150
26	Doble circuito de disparo independiente	--	si
27	Relé antipumping	--	si

Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS TRANSITORIO

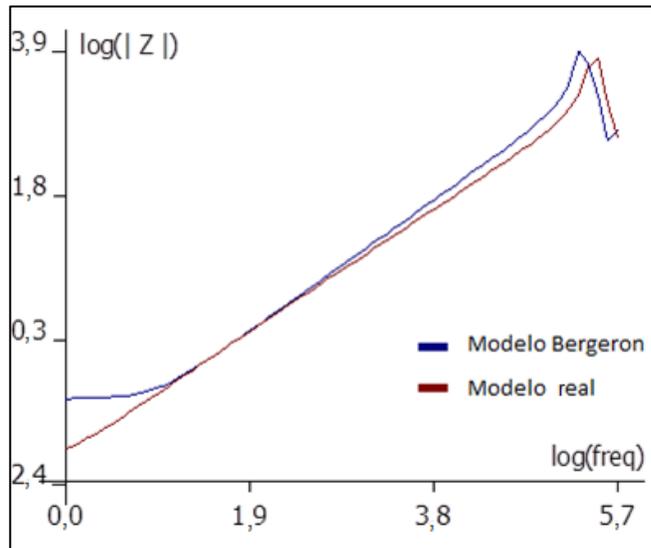
4.1. Análisis de los modelos de líneas de transmisión

Para seleccionar el modelo que proporcione una representación más exacta de la línea de transmisión ante fenómenos transitorios a altas frecuencias se ha realizado un estudio empleando las herramientas disponibles en el ATPDRAW que permite estudiar la respuesta frecuencial de la línea Escuintla I-Santa Ana. Para cada modelo se presentan las respuestas en frecuencia a las secuencias cero y positiva de una fase de la línea versus el modelo real que tendría una línea.

4.1.1. Modelo Bergeron

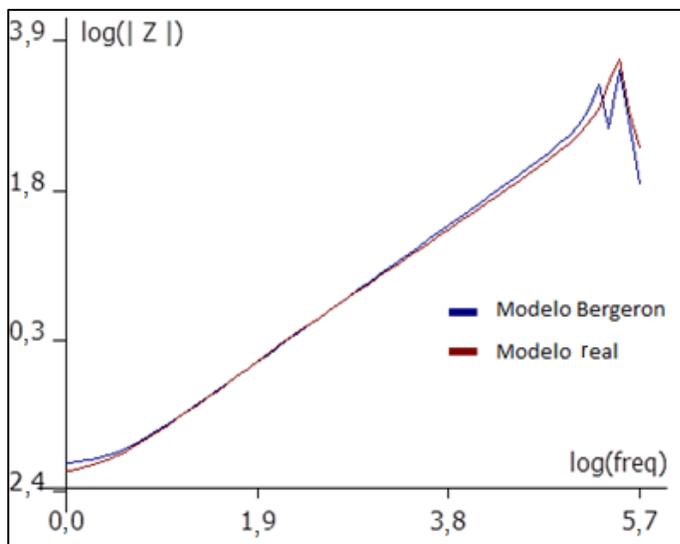
Se presentan los resultados para las secuencias cero y negativa. De una fase.

Figura 52. **Secuencia cero – modelo Bergeron**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 53. **Secuencia negativa – modelo Bergeron**



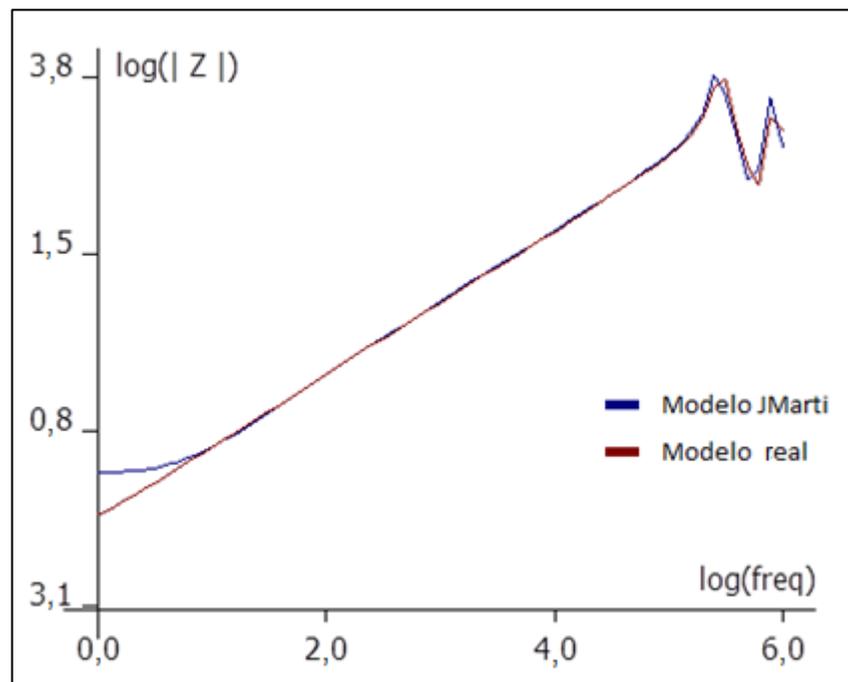
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

En estos dos casos se ve que para frecuencias en el orden de 100 Hz, el modelo de Bergeron se acerca bastante al modelo real; pero a partir de los 6 KHz se inicia a separar y a partir de los 100 kHz la desviación es mucho mayor tomando en cuenta que son escalas logarítmicas. Sin embargo, para fenómenos de estado estable donde frecuencia de los estudios son con base en la frecuencia del sistema, se pueden esperar resultados muy cercanos a la realidad, precisos y sobre todo fiables al fenómeno estudiado.

4.1.2. Modelo JMarti

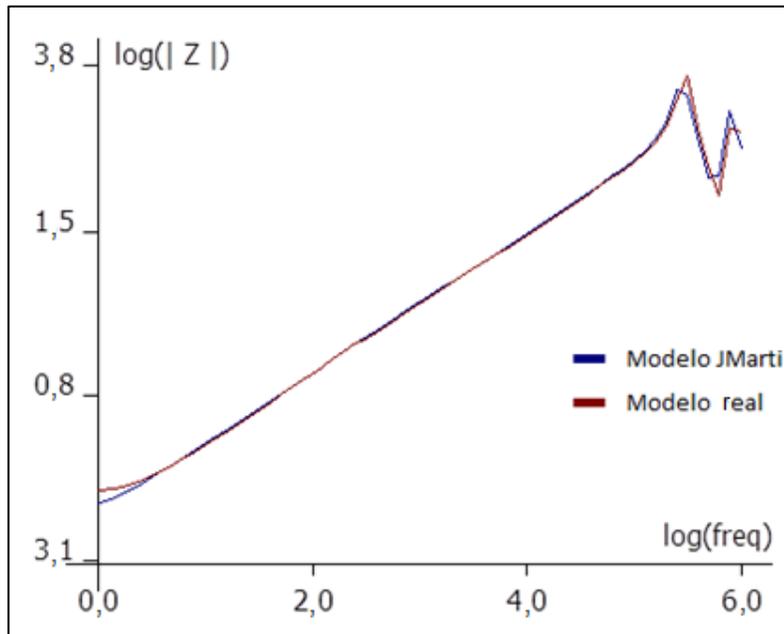
Se presentan los resultados para las secuencias cero y negativa, de una fase, hasta frecuencias de 1 a 1 MHz.

Figura 54. Secuencia cero – modelo JMarti



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 55. **Secuencia negativa modelo JMarti**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Tal como se indica en textos consultados respecto al modelo JMarti, que utiliza parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia, se acerca mucho más a la realidad o la exactitud respecto a la variación de la frecuencia desde la frecuencia del sistema (60 Hz) hasta frecuencias cercanas a 1 MHz, frecuencias que son observadas durante fenómenos transitorios ya sea de frente lento o rápido. Por lo tanto, se valida el uso de este modelo para realizar los estudios restantes de este trabajo de investigación.

4.2. Análisis por sobretensiones atmosféricas

La metodología adoptada para esta sección se basará en analizar 3 escenarios el actual, uno con diferentes cambios y por último un modelo optimo, el fin de este último análisis será llegar a un modelo mixto que permita mejorar el desempeño de la línea de transmisión.

4.2.1. Análisis del desempeño actual de la línea

Teniendo en cuenta las variables calculadas a partir del área geográfica (tabla XV) donde se encontró que la mayor parte de los rayos caerán a la estructura a partir de un valor pico de intensidad de corriente de 6 kA, se realizaron las siguientes simulaciones:

Tabla XVII. Respuesta de la línea transmisión ante impactos de rayo

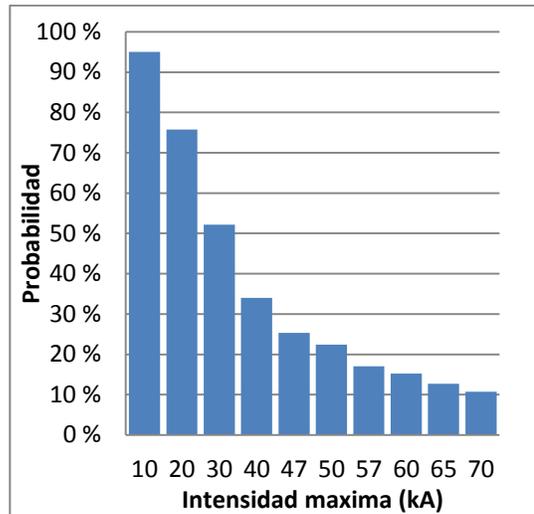
Núm. simulación	Valor pico intensidad rayo (KA)	Probabilidad ser superado* (%)	Flameo Inverso**
1	10	95	NO
2	20	76	NO
3	30	52	NO
4	40	34	NO
5	45	28	SÍ
6	50	22	SÍ

