

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

**CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES 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.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

KLÉBER SEBASTIÁN VÁSQUEZ OCAÑA

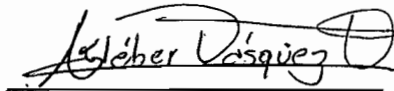
DIRECTOR: ING. LUIS RUALES

Quito, Diciembre, 2003

DECLARACIÓN

Yo, Kléber Sebastián Vásquez Ocaña, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

A handwritten signature in black ink, reading 'Kléber Vásquez', with a stylized flourish at the end. The signature is written over a horizontal line.

Kléber Vásquez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Kléber Sebastián Vásquez Ocaña, bajo mi supervisión.



ING. LUIS RUALES
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Luis Ruales, director del proyecto, quien con su dirección y ayuda hizo posible la culminación de este proyecto.

A la Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica, TRANSELECTRIC S.A., y en especial a la Área de Planificación y Estudios.

A la Escuela Politécnica Nacional por haberme acogido en sus aulas.

A mis profesores y a mis compañeros de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

DEDICATORIA

A Segundo Gabriel y María del Carmen, mis padres, quienes con su constante dedicación, apoyo, cariño y sobretodo amor, me encaminaron por el sendero del bien, inculcando en mí la responsabilidad y el deseo de superación.

CONTENIDO

CONTENIDO	1
RESUMEN	4
PRESENTACIÓN	6
CAPÍTULO I	7
1.1 ANTECEDENTES.....	7
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 ALCANCE	9
CAPÍTULO II	10
2. DEFINICIONES GENERALES	10
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	10
2.1.1 MECANISMO DE LA DESCARGA.....	10
2.1.2 REPRESENTACIÓN DE UNA DESCARGA.....	12
2.1.3 PARÁMETROS DEL RAYO.....	13
2.1.4 DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA.....	15
2.2 EL MODELO ELECTROGEOMÉTRICO.....	16
2.2.1 LOCALIZACIÓN DE LA DESCARGA.....	18
2.2.1.1 Descargas directas al cable de guarda o a la torre.....	18
2.2.1.2 Descargas directas al conductor de fase.....	19
2.2.1.3 Descargas indirectas.....	20
2.3 TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	20
2.3.1 ONDAS VIAJERAS	20
2.3.2 IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA Y VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN.....	22
2.3.3 PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA.....	24
2.3.4 REFLEXIONES.....	25
2.4 RESPUESTA DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN A UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	26
2.4.2 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.....	27

2.4.3 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DEL VOLTAGE EN EL TOPE DE LA TORRE DE TRANSMISIÓN	28
2.4.4 ECUACIONES DE ONDA VIAJERA PARA EL VOLTAGE EN LA CRUCETA O EN CUALQUIER PUNTO DE LA TORRE	31
CAPÍTULO III.....	33
3. MODELOS UTILIZADOS EN EL ATP PARA EL CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ORIGINADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRECTAS.	33
3.1 EL PROGRAMA ATP	33
3.1.1 ESTRUCTURA DE ENTRADA DE DATOS.....	35
3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS.....	36
3.2.1 CORRIENTE DEL RAYO (FUENTE DE CORRIENTE DE HEIDLER).....	36
3.2.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN	38
3.2.2.1 El Modelo Jmarti	39
3.2.2.1.1 Descripción del modelo	39
3.2.2.1.2 Datos para la implementación del modelo JMartí Setup	41
3.2.3 TORRE DE TRANSMISIÓN.....	45
3.2.4 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE (RESISTENCIA NO LINEAL TYPE 99).....	46
3.2.4 CADENA DE AISLADORES (INTERRUPTORES CONTROLADOS POR VOLTAGE).....	46
3.2.5 PARARRAYOS (RESISTENCIA NO LINEAL "TYPE 92")	47
4. DATOS E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	49
4.1 CORRIENTE DEL RAYO	49
4.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN	52
4.3 TORRE DE TRANSMISIÓN	55
4.4 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.....	56
4.6 CADENA DE AISLADORES.....	58
4.7 PARARRAYOS.....	60
4.8 FUENTE TRIFÁSICA.....	61
4.9 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	62

CAPITULO V	65
5. SIMULACIÓN DIGITAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
5.1 SOBREVOLTAJES PRODUCIDOS POR DESCARGAS	
ATMOSFÉRICAS DIRECTAS.	65
5.1.1 DESCARGA EN LA TORRE DE TRANSMISIÓN.....	66
5.1.1.1 Descarga en el cable de guarda o en la torre.....	66
5.1.1.2 Descarga en el conductor de fase.....	69
5.1.2 DESCARGA EN LA MITAD DEL VANO.....	71
5.2 ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD	73
5.2.1 SENSITIVIDAD DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE DEL RAYO	73
5.2.2 SENSITIVIDAD DEL FRENTE DE ONDA.....	76
5.2.3 SENSITIVIDAD TIEMPO DE COLA.....	77
5.2.4 SENSITIVIDAD DE LA RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.....	79
5.3 APLICACIÓN A LA LÍNEA SANTA ROSA POMASQUI	81
5.3.1 TRAMO GENERAL.....	81
5.3.2 TORRE DE MENOR RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.....	83
5.3.2 TORRE CON MAYOR RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.....	84
5.3.3 TORRE MÁS PRÓXIMA A LA SUBESTACIÓN	85
5.3.4 TRAMO CONSTRUIDO SOBRE LOS 4000 METROS DE ALTURA.....	85
5.3.4 FALLA DEL APANTALLAMIENTO.....	86
5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	87
5.4.1 DESCARGA EN EL CABLE DE GUARDA.....	87
5.4.2 DESCARGA EN EL CONDUCTOR DE FASE.....	91
5.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	97
5.5.1 CONCLUSIONES	97
5.5.2 RECOMENDACIONES	100
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXO 1.....	105
ANEXO 2.....	107

RESUMEN

Los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas son la principal causa de salida de operación de las líneas de transmisión y distribución de energía, por lo que conocer las magnitudes de estos sobrevoltajes constituye una tarea fundamental en la etapa de diseño de líneas de transmisión. En el presente proyecto se determinan los valores de las magnitudes de los sobrevoltajes ocasionados por descargas atmosféricas directas a la línea de transmisión, para lo cual se ha implementado un modelo en el programa de transitorios electromagnéticos ATP y las magnitudes de los sobrevoltajes se obtienen mediante simulaciones digitales en dicho programa. El ATP constituye uno de los programas digitales más ampliamente utilizado a nivel mundial para el análisis de transitorios electromagnéticos en los sistemas eléctricos de potencia.

Para la implementación del modelo se han utilizado los distintos componentes existentes en el ATP, de tal forma que cada elemento utilizado pueda representar lo más cercanamente posible al fenómeno a simularse, así como también al sistema de potencia a analizarse. Los valores de las magnitudes que caracterizan a los componentes del sistema a implementarse han sido tomados de referencias especializadas en el tema.

El modelo implementado en ATP permite simular los efectos provocados por una descarga atmosférica directa en una línea de transmisión. Las simulaciones se realizan para los casos en que la descarga impacta al cable de guarda y cuando existe una falla del apantallamiento y, por consiguiente, la descarga impacta en el conductor de fase. También se realiza un estudio de sensibilidad mediante el cual se determinan los parámetros de mayor influencia en los valores máximos de los sobrevoltajes producidos por dicho fenómeno.

Finalmente, el modelo es aplicado a ciertos tramos de la línea Santa Rosa Pomasqui, en donde se determinan las características de aquellas descargas

atmosféricas que de presentarse pueden provocar una falla del aislamiento y la consiguiente salida de operación de la línea.

Resulta necesario expresar que para la elaboración del modelo, se tomó configuraciones típicas de las utilizadas para la construcción de una línea de 230 kV. de doble circuito para alturas superiores a los 1000 m, por lo que el modelo puede ser aplicado a cualquier otra línea similar construida o por construirse. En todo caso los valores presentados este trabajo pueden ser tomados como referencia para nuevos estudios de mayor profundidad o relacionados al tema.

PRESENTACIÓN

El estudio de los fenómenos de tipo transitorio en los sistemas eléctricos de potencia constituyen un aspecto de extrema importancia en lo que al diseño y operación de los sistemas de potencia se refiere. Uno de los fenómenos transitorios que a menudo se presentan en un sistema de potencia son las descargas de origen atmosférico. Determinar, de forma directa, los efectos de este tipo de fenómenos en los sistemas eléctricos en análisis resulta una tarea complicada y costosa, por lo que se ha tenido que recurrir a modelos a escala o a simulaciones digitales que puedan representar dichos fenómenos.

El desarrollo informático permite contar en la actualidad con programas digitales especializados que proporcionan respuestas en los distintos campos de la ingeniería eléctrica. Uno de estos programas y el de mayor difusión a nivel mundial, en lo que al análisis de transitorios electromagnéticos se refiere, es el programa de transitorios electromagnéticos ATP (EMTP/ATP). Este programa permite representar los sistemas de potencia y los distintos eventos de tipo transitorio que en estos puedan presentarse.

En este proyecto se presenta un estudio del comportamiento de una línea de transmisión frente a descargas atmosféricas, para esto se implementa un modelo en ATP y se realizan las simulaciones digitales por medio de las cuales se obtienen las magnitudes y características de los sobrevoltajes ocasionados por descargas atmosféricas directas.

CAPÍTULO I

1.1 ANTECEDENTES

Los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas son la principal causa de fallas y averías en líneas de transmisión y distribución de energía. Determinar con cierto grado de exactitud la magnitud de los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas resulta una necesidad imperiosa primero en el diseño y luego en la operación de líneas de transmisión.

Estos voltajes se pueden obtener por medio de la medición directa en sistemas reales o mediante simulaciones del sistema de potencia. Anteriormente las simulaciones se realizaban en los conocidos TNA (Analizador Transitorio de Redes) que consistían en la interconexión de elementos eléctricos, que permitan representar a escala el sistema de potencia y el fenómeno transitorio en estudio.

Posteriormente, con el desarrollo de computadoras digitales se elaboraron programas computacionales con el fin de simular los fenómenos transitorios de manera digital. Uno de los programas computacionales de mayor utilización a nivel mundial, para la simulación de estos fenómenos es el ATP o EMTP (Alternative Transients Program o ElectroMagnetic Transients Program) el cual permite realizar simulaciones del comportamiento de los distintos componentes de un sistema eléctrico y de los fenómenos de tipo transitorio que en estos se presentan.

Las descargas atmosféricas y el comportamiento de las líneas de transmisión frente a estas, pueden ser simuladas en el ATP utilizando los modelos eléctricos y funciones disponibles en el mismo.

1.2 OBJETIVOS

La realización del presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

a) Objetivo General

Determinar las magnitudes de los sobrevoltajes que se producen cuando una línea de transmisión es impactada por una descarga atmosférica y la influencia de los distintos parámetros involucrados en estos sobrevoltajes.

b) Objetivos Específicos

- i) Conocer las características y propiedades del programa para análisis de transitorios electromagnéticos, ATP
- ii) Elaborar el modelo para la simulación de descargas atmosféricas en el ATP para líneas de transmisión que permita determinar la magnitud de los sobrevoltajes ocasionados por estas.
- iii) Realizar un análisis de sensibilidad para conocer cuáles de los parámetros involucrados en una descarga atmosférica tienen mayor influencia en los voltajes máximos causados por este fenómeno.
- iv) Aplicar el modelo implementado a la línea de transmisión Santa Rosa Pomasqui y determinar las características de las descargas atmosféricas que pueden presentarse sin causar falla del aislamiento de la línea.

1.3 ALCANCE

El presente proyecto pretende realizar un estudio para calcular los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas directas en Líneas de Transmisión de Energía con la ayuda del programa ATP (Alternative Transients Program) del CAN/AM User Grup utilizando la licencia de uso del programa que posee TRANSELECTRIC S.A.

En este trabajo se implementará el modelo en el programa ATP que permita simular los elementos físicos involucrados cuando sobre una línea de transmisión impacta una descarga atmosférica. Los elementos involucrados serán representados por modelos recomendados por publicaciones especializadas en el tema.

Una vez implementado el modelo, se realizarán simulaciones de tipo general para obtener las magnitudes de los sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas que impacten directamente sobre una línea de transmisión y además se realizará un estudio de sensibilidad que permita determinar aquellos parámetros de mayor influencia en los valores máximos de estos sobrevoltajes.

Finalmente, se utilizará el modelo implementado para realizar simulaciones aplicadas a la línea de transmisión Santa Rosa - Pomasqui, para lo cual, se considerarán tramos específicos de análisis.

CAPÍTULO II

2. DEFINICIONES GENERALES

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Una descarga atmosférica consiste en una descarga eléctrica, en forma de rayo luminoso, desde una nube cargada eléctricamente hacia la tierra o a otra nube. También se puede definir como el rompimiento del aislamiento del aire entre dos superficies cargadas eléctricamente con polaridades opuestas.

Campos eléctricos de alrededor de 1000 V/m están presentes en el centro de la nube, en la cual cargas de aproximadamente 20 culombios se encuentran separadas distancias de 3 km. e indican que la diferencia de potencial entre los centros de carga alcanzan valores de entre los 100 y 1000 MV. La energía disipada en un rayo está en el orden de 1000 a 10000 MJ., de la cual la mayor parte es utilizada en calentar, hasta valores de 15000 °C en unos 10 μ s., una columna vertical que rodea la descarga.

2.1.1 MECANISMO DE LA DESCARGA

La descarga atmosférica se produce por una elevada concentración de cargas eléctricas en el interior de la nube. La figura 2.1 muestra la distribución de cargas y el proceso de la descarga se relata en los siguientes párrafos.

Siguiendo el ciclo natural del agua en la naturaleza, el vapor de agua ascendente llega hasta las nubes en donde las bajas temperaturas producen un cambio de estado de vapor a copos de nieve, los cuales son dipolos eléctricos débiles. Por efecto de la gravedad estos empiezan a descender y chocan con el vapor

ascendente lo cual produce el desprendimiento de cargas positivas que son llevadas a la parte superior de las nubes donde se tiene una temperatura promedio de -20°C . Las cargas negativas se acumulan en la parte inferior de la nube donde se tiene una temperatura de alrededor de -5°C . En la mayoría de nubes de tormenta, existe una acumulación de cargas positivas en la base de la nube donde se tiene una temperatura de 0°C .

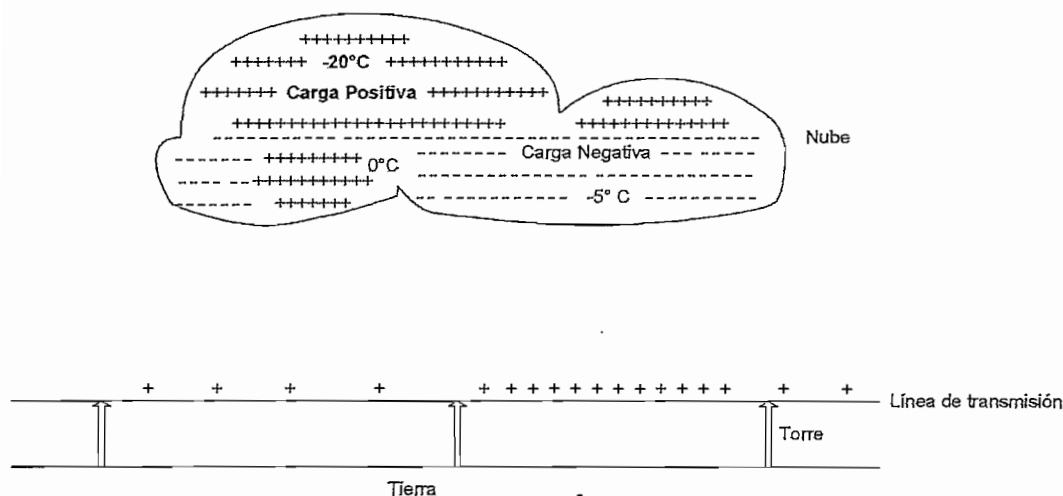


Fig. 2.1: Distribución de cargas en la nube de tormenta

Cuando el campo eléctrico en la vecindad de una de las cargas negativas alcanza valores de alrededor de 10 kV/cm , se forma un canal ionizado que se propaga de la nube a tierra con una velocidad que puede llegar hasta un décimo de la velocidad de la luz. Usualmente este canal es extinguido a una corta distancia de la nube. Unos cuarenta microsegundos después del primer canal se genera un segundo canal que sigue el camino creado por el primero e incrementa la longitud del canal, este canal es también extinguido tiempo después. Este proceso se repite varias veces y cada vez el canal incrementa su longitud. De todos los canales formados, aquel que más se aproxima a la tierra se denomina líder. Cuando el líder está próximo a la tierra, la intensidad del campo eléctrico es suficiente para generar en la tierra canales de cargas positivas ascendentes que cuando ambos canales se encuentran a una distancia suficiente terminan en una descarga atmosférica. El proceso es terminado por una descarga de retorno que puede llevar corrientes de hasta 200 kA ., pero el promedio oscila en 27 kA .

2.1.2 REPRESENTACIÓN DE UNA DESCARGA

Con objeto de plantear un modelo para realizar cálculos y simulaciones se han planteado varias representaciones matemáticas que puedan ajustarse a este fenómeno. Tomando en cuenta el período de la corriente de retorno que es la que interesa, se ha encontrado que la forma de onda de corriente puede representarse por una doble exponencial de la forma:

$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.1)$$

Donde I es el valor pico de la corriente del rayo. Para un tiempo de frente de onda que va entre 0.5 y 10 μs . y un tiempo de cola de onda de 30 a 200 μs .

La forma de onda estandarizada según la norma IEC 60 para pruebas de alto voltaje es 1.2/50 μs . esto es tomando en cuenta las condiciones más extremas. Para este tipo de onda normalizada los coeficientes de α y β de la expresión 2.1 son $\alpha = 1.426 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ y $\beta = 4.877 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ respectivamente [2].