*Según ecuación 16 Capitulo 1 **Simulación en ATP

Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

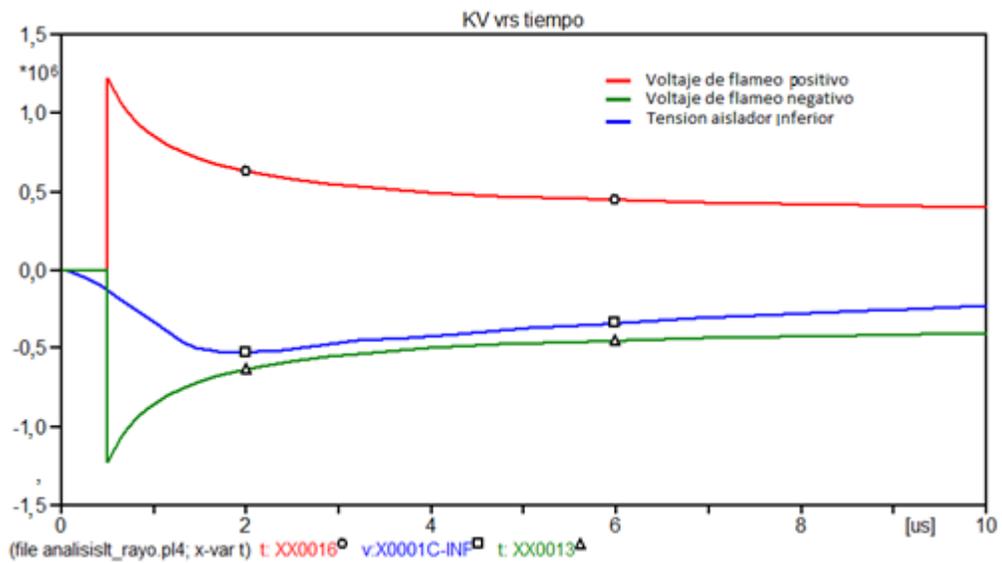
Según los análisis realizados, se aprecia que en las condiciones actuales, la línea de transmisión superará sin problemas intensidades de corriente hasta los 40 kA; sin embargo, después de este valor el aislamiento se verá comprometido.

Figura 56. **Distribución de las intensidades máximas sobre la línea**



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Respuesta aislador descarga de 30KA**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Respecto a la figura 55 se identifica que según el método de los dos puntos de EPRI en 2 y 6 μs , el valor de tensión en el aislador no supera el valor de voltaje que produce flameo; y como se ve en la figura 54, la probabilidad de ocurrencia de esta intensidad de rayo se encuentra muy cercana al 50 %, lo cual significa que dentro del total de rayos que caen a la línea, 20 rayos con un valor de 30 kA serán superados sin problema.

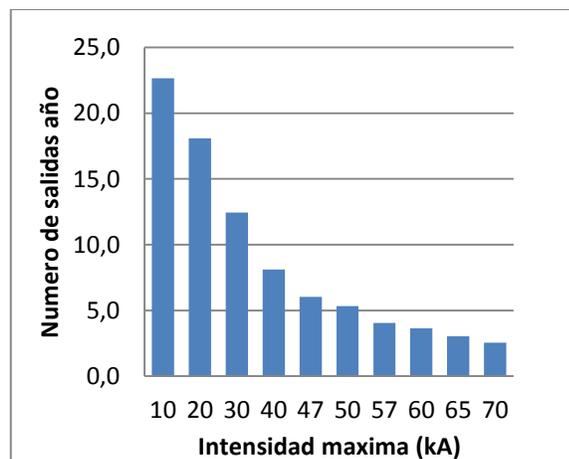
Sin embargo, el caso contrario se muestra en la figura 55: a partir de 45 kA, el voltaje de flameo del aislador se ve sobrepasado y la falla es inevitable y tiene efecto en el número de salidas al año calculado para la línea.

Tabla XVIII. **Número de salidas al año línea actual**

Núm.	Valor pico intensidad rayo (kA)	Probabilidad ser superado	Flameo Inverso	Cantidad de salidas al año (por flameo)
1	45	28 %	✓	6,6
2	50	22 %	✓	5,3

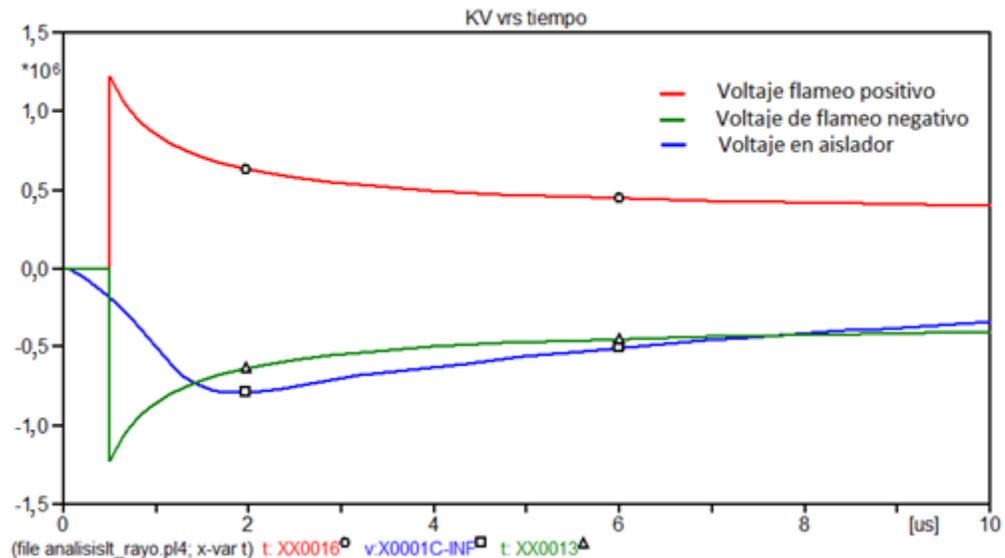
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 58. **Relación salidas al año y valor mínimo de intensidad rayo**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 59. Respuesta aislador a 45 kA



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Para validar estos datos, TRELEC proporcionó el reporte de interrupciones de la línea Escuintla I - Santa Ana para el 2015; según el reporte, se registraron 6 salidas en el año, las cuales fueron probablemente por fuertes lluvias en el área. Con estos datos se validan los cálculos realizados con la condición actual de la línea

4.2.2. Análisis del desempeño con cambios en la línea

El siguiente paso de la metodología adoptada para este trabajo de investigación establece que se deberán realizar cambios a los elementos que puedan mejorar la respuesta de la línea para obtener un modelo de la línea de transmisión que proporcione una respuesta fiable y dentro de los parámetros de calidad que establecen las normas nacionales, para Guatemala se ubica en un máximo de 3 salidas al año, según la norma técnica NTDOID de la CNEE.

4.2.2.1. Análisis cambios en el aislamiento

A continuación, se presentan los resultados realizando cambios en el aislamiento; según el catálogo disponible al público para aisladores, se decidió aumentar el aislamiento. El criterio para elevar el aislamiento se basó en porcentajes respecto a la distancia de flameo arco en seco y con los datos disponibles en catálogos comerciales; definitivamente, este aumento dependerá del fabricante.

Tabla XIX. Aumento de aislamiento

Núm.	Aumento respecto al existente	Distancia de arco seco	Longitud de la sección "X"	BIL (IEC)
		ln (mm)	ln (mm)	
1	Existente	32,2 (818)	44 (1117)	350 kV
2	38 %	44,3 (1125)	55,9 (1419)	480 kV
3	68 %	54 (1372)	65,3 (1658)	810 kV
4	90 %	61,3 (1557)	72,4 (1838)	905 kV

Fuente: elaboración propia.

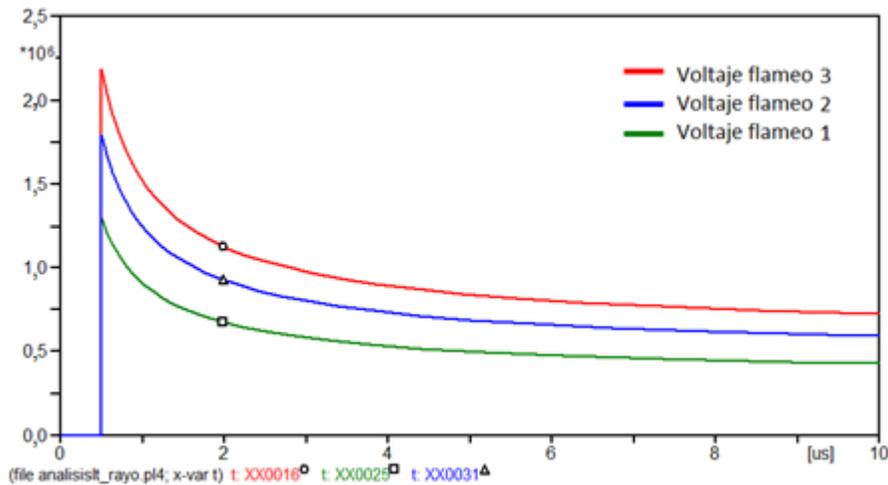
Tabla XX. Cambio aislamiento y salidas por flameo inverso

Núm.	Voltaje nominal	Distancia de arco seco	Longitud de la sección "X"	Intensidad pico soportada	Salidas por flameo inverso
		ln (mm)	ln (mm)		
1	110 kV	32,2 (818)	55,9(1419)	55 kA	4,39
2	138 kV	54 (1372)	65,3 (1658)	65 kA	3,00
3	160 kV	61,3 (1557)	72,4 (1838)	78 kA	2,00

Fuente: elaboración propia.