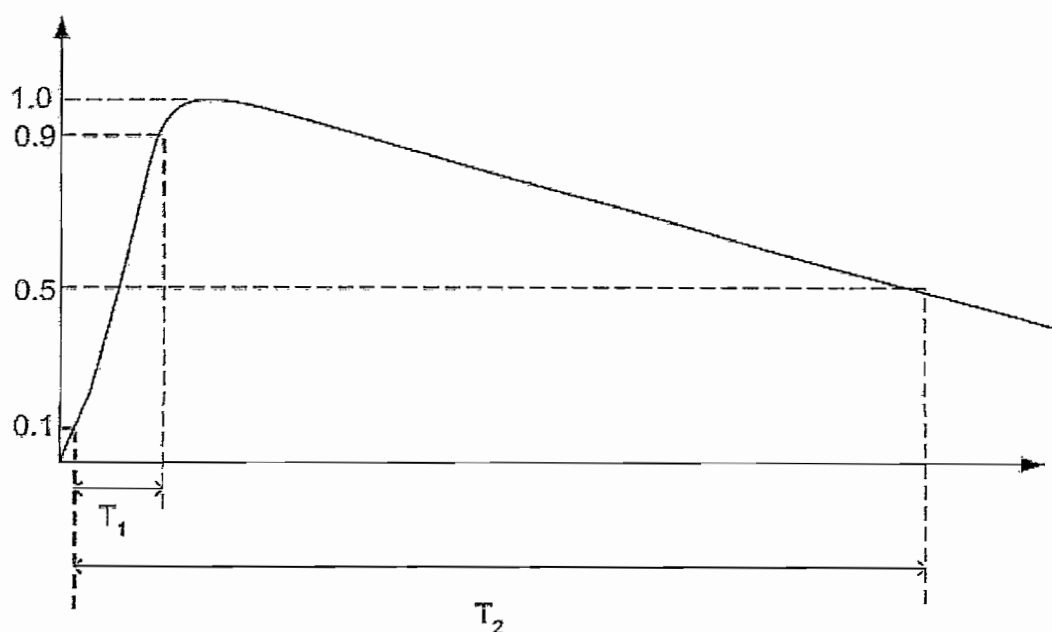


Fig. 2.2: Forma de onda estandarizada para pruebas de alto voltaje

Para una onda estandarizada para pruebas de alto voltaje, figura 2.2, 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 semejarse a una fuente de corriente la cual tendrá una polaridad positiva o negativa conocidas 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.

2.1.3 PARÁMETROS DEL RAYO

Los parámetros considerados para la caracterización de una descarga atmosférica son de tipo aleatorio. La corriente de cresta, el frente de onda, el tiempo de cola y la pendiente responden a un comportamiento aleatorio y según CIGRE (Conseil International des Grands Reseaux Electriques) estos parámetros responden a una distribución logarítmica normal dada por la expresión siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{\left(-\frac{z^2}{2}\right)} \quad (2.2)$$

Donde: $z = \frac{\ln(x/M)}{\sigma}$

M es el valor medio y σ la desviación estándar del parámetro en cuestión. En la tabla 2.1 se muestran los valores medios y la desviación estándar de la figura 2.3 que representa la forma de onda aceptada por CIGRE para una descarga atmosférica [13].

	Primera descarga	
	Valor Medio	Desviación Logarítmica Estándar
FRENTE DE ONDA		
$td_{10/90} = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576
$td_{30/90} = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553
$tm = I_F / S_m$	1.28	0.611
PENDIENTE kA/μs		
S_m , Máxima	24.3	0.599
S_{10} , at 10%	2.6	0.921
$S_{10/90}$, 10-90%	5	0.645
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622
CORRIENTE DE CRESTA, kA		
I_i , inicial	27.7	0.461
I_F , final	31.1	0.484
Inicial/final	0.9	0.23
COLA, tn, μs	77.5	0.577
CARGA, Q1, C	4.65	0.882
$\frac{1}{2} I^2 dt, (kA)^2 s$	0.057	1.373

Tabla 2.1: Parámetros recomendados por CIGRE para una descarga atmosférica

Descripción de los parámetros de la forma de onda de la figura 2.3

I_{10} = 10% del valor pico de la corriente de rayo

I_{30} = 30% del valor pico de la corriente de rayo

I_{90} = 90% del valor pico de la corriente de rayo

$T_{10/90}$ = tiempo entre I_{10} e I_{90}

$T_{30/90}$ = tiempo entre I_{30} e I_{90}

$td_{10/90}$ = Equivalente lineal del frente de onda derivado de $T_{10/90}$

$td_{30/90}$ = Equivalente lineal del frente de onda derivado de $T_{30/90}$

S_m = Pendiente máxima del frente de onda

S_{10} = Pendiente instantánea a I_{10}

$S_{10/90}$ = Pendiente promedio (entre I_{10} e I_{90})

$S_{30/90}$ = Pendiente promedio (entre I_{10} e I_{90})

$Q1$ = Carga de impulso en una descarga.

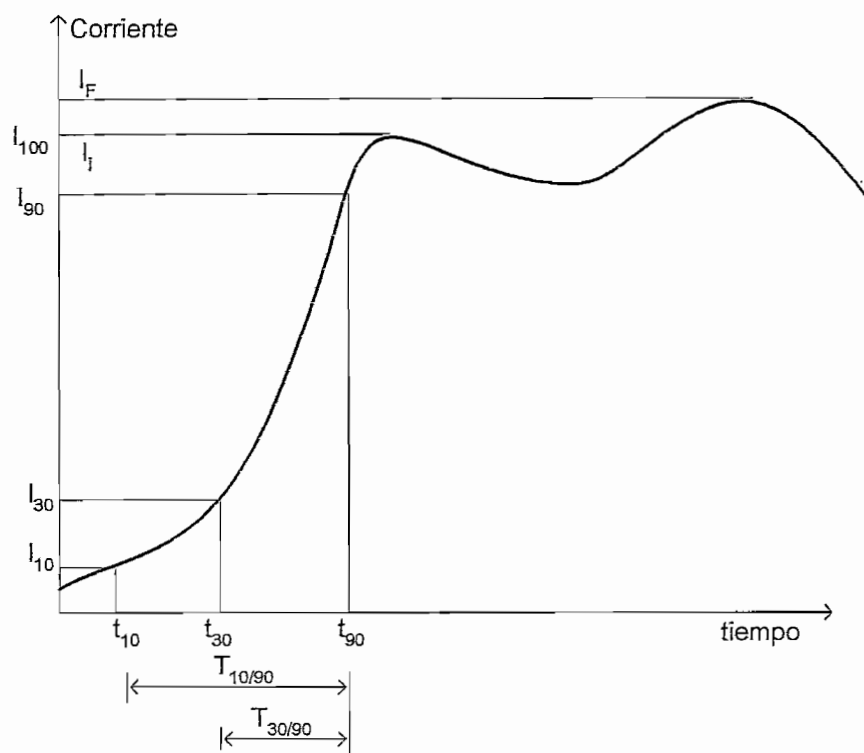


Fig. 2.3 Forma de onda de una descarga atmosférica

2.1.4 DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA

Otro de los parámetros para caracterizar los rayos es la densidad de descargas a tierra (N_g) por km y año, este es un parámetro mal conocido y puede variar con los años y con la región. Un parámetro mejor conocido es el nivel cerámico T_d , es decir, el número de días con tormenta al año.

La relación aceptada por CIGRE e IEEE entre estos dos parámetros es la siguiente:

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (2.3)$$

2.2 EL MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Cuando un rayo se aproxima a la línea o a la tierra a una distancia r denominada distancia de arqueo, el rayo hace impacto ya sea en la línea o en la tierra. La distancia de arqueo es una función de la carga y consecuentemente función de la corriente. La ecuación recomendada por las referencias [12] y [13] para la determinación de la distancia de arqueo es la siguiente:

$$r = 10I^{0.65} \quad (2.4)$$

Donde: r es la distancia de arqueo en metros

I es la corriente del rayo en kA.

En una línea de transmisión la descarga puede impactar en el cable de guarda, en el conductor de fase, en la torre o puede impactar en las proximidades a esta. La figura 2.4 muestra las alternativas antes descritas. En esta figura se puede ver que el apantallamiento no es completo, para un apantallamiento completo $X_s = 0$

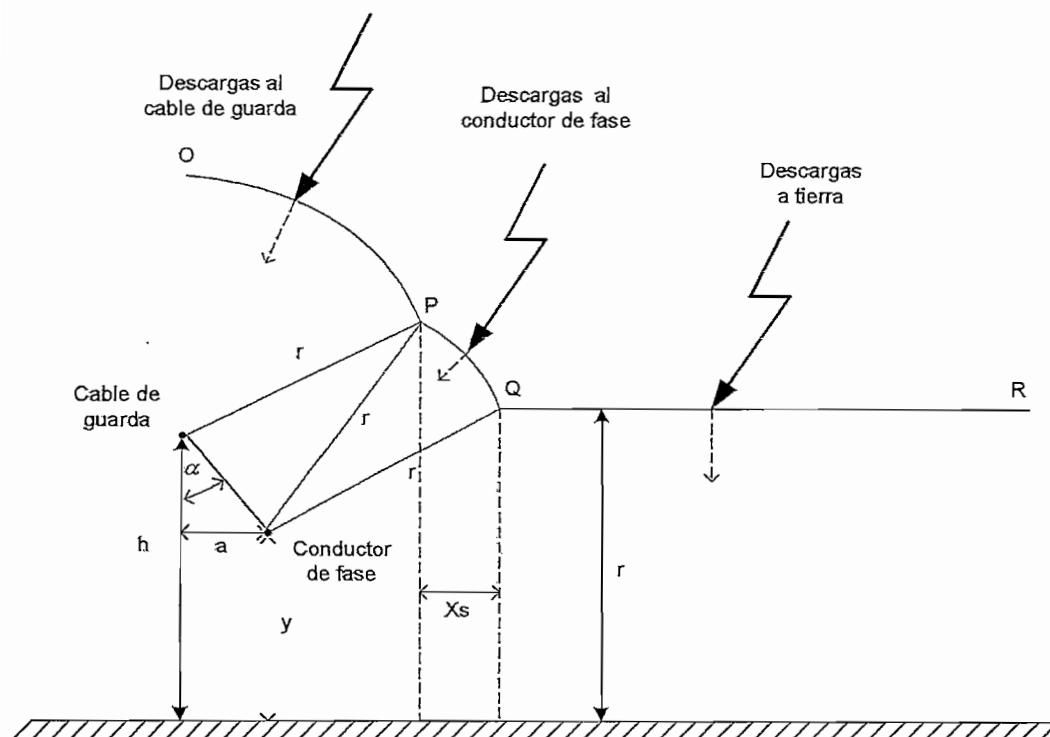


Figura 2.4: Apantallamiento incompleto

El hecho de que una descarga impacte o no en el cable de guarda depende del grado de apantallamiento de la línea de transmisión. En el diseño del apantallamiento o blindaje de líneas de transmisión se considera el ángulo de apantallamiento α que es aquel ángulo que forma la perpendicular trazada desde el cable de guarda a tierra y la recta entre el cable de guarda y el conductor de fase superior. Mientras más pequeño es el ángulo mejor será el blindaje de la línea.

El método electrogeométrico permite determinar la máxima corriente que provoque una falla de apantallamiento. Esta corriente depende de la geometría de la torre por lo que un análisis geométrico puede realizarse para determinar la distancia máxima de arqueo para esta condición y la corriente puede ser determinada con la ecuación 2.4, para esto se considera la figura 2.5.

Del análisis geométrico se obtiene la siguiente expresión:

$$a = \sqrt{h(2r - h)} - \sqrt{y(2r - y)} \quad (2.5)$$

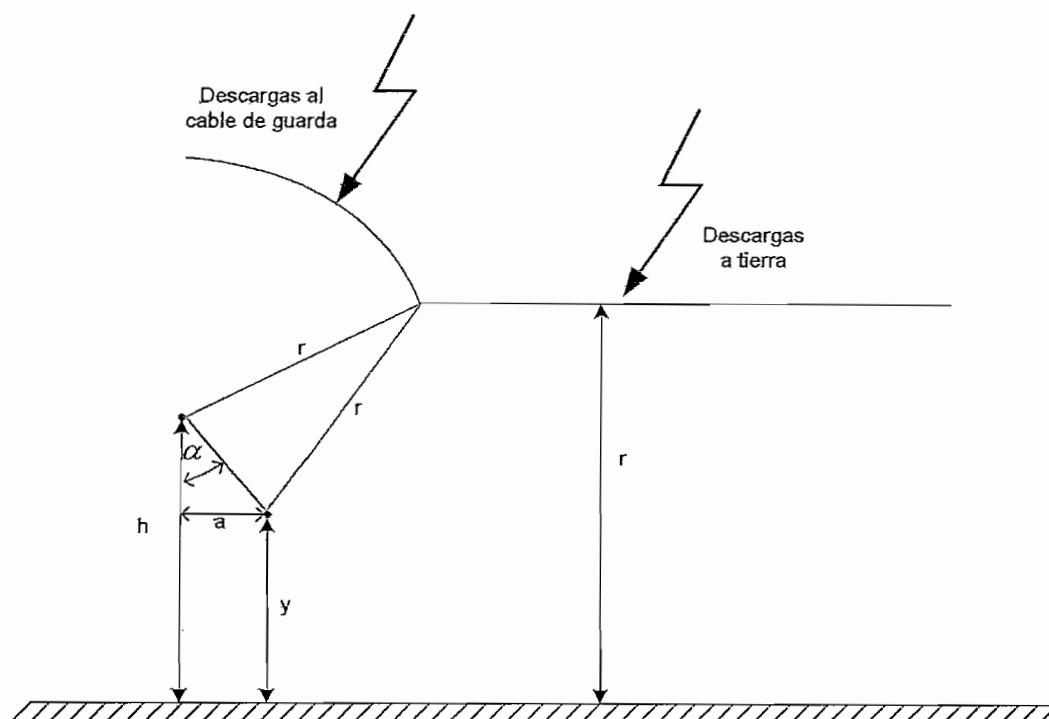


Figura 2.5: Distancia máxima que produce fallo de apantallamiento

Conociendo la geometría de la torre se puede resolver la ecuación 2.5 y conocer la distancia r máxima que provoque un fallo de apantallamiento. Otra expresión que se puede utilizar para determinar este valor es la recomendada por la referencia [1] y es la siguiente:

$$r = \frac{h+y}{2(1-\sin\alpha)} \quad (2.7)$$

Utilizando las expresiones 2.6 ó 2.7 se puede determinar el valor de r y la magnitud de la corriente I se determina con la expresión 2.5.

2.2.1 LOCALIZACIÓN DE LA DESCARGA

2.2.1.1 Descargas directas al cable de guarda o a la torre

Son aquellas descargas que impactan directamente al cable de guarda o a la torre de transmisión. Estas descargas en general presentan altas corrientes y pueden producir una descarga inversa, es decir, contorno de la cadena de aisladores por la diferencia de potencial del cable de guarda o de la torre hacia el conductor de fase.

2.2.1.1.1 Descarga en las torres

Cuando un rayo cae en una torre de transmisión, se establece un proceso de propagación de ondas en el cable de guarda, en las torres adyacentes y en los sistemas de puesta a tierra, como reflexiones de acuerdo a las impedancias características involucradas.

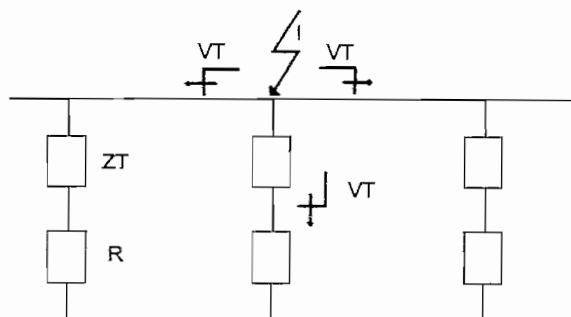


Figura 2.6: Descarga en la torre de transmisión

El voltaje resultante de una descarga atmosférica es determinado por la magnitud de la corriente del rayo y el valor de la impedancia de impulso equivalente vista en ese punto. Este voltaje es modificado por las reflexiones en la resistencia de pie de torre y en las torres adyacentes.

2.2.1.1.2 Descargas en el cable de guarda

La incidencia de rayos en los cables de guarda presenta como característica básica un sobrevoltaje en el punto de incidencia mucho mayor que cuando la descarga es en la torre.

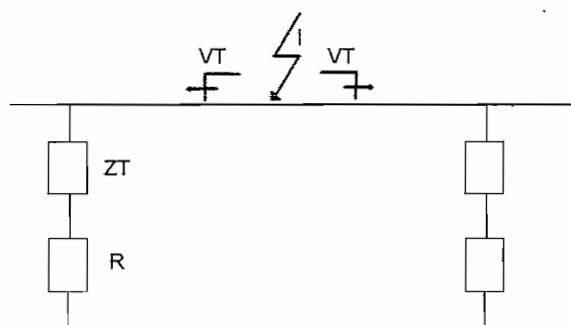


Figura 2.7: Descarga en el cable de guarda en la mitad del vano

El rayo puede caer en cualquier punto del vano y el voltaje dependerá de la relación entre las distancias desde el punto de incidencia y las torres más próximas, siendo la descarga en la mitad del vano aquella que producirá el mayor valor de voltaje.

2.2.1.2 Descargas directas al conductor de fase

Son aquellas descargas que impactan directamente al conductor de fase y son debidas a falla del apantallamiento. En general estas descargas presentan una corriente del rayo de baja intensidad pero que pueden producir falla del aislamiento y por lo tanto contorneo en la línea. A través del modelo electrogeométrico se puede conocer la magnitud de la corriente máxima que puede provocar falla en el apantallamiento.

2.2.1.3 Descargas indirectas

Son aquellas que se producen en las proximidades de la línea de transmisión. Dadas las dimensiones de las líneas de transmisión y el nivel de aislamiento de estas, los sobrevoltajes inducidos por una descarga indirecta no provoca contorno en ningún sentido. Una descarga indirecta se considera de importancia en distribución y subtransmisión.

2.3 TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

Las descargas directas debido a rayos, descargas indirectas, operaciones de maniobra o fallas inducen altos voltajes en las líneas de transmisión aérea. Estos sobrevoltajes pueden ser descritos como ondas que viajan a través de la línea a la velocidad de la luz.

2.3.1 ONDAS VIAJERAS

En la solución exacta de una línea de transmisión se debe considerar líneas con parámetro distribuidos, es decir, que los valores de corriente y voltaje varían con la longitud de la línea desde un extremo emisor hasta un extremo receptor.

La figura 2.8 muestra el circuito equivalente para la obtención de las ecuaciones de Líneas de transmisión, según la teoría de ondas viajeras, y las ecuaciones de voltaje y corriente pueden escribirse como [1]:

$$V(x + \Delta x, t) = V(x, t) - L\Delta x \frac{\partial I(x + \Delta x, t)}{\partial t} - R\Delta x I(x + \Delta x, t) \quad (2.8)$$

$$I(x + \Delta x, t) = I(x, t) - C\Delta x \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} - R\Delta x V(x, t) \quad (2.9)$$

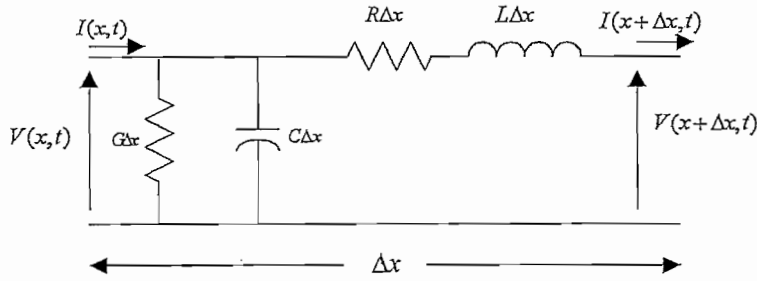


Fig. 2.7 : Línea con parámetros distribuidos

Trabajando sobre las ecuaciones 2.8 y 2.9 puede llegar a demostrarse que:

$$\frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial x^2} = RGV(x, t) + (LG - RC) \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial x^2} = RGI(x, t) + (LG + RC) \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

Las ecuaciones anteriores se conocen como ecuaciones de onda viajera de una línea de transmisión.