Con el cambio de aislamiento se puede obtener el número de salidas al año máximo, el objetivo de la empresa; sin embargo, realizar el cambio de aislamiento involucra dificultades técnicas y sobre todo aspectos económicos.

Figura 60. **Aumento del voltaje de flameo**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Según la figura 58, con el cambio propuesto, el voltaje que se obtiene a $2 \mu s$ con el primer aislador propuesto se acerca a los 700 kV; este voltaje aumenta con la opción 2 hasta aproximadamente los 1 000Kv, con la última propuesta llega aproximadamente a los 1 250 kV.

4.2.2.2. Análisis con cambios en la puesta a tierra

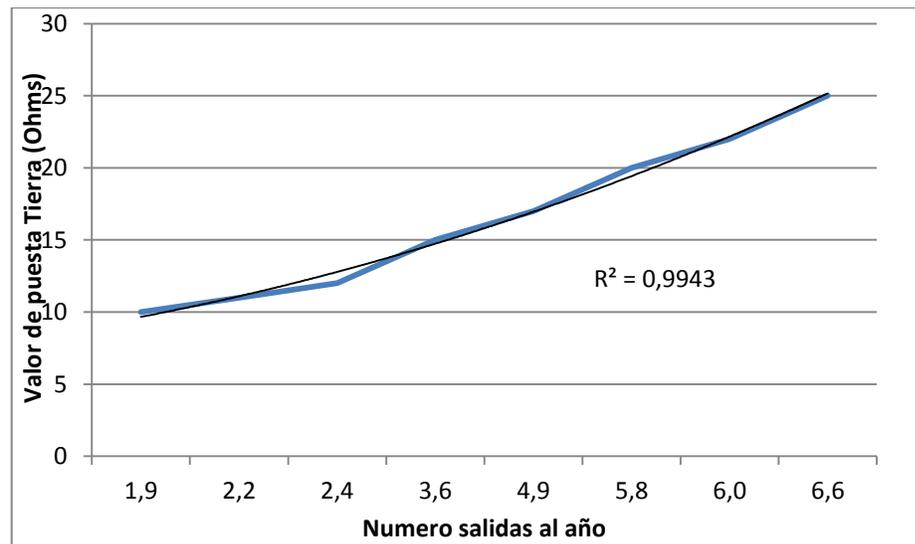
A continuación, se presentan los resultados obtenidos al variar los valores de resistencia de todas las estructuras donde cae el rayo y de las estructuras adyacentes y manteniendo los mismos parámetros de la línea existente con la cual se obtienen los siguientes datos:

Tabla XXI. **Cambios de puesta a tierra**

Núm.	Valor pico intensidad rayo	Probabilidad ser superado	Resistencia tierra	salidas año
1	80	8 %	10	1,9
2	75	9 %	11	2,2
3	72	10 %	12	2,4
4	60	15 %	15	3,6
5	52	21 %	17	4,9
6	48	24 %	20	5,8
7	47	25 %	22	6,0
8	45	28 %	25	6,6

Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Puesta a tierra vrs salidas al año**



Fuente: elaboración propia

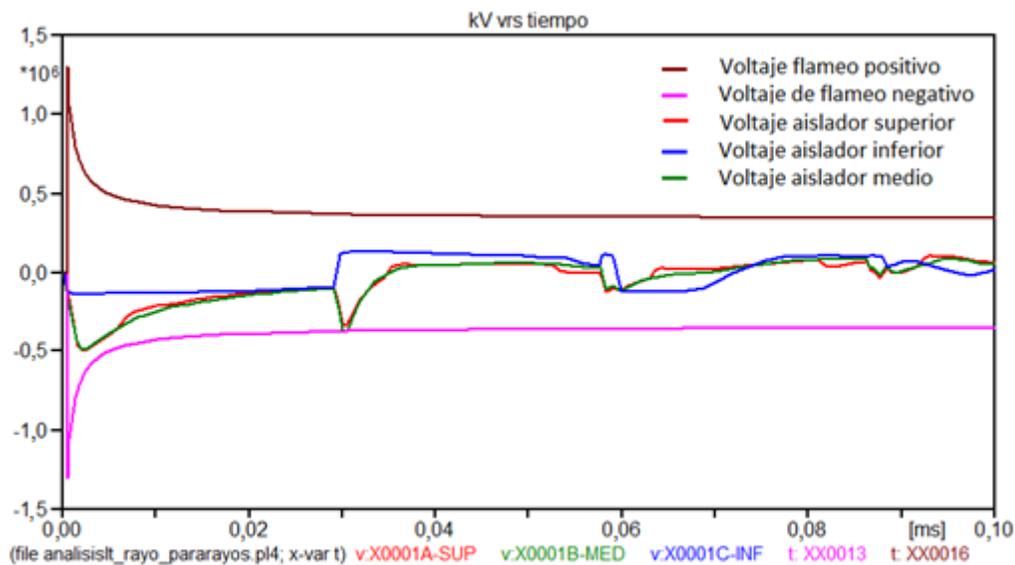
Como se aprecia en la figura 61, el comportamiento más adecuado para describir la variación de valor de puesta tierra con el número de salidas al año es tendencia cuadrática de grado 2 ya que presenta una correlación mayor a una tendencia lineal. Con base en los datos obtenidos se infiere que se puede

cumplir con el número máximo de salidas al año con un valor de puesta a tierra menor de 15 ohm; sin embargo, lograr obtener estos valores muchas se ve dificultado por problemas de robo, accesibilidad o concernientes al área.

4.2.2.3. Análisis con descargadores de sobretensiones

Tal como se realizó con los demás casos, a continuación, se realizará un análisis del caso base o existente y la instalación de pararrayos; sin embargo, debido a que se observa un comportamiento más errático en el voltaje de las otras fases se mostrarán los voltajes en los aisladores de las 3 fases.

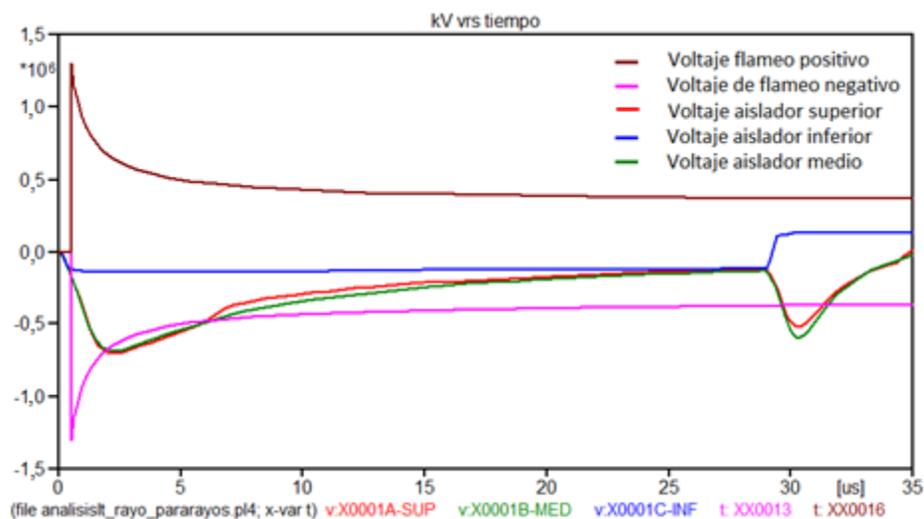
Figura 62. Pararrayos fase inferior 45 kA



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Tal como se observa en la figura 62, el voltaje en las fases media y superior donde no está instalado un pararrayos presenta un comportamiento errático y en algunos momentos con sobretensiones momentáneas; por otro lado, la fase con pararrayos presenta una atenuación de la sobretensión hasta llegar a cero; sin embargo, después se presentan voltajes con valores positivos y negativos; estos aunque son pequeños probablemente generen distorsiones a la forma de onda del voltaje del sistema. Si se aumenta la corriente del rayo, este comportamiento se incrementa en la misma magnitud de la corriente que impacta.

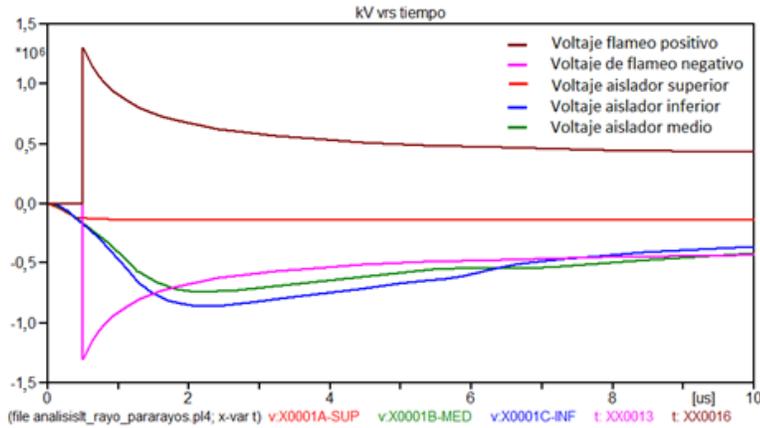
Figura 63. Pararrayos fase inferior 65 kA



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Como se observa, la instalación de un pararrayos en la fase inferior solo elimina la sobretensión de la fase en cuestión; sin embargo, las demás fases se ven afectadas que provocan de este modo su flameo inverso, como se observa en la figura 63 a los 4 o 30 μ s. Los siguientes análisis se realizaron para determinar donde conviene más instalar los pararrayos.