Si se considera una línea de transmisión sin pérdidas entonces las ecuaciones se reducen a:

$$\frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

Es usual sustituir $LC = 1/a^2$ donde a tiene las dimensiones de velocidad y las expresiones anteriores resultan:

$$a^2 \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$a^2 \frac{\partial^2 I(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 I(x,t)}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

La solución general para el voltaje de la ecuación de derivadas parciales de segundo orden puede ser escrita en forma de dos funciones arbitrarias de la siguiente manera:

$$V(x,t) = f_1(x-at) + f_2(x+at) \quad (2.16)$$

La solución anterior expresa la ocurrencia simultánea de dos eventos a los dos lados de la línea de transmisión. Similar expresión se obtiene también para la corriente.

2.3.2 IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA Y VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN.

Considerando la onda $V = f_1(x-at)$. La onda de corriente I puede ser determinada de la siguiente ecuación[2]:

$$L \frac{\partial I}{\partial t} = - \frac{\partial V}{\partial x} = -f_1'(x-at)$$

$$I = \frac{1}{aL} f(x-at) = \frac{1}{aL} V = \sqrt{\frac{C}{L}} V$$

$$V = \sqrt{\frac{L}{C}} I = ZI \quad (2.17)$$

Donde: $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Z es conocida como la impedancia característica o de impulso de la línea de transmisión. El impulso de corriente I que viaja a través de la línea va acompañado por un impulso de voltaje $V = ZI$ viajando en la misma dirección.

Para $V = f_2(x+at)$, el impulso de corriente I está asociado con un impulso de voltaje $V = -ZI$.

Para una línea de transmisión, con conductor de radio r y espaciamento entre conductores d , la inductancia por unidad de longitud está dada por:

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \left[\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{d}{r} \right] \text{ H/m} \quad (2.18)$$

La concatenación de flujo interno es pequeño y si esta se desprecia se tiene:

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d}{r} \quad \text{H/m} \quad (2.19)$$

Por otro lado la capacitancia por unidad de longitud está dada por:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o\epsilon_r}{\ln \frac{d}{r}} \quad (2.20)$$

Para el aire $\epsilon_r = 1$

Por lo tanto $LC = \mu_o\epsilon_o = \frac{1}{a^2}$

Pero $\frac{1}{\sqrt{\mu_o\epsilon_o}} = \text{velocidad de la luz}$

Donde $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ (permeabilidad del espacio libre)

$\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (permisividad del espacio libre)

La expresión anterior muestra que la velocidad a la que se propaga una onda viajera es la velocidad de la luz. En realidad la velocidad es un poco menor a la de

la luz debido a la presencia de la resistencia de la línea que disminuye la velocidad en alrededor del 5 al 10%.

2.3.3 PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA.

Para el análisis de transitorios en líneas de transmisión son de importancia la impedancia característica y el factor de propagación que de forma general están dados por las expresiones:

$$Z(w) = \sqrt{\frac{R' + jwL'}{G' + jwC'}} \quad (2.21)$$

$$A(w) = e^{\gamma l} \quad (2.22)$$

El exponente γ se denomina constante de propagación y está dado por:

$$\gamma = \sqrt{(R' + jwL')(G' + jwC')} \quad (2.23)$$

R' , L' , G' , C' son magnitudes por kilómetro. Tanto Z_c y γ son complejos y dependientes de la frecuencia, la cual juega un papel importante en la determinación de estos parámetros. La constante de propagación también se puede expresar por:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.24)$$

A la parte real de la constante de propagación α se conoce como constante de atenuación y se mide nepers por unidad de longitud. La parte en cuadratura β se conoce como constante de fase y se mide en radianes por unidad de longitud.

Las expresiones anteriores muestran la dependencia de los parámetros que caracterizan a una línea de transmisión de la frecuencia y puesto que los

fenómenos transitorios son de alta frecuencia, para su análisis se debe tener en cuenta que los modelos para la determinación de los parámetros sean dependientes de la frecuencia o tratarlos como parámetros constantes pero calculados a la frecuencia del fenómeno en análisis.

2.3.4 REFLEXIONES

Una discontinuidad en los parámetros de un circuito o un cambio en las constantes del circuito producen ondas reflejadas o transitorias. En un sistema eléctrico real, con una serie de líneas interconectadas y con muchos terminales, el estudio de ondas viajeras se vuelve muy complejo. Los valores de los voltajes que se producen dependen directamente de las impedancias características de los componentes involucrados.

Cuando una onda viajera alcanza una juntura, una parte de la onda incidente es reflejada hacia atrás, mientras que la otra es transmitida hacia la juntura. La ondas incidente, reflejada y transmitida se forman de acuerdo a la Ley de Kirchhoff y deben satisfacer con las ecuaciones diferenciales de la línea de transmisión.

Los voltajes se ven modificados en su forma y en su valor pico por las relaciones entre las impedancias características que encuentra una onda de impulso viajera.

Para una onda viajera de voltaje se tienen los siguientes operadores:

Operador de transmisión

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.25)$$

Operador de reflexión

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.26)$$

Mientras que para una onda de corriente;

Operador de transmisión

$$\alpha = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.27)$$

Operador de reflexión

$$\beta = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.28)$$

2.4 RESPUESTA DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN A UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA

2.4.1 IMPEDANCIA DE IMPULSO DE LA TORRE

La impedancia de impulso de las torres de una línea de transmisión varía a lo largo de la torre y con el tiempo por lo que depende de los detalles de la estructura. La torre puede ser representada como una línea de transmisión monofásica con una impedancia de impulso y una velocidad de propagación de onda igual a la de la luz. Valores característicos de la impedancia de una torre de transmisión está entre 100 y 300 ohmios.

Son varios los modelos que se han propuesto para determinar la impedancia de impulso de las torres de transmisión [11]. Wagner y Hileman propusieron un modelo cilíndrico que indica que la impedancia de la torre varía de igual forma que varía la onda viajera del tope a la base de la torre. Sargent y Darveniza prefieren un modelo cónico el cual proporciona una impedancia constante para la torre de transmisión. Los dos modelos son derivados para descargas verticales en el tope de la torre.

La impedancia de impulso para descargas verticales está dada por:

Modelo Cónico

$$Z_t = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) \quad (2.28)$$

Modelo cilíndrico

$$Z_t = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) \quad (2.29)$$

Donde: h es la altura de la torre en metros.

r es el radio de la base de torre en metros.

t es el tiempo en que tarda la onda de corriente en alcanzar el tope de la torre en segundos.

c es la velocidad de la luz, 3×10^8 m/s.

2.4.2 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

El valor pico de sobrevoltaje que aparece sobre la torre está principalmente determinado por la impedancia de pie de torre aparente en el momento de la descarga, debido a que la reflexión de la base de la torre puede llegar mucho más rápido al tope de la torre que las reflexiones de las torres adyacentes. La influencia de la resistencia de pie de torre aparente sobre el voltaje en el tope de la torre es determinada por su respuesta que depende de la corriente y el tiempo. La respuesta del tiempo es importante solo cuando los contrapesos instalados superan los 30 metros de longitud de la base de la torre. La respuesta del tiempo es generalmente despreciada y la impedancia es determinada por su dependencia de la corriente por la siguiente expresión[10]:

$$R_T = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{Ig}}} \quad (2.30)$$

Donde : R_o es la resistencia de pie de torre a baja corriente y baja frecuencia, Ω

R_T es la resistencia de puesta a tierra, Ω

I_g es la corriente limitante para inicializar una ionización suficiente del suelo.

I es la corriente del rayo a través de la resistencia de pie de torre.

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

$$I_g = \frac{E_o * \rho}{2\pi R_o^2} \quad (2.31)$$

Donde: ρ es la resistividad del suelo, Ωm .

E_o Gradiente de ionización del suelo (300 kV/m).

2.4.3 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DEL VOLTAJE EN EL TOPE DE LA TORRE DE TRANSMISIÓN

El circuito equivalente para la obtención del voltaje de la torre de transmisión se muestra en la figura 2.8 [12]. Se definen los siguientes componentes:

$Z_s / 2$ Impedancia característica combinada del cable de guarda.

Z_T Impedancia característica de la torre de transmisión

R Resistencia de pie de torre

$I(t)$ Corriente del rayo

$V_T(t)$ Voltaje en el tope de la torre en el instante t

ζ_T Tiempo que tarda la onda viajera de corriente en ir del tope de la torre a la base.

$V_R(t)$ Voltaje en la resistencia de pie de torre.

ζ_P Tiempo que tarda la onda viajera de corriente en ir del tope de la torre a una cruceta de la torre.

$V_P(t)$ Voltaje de la cruceta a tierra

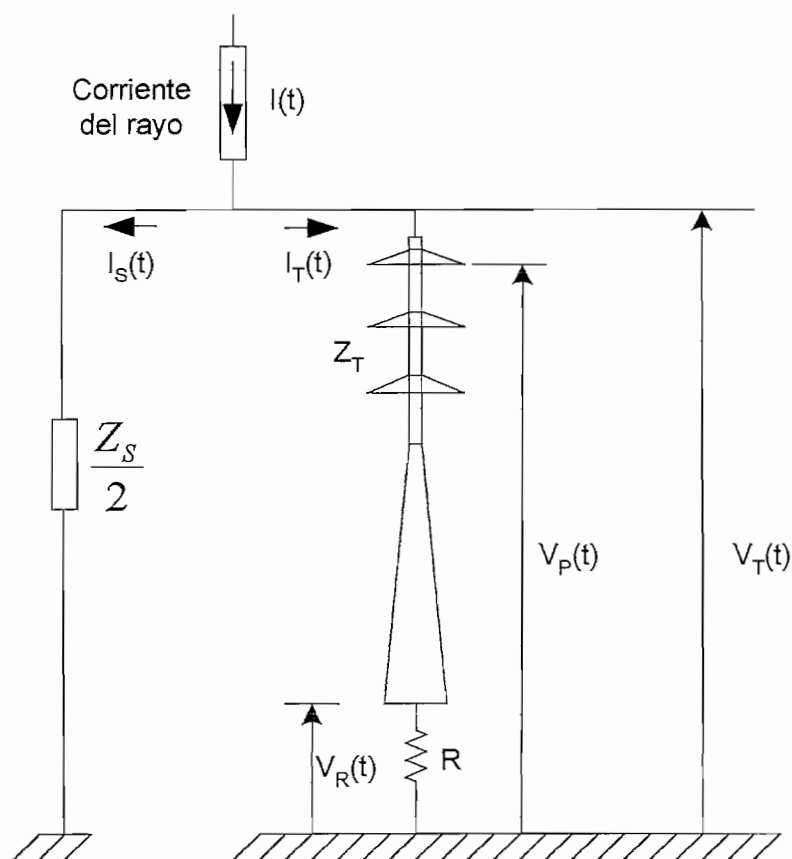


Fig. 2.8 : Descarga en una torre de transmisión

Antes de presentar la ecuación del voltaje en el tope de la torre se deben definir los operadores de reflexión y transmisión en el tope y la base de la torre. Los operadores son los siguientes:

$$\beta_R = \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \quad \beta_S = \frac{2Z_T - Z_S}{2Z_T + Z_S} \quad \alpha_T = \frac{4Z_T}{Z_S + 2Z_T}$$

Donde:

β_R Es la porción de corriente viajera descendente que es reflejada de la base al tope de la torre.

β_s Es la porción de corriente viajera ascendente que es reflejada del tope a la base de la torre.

α_T Es la porción de corriente viajera ascendente que es transmitida desde el tope de la torre a los cables de guarda.

Es necesario también definir una impedancia intrínseca Z_I que es la impedancia que ve la onda de corriente al alcanzar el tope de la torre. Esta impedancia esta dada por el paralelo de la impedancia del cable de guarda y la impedancia característica de la torre de transmisión:

$$Z_I = \frac{Z_s Z_T}{Z_s + 2Z_T}$$

También se debe definir el operador de transmisión de la corriente del rayo dado por:

$$\delta_T = \frac{Z_s}{Z_s + 2Z_T}$$

δ_T es la porción de la corriente del rayo que entra al tope de la torre y empieza su viaje hacia la base de la torre, la otra parte de la corriente viaja hacia los cables de guarda.

Se puede llegar demostrar que el voltaje en el tope de la torre está dado por la siguiente expresión:

$$V_T(t) = Z_I I(t) - \frac{Z_s}{2} \delta_T \beta_R \alpha_T \sum_{n=1}^N I(t - 2n\tau_T) (\beta_R \beta_s) n^{n-1} \quad (2.32)$$

$\frac{Z_s}{2} \delta_T \beta_R \alpha_T$ tiene las dimensiones de impedancia y puede ser reemplazada por Z_w denominada impedancia de onda. También se puede definir el factor de amortiguamiento ψ dado por:

$$\psi = \beta_R \beta_T$$

Con estas observaciones la ecuación del voltaje en el tope de la torre está dada por:

$$V_T(t) = Z_I I(t) - Z_W \sum_{n=1}^N I(t - 2n\tau_T) \psi^{n-1} \quad (2.33)$$

Donde N es el mayor entero que cumpla con: $N \leq \frac{t}{2\tau_T}$

2.4.4 ECUACIONES DE ONDA VIAJERA PARA EL VOLTAJE EN LA CRUCETA O EN CUALQUIER PUNTO DE LA TORRE

En el numeral anterior se determinó la ecuación para el voltaje en el tope de la torre. Para determinar el voltaje que debe soportar la cadena de aisladores en una descarga atmosférica debe determinarse el voltaje en la parte terminal de la cruceta. Con este propósito se definen los siguientes operadores de reflexión:

$$\bar{\beta}_R = \frac{R - Z_T}{R + Z_T}$$

$$\bar{\beta}_S = \frac{Z_S - 2Z_T}{Z_S + 2Z_T}$$

También debe definirse el operador de transmisión, α_R , que es la porción de la onda viajera descendente que aparece frente a la resistencia de pie de torre

$$\alpha_R = \frac{2R}{Z_T + R}$$

El voltaje en la resistencia de pie de torre al tiempo $(t + \tau_T)$ viene dado por:

$$V_R(t + \tau_T) = \alpha_R Z_I \sum_{n=0}^N I(t - 2n\tau_T) \psi^n \quad (2.34)$$

Donde: $Z_I = \frac{Z_S Z_T}{Z_S + 2Z_T}$

$$\psi = \alpha \beta$$

El voltaje $V_{pn}(t)$ para cualquier cruceta n puede ser encontrado por la interpolación:

$$V_{pn}(t + \tau_{pn}) = V_R(t + \tau_T) + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_t} [V_T(t) - V_R(t + \tau_T)] \quad (2.35)$$

Donde τ_{pn} es el tiempo de propagación del tope de la torre a la cruceta n .

Este tiempo puede calcularse como la distancia del tope de la torre a la cruceta n dividido para 300.

Como se puede ver las ecuaciones para calcular los voltajes producidos en una torre de transmisión tienen un cierto grado de complejidad debido a la cantidad de reflexiones en la torre de transmisión, por lo que para su cálculo se deben utilizar programas digitales especializados.

CAPÍTULO III

3. MODELOS UTILIZADOS EN EL ATP PARA EL CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ORIGINADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRECTAS.

3.1 EL PROGRAMA ATP

El ATP (Alternative Transient Program) o EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) es el programa más extensamente utilizado en el mundo para la simulación de transitorios electromagnéticos, electromecánicos y sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia. Es un programa que nació como una alternativa a los simuladores analógicos TNA (Transient Network Analyzer), desarrollado por la Bonneville Power Administration. [17]

Los estudios que involucran la utilización del EMTP/ATP se encuadran en dos aspectos principales: el diseño y la solución de problemas de operación. Los casos típicos de estudio son:

- Transitorios de maniobra
- Impulsos atmosféricos
- Coordinación de la aislamiento
- Solicitaciones torsionales de ejes (por analogía electro-mecánica)
- Sistemas de alta tensión en corriente continua (hvdc)
- Compensadores estáticos
- Ferroresonancia
- Análisis armónico
- Arranque de motores
- Sistemas de control en general
- Análisis de sistemas desbalanceados

El usuario define el sistema a ser simulado interconectando los distintos componentes que constituyen el modelo del sistema. Los tipos de componentes que pueden ser utilizados son:

- Resistencias, capacitancias e inductancias concentradas.
- Modelos para representar líneas aéreas o cables.
- Modelos para representación de transformadores.
- Inductancias y Resistencias no lineales para simulación de descargadores de sobrevoltajes (pararrayos).
- Interruptores, diodos, tiristores, etc.
- Fuentes ideales de corriente y tensión.
- Máquinas sincrónicas.
- Modelo de máquina universal.
- Sistemas de control.

El ATP utiliza un programa auxiliar para el pre-procesamiento de datos denominado ATPDraw, el cual permite ensamblar los distintos componentes del sistema en un ambiente gráfico. La utilización del ATPDraw facilita y ahorra la elaboración de los archivos en formato ATP.

Como un paso previo a la simulación digital se debe especificar el intervalo de tiempo para el cálculo (paso de integración) y el tiempo máximo de simulación, estos parámetros pueden ser definidos en la opción ATPDraw settings. Las variables de salida pueden ser señales de corriente, voltaje, potencia y energía.

Una vez que el usuario tiene armado el sistema a simularse, con los datos de entrada adecuados en cada uno de los componentes del sistema, se puede proceder a generar un archivo en formato ATP desde el ATPDraw.

El paso siguiente es la ejecución de la simulación que también puede realizarse desde el ATPDraw. Los resultados de la simulación son presentados en archivos con extensión LIS y PL4. El archivo LIS presenta los resultados en un archivo de

texto, mientras que el archivo PL4 presenta la simulación en forma gráfica para lo cual se necesita del programa auxiliar PlotXY.

3.1.1 ESTRUCTURA DE ENTRADA DE DATOS

La entrada de datos se realiza con un archivo donde en cierto orden se registran los datos, algunos son opcionales y pueden no ser incluidos. Este archivo puede ser generado por el ATPDraw o puede elaborarse manualmente.

La organización del archivo es la siguiente:

(1) - Datos generales

(1.1) - Inicio de un nuevo caso de estudio (Begin new data case)

(1.2 opcional) - Requerimientos especiales, funciones auxiliares - transformador, constantes de línea, etc. - instrucciones particulares - frequency scan, etc.