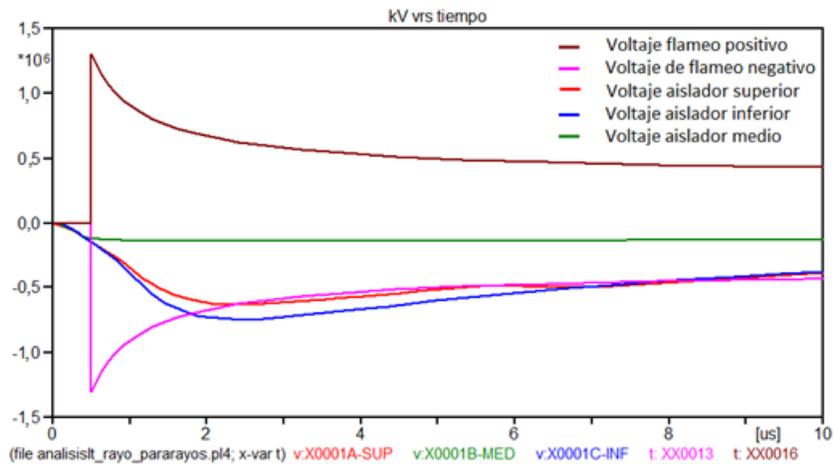
Figura 64. Pararrayos fase superior 65 kA



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Tal como se aprecia, la instalación del pararrayos en la fase superior o fase media no provocó cambio alguno ya que las demás fases sufrieron flameo inverso.

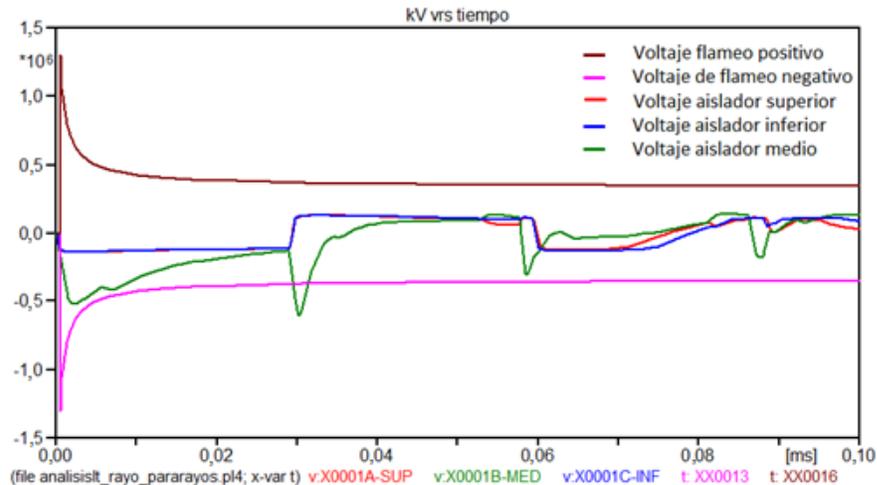
Figura 65. Pararrayos fase media 65 kA



1.

Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 66. Pararrayos fase superior e inferior a 65 kA

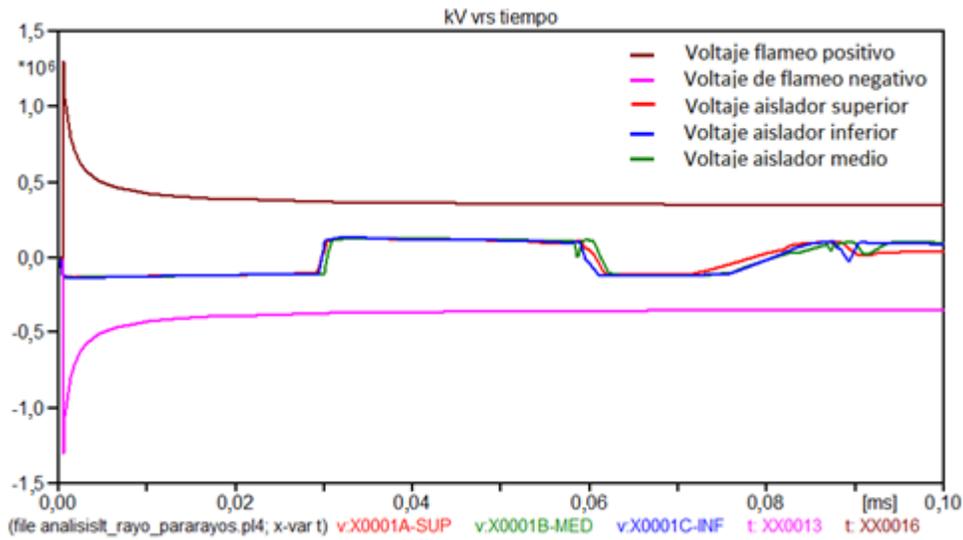


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

En la figura 66 se aprecia el sobrevoltaje en la fase media; inclusive la simulación de la sobretensión se realizó con una puesta a tierra de 10 ohm para determinar la influencia de la puesta a tierra; sin embargo, tal como se observa no evita la sobretensión en la fase sin pararrayos. En la figura 66 se observa que sucede lo mismo al poner en dos fases y dejar una desprotegida. Siempre la fase sin pararrayos se ve afectada lo cual indica que todas deben tener instalado un pararrayos para evitar el flameo de una de las fases en la estructura afectada.

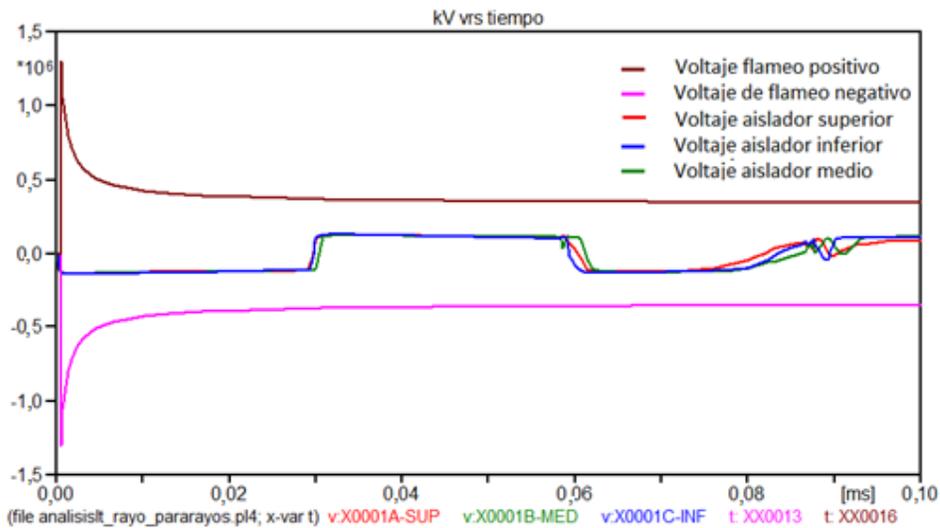
Tal como se observa en las figuras 67 y 68, la única manera de superar la sobretensión con pararrayos es colocarlos en las tres fases ya que mientras que una fase se quede sin este dispositivo sufrirá sobretensiones que provocarían su flameo. Para realizar una comprobación respecto a la eficacia del pararrayos se simuló una sobretensión de 80 kA la cual, según la figura 65, no produjo flameo alguno.

Figura 67. Pararrayos en las tres fases a 65kA



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 68. Pararrayos en las 3 fases 80kA



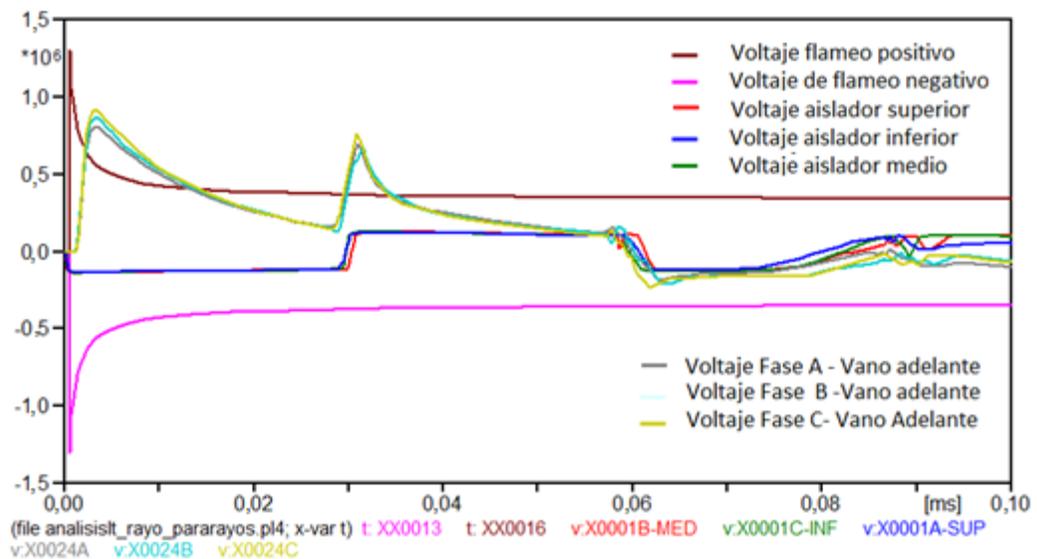
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

4.2.3. Análisis del modelo óptimo

Con base en los resultados obtenidos con los cambios y modelos analizados anteriormente, se procede ahora a realizar una propuesta de configuración que permita a la línea Escuintla 1 – Santa Ana superar las descargas atmosféricas dentro de los valores normados por la CNEE y, sobre todo, aumentar la calidad del servicio de sus clientes.

Tal como se vio en la sección 4.2.2., los pararrayos logran atenuar sobretensiones de gran magnitud en corto tiempo logrando así evitar el flameo del aislador en la estructura donde están instalados; sin embargo, si se realiza un análisis o medición del voltaje en los aisladores de las estructuras anterior y posterior se obtienen los siguientes resultados.