(1.3) - Datos misceláneos – “miscellaneous data card”.

(2) - Ramas - elementos lineales, R, L, C, transformadores, líneas, elementos no lineales.

(3) - Interruptores - simples, corrientes, tensión, estadísticos, etc.

(4) - Fuentes - sinusoidal, rampas, de tensión, de corriente, maquinas sincrónicas.

(5 opcional) - Condiciones iniciales, tensión, corriente.

(6) - Especificaciones de salida, listados numéricos, tablas, gráficos.

En el Anexo 2 se muestra un archivo ATP generado por el ATPDraw para un caso específico de la simulación.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS.

Cada elemento involucrado en los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas debe ser representado por un componente en ATP. La tabla 3.1 muestra los elementos del sistema a simularse y su representación en ATP.

Elemento del sistema	Representación en ATP
Corriente del rayo	Fuente de impulso Heidler (Type 15)
Línea de transmisión	Modelo JMarti
Torre de transmisión	Línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos (Modelo Clarke)
Resistencia de pie de torre	Resistencia con característica no lineal (Type 99)
Cadena de aisladores	Interruptores controlados por voltaje
Pararrayos	Resistencia con característica no lineal (Type 92)

Tabla 3.1: Elementos del sistema

3.2.1 CORRIENTE DEL RAYO (FUENTE DE CORRIENTE DE HEIDLER)

El ATP dispone de varios modelos de fuentes para la simulación de transitorios. Para el caso de la simulación de la corriente del rayo se utilizará la fuente de corriente Heidler type 15 pues es la fuente que se ajusta con mayor exactitud a la forma de onda de corriente propuesta por la norma IEC 61-1.

La forma de onda de la corriente suministrada por la fuente Heidler está dada por la expresión 3.1. [4]

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} * \frac{k^n}{1 + k^n} * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (3.1)$$

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

τ_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.

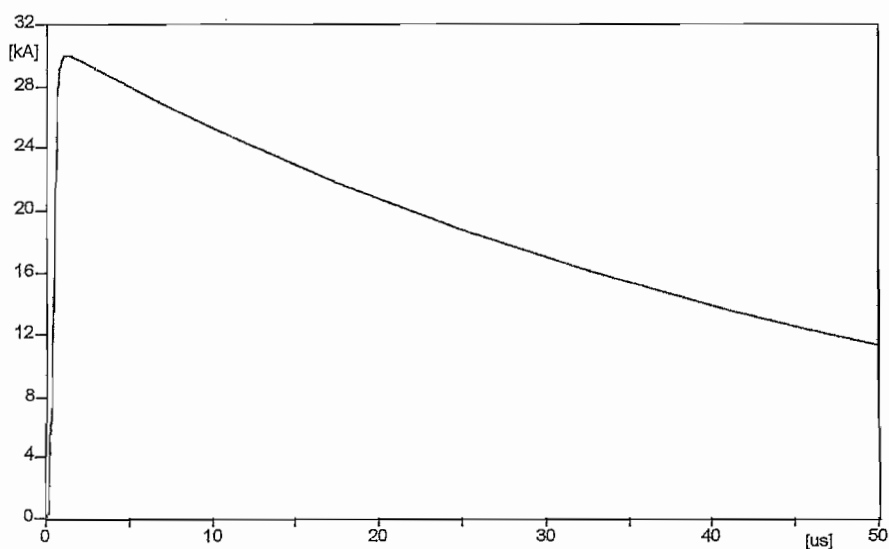


Fig. 3.1 Forma de onda Heidler

La forma de onda mostrada en la figura 3.1 es una onda 1.2/50, es decir, con un frente de onda de $1.2 \mu\text{s}$, tiempo de cola de $50 \mu\text{s}$ y una corriente pico de 30 kA

Para la utilización de este tipo de fuente se requiere ingresar los siguientes datos:

U/I : 0 Para fuente de voltaje.

-1 Para fuente de corriente

Amp: Amplitud de la onda

Tf : Tiempo de frente de onda en segundos. Intervalo entre $t=0$ al tiempo del pico de la función.

Tau: Duración de la descarga en segundos. Intervalo entre $t=0$ hasta el punto de la cola donde la amplitud de la función ha decrecido hasta el 37% de su valor pico.

n: Factor de influencia de la tasa de crecimiento. Incrementando n se incrementa la máxima pendiente.

Tsta : Tiempo de inicio en segundos. La fuente tiene valor cero para un tiempo $t < T_{sta}$.

Tsto: Tiempo de finalización en segundos. La fuente tiene valor cero para un tiempo $t > T_{sto}$.

3.2.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En el ATP se dispone de una subrutina auxiliar, "Line Constants" para el cálculo de los parámetros de líneas de transmisión y cables que producen varios modelos, cada uno de los cuales deben ser empleados según el tipo de transitorio a simularse. Los modelos de líneas de transmisión en el ATP son los siguientes:

Modelo PI

Modelo K. C. LEE

Modelo SEMLYEN SETUP

Modelo JMARTI SETUP

Modelo TAKU NODA SETUP

Los modelos PI y K. C LEE consideran parámetros distribuidos y constantes, mientras que los modelos SEMLYEN SETUP y JMARTI SETUP consideran parámetros dependientes de la frecuencia mediante una descomposición modal. El modelo TAKU NODA SETUP que difiere de los dos anteriores porque el cálculo lo realiza en componentes de fase.

Para el caso de una descarga atmosférica que es un fenómeno de alta frecuencia, el modelo de línea debe responder a la variación de la frecuencia por lo que requiere que los parámetros de la línea sean calculados en función de la frecuencia.

3.2.2.1 El Modelo Jmarti

El Modelo JMARTI SETUP de líneas de transmisión, con parámetros en función de la frecuencia es el más utilizado para el cálculo de transitorios de alta frecuencia y es el que se utilizará en el presente trabajo. En los párrafos siguientes se describirá la sustentación teórica de este modelo.

3.2.2.1.1 Descripción del modelo

Los parámetros más importantes en la propagación de onda son la impedancia característica dada por [6]:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (3.2)$$

y la constante de propagación:

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (3.3)$$

Los dos parámetros son dependientes de la frecuencia. Siendo el factor de propagación:

$$A(w) = e^{-\gamma l} \quad (3.4)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.5)$$

El factor de propagación contiene el factor de atenuación $e^{-\alpha l}$ y un cambio de fase $e^{-j\beta l}$, ambos son función de la frecuencia.

La función racional que aproxima $A(w)$ tiene la forma:

$$A_{aprox}(s) = e^{-s\tau_{min}} k \frac{(s + z_1)(s + z_2).....(s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2).....(s + p_m)} \quad (3.6)$$

con $s = jw$ y $n < m$. La expresión anterior es una aproximación del factor de propagación $A(w)$ y puede representarse por fracciones parciales así:

$$k \frac{(s + z_1)(s + z_2).....(s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2).....(s + p_m)} = \frac{k_1}{s + p_1} + \frac{k_2}{s + p_2} + \frac{k_m}{s + p_m} \quad (3.7)$$

De igual forma la impedancia característica $Z_C(w)$ es aproximada por una función racional de la forma:

$$Z_{C-aprox}(s) = k \frac{(s + z_1)(s + z_2).....(s + z_n)}{(s + p_1)(s + p_2).....(s + p_n)} \quad (3.8)$$

la expresión anterior puede representarse en fracciones parciales:

$$Z_{C-approx}(s) = k_0 + \frac{k_1}{s + p_1} + \frac{k_2}{s + p_2} \dots\dots\dots + \frac{k_n}{s + p_n} \quad (3.9)$$

El éxito de este método es la aproximación a funciones racionales para $A(w)$ y $Z_C(w)$. JMarti usa procedimientos de Bode para aproximar las magnitudes de las funciones

El modelo JMARTI es el modelo de parámetros variables que más se utiliza, aunque presenta ciertas limitaciones como la de utilizar una matriz de transformación constante para convertir de valores de modo a valores de fase.

3.2.2.1.2 Datos para la implementación del modelo JMarti Setup

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

En el ATP_LCC se tienen dos conjuntos de datos de entrada "line model" y "conductor" card. En "line model" se ingresan los datos requeridos para el modelo seleccionado, mientras que en "conductor card" se ingresan las características de los conductores de fase y de guarda y la configuración física de las estructuras soporte, que son los mismos para cualquier modelo.

El formato del conjunto de datos "line model" para el modelo JMarti se muestra en la figura 3.2 y la descripción de los parámetros es la siguiente:

Rho: Resistividad del suelo en ohm*m de suelo homogéneo
(Teoría de Carson)

Dist: Longitud de la línea de transmisión

Freq.: Frecuencia a la cual se calcularán los parámetros.

En el modelo Jmartí Freq. es usada como la frecuencia a la cual se calcula la matriz de transformación

Metric/English: Para seleccionar entre unidades del Sistema Internacional o inglesas.

High accuracy (FCAR): Si la opción está activada, la exactitud es alta en las ecuaciones de Carson.

Seg. ground: Segmentación de los cables de guarda.

Si la opción está activada se asume que el cable de guarda esta aterrado continuamente.

Transposed: Se debe activar para el caso de líneas transpuestas.

Real/Complex matrix (TR):

Real matrix: Recomendado para simulación de transitorios

Complex matrix: Recomendado para el cálculo en estado estable

DEC: Número de décadas de la escala logarítmica

PNT: 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.Init: Frecuencia inicial para la escala logarítmica.

En los otros parámetros se recomienda utilizar los valores por defecto.

Line data window

Line Model | Conductor card

J. Marti

Rho[ohmm] 0 Freq[Hz] 0

Dist[km] 0 Freq.SS[Hz] 0

Freq.init[Hz] 0

☒ Metric unit

☒ High accuracy [FCAR]

☐ Seg. ground DEC 0

☐ Transposed PNT 0

☐ Real matrix [IR]

☐ Default Fitting

Zc

NexMis 0 EpsTol 0

NorMax 0

☐ IfCode ☐ IfDat

☐ IfWta ☐ InElim

☐ IfPlot

A1

NexMis 0 EpsTol 0

NorMax 0 AminA1 0

☐ IfCode ☐ IfDat

☐ IfWta ☐ InElim

☐ IfPlot

OK Cancel Help

Figura 3.2: Formato de la opción "line model"

El formato del conjunto "conductor card" se presenta en la figura 3.3 y la descripción de los parámetros es la siguiente:

IP : Número asignado a cada conductor de fase. 0 para el cable de guarda (eliminado)

SKIN: 0 si no se considera el efecto piel.

T/D: Diferente de cero, para considerar el efecto piel

T/D es la relación entre la espesura del conductor tubular y el diámetro externo del conductor.

RESIS: Resistencia en ohm/km u ohm/milla

El valor de RESIS es la resistencia en AC si no se considera el efecto piel, mientras RESIS es la resistencia en DC cuando se considera el efecto piel. Estará en ohm/km si se selecciona el Sistema Internacional de Unidades o en ohm/milla si se selecciona el Sistema Inglés de Unidades, el programa permite escoger entre los dos sistemas de unidades.

IX : 0: REACT = Reactancia para una unidad de espaciamiento (metros o pies) a la frecuencia especificada (Freq) en line model.

1: REACT = Reactancia para una unidad de espaciamiento (metros o pies) a 60 Hz.

2: REACT = Radio Medio Geométrico (cm o pulgadas)

3: REACT = GMR/R (Conductor sólido: 0.7788)

4: REACT = En Blanco. Corrección por efecto piel.

REACT: Parámetro de inductancia propia.

DIAM : Diámetro externo del conductor (cm. o pulgadas)

HORIZ: Distancia horizontal (metros o pies) del centro del conductor a un punto de referencia escogido.

VTower: Altura vertical del conductor en la torre (metros o pies).

VMid : Altura vertical del conductor a medio vano (metros o pies).

El altura $h = 2/3 * VMid + 1/3 * VTower$ es usada en los cálculos.

SEPAR: Distancia entre conductores en un haz de conductores (cm. o pulgadas)

ALPHA: Posición angular de un conductor en un haz, medido en sentido contrario a las agujas del reloj de la línea horizontal.

NB: Número de conductores del haz.

#	Ph.no.	Skin	Resis [ohm/mile]	IX	React	Diam [inch]	Horiz. [ft.]	Vtower [ft.]	Vmid. [ft.]
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.3: Formato de la opción conductor card

Una vez que se han proporcionado los datos necesarios se puede utilizar en el menú ATP la opción "Create data case" para generar un archivo ATP.

Para utilizar este modelo de la línea en el ATPDraw se debe seguir los siguientes pasos:

- En el Menú ATP del preprocedaor ATPDraw, seleccionar la opción "run ATP file" y buscar el archivo .ATP generado por el ATP_LCC.
- Al realizar el paso anterior se genera un archivo .PCH
- En el ATPDraw (click derecho) seleccionar la opción "Overhead Line (PCH)" y buscar el archivo con extensión PCH. Aquí se crea el modelo de la línea y también un archivo con extensión LIB que se almacenará en la carpeta "sup" del ATP.

Seguidos los pasos anteriores, se tiene listo el modelo de la línea para ser implementado en el modelo de descargas atmosféricas.

3.2.3 TORRE DE TRANSMISIÓN

La torre de transmisión es modelada como una línea de transmisión monofásica (Modelo Clarke) con parámetros distribuidos, en donde se requieren los siguientes datos:

R/l: Resistencia (Ω/m)

A: Impedancia característica [Ω] $Z = \sqrt{L'/C'}$

B: Velocidad de propagación de la onda [m/s] $v = \sqrt{1/L'C'}$

3.2.4 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE (RESISTENCIA NO LINEAL TYPE 99)

Para la resistencia de pie de torre, se utiliza una resistencia con característica no lineal, dependiente de la corriente, para simular la variación de la resistencia con la magnitud de la corriente.

El modelo seleccionado es el R(i) "type 99", el cual permite ingresar hasta 16 valores de corriente y voltaje que determinan la característica no lineal de la resistencia.

La resistencia con característica no lineal se utilizará solamente en la torre en que se produce la descarga, para las torres adyacentes se utilizará resistencias constantes.

3.2.4 CADENA DE AISLADORES (INTERRUPTORES CONTROLADOS POR VOLTAJE)

Para una descarga atmosférica que impacte en la torre de transmisión o en el cable de guarda las crucetas de la torre semejan circuitos abiertos. La cadena de aisladores son representados por interruptores controlados por voltaje, los cuales simularán la descarga inversa, cerrando el interruptor, si el voltaje entre la cruceta y el conductor de fase supera un valor especificado.

El interruptor controlado por voltaje es un interruptor normalmente abierto. El cierre del interruptor ocurre a un tiempo mayor o igual al tiempo de cierre T_{cl} , siempre y cuando se haya alcanzado el voltaje de activación V_{fl} . Luego de un retardo T_{de} el interruptor intenta abrir nuevamente.

Los datos requeridos son:

T_{cl} : Tiempo de cierre del interruptor [s]

T_{de} : Tiempo mínimo que el interruptor debe permanecer cerrado [s]

I_{mar} : Corriente marginal [A]

El interruptor abre para $T_{cl} > T_{de}$ si $|I| > I_{mar}$

V_{fl} : Voltaje de activación. [V]

El interruptor cierra para $t > T_{cl}$ si $|U| > V_{fl}$

3.2.5 PARARRAYOS (RESISTENCIA NO LINEAL “TYPE 92”)

Las funciones de un pararrayos son:

- No conducir para voltajes de operación normal
- Conducir corriente durante sobrevoltajes 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 de la subestación Santa Rosa se presenta en la figura 3.4

El modelo más utilizado en el EMTP/ATP 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, donde cada segmento es definido por:

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (3.10)$$

donde q es el exponente, p es un factor multiplicador que se encuentra en unidades de corriente, V_{ref} es un voltaje de referencia que normaliza la ecuación.

Al igual que en la resistencia no lineal "type 99", se necesita ingresar una característica de operación que en este caso será la proporcionada por el fabricante del pararrayos, específica para impulso atmosférico.

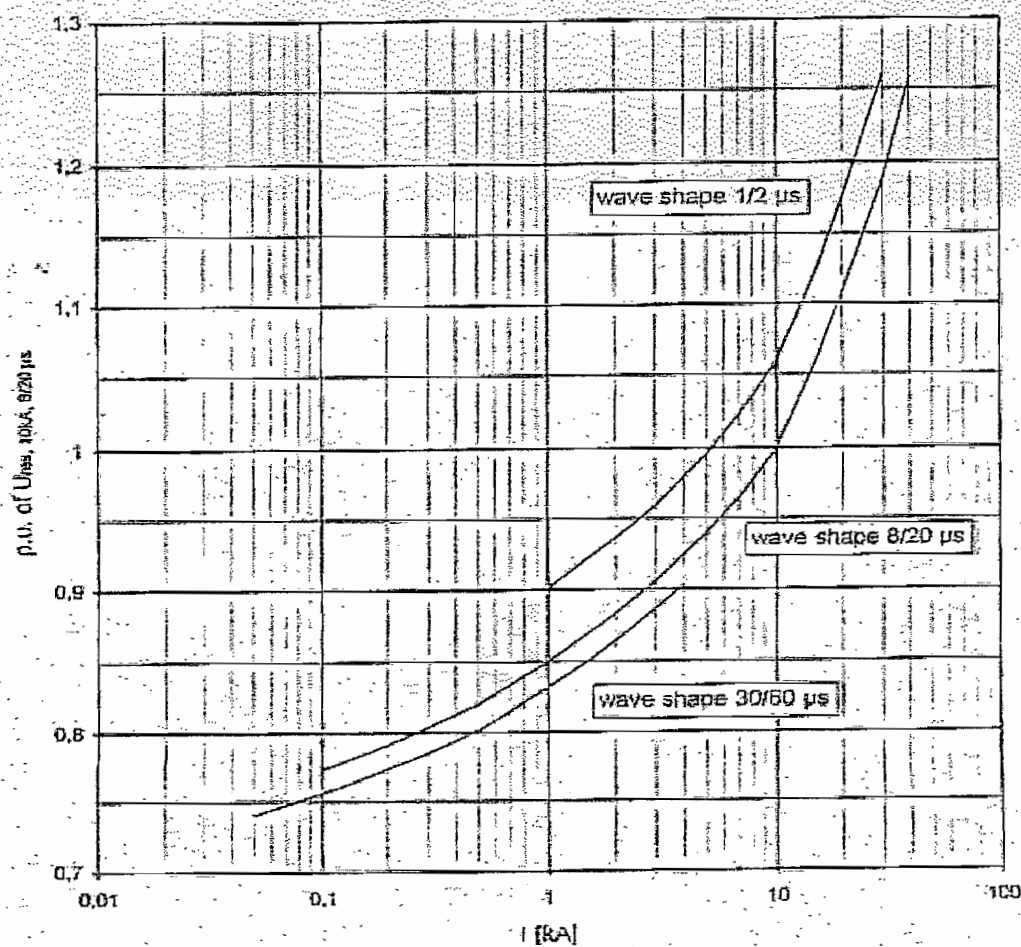


Fig. 3.4: Característica del Pararrayos instalado en la subestación Santa Rosa para la posición Pomasqui

CAPÍTULO IV

4. DATOS E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

En este capítulo se presenta los datos de los elementos que serán considerados en el modelo para la simulación digital, es decir, se trata de sustentar el porqué de la utilización de determinados valores para cada parámetro utilizado.