Figura 69. Voltajes vano anterior - pararrayos



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

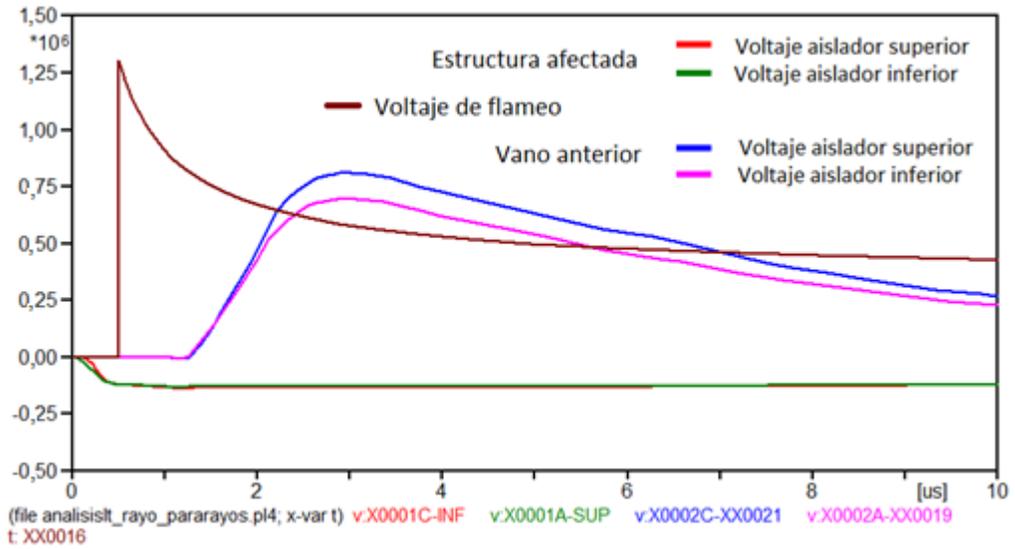
Los resultados para el vano posterior y anterior es el mismo; se provoca una sobretensión en el conductor y aisladores anteriores y posteriores de la estructura con pararrayos al momento de caer una descarga atmosférica; en la figura 69 se ve la simulación de los voltajes en los aisladores de la estructura donde están instalados los pararrayos; observe la atenuación del sobrevoltaje y el voltaje en el conductor de la estructura anterior donde se observa que a los 5 y 30 μs se producen sobrevoltajes que llegan hasta los 800 kV aproximadamente en la fase más afectada.

Esto indica que el uso de los pararrayos para evitar flameo inverso en líneas de 69 kV está descartado. Ya que se evita el flameo en la estructura pero la sobretensión disipada por los pararrayos se transmite a las estructuras vecinas en la misma intensidad y con un comportamiento más errático. Pues se generan voltajes de diferentes magnitudes cerca de los 100 μs .

Realizando un análisis de los sobrevoltajes que aparecen en el aislador del vano anterior y los de la estructura, figura 70, donde impacta la sobretensión en los primeros 10 μs , se ve que mientras la atenuación de la sobretensión por el pararrayos se logra estabilizar a los 2 μs , el voltaje en los aisladores de la estructura anterior se empieza a elevar, este sobrevoltaje positivo posiblemente este regresando por medio del pararrayos a la línea y fácilmente provoca un flameo inverso en los aisladores vecinos posteriores y anteriores.

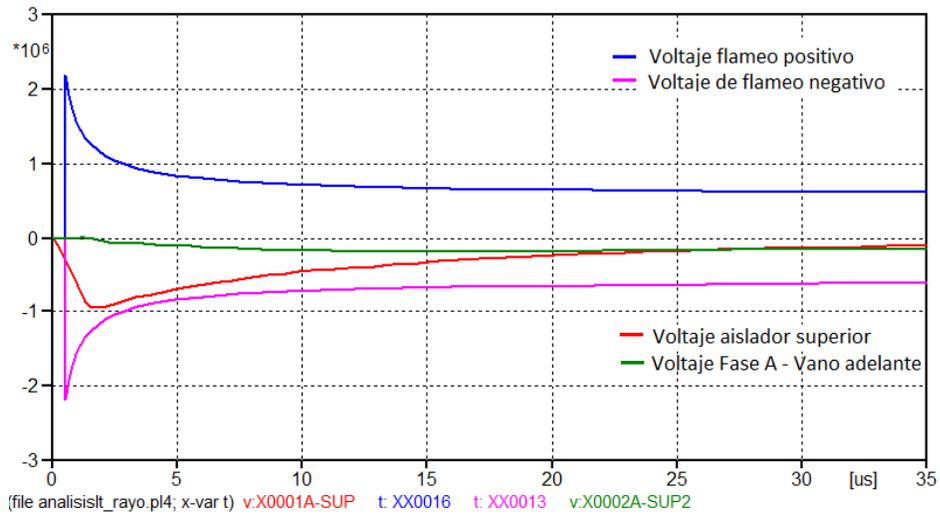
Si se realiza un análisis similar pero únicamente con las puestas a tierra y se mide el voltaje en los aisladores de la estructura donde cae el rayo y se mide el voltaje en los aisladores vecinos, se obtienen los resultados mostrados en la figura 71, donde se observa que el sobrevoltaje producido en los aisladores vecinos no es significativo y no representa riesgo de flameo inverso.

Figura 70. **Voltaje aisladores vecinos - pararrayos**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 71. **Voltaje aisladores vecinos – puesta a tierra 15 ohm**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Como se observa en la imagen y con base en los análisis realizados, la única manera de mejorar el desempeño de la línea de transmisión Escuintla I – Santa Ana ante descargas atmosféricas es variando el aislamiento y/o bajar el valor de la puesta a tierra. Ambos cambios representan ventajas y desventajas técnicas y económicas que se abordarán en el capítulo 5.

El análisis técnico económico en este caso es determinante ya que por ser una línea existente tendrán que considerarse los costos para realizar los cambios sugeridos y evitar que el proyecto perjudique las finanzas de la empresa.

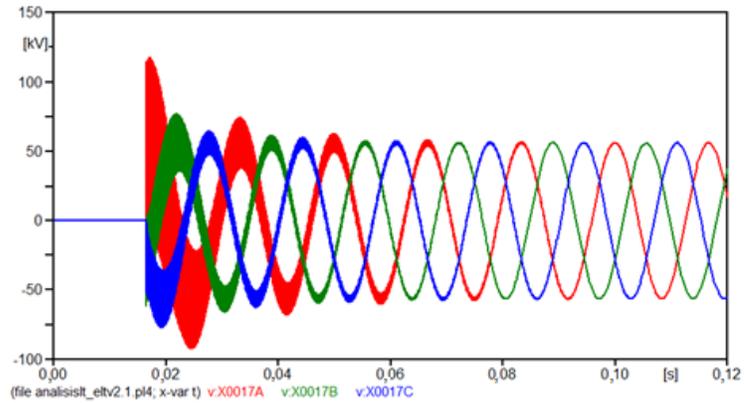
4.3. Sobretensiones por maniobras

En esta sección de esta investigación se analizará la respuesta de la línea ante sobretensiones de frente lento vinculadas generalmente a sobretensiones provocadas por maniobras; provocadas en el caso de estudio únicamente por apertura y cierre de los interruptores instalados en los extremos de la línea, ya que no poseen equipos adicionales a estos que afecten el voltaje de la línea. La metodología adoptada es similar a la seguida para el análisis de los sobrevoltajes atmosféricos y se iniciará realizando un análisis de las condiciones actuales de la línea.

4.3.1. Análisis desempeño actual línea

En la siguiente imagen se aprecia el comportamiento de la sobretensión generada por la energización de la línea, se aprecia que los tiempos cuando se presentan estos sobrevoltajes son más largos y afectan directamente a la forma de onda del sistema.

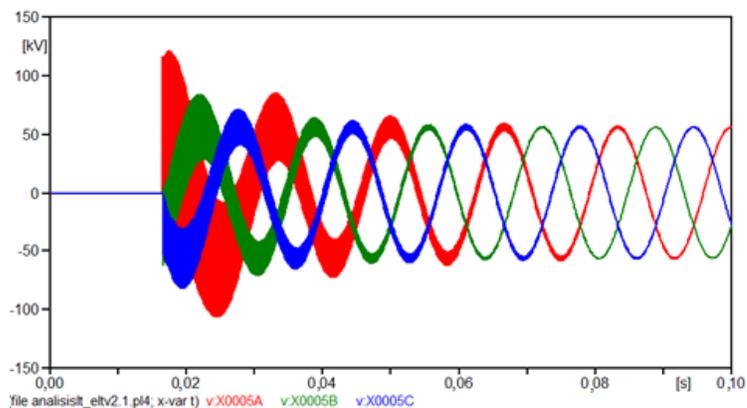
Figura 72. **Energización de la línea, estado actual**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Como se ve, los voltajes provocadas por las maniobras no sobrepasan las 150 kV es más si se analiza la figura 72, se ve que la sobretensión en la fase más afectada se atenúa a los 6 ciclos aproximadamente. Midiendo la misma sobretensión al final de la línea se obtiene resultados muy parecidos.

Figura 73. **Energización de la línea, estado actual, final línea**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

En el siguiente cuadro se verán los valores de las sobretensiones producidas en la línea a la mitad de la línea y al final.

Tabla XXII. **Voltajes máximos energización de la línea actual**

Energización de la línea vacío	Voltaje pico (pu)	
	Mitad línea	Final línea
Fase A	2,10	2,17
Fase B	1,39	1,50
Fase C	-1,39	-1,46

Fuente: elaboración propia.

Como se ve las sobretensiones provocadas por la energización de la línea en la fase más afectada no sobrepasan los 2,1 veces el valor del voltaje pico del sistema, queda pendiente cómo se puede atenuar este valor con el uso de pararrayos en la línea de transmisión.