Algunos valores, principalmente los referentes a los parámetros del rayo se tomarán de referencias especializadas en el tema, mientras que los otros se determinarán de las características de la línea Santa Rosa - Pomasqui.

4.1 CORRIENTE DEL RAYO

Los parámetros que determinan la forma de onda de la corriente en una descarga atmosférica son de naturaleza aleatoria. Estudios realizados han determinado que la amplitud, el frente de onda, el tiempo de cola y la pendiente responden a una función de distribución logarítmica normal cuyos parámetros para la primera descarga son los siguientes [10]:

	Valor Medio	Desviación Estándar
Amplitud [kA.]	27.7	0.461
Frente de onda [μ s.]	5.63	0.576
Tiempo de cola [μ s.]	77.5	0.577
Pendiente máxima [kA/ μ s.]	24.3	0.599

Tabla 4.1: Parámetros de la distribución logarítmica de una descarga atmosférica

Según CIGRE, la descarga de corriente más baja es de 3 kA.

La probabilidad de que una corriente de cresta de una descarga sea igual o mayor que un valor de corriente I está dada por:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (4.1)$$

Las descargas directas en líneas de transmisión pueden producirse ya sea en el conductor de fase o en el cable de guarda, esto dependerá del grado de protección de la línea de transmisión. Para la simulación digital se debe determinar de forma aproximada la magnitud de la corriente de las descargas que impactarán en el cable de guarda y de aquellas que impactarán en el conductor de fase produciendo una falla del apantallamiento.

Con la ayuda del modelo electrogeométrico, expuesto en el capítulo 2, se puede determinar la magnitud de la corriente máxima que producirá una falla del apantallamiento. La distancia de incidencia máxima que provocará la falla de apantallamiento puede calcularse con la siguiente expresión [1]:

$$r_{\max} = \frac{h + y}{2(1 - \sin \alpha)} \quad (4.2)$$

Donde: h es el altura del cable de guarda

y es el altura del conductor de fase

α es el ángulo de apantallamiento.

Conociendo la geometría de la torre de transmisión, se puede calcular la distancia máxima de incidencia. La corriente máxima que producirá una falla de apantallamiento puede obtenerse al despejar la corriente de la siguiente expresión [12], [13]:

$$r_{\max} = 10I_{\max}^{0.65} \quad (4.3)$$

Para la configuración de la torre de transmisión utilizada en la construcción de la línea Santa Rosa-Pomasqui, figura 4.1, y aplicando las ecuaciones anteriores se determina que la magnitud de corriente máxima que produce fallo del apantallamiento es de 17.9 kA, por lo que en el presente trabajo se considerará que las corrientes menores a 18 kA impactarán en el conductor de fase superior, mientras que las mayores o iguales a 18 kA impactarán en el cable de guarda.

En la tabla 4.2 se presentan los valores de corriente de rayo que se consideraran para la simulación y la probabilidad de tener corrientes superiores a estas.

Corriente [kA]	Probabilidad [%]	Corriente [kA]	Probabilidad [%]
3	99.8	25	63.6
4	99.5	30	52.1
5	99.1	35	42.2
6	98.6	40	34.0
7	98.0	45	27.5
8	97.1	50	22.4
9	96.1	55	18.4
10	95.0	60	15.2
11	93.7	65	12.7
12	92.2	70	10.7
13	90.5	75	9.1
14	88.8	80	7.8
15	86.8	85	6.8
16	84.8	90	5.9
17	82.7	95	5.2
18	80.4	100	4.5
20	75.8		

Tabla 4.2: Corriente de rayo y probabilidad de tener corrientes superiores a estas

Como se observa en la tabla 4.2, para la simulación se considerará un rango en el cual se encuentran incluidas el 95.5 % de las descargas atmosféricas con estas magnitudes de corriente.

En lo que al frente de onda corresponde se considerará valores de entre 1.2 y 10 μ s, mientras que para el tiempo de cola se considerará el valor de 50 μ s. La tabla

4.3 muestra los valores de frente de onda considerados y la probabilidad acumulada de tener frentes menores a estos.

Frente de onda [μs]	Probabilidad acumulada[%]
1.2	0.4
2	3.6
3	13.7
4	27.6
5	41.8
6	54.4
7	64.7
8	72.9
9	79.2
10	84.1

Tabla 4.3: Frente de onda y probabilidad acumulada

4.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Los parámetros de la línea de transmisión fueron calculados para el modelo JMarti y utilizando los datos de la línea Santa Rosa - Pomasquí. Una configuración típica para una torre utilizada en esta línea se muestra en la figura 4.1, donde se muestra la altura de los conductores en la torre y también la altura de los conductores a medio vano.

Los conductores utilizados en la línea, ACAR 1200 18/19 tienen las siguientes características:

Conductores de fase

Resistencia en DC máxima a 20°C = 0.0514 Ω/km.

Diámetro externo: 3.202 cm.

Diámetro interno: 2.288 cm.

Cables de guarda

Resistencia en DC máxima a 20°C = 4.2324 Ω/km.

Diámetro: 0.9144 cm.

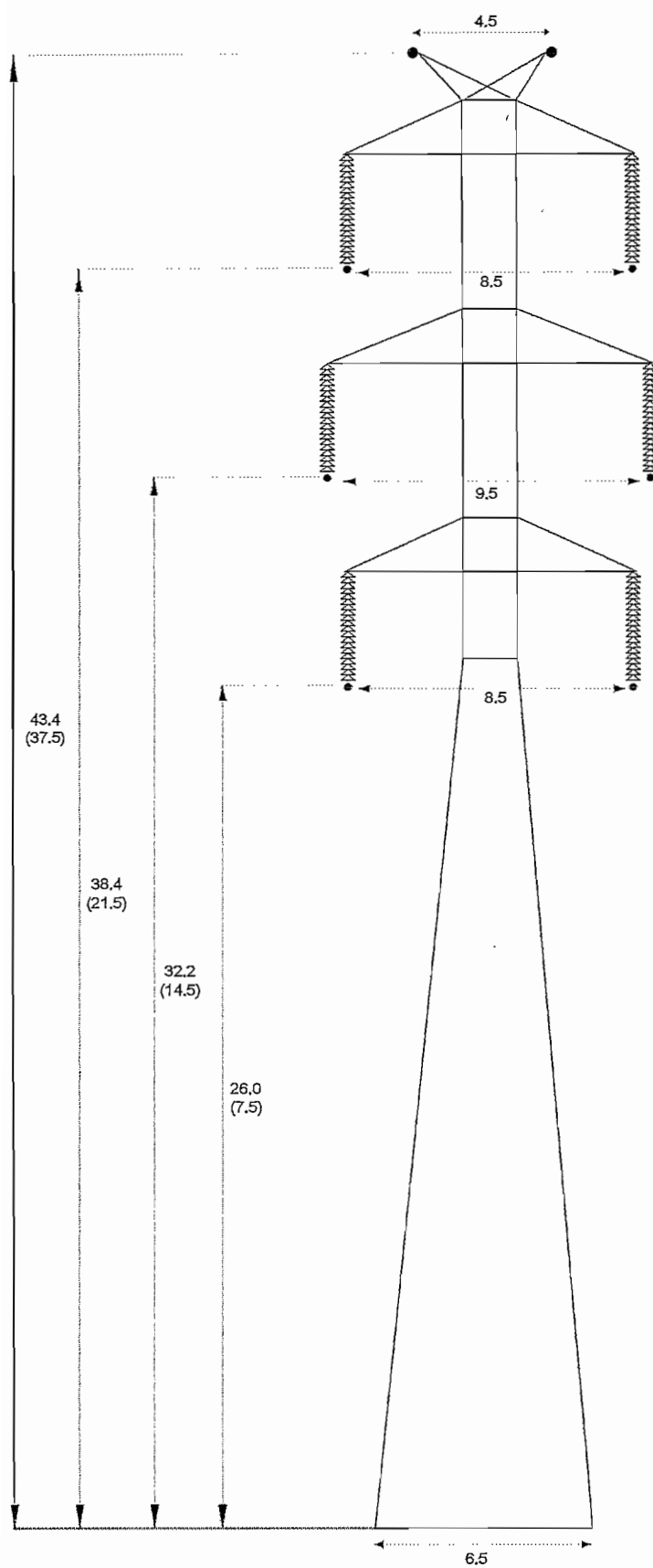


Fig. 4.1 Torre de Transmisión doble circuito para 230 kV.

La línea es de doble circuito con dos cables de guarda y no transpuesta. Se consideran los siguientes parámetros:

Resistividad del suelo (ρ): 110 Ωm .

Frecuencia de estado estable (Freq.SS): 60 Hz.

Frecuencia a la cual se calcula la matriz de transformación (Freq): 500 kHz.

Frecuencia inicial de la escala logarítmica (Freq.Init): 0.1 Hz.

Número de décadas (DEC): 6

Número de puntos por década (PNT): 10

Para considerar el efecto piel se debe calcular la relación T/D , que es la relación entre la espesura del conductor y el diámetro externo del conductor, dado por la expresión:

$$\frac{T}{D} = \frac{R_e - R_i}{2R_e} \quad (4.4)$$

Donde R_e : Radio externo del conductor

R_i : Radio interno del conductor

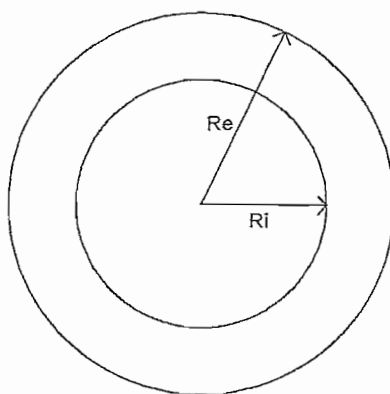


Fig. 4.2: Conductor tubular

La relación T/D para el conductor de fase es de 0.143 mientras que para el cable de guarda 0.5.

Los datos de la línea ingresados en el ATP_LCC para la opción Conductor card se muestran en la figura 4.3

Line data window

Line Model Conductor card

#	Ph.no.	Skin	Resis [ohm/km]	IX	React	Diam [cm]	Horiz. [m]	Ytower [m]	Vmid. [m]
1	1	0.143	0.0514	4	0	3.202	0.5	38.4	21.5
2	2	0.143	0.0514	4	0	3.202	0	32.2	14.5
3	3	0.143	0.0514	4	0	3.202	0.5	26	7.5
4	4	0.143	0.0514	4	0	3.202	9	38.4	21.5
5	5	0.143	0.0514	4	0	3.202	9.5	32.2	14.5
6	6	0.143	0.0514	4	0	3.202	9	26	7.5
7	7	0.5	4.2324	4	0	0.9144	2.5	43.4	37.5
8	8	0.5	4.2324	4	0	0.9144	7	43.4	37.5

Add row Delete last row ☐ Auto bundling

☒ OK ☒ Cancel ☒ Help

Fig. 4.3 Datos de los conductores y configuración para la línea Santa Rosa - Pomasqui

4.3 TORRE DE TRANSMISIÓN

Las torres de transmisión son modeladas como líneas de transmisión monofásicas con parámetros distribuidos a cuya base se encuentra conectada la resistencia de pie de torre. Valores de impedancia característica típicos para las torres de transmisión se encuentran entre 100 y 300 ohmios y una velocidad de propagación igual a la velocidad de la luz.

Las características geométricas de las torres de transmisión utilizadas en la línea de transmisión Santa Rosa-Pomasqui determinan que para el cálculo de la impedancia característica se utilice un modelo cónico. La expresión propuesta para el cálculo de la impedancia de la torre es la siguiente [11]:

$$Z_t = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) \quad (4.5)$$

Donde: r es el radio de la base de la torre, en metros

h es el altura de la torre, en metros.

Para la línea en cuestión se tiene que la longitud del radio y el altura de la torre son 3.25 y 43.4 metros respectivamente, con lo que se obtiene una impedancia característica de aproximadamente 180 ohmios.

La torre es representada por un conjunto de líneas de transmisión monofásicas, con el objeto de simular las crucetas y el cuerpo de la torre. El modelo establecido es el siguiente:

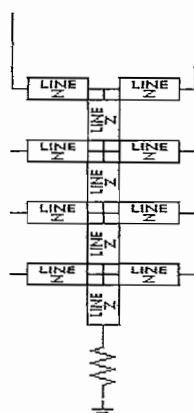


Fig 4.4 Modelo de la Torre de Transmisión en ATPDraw

4.4 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

La característica no lineal de la resistencia de pie torre, dependiente de la magnitud de la corriente del rayo, es determinada por la siguiente expresión[10]:

$$R_T = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{Ig}}} \quad (4.6)$$

El valor de I_g puede determinarse con la expresión 2.31 que para una resistividad del suelo de $110 \Omega m$, gradiente de ionización del suelo de 300 kV/m es de 52.5 kA . R_o será la resistencia medida en pruebas de campo. Los 16 puntos de la característica no lineal de la resistencia se determinarán con corrientes que se encuentren entre 5 y 80 kA en intervalos de 5 kA . La característica de la resistencia para un valor de 10Ω a baja corriente y baja frecuencia se presenta en la tabla 4.4 y en la figura 4.5.

Corriente [A]	Resistencia [Ω]	Voltaje [V]
5000	9.56	47777
10000	9.17	91654
15000	8.82	132293
20000	8.51	170202
25000	8.23	205777
30000	7.98	239335
35000	7.75	271131
40000	7.53	301374
45000	7.34	330240
50000	7.16	357874
55000	6.99	384399
60000	6.83	409922
65000	6.69	434532
70000	6.55	458310
75000	6.42	481323
80000	6.30	503633

Tabla 4.4: Característica de la resistencia de pie de torre

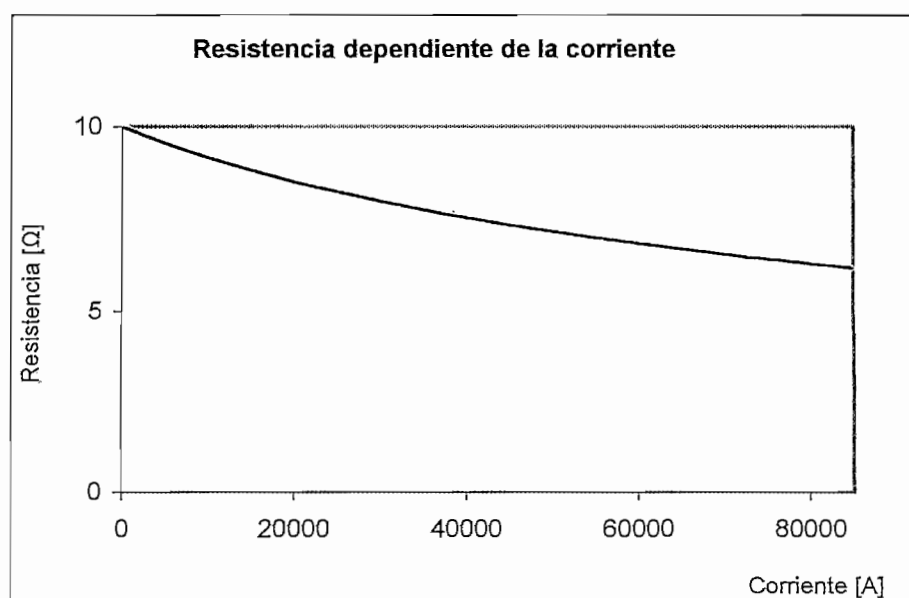


Fig. 4.5: Característica de la resistencia de pie de torre

4.6 CADENA DE AISLADORES

La cadena de aisladores es representada por un interruptor controlado de voltaje. Si el voltaje entre la cruceta de la torre y el conductor supera el valor V_{fl} el interruptor se activa y semeja una falla del aislamiento.

El valor de V_{fl} , será aquel voltaje que no produzca contorneo el 90% de las veces que se presente en una descarga atmosférica. Para determinar el valor de V_{fl} y para el caso de la línea Santa Rosa - Pomasquí se tienen las siguientes consideraciones:

- En la línea se instalaron 20 aisladores bajo los 3500 msnm, mientras que para alturas superiores se instalaron 21 aisladores.
- El CFO (Critical Flash Overvoltage), voltaje de impulso al cual el 50% de las veces que es aplicado a un equipo produce contorneo, se determina de catálogos de los aisladores utilizados en la línea.
- Se considera el CFO de polaridad positiva por ser menor que el de polaridad negativa, con lo que se estará tomando en cuenta las condiciones más críticas.
- El voltaje de contorneo debe ser corregido por efectos de la altura de las instalaciones.
- No se considera el efecto de la humedad.

Según el manual NGK, para los aisladores tipo 53-2 utilizados en la línea se tiene los siguientes valores de CFO:

Número de aisladores	CFO [kV] (Positivo)	CFO [kV] (Negativo)
20	1745	1785
21	1825	1870

Tabla 4.5: CFO de la cadenas de aisladores

El CFO presentado en la tabla 4.5 debe ser corregido por efecto de las condiciones atmosféricas. La línea Santa Rosa - Pomasqui se encuentra construida en alturas que van desde los 2400 hasta los 4200 metros sobre el nivel del mar. Uno de los aspectos más importantes que influyen en el voltaje de disrupción es la densidad relativa del aire, la corrección por este factor se presenta a continuación [3]:

La presión barométrica estándar, b , de 76 cm Hg a una temperatura, " t ", de 25°C establece una densidad relativa del aire de 1.0. La densidad relativa del aire, δ , para cualquier otra presión barométrica y temperatura puede ser calculada con la relación:

$$\delta = 3.86 \frac{b}{273+t} \quad (4.7)$$

donde b = presión barométrica, cm Hg

t = temperatura, °C

La capacidad de aislamiento disminuye cuando va disminuyendo δ y está dado por la relación:

$$V = \delta^n V_o \quad (4.8)$$

Donde V = CFO a cualquier densidad relativa del aire

V_o = CFO a temperatura y presión estándar

n = Exponente empírico que depende de la longitud de la cadena.

1.0 si la longitud de la cadena es menor que 1.5 m

0.9 si la longitud de la cadena está entre 1.5 y 2.5 m

0.8 si la longitud de la cadena está entre 2.5 y 3 m.