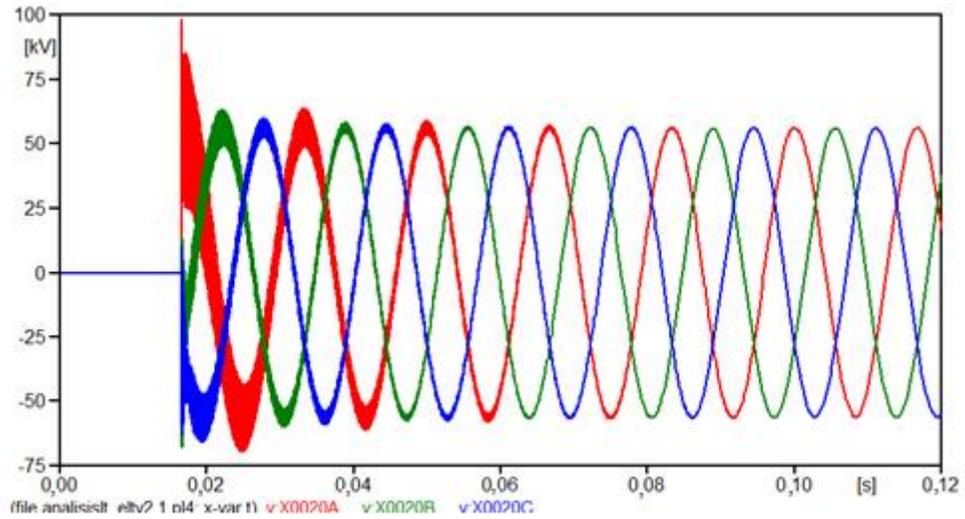
4.3.2. Análisis del desempeño cambios línea

Como se estableció en la metodología para evaluar el desempeño de la línea, se ha variado el modelo de tal forma que se puedan analizar los efectos de agregar o cambiar los valores de los elementos que componen la línea de transmisión Escuintla 1 – Santa Ana, el objetivo es determinar cómo se puede mejorar el desempeño de la línea.

4.3.2.1. Análisis con descargadores de sobretensiones

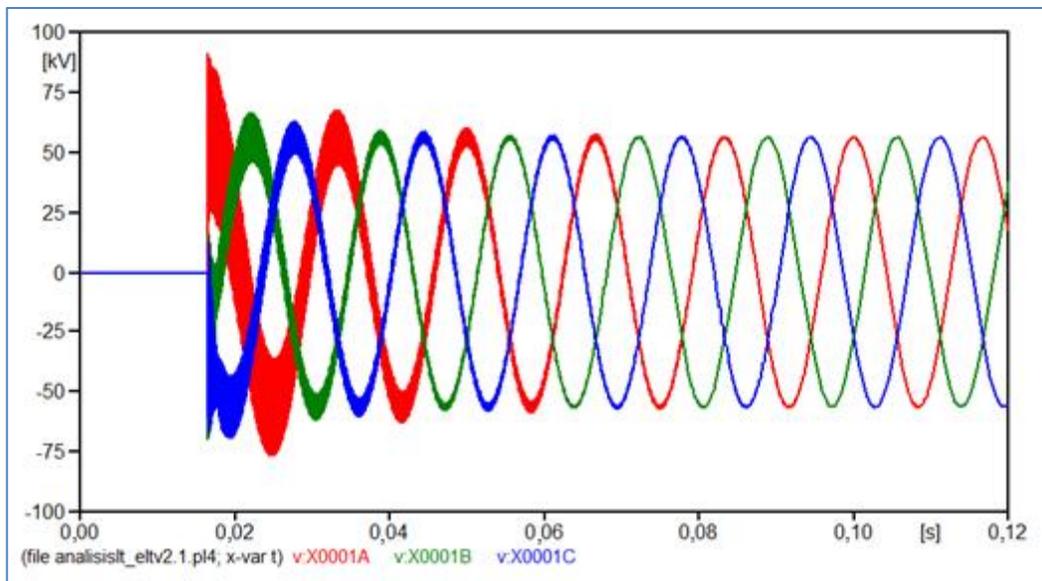
En la figura 74 se aprecia que el comportamiento de los sobrevoltajes provocados por maniobras y con pararrayos instalados al final de la línea de transmisión se ven reducidos en magnitud y en la duración.

Figura 74. **Energización, línea con pararrayos**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

Figura 75. **Energización línea con pararrayos, final línea**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW.

La atenuación de la magnitud y duración se ve a la mitad y al final de la línea y su magnitud se muestra en la tabla XXII.

Tabla XXIII. **Energización línea con pararrayos**

Energización de la línea vacío	Voltaje pico (pu)	
	mitad línea	Final línea
Fase A	1,74	1,63
Fase B	-1,15	-1,23
Fase C	1,14	1,19

Fuente: elaboración propia.

Los valores de la sobretensión por maniobras y con pararrayos instalados variaron 0,43 veces, es decir, como 24 kV voltios, lo cual representa un cambio significativo; con estos datos se afirma que los pararrayos pueden disminuir las sobretensiones en un 40 % de su magnitud y reducir a la mitad su duración.

4.3.3. Análisis del modelo óptimo

Antes de proponer la instalación de los pararrayos para disminuir las sobretensiones, se analizarán las especificaciones de los aisladores de la línea instalados los cuales se presentan en la tabla IX del capítulo 3.

Tabla XXIV. **Niveles de tensión**

	Voltaje industrial a 1 min.	Impulso positivo	Impulso negativo	Voltaje de fuga
Marca OHIO BRASS	(kV)	(kV)	(KV)	(KV)
P250031S1070	255	480	580	84kV

Fuente: elaboración propia.

Como se observa, los aisladores están especificados para soportar sobretensiones a frecuencia industrial de hasta 255 kV a un minuto de duración; por lo tanto, aunque el uso de los pararrayos disminuya las sobretensiones por maniobras, el aislamiento usado en esta línea soporta los 130 kV que se generan en la línea sin la presencia del pararrayos. Si se aproximan los valores, se afirma que el aislador soporta el doble de la sobretensión máxima generada por maniobras en la línea Escuintla 1 – Santa Ana.

5. APLICACIÓN A LÍNEA ESCUINTLA I – SANTA ANA

Como se vio en el capítulo anterior, la línea Escuintla 1 – Santa Ana 69 kV como está construida actualmente supera sin ningún problema las sobretensiones por maniobra, pero no ocurre lo mismo con las sobretensiones por descargas atmosféricas; este capítulo se centrará en analizar los costos que involucran realizar los cambios propuestos en el capítulo 4, cambios necesarios para cumplir con los valores de calidad permitidos por la normativa guatemalteca.

5.1. Análisis económico

Uno de los principales aspectos a tomar en cuenta a la hora de evaluar un proyecto es el aspecto económico, en este caso, serán las dos soluciones técnicas que llevan al mismo resultado. Y no más importante será la evaluación del tiempo en ejecución. A continuación, se presentan los análisis respectivos.

5.1.1. Cambios de aislamiento

Los trabajos y costos que implica el cambio de aislamiento en las 80 estructuras se tomaron como se indica a continuación:

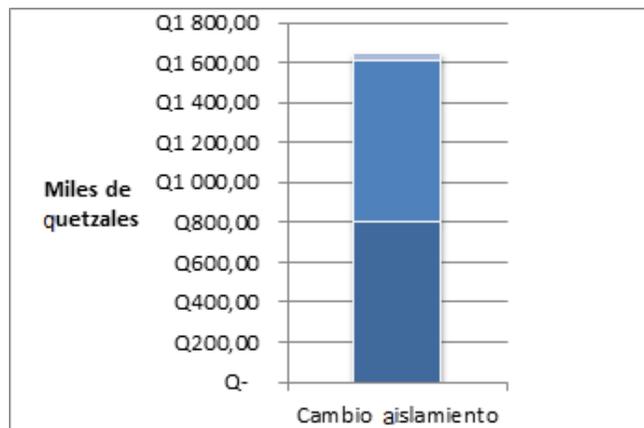
Tabla XXV. Costos cambio aislamiento

Descripción	Costo
Mano de obra	Q 804 108,45
Materiales	Q 805 535,00
Otros	Q 40 000,00
Total	Q 1 649 643,45

Fuente: elaboración propia.

Los tiempos asociados a esta opción rondan las 16 semanas e igual número de descargos.

Figura 76. **Costos cambio de aislamiento**



Fuente: elaboración propia

5.1.2. Cambios en la puesta a tierra

En este apartado se presenta un resumen de los costos asociados al mejoramiento de la red de tierras; una red de tierras que se basó en las mediciones de resistividad realizadas por TRELEC, con las siguientes datos usados como base.

Tabla XXVI. **Valores diseño malla tierra postes**

Descripción	Valor
Valor de resistividad suelo	200 ohm-m
Valor de puesta a tierra	12 ohm
Varillas puesta a tierra	Varilla 5/8"x8' C/baño cobre
Configuración	Anillo
Conductor	Cable coperweld no. 2

Fuente: elaboración propia.

Usando como base la *Norma IEEE-80-2000, Guide for safety in ac substation grounding* y un programa especializado tenemos como resultado el siguiente cuadro con la red tierras a instalar:

Figura 77. **Red tierra a instalar**

GEM Calculator	
Tips for use	
Language	English
Unit of Measure	Metric Units
Soil Resistivity for Site in ohm-m (Ω -m)	200
Target Resistance in Ohm	12
UL Approval Required?	No
Configuration	Multiple Ground Rods
Grid Shape	Ring
Ground Rod Diameter in Millimeters	14.2
Length of Ground Rod(s) in Meters	2.4
Total Length of Ground Rod Assembly (electrode) in Meters	4.8
Number of electrodes	4
Conductor Material	Copper
Conductor Size	35 mm ²
Diameter of Augered Hole in Centimeters	10
Radius of Ring in Meters	6
Resulting Resistance	
Resistance With GEM (Ohm)	10.7
Bags of GEM Needed	14
Required Parts	
Select Ground Rod	Copper-Bonded Ground Rod, Pointed, 5/8" dia, 2.4 m, 254 μ m Plating, 3.07 kg
Required number of Ground Rods	8
Select Ground Rod Coupler	Compression Coupler for Copper-Bonded Ground Rod, Pointed, Silicon Bronze, 5/8" dia
Required number of Couplers	4
Select CADWELD® Mold	Cable to Ground Rod or Other Rounds, GT, Copper-bonded, 0.625" dia, 35 mm ² Concentric
Required Weld Material	90PLUSF20

Fuente: *GEM Calculator*. <https://www.erico.com>. Consulta: 14 de mayo de 2015.