El valor de la presión barométrica a cualquier altura está dado por la relación:

$$\log b = \log 76 - \frac{h}{18336} \quad (4.9)$$

Donde h es la altura sobre el nivel del mar, en metros.

Para la línea Santa Rosa - Pomasqui, la temperatura promedio es de 12 °C y la longitud de la cadena es de 3.0 m. Con estos datos y con las expresiones anteriores puede realizarse la corrección por la densidad relativa del aire del CFO.

Para obtener el voltaje que no produzca falla de aislamiento con un 90% de probabilidad, se utiliza lo establecido en la norma CEI 71-1, que establece la siguiente relación:

$$U_{90} = CFO(1 - 1.3\sigma) \quad (4.10)$$

σ es la desviación estándar de una distribución normal que para el caso de impulsos por descargas atmosféricas toma un valor del 3%.

4.7 PARARRAYOS

La característica voltaje-corriente de un pararrayos es función de la pendiente del impulso. El pararrayos debe ser modelado con la característica de operación para descargas atmosféricas (8/20 μ s.) proporcionada por los fabricantes y para corrientes entre 20 y 40 kA.

Los pararrayos de la subestación Santa Rosa son de marca Siemens y tienen la siguiente característica para una onda de impulso 8/20 μ s (figura 3.4):

Corriente[kA]	Voltaje[kV]
5	442
10	470
20	528
40	588

Tabla 4.6: Característica del pararrayos para una onda 8/20 μ s.

Esta característica debe ser ingresada en el resistor no lineal “type 92 (555)” el cual se encarga de realizar la aproximación a segmentos exponenciales.

Cuando se desea implementar el modelo hasta el interior de la subestación, los distintos componentes de esta, para el caso de descargas atmosféricas, se representan por capacitancias a tierra. Si no se dispone de estos datos entonces se puede utilizar valores recomendados por documentos especializados en el tema. En este trabajo se utiliza los valores recomendados por la referencia [10] y los valores se presentan en la tabla 4.7.

Equipo	Capacitancia a tierra [pF]
Interruptor	100
Base soporte del aislador	80
Transformador capacitivo de potencial	8000
Transformador de corriente	250
Autotransformador	3500

Tabla 4.7: Capacitancia a tierra de equipos de una subestación.

4.8 FUENTE TRIFÁSICA

El sobrevoltaje máximo ocasionado por una descarga atmosférica depende no solo del voltaje ocasionado por la corriente del rayo sino también del voltaje de 60 Hz en el instante de la descarga. En este trabajo y considerando que el conductor de fase superior es el de la fase A y la corriente de rayo es de polaridad positiva, se asume que en el momento de la descarga, el voltaje en la fase A se encuentra en su valor máximo negativo.

4.9 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Una vez que se ha seleccionado los diferentes modelos para los distintos elementos involucrados en una descarga atmosférica, es necesario armar el sistema a ser simulado.

Cuando un rayo alcanza una torre de transmisión, este provoca un disturbio en la torre que fue afectada por el rayo y en las torres adyacentes. La onda de corriente provocada por el rayo viaja hacia los dos lados de la línea produciendo sobrevoltajes también en los vanos y torres más próximas. El disturbio no afecta a toda la línea pues a medida que avanza va disminuyendo su efecto hasta desaparecer, por lo que considerar un número de cuatro vanos a cada lado de la torre afectada resulta suficiente. El diagrama del modelo a implementarse es el siguiente.

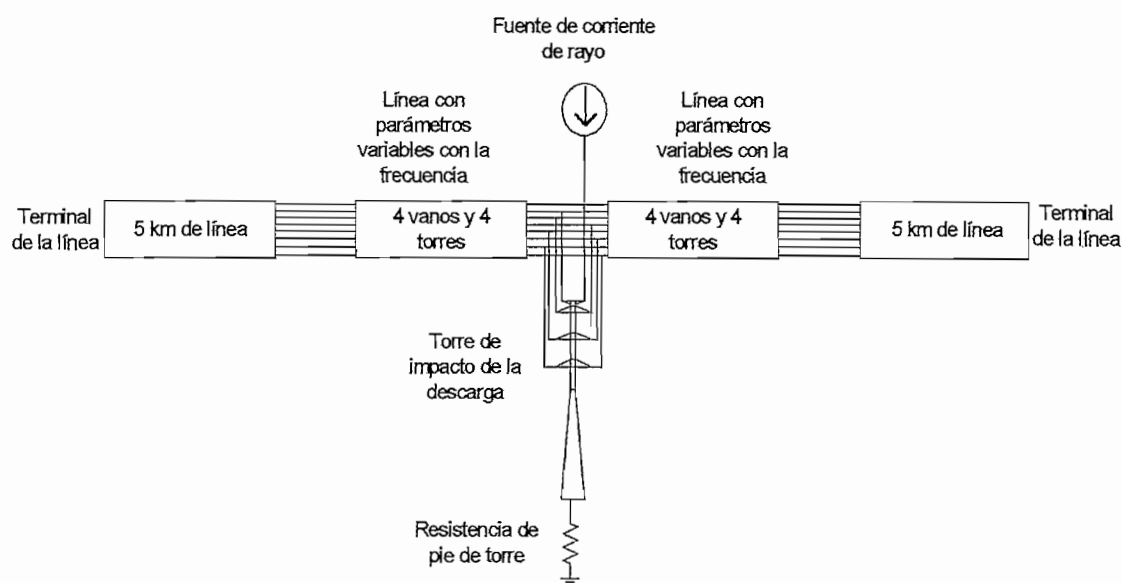


Fig. 4.6 Modelo a implementarse

Un aspecto que resulta de elevada importancia cuando se quiere simular descargas atmosféricas en el conductor de fase es la terminación de la línea de

transmisión con el fin de evitar las reflexiones. Existen varias formas de simular la terminación de la línea entre las cuales se tiene:

- Modelar las líneas como líneas largas a partir de algunos vanos.
- Incluir tantos vanos como haga falta para que el tiempo de simulación sea menor que el de regreso de las ondas reflejadas.
- Incluir después de algunos vanos un sistema de resistencias acopladas, de valores iguales a las impedancias características propias y mutuas de cada conductor.

En este trabajo se utilizará la primera alternativa, es decir, se coloca un tramo de línea largo de 5 km. que aunque presenta ciertos problemas de memoria y velocidad de ejecución de la simulación es el más adecuado para este caso.

El modelo implementado en el ATPDraw, para la torre de impacto de una descarga en el cable de guarda, es el que se muestra en la figura 4.7 y su descripción es la siguiente:

1. **Fuente de corriente:** Representa a la corriente originada por una descarga atmosférica.
2. **Modelo de la línea de transmisión(L/T):** Representa a la línea de transmisión, cuyos parámetros son distribuidos y dependientes de la frecuencia. La longitud de esta línea corresponde a la longitud de un vano.
3. **Línea de transmisión monofásica:** La torre de transmisión está representada por la interconexión de un conjunto líneas monofásicas con el fin de simular las cruceas y el cuerpo de la torre. La longitud de estas líneas se determinan de la geometría de la torre de transmisión (figura 4.1)
4. **Resistencia no lineal:** Representa a la resistencia de pie de torre, cuya magnitud es dependiente de la magnitud de la corriente del rayo.

5. **Interruptores controlados por voltaje:** Representan a la cadena de aisladores en cada una de las fases.
6. **Circuito trifásico:** Representa al circuito 1 y al circuito 2 de la línea de transmisión.
7. **Cables de guarda:** Los cables de guarda han sido representados en el modelo como dos fases adicionales.

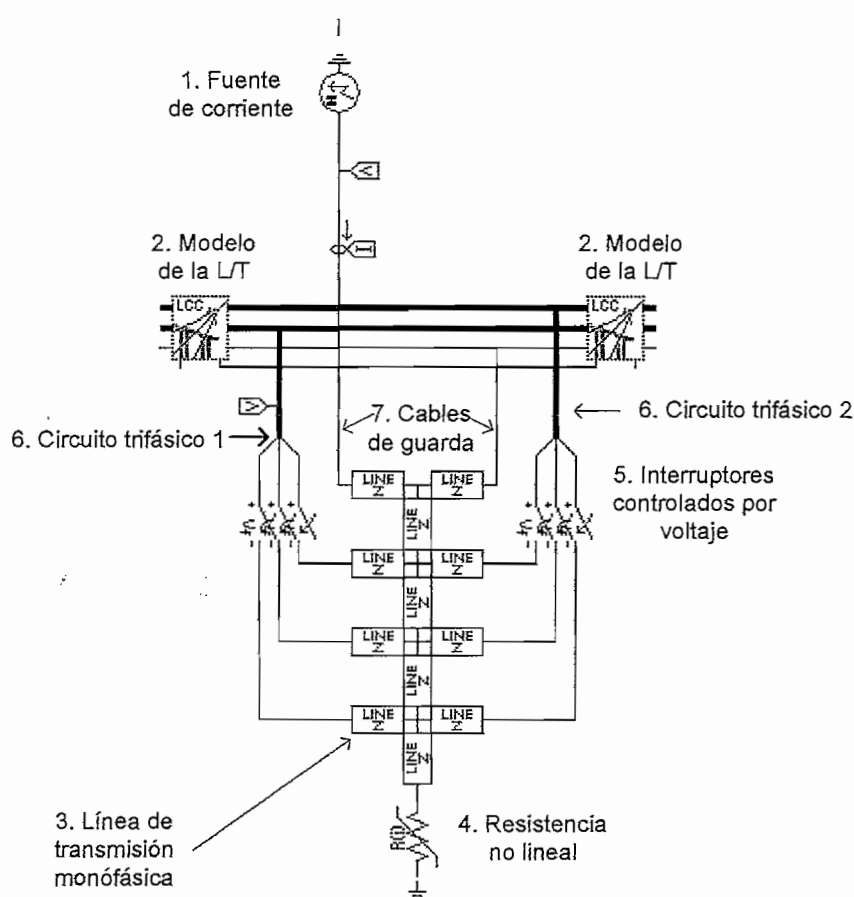


Fig. 4.7: Modelo implementado en ATPDraw

El modelo completo consiste en interconectar cuatro modelos similares al de la figura anterior a cada lado de la torre de impacto de la descarga.

CAPITULO V

5. SIMULACIÓN DIGITAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez que ya se tiene armado el sistema resulta necesario plantearse aquellos casos que van a ser simulados.

La primera parte de este capítulo tiene un fin didáctico, es decir, se pretende realizar simulaciones de tipo general que permitan determinar aquellos parámetros que mayor influencia tienen en los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas. La segunda parte de este capítulo consiste en realizar las simulaciones en la línea Santa Rosa - Pomasqui, para esto, se determinarán aquellas torres o tramos en los cuales se podría tener un comportamiento que amerite ser analizado.

Resulta de importancia en la simulación digital definir el paso de integración y el tiempo máximo de simulación. El paso de integración depende de la pendiente del impulso y de la longitud mínima del modelo de onda viajera. En general para descargas atmosféricas se puede utilizar los siguientes valores:

Paso de integración: 1 a 20 ns, típico = 5 ns.

Tiempo máximo de simulación: 20 a 50 μ s, típico = 40 μ s

5.1 SOBREVOLTAJES PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRECTAS.

Se consideran los siguientes casos a ser simulados:

Descarga en la torre de transmisión

- Descarga en el cable de guarda
- Descarga en el conductor de fase superior

Descarga en medio vano

- Descarga en el cable de guarda

5.1.1 DESCARGA EN LA TORRE DE TRANSMISIÓN

Para la descarga en la torre de transmisión se han considerados cuatro torres a cada lado de la torre de impacto y cinco vanos. Los vanos tienen una longitud constante de 300 m y las resistencias de pie de torre se consideran iguales en todas las torres.

5.1.1.1 Descarga en el cable de guarda o en la torre.

Cuando un rayo cae en el cable de guarda, parte de la corriente viaja a través de este hacia las torres adyacentes y la otra parte viaja a través de la torre, originando sobrevoltajes tanto en las crucetas como en la base debido a la resistencia de pie de torre. En la figura 5.1 se muestran los sobrevoltajes ocasionados por una onda 1.2/50 de 25 kA y en la tabla 5.1 se presentan los voltajes máximos en el tope (parte superior de la torre de transmisión) y en la base (resistencia de pie de torre) tanto en la torre de impacto (torre 1) como en las torres adyacentes a la torre de impacto (torres de la 2 a la 5). En dicha tabla se presentan también los voltajes inducidos por la descarga en cada una de las fases. En esta parte del estudio se considera que no existe descarga inversa. Los valores de voltajes presentados en este estudio corresponden a los valores máximos o pico. La presencia de estos sobrevoltajes pueden provocar descargas inversas entre la torre y el conductor de fase conocidos como “backflashover” si el voltaje entre la cruceta y el conductor de fase superan el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores. Los voltajes provocados son mayores en la torre de impacto y van atenuándose a medida que viajan a lo largo de la línea y por lo tanto se tienen voltajes de menor magnitud en las torres adyacentes, hasta que el efecto de la descarga desaparece al cabo de ciertos vanos.

Para la simulación se considera que la descarga impacta en la torre en el instante en que el voltaje de la fase A se encuentra en su valor máximo negativo. La tabla

5.1 también presenta valores en estado estable, es decir, se presenta los valores de las magnitudes instantes antes de que se produzca la descarga.

	Voltajes originados por descargas atmosféricas [kV]				
	Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
Estado estable	0	-187	94	94	0
Torre 1	1738	261	415	313	260
Torre 2	657	-39	185	143	93
Torre 3	370	-100	152	161	37
Torre 4	304	-113	140	161	19
Torre 5	251	-102	143	155	19

Tabla 5.1: Voltaje producidos por descargas atmosféricas en el tope de la torre

La figura 5.1 muestra los voltajes generados en una descarga directa a la torre. En esta se puede observar la forma de onda del voltaje para el tope de la torre, el voltaje inducido en la fase A y el voltaje en la base de la torre (resistencia de pie de torre).

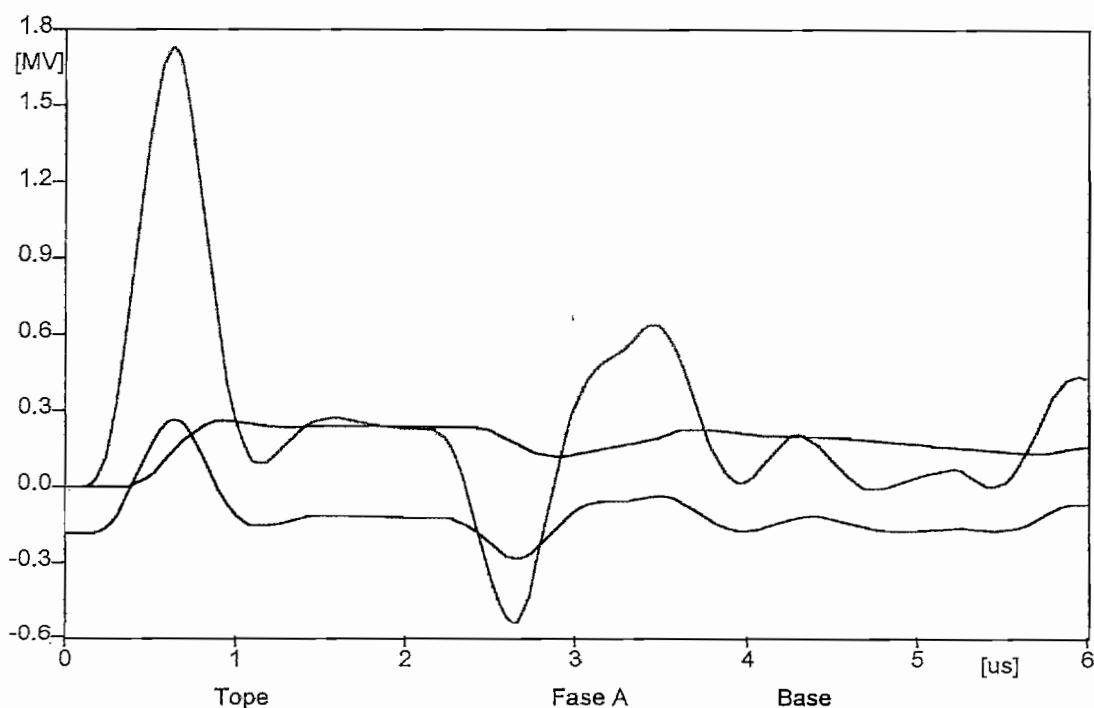


Fig. 5.1 Voltajes en la torre de impacto de la descarga

En la figura 5.1 también puede observarse como el voltaje en el tope de la torre alcanza su valor máximo antes de que la corriente llegue a su valor pico a los 1.2 μ s, esto se debe a que la reflexión en la base de la torre llega antes que se

produzca el máximo de la corriente impidiendo que el voltaje siga incrementándose, debido a que el operador de reflexión en la base de la torre es negativo.

La parte de la onda que viaja a las torres adyacentes va disminuyendo su valor pico, estos dos hechos pueden visualizarse en la figura 5.2, en donde se muestra el voltaje en el tope de la torre de impacto (Torre 1) y de las dos torres siguientes (Torre 2 y 3).

Cuando el sobrevoltaje producido por la descarga atmosférica no es el suficiente para provocar una descarga inversa (backflasover) entre la cruceta y el conductor de fase, un voltaje inducido está presente en los conductores de fase. Este voltaje disminuye a medida que la onda viaja en la línea debido al amortiguamiento por la componente resistiva tanto cable de guarda como del conductor de fase. Para mostrar estos hechos en la figura 5.3 se presenta el voltaje en la fase superior de la torre de descarga y en las dos torres siguientes.