Los costos asociados para el cambio de toda la línea se resumen a continuación:

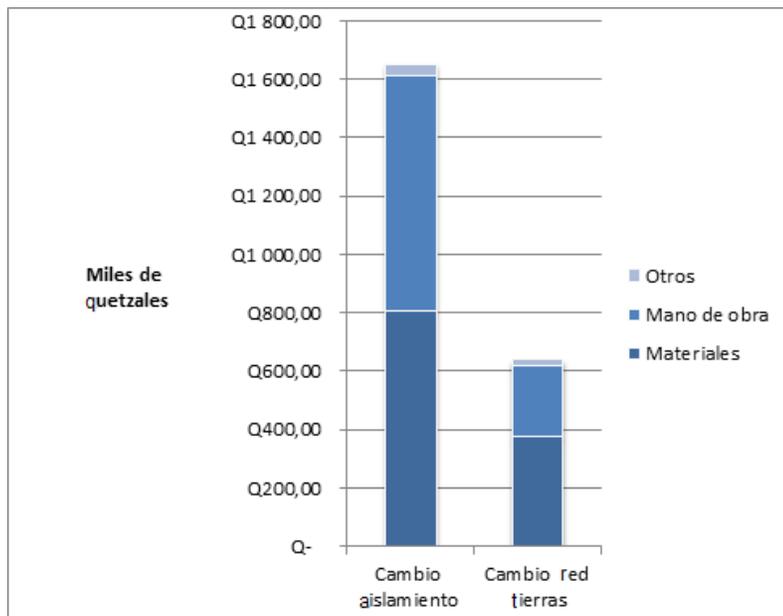
Tabla XXVII. **Costo de cambio de red de tierras**

descripción	costo
Materiales	Q 372 320,00
Mano de obra	Q 246 151,40
Otros	Q 20 000,00
Total	Q 638 471,40

Fuente: elaboración propia.

La realización de los trabajos no depende de la disponibilidad de la línea de transmisión, por lo tanto, es un trabajo continuo y depende más de la habilidad del responsable de la construcción.

Figura 78. **Comparación de costos**



Fuente: elaboración propia.

5.2. Evaluación de alternativas

Teniendo en cuenta los parámetros técnicos, económicos y operativos, se realiza una evaluación de alternativas que se describe a continuación.

Tabla XXVIII. **Análisis de alternativas**

Cambio de aislamiento	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de operación superior a los 10 años después de instalado. • Tiempo libre de mantenimiento superior a los 10 años. • No hay riesgos pérdida de inversión por robo. • Incremento de la confiabilidad operativa de la línea. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado comparado con la otra alternativa. • Indisponibilidad de la línea de transmisión mientras se realizan los trabajos.
Cambio puesta a tierra	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Menor costo en comparación de la alternativa anterior. • No es necesario la desenergización de la línea de transmisión para su construcción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de pérdida de inversión por robo. • Costo de mantenimiento continuo. • El valor objetivo a alcanzar depende de las condiciones climáticas ya que tiene que ser en época seca sin lluvias. • Riesgo de operación ya que según la cantidad de materiales a usar el riesgo de robo se incrementa en un 50 % al día de hoy.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El programa ATP (*alternative transients program*) es aplicable para análisis de fenómenos transitorios por sobretensiones atmosféricas y por maniobra en líneas de 69 kV.
2. El modelo de la línea con mayor precisión para el estudio de fenómenos transitorios es el modelo JMarti ya que presenta menor variación respecto a los cambios de frecuencia.
3. En líneas de 69 kV el factor principal para selección de aislamiento es la sobretensión de origen atmosférico, por lo que el uso de programas como el ATP es justificable y necesario para su correcto dimensionamiento.
4. Los niveles de sobretensión de frente rápido presentes en la línea de transmisión Escuintla I – Santa Ana 69 kV alcanzan por lo menos intensidades de 40 kA, después de estos valores se produce el fenómeno de flameo inverso en los aisladores.
5. Los niveles de sobretensión de frente lento provocados por maniobras en la línea Escuintla I- Santa Ana 69 kV alcanzan valores de próximos a los 130 kV, los cuales no representan peligros de operación en los aisladores pues están especificados para soportar tensiones mayores.
6. Se espera 6.6 salidas por flameo inverso en la longitud total de la línea Escuintla I – Santa Ana 69 kV.

7. Al realizar un cambio de aislamiento con valores mínimos de BIL de 800 kV se espera cumplir con los valores mínimos establecidos en la NTDOID referente a la calidad y confiabilidad del servicio.

RECOMENDACIONES

1. Los parámetros relacionados para el análisis de sobretensiones atmosféricas y por maniobra tienen que seleccionarse adecuadamente y representar aquellos que se presentan con mayor frecuencia.
2. Para líneas de 69 kV del área de la Costa Sur de Guatemala se recomienda el uso de aisladores con un BIL de por lo menos 800 kV, según norma IEC y un sistema de puesta a tierra mínimo de 25 ohm para soportar sobretensiones de origen atmosféricos.
3. Para líneas de 69 kV se recomienda no usar descargadores de sobretensiones ya que probablemente provoquen puntos de falla ya que su uso para sobretensiones atmosféricas y por maniobras no es justificada.
4. Para la línea Escuintla 1 – Santa Ana el nivel de contaminación que se ha seleccionado es alto; sin embargo, se recomienda evaluar el siguiente nivel muy alto, ya que existe presencia de salinidad y presencia de hollín debido a la quema de caña la cual es abundante en el sector.
5. Para la línea se recomienda evaluar otras configuraciones en los postes de tal manera que se aumente la distancia sobre el nivel del suelo de los conductores y la catenaria.

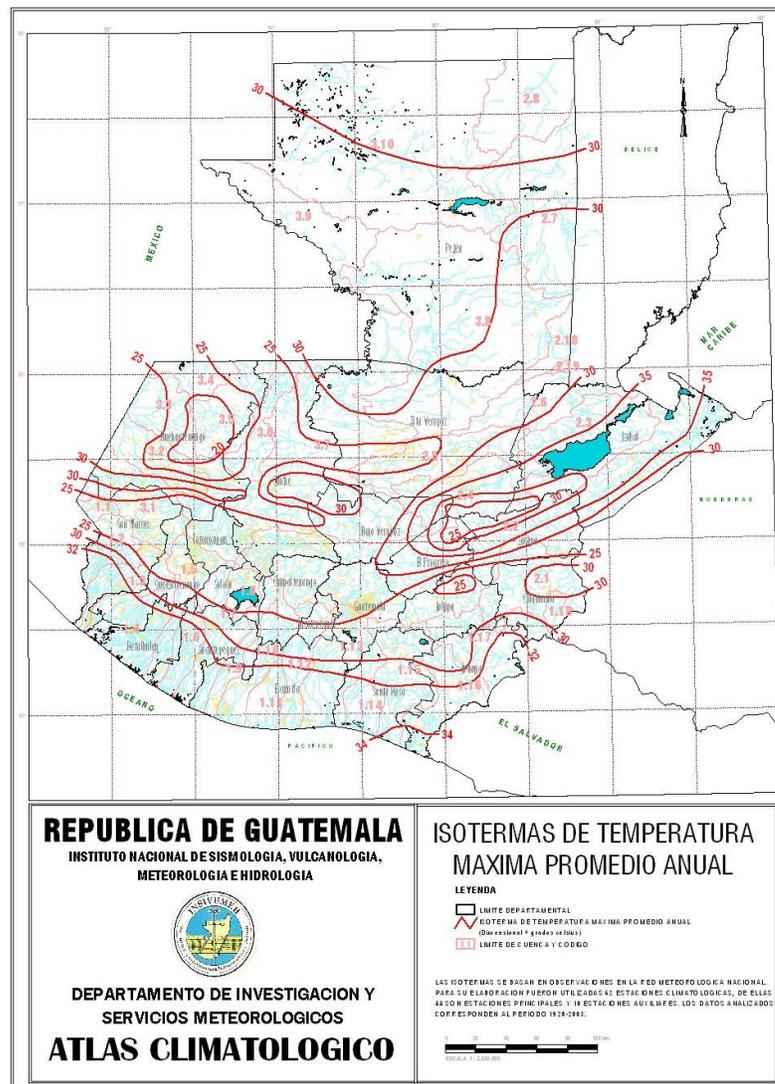
BIBLIOGRAFÍA

2. Branch of System Engineering Bonneville Power Administration (BPA). *Electro-magnetic transients program theory book*. Portland, Oregon, USA: EMPT, 1986. 250 p.
3. CARDONA CORREA, Leonardo. *Teoría y práctica con el ATP*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2004. 105 p.
4. CHAJ RAMIREZ, Edgar Estuardo. *Análisis de sobretensiones debido a transitorios por maniobras en sistemas eléctricos de potencia mayores a 300 kV*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 180 p.
5. CUACUAS GUTIÉRREZ, Juan. *Simulación de interruptores de potencia con gas SF6 en ATPDRAW*. México: Instituto Politécnico Nacional, 1994. 255 p.
6. Electric Power Research Institute. *Transmission line reference book 345 kV and above*. 2 ed. California, USA: EPRI, 1982. 650 p.
7. HERNÁNDEZ RESTREPO, Luis. *Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia*. Trabajo de graduación de Ing. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2012. 250 p.