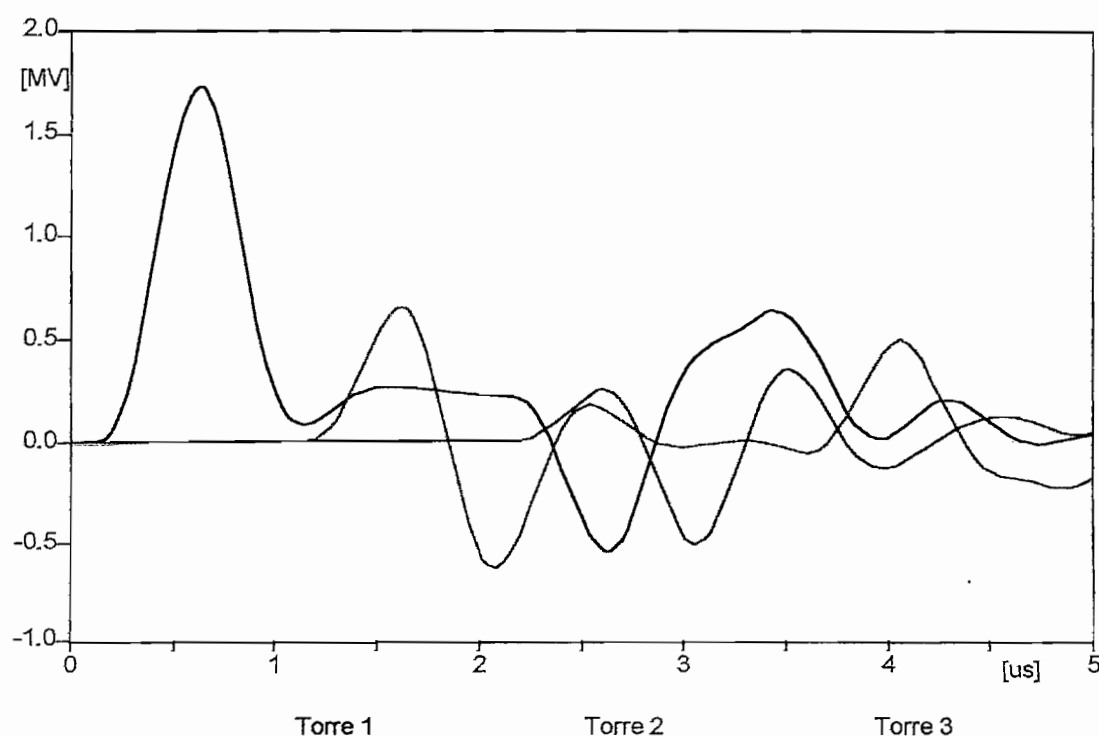


Fig. 5.2 Voltaje en el tope de la torre de impacto y adyacentes.

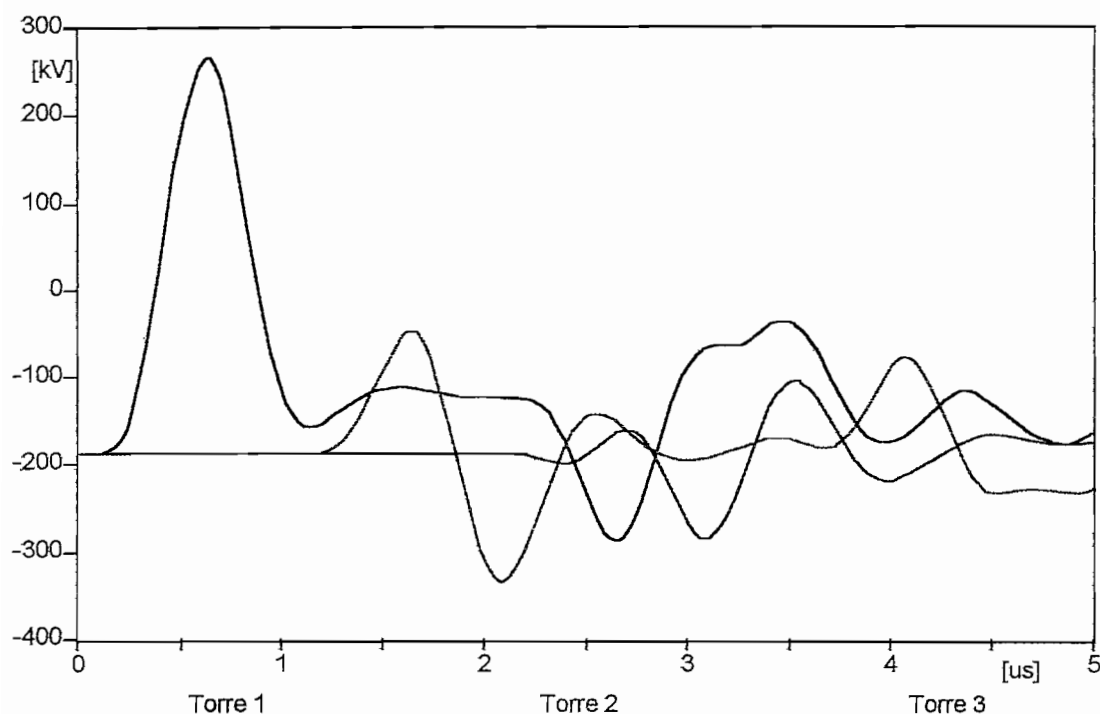


Fig. 5.3 Voltaje inducido en la fase A

5.1.1.2 Descarga en el conductor de fase

Las descargas que llevan corrientes de baja intensidad pueden provocar falla en el apantallamiento e impactar en el conductor de fase. Las descargas que impactan los conductores de fase producen sobrevoltajes en la línea y de acuerdo a su magnitud pueden provocar una falla del aislamiento entre el conductor de fase y la torre de transmisión. La tabla 5.2 presenta los voltajes en la torre de impacto y adyacentes producidos por una descarga directa al conductor de fase superior (Fase A) de 6kA, 6/50 μ s y en la figura 5.4 muestra la forma de onda del voltaje en la fase A y los voltajes inducidos en las fases B y C para la torre de impacto.

Voltajes por descargas en el conductor de fase [kV]				
	Fase A	Fase B	Fase B	Guarda
Torre 1	1219	420	297	109
Torre 2	1208	413	292	34
Torre 3	1203	407	377	20
Torre lejana	273	105	94	0

Tabla 5.2: Voltaje producido por descargas en el conductor de fase

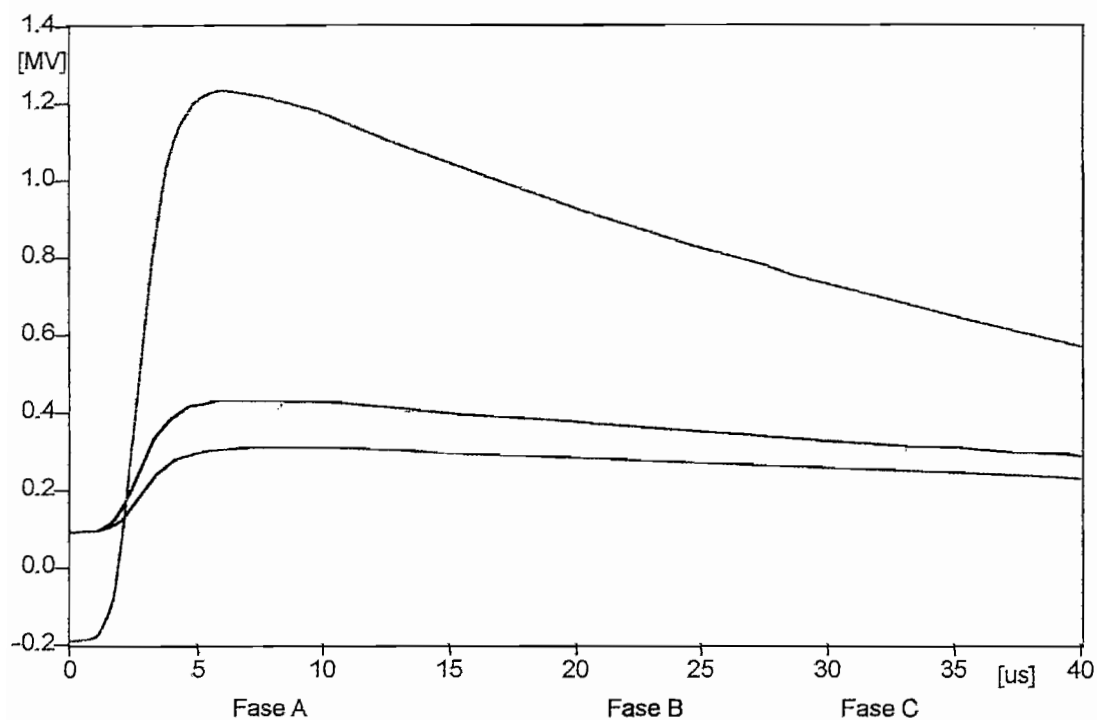


Fig. 5.4 Voltaje en las fases por descarga en el conductor de la fase A

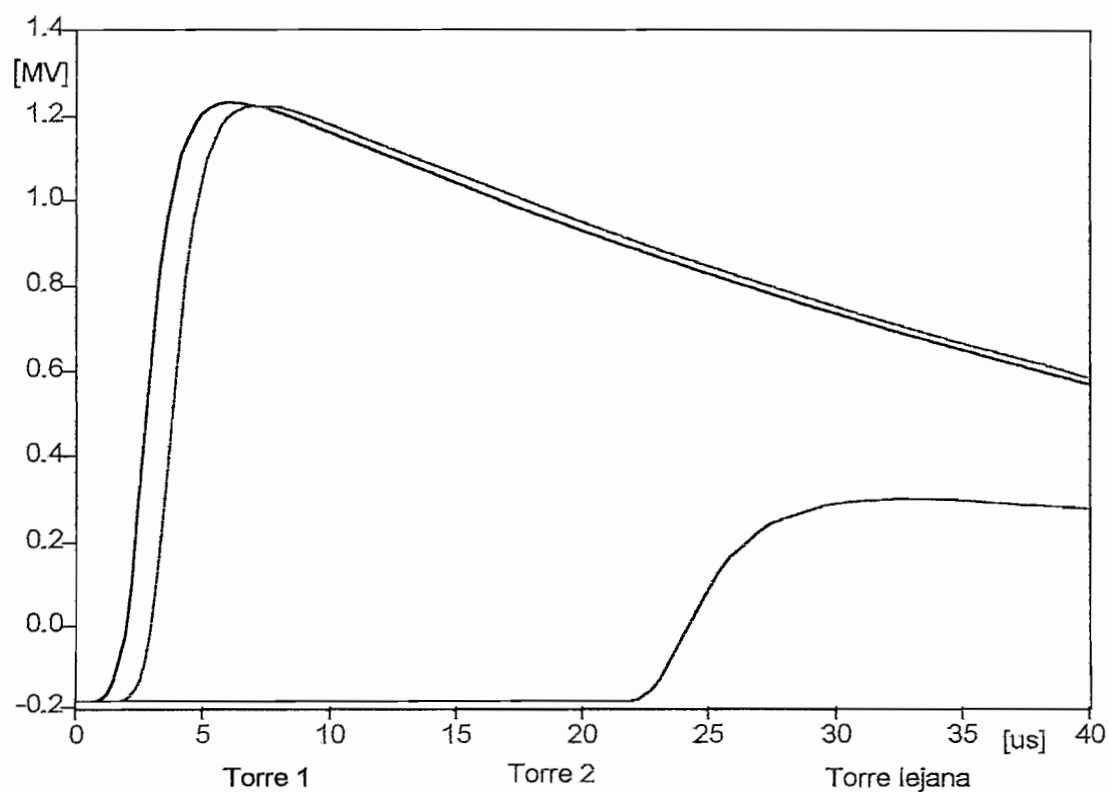


Fig. 5.5 Voltaje en la fase A en varios puntos de la línea

La diferencia entre una descarga en el cable de guarda y una descarga en el conductor de fase radica en que en el primer caso la onda viajera encuentra

varias discontinuidades que hacen que la onda vaya sufriendo distorsiones de la onda dependiendo de los coeficientes de reflexión y que su efecto desaparezca al cabo de ciertos vanos, mientras que en el segundo caso, la onda no encuentra discontinuidades a lo largo de la línea haciendo que la única variación presente sea un amortiguamiento debido a la parte resistiva de la línea.

La figura 5.5 muestra el voltaje en la torre de impacto, en la torre más próxima y en un punto lejano del sitio de la descarga (5 km a partir de la torre de impacto de la descarga).

5.1.2 DESCARGA EN LA MITAD DEL VANO

La mayoría de las descargas atmosféricas no impactan directamente en la torre sino en algún punto del vano, desde el cual la onda de corriente emprende el viaje hacia las torres adyacentes. El mayor valor de sobrevoltaje se produce cuando la descarga se produce en la mitad del vano y es la condición para la cual se realizan las simulaciones.

Cuando la descarga se produce en la mitad del vano los voltajes que se producen en el punto de incidencia son muy superiores a los que se generan cuando la descarga es directa en la torre.

En la tabla 5.3 se presentan los valores de voltajes máximos desarrollados en el punto de incidencia y en las torres adyacentes, mientras que las figuras 5.6 y 5.7 muestran los voltajes en el punto de incidencia y en la torre más próxima respectivamente para un rayo de corriente pico de 25 kA y 1.2/50 μ s.

	Voltajes en una descarga a medio vano [kV]				
	Guarda	Fase A	Fase B	Fase C	Base
Sitio de impacto	7412	1143	1038	743	
Torre 1	1703	214	354	239	256
Torre 2	688	-88	183	188	100
Torre 3	301	-108	180	188	48
Torre 4	302	-108	168	177	32

Tabla 5.3: Voltaje por descargas en medio vano

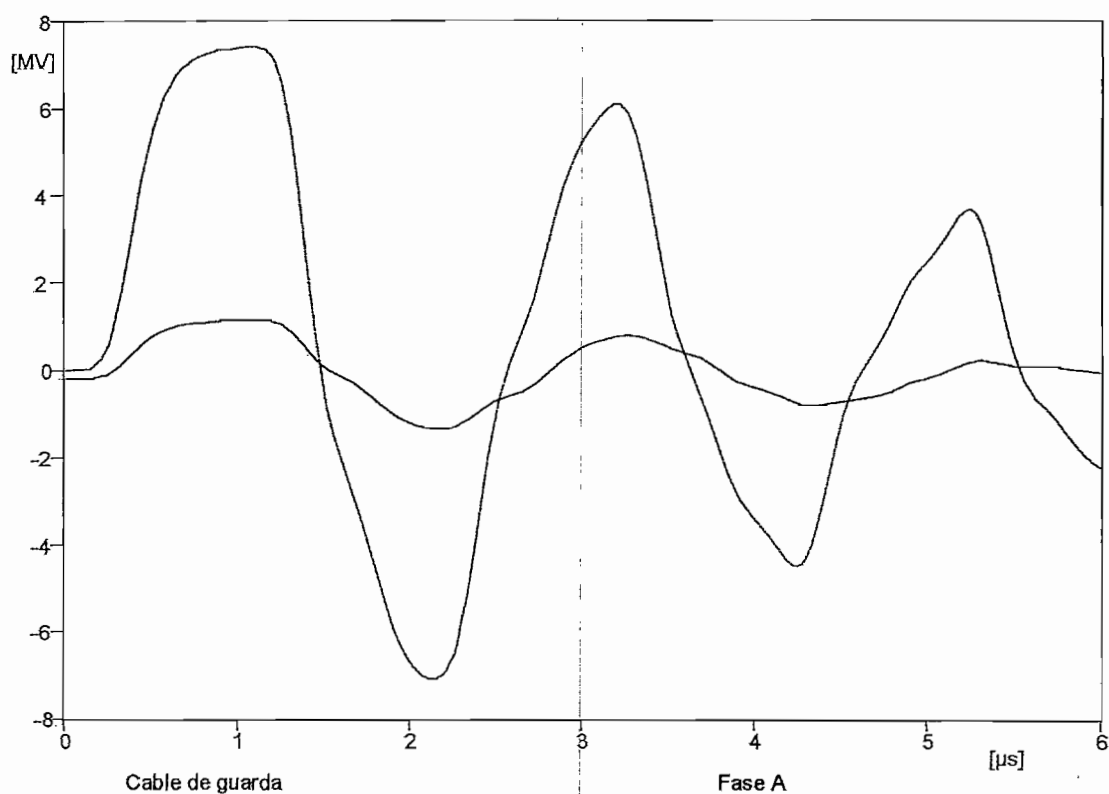


Fig. 5.6: Voltaje en el punto de incidencia de la descarga

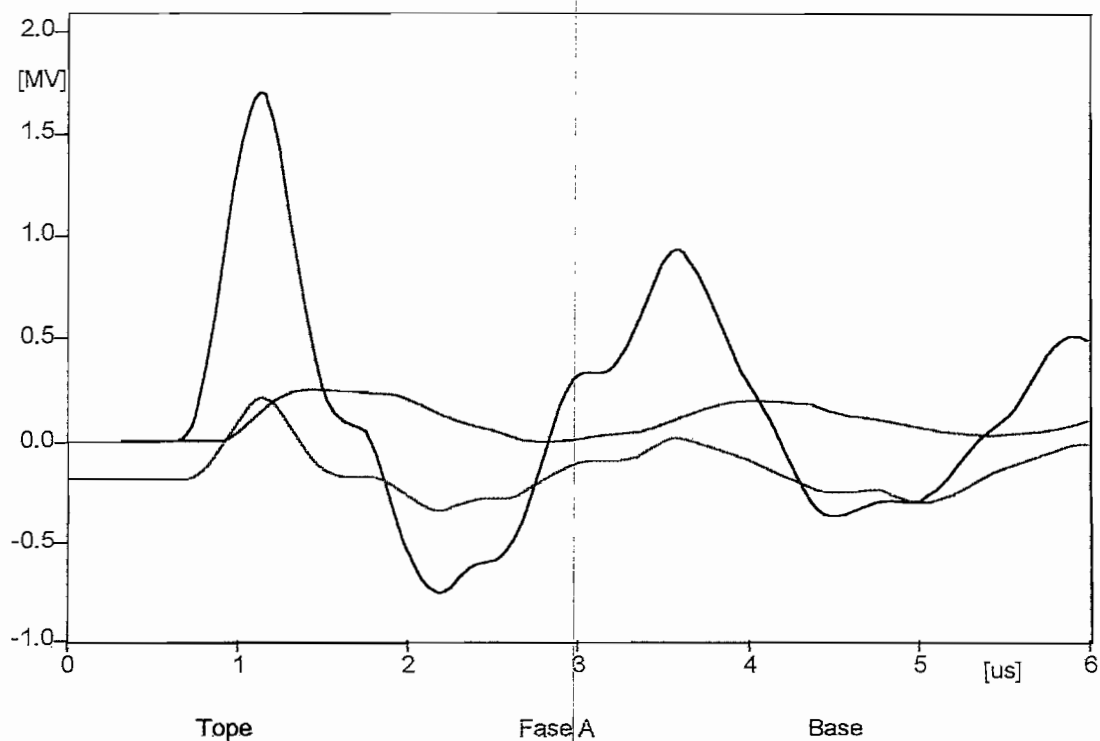


Fig. 5.7: Voltaje en la torre más próxima a la descarga

Cuando la descarga produce una falla del apantallamiento en la mitad del vano, los sobrevoltajes desarrollados son similares a los desarrollados cuando la

descarga impacta en el conductor de fase en la torre de transmisión, pues la corriente ve la misma impedancia característica.