8. LUGO NOGUERON, Isabel Adrian. *Simulación del operación de apartarrayos en líneas de transmisión utilizando el programa ATP / EMPT*. México: Universidad Autónoma de México, 2014. 285 p.
9. MARTINEZ VELAZCO, Juan. *Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte: cálculo de sobretensiones*. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2010. 175 p.
10. TUBAC ESCOBAR, Daniel Alfredo. *Selección de aislamiento y posicionamiento del cable para la línea de transmisión las Cruces-Sololá a 230kV, contemplada en el lote F del plan de expansión del sistema de transporte*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 120 p.
11. VASCONCELLOS PAREDES, José. *Modelos dependientes de la frecuencia para análisis de la energización y descargas atmosféricas para líneas de 500 kV*. Ecuador: Escuela superior politécnica del litoral, 2003. 245 p.
12. VASQUEZ OCAÑA, Kleber. *Cálculo de sobre voltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando el ATP (Alternative Transients Program) aplicado a la línea de transmisión santa rosa – pomasqui a 230 kv*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2003. 105 p.
13. Westinghouse Electric Corporation. *Electrical transmission and distribution reference book*. 4a ed. Pennsylvania, USA: WEC, East Pittsburg, 1964. 206 p.

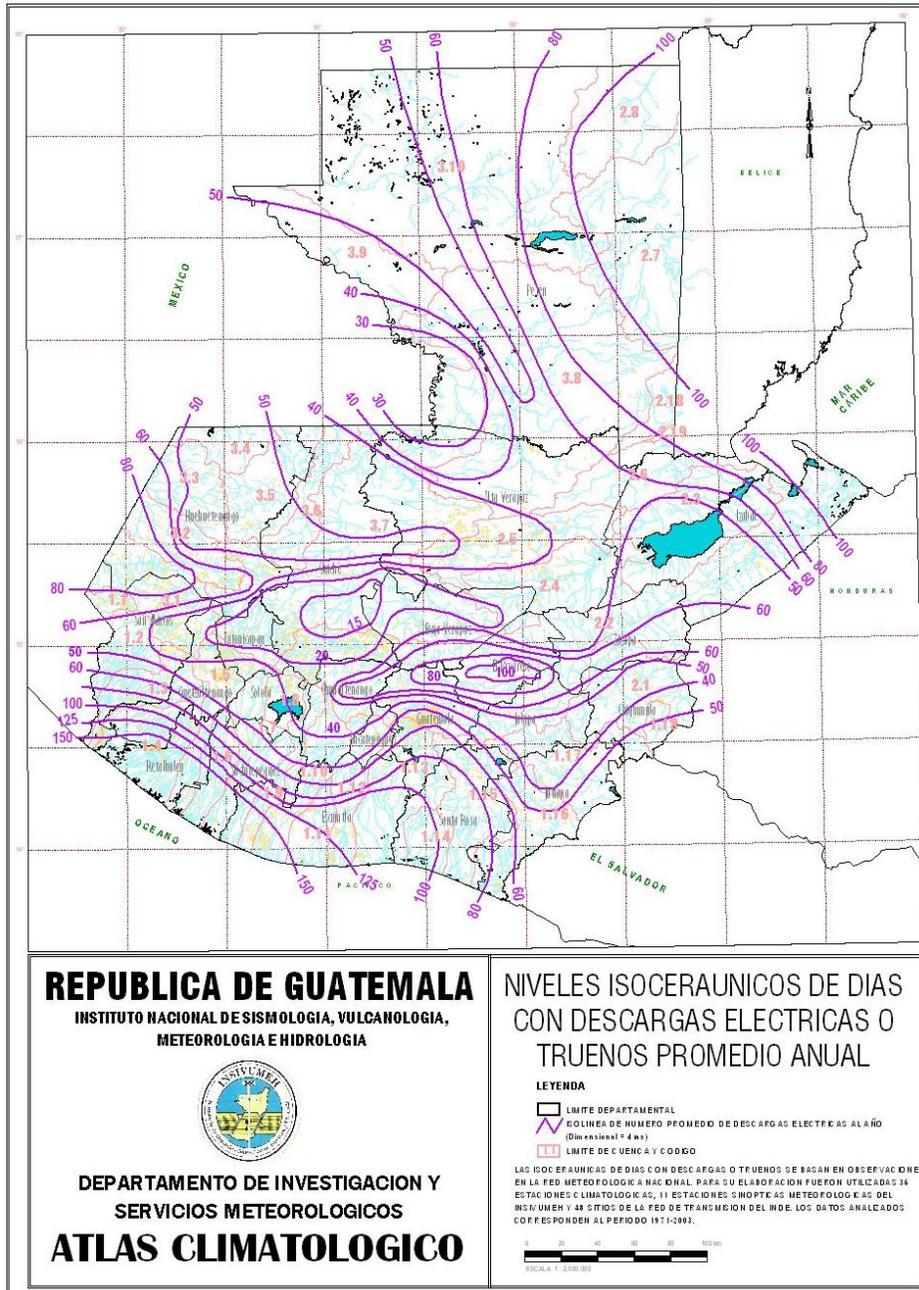
ANEXOS

Anexo 1. Mapa de temperaturas máximas promedios anual Guatemala



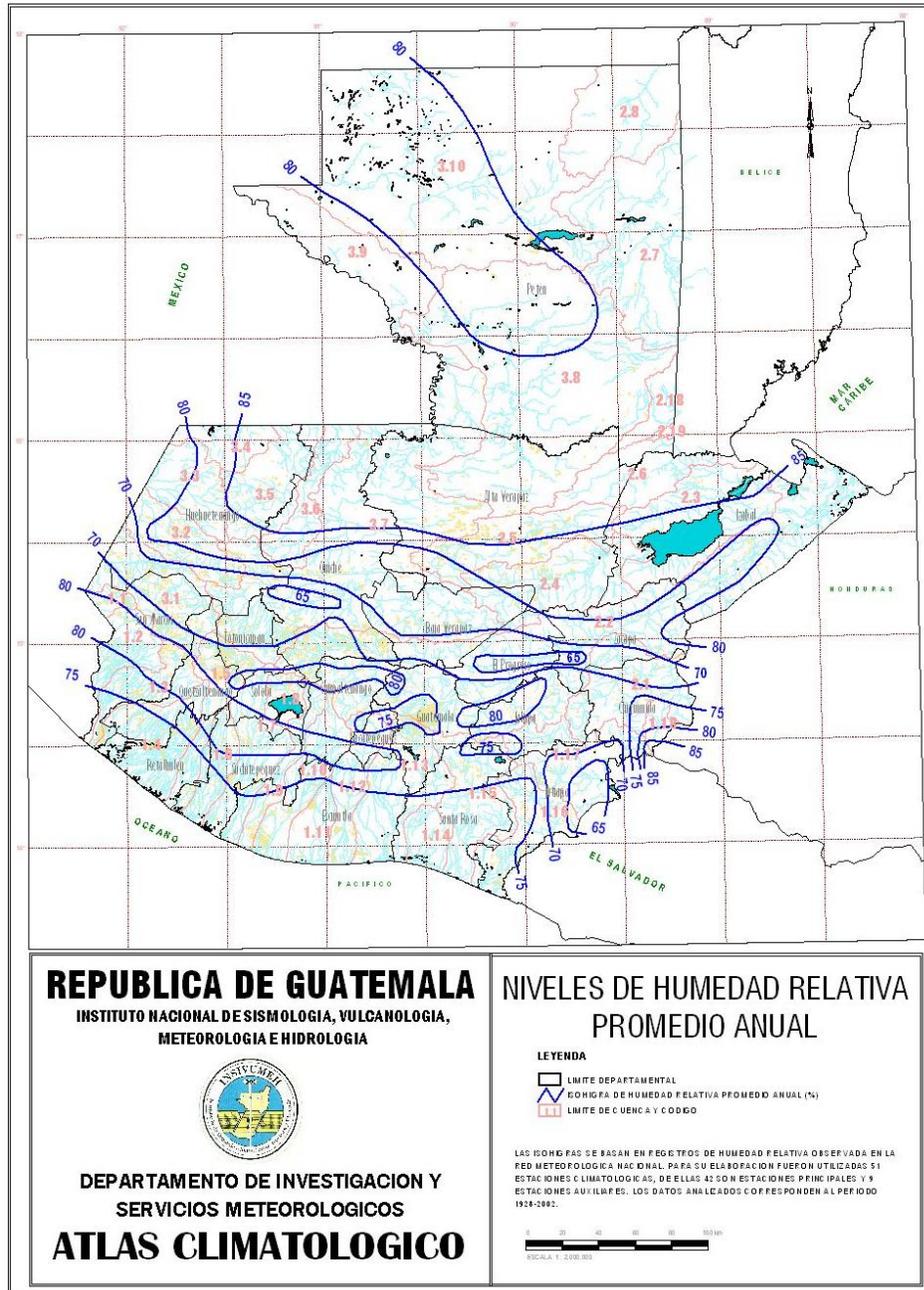
Fuentes: Insivumeh. *Atlas climatológico*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/AtlasClimatologico/t-mx-prom.jpg. Consulta: 14 de mayo de 2015.

Anexo 2. **Mapa nivel isoceráunico Guatemala**



Fuentes: Insivumeh. *Atlas climatológico*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/AtlasClimatologico/t-mx-prom.jpg. Consulta: 14 de mayo de 2015.

Anexo 3. **Mapa humedad relativa Guatemala**



Fuentes: Insivumeh. *Atlas climatológico*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/AtlasClimatologico/t-mx-prom.jpg. Consulta: 14 de mayo de 2015.