5.2 ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD

Como se ha expuesto anteriormente, los parámetros que caracterizan al rayo son de naturaleza aleatoria, por lo tanto también lo son los sobrevoltajes producidos en las líneas de transmisión. Con el fin de determinar aquellos parámetros de mayor influencia en los sobrevoltajes de origen atmosférico se realiza un estudio de sensibilidad de dichos parámetros. Para el análisis de sensibilidad se consideran los siguientes parámetros:

- Amplitud de la corriente
- Frente de onda
- Tiempo de cola
- La resistencia de pie de torre

Resulta de importancia determinar de los parámetros anteriores cuál es el de mayor influencia en los sobrevoltajes de origen atmosférico. Para dicho análisis se procederá a variar uno de los parámetros manteniendo los otros constantes. Los valores entre los cuales se variaran dichos parámetros estarán de acuerdo a los intervalos más probables de ocurrencia.

5.2.1 SENSITIVIDAD DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE DEL RAYO

Cuando la descarga se produce en el cable de guarda se considera los siguientes parámetros:

Frente de onda = 1.2 μ s

Tiempo de cola = 50 μ s

Resistencia de pie de torre = 10 Ω

Para el caso en que la descarga impacta en el cable de guarda se considera el intervalo de la corriente entre 18 y 100 kA.

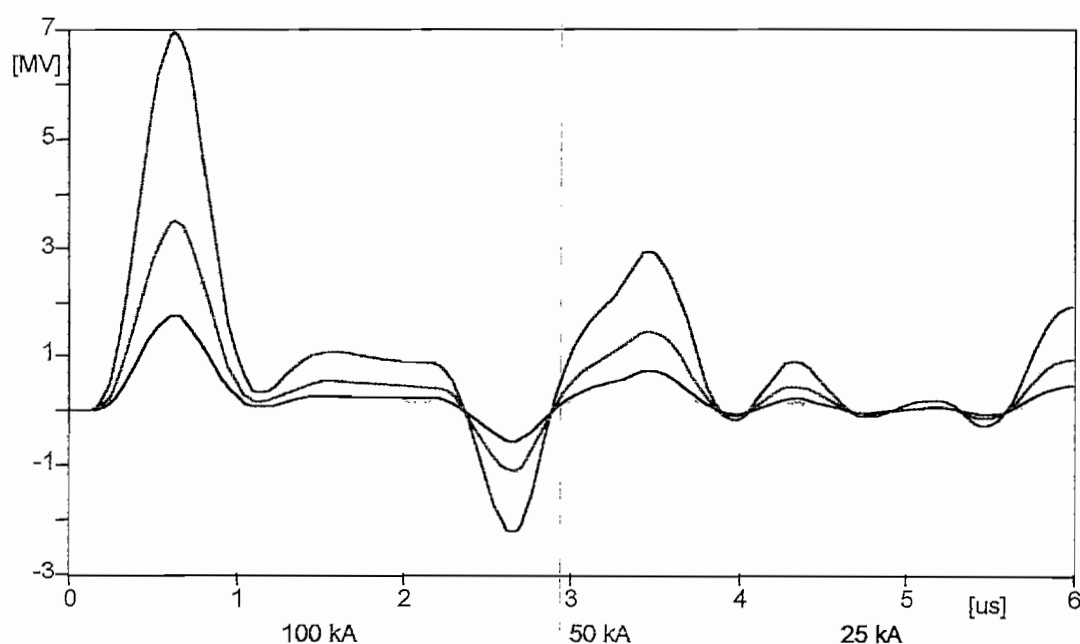


Fig 5.8: Voltaje en el tope de la torre para distintos valores de corriente.

En la tabla 5.4 se muestra los valores máximos de voltajes mientras que en la figura 5.8 se muestra la forma de onda de los voltajes en el tope de la torre para corriente de 25, 50 y 100 kA.

Corriente de rayo [kA]	Voltaje en la torre de transmisión [kV]				
	Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
18	1251	135	325	252	187
20	1390	171	351	270	208
25	1738	261	415	313	260
30	2074	356	478	351	310
35	2433	440	544	401	363
40	2781	530	608	445	415
45	3128	620	672	489	467
50	3476	710	736	533	519
55	3824	799	800	577	571
60	4171	889	865	621	623
65	4519	979	929	665	675
70	4867	1069	993	709	727
75	5214	1158	1057	752	779
80	5562	1248	1122	796	831
85	5909	1338	1186	840	882
90	6257	1428	1250	884	934
95	6605	1517	1314	928	986
100	6952	1607	1379	972	1038

Tabla 5.4: Sensitividad de la corriente del rayo

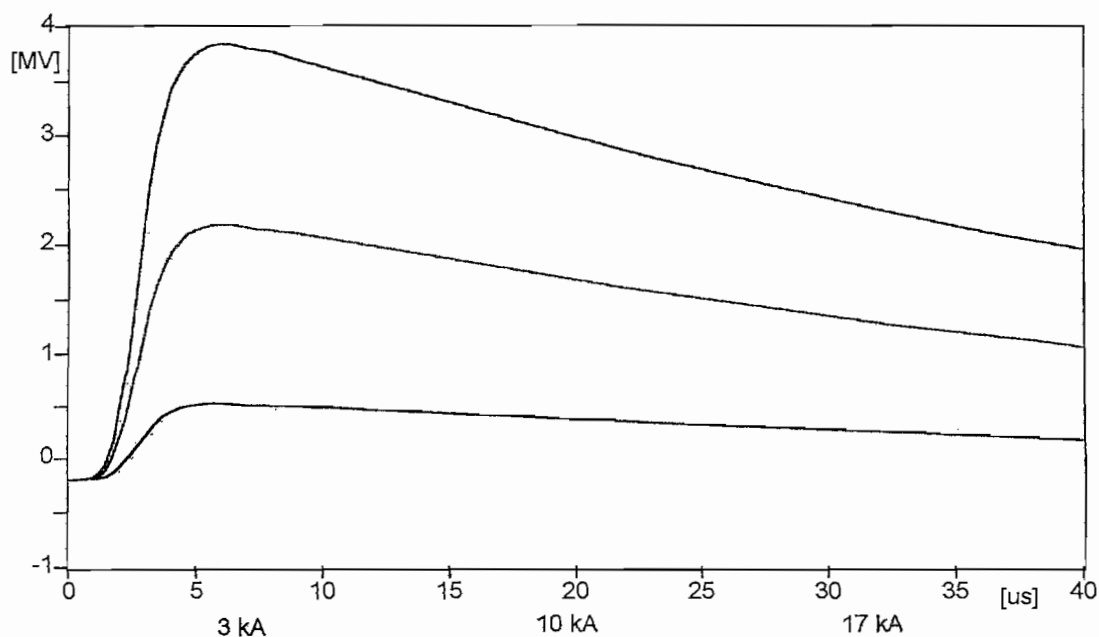
Cuando la descarga se produce en el conductor de la fase superior se considera los siguientes parámetros:

Frente de onda = $1.2 \mu\text{s}$

Tiempo de cola = $50 \mu\text{s}$

Corriente [kA]	Voltajes en la línea de transmisión por falta de apantallamiento [kV]			
	Fase A	Fase B	Fase C	Cable de Guarda
3	516	257	196	54
4	750	311	230	72
5	985	366	263	91
6	1219	420	297	109
7	1453	474	331	127
8	1688	529	365	145
9	1922	583	399	163
10	2157	638	433	181
11	2391	692	467	199
12	2626	746	501	217
13	2860	801	534	236
14	3095	855	568	254
15	3329	910	602	272
16	3564	964	636	290
17	3798	1018	670	308

Tabla 5.5: Sensibilidad de la corriente del rayo



5.9: Voltaje en la fase A para distintos valores de corriente

La corriente de rayo se considera entre 3 y 17 kA, se espera que descargas con corrientes superiores terminarán en el cable de guarda. En la tabla 5.5 se presentan los valores de sobrevoltajes máximos para varios valores de corriente y en la figura 5.9 se muestran los voltajes en la fase A para 3, 10 y 17 kA.

5.2.2 SENSITIVIDAD DEL FRENTE DE ONDA

Para la descarga en el cable de guarda se considera los siguientes parámetros:

Corriente del rayo = 30 kA Tiempo de cola = 50 μ s Resistencia = 10 Ω

Frente [μ s]	Voltaje en la torre de transmisión [kV]				
	Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
1.2	2074	356	478	351	310
2	1477	198	367	278	285
3	1014	73	282	224	283
4	761	12	237	192	271
5	619	-27	210	176	255
6	525	-48	195	164	241
7	456	-67	182	158	237
8	402	-78	175	153	236
9	363	-89	167	150	231
10	334	-94	164	147	230

Tabla 5.6: Sensitividad del frente de onda

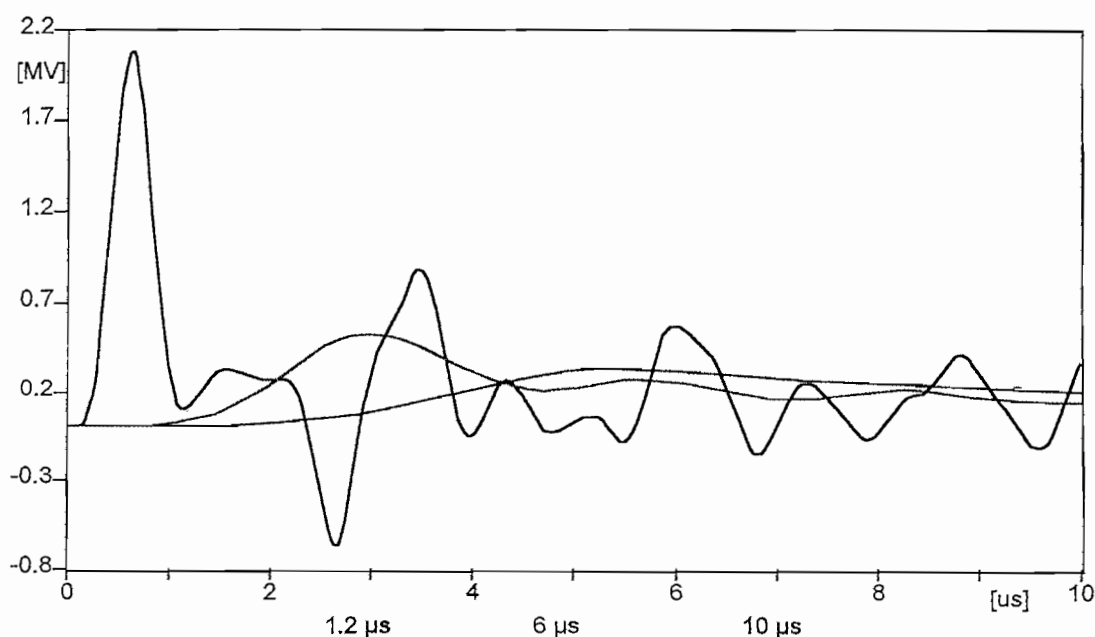


Fig 5.10: Voltaje en el tope de la torre para distintos valores de frente de onda

Si la descarga se produce en el conductor de fase se considera una corriente de 6 kA y un tiempo de cola de 50 μ s. Y los resultados se presentan en la tabla 5.7 y en la figura 5.11

Frente de onda [μ s]	Voltajes en la torre de impacto			
	Fase A	Fase B	Fase C	Cable de Guarda
1.2	1219	420	297	109
2	1223	422	299	77
3	1224	426	301	53
4	1228	428	303	40
5	1230	429	305	33
6	1231	430	307	28
7	1232	431	308	25
8	1233	433	310	22
9	1234	434	311	20
10	1235	435	312	19

Tabla 5.7: Sensitividad del frente de onda para falla del apantallamiento

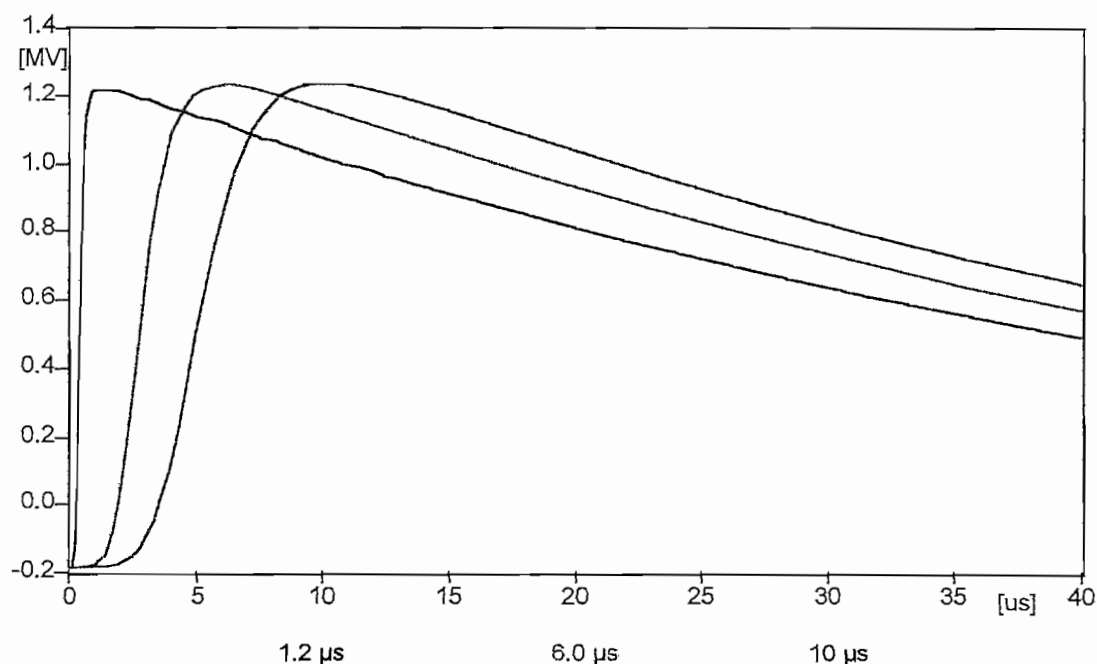


Fig. 5.11: Voltaje en la fase A para distintos valores de frente de onda

5.2.3 SENSITIVIDAD TIEMPO DE COLA

Se considera los siguientes parámetros:

Corriente del rayo = 30 kA

Frente de onda = $1.2 \mu\text{s}$

Resistencia de pie de torre = 10Ω

Los valores del tiempo de cola considerados para la simulación están entre 25 y $250 \mu\text{s}$.

Tiempo de cola [μs]	Voltaje en la torre de transmisión [kV]				
	Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
Estado estable	0	-188	94	94	0
25	1973	329	459	338	306
50	2074	356	478	351	310
75	2132	372	489	358	313
100	2173	383	497	364	315
125	2204	391	503	368	317
150	2228	398	508	371	318
175	2248	403	512	373	320
200	2266	408	515	376	321
225	2281	412	518	377	322
250	2295	416	521	379	322

Tabla. 5.8: Sensitividad de tiempo de cola

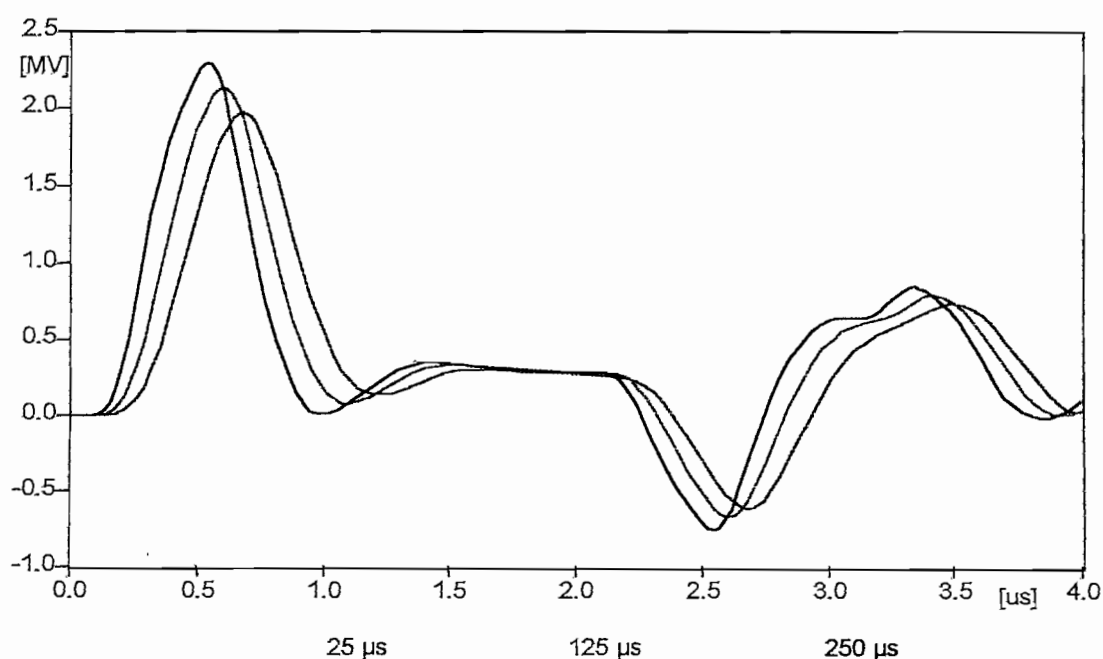


Fig. 5.12: Voltaje en el tope de la torre para distintos valores de tiempo de cola.

5.2.4 SENSITIVIDAD DE LA RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

Se considera los siguientes parámetros:

Corriente del rayo = 30 kA.

Frente de onda = 1.2 μ s y 6.0 μ s

Tiempo de cola = 50 μ s.

Los valores de resistencia se tomarán entre 5 y 100 ohmios. Se considera una sensibilidad para ondas con frente de onda de 1.2 y 6 microsegundos. La tabla 5.9 muestra los valores de voltaje máximo en la torre de impacto, mientras que las figuras 5.13 y 5.14 muestran las formas de onda de voltaje en el tope de la torre para resistencias de 5, 50 y 100 ohmios, considerando un frente de onda de 1.2 y 6.0 microsegundos.

Frente [μ s]	Resistencia [Ω]	Corriente [kA]	Voltaje en la torre de transmisión [kV]				
			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
1.2	5	30	2063	353	476	349	160
	10	30	2074	356	478	351	310
	20	30	2095	362	483	354	582
	30	30	2118	368	487	357	823
	40	30	2140	375	492	360	1037
	50	30	2164	381	496	364	1231
	60	30	2188	388	501	367	1406
	70	30	2213	395	506	371	1566
	80	30	2239	402	512	375	1714
	90	30	2267	410	518	379	1851
	100	30	2298	419	524	394	1980
6	5	30	467	-64	183	156	128
	10	30	525	-48	195	164	241
	20	30	653	-12	221	184	458
	30	30	791	28	251	207	654
	40	30	934	68	282	231	832
	50	30	1073	108	312	253	995
	60	30	1207	146	340	274	1145
	70	30	1333	182	366	293	1283
	80	30	1452	215	391	311	1411
	90	30	1564	246	414	327	1529
	100	30	1668	275	435	342	1640

Tabla 5.9: Sensitividad de la resistencia de pie de torre

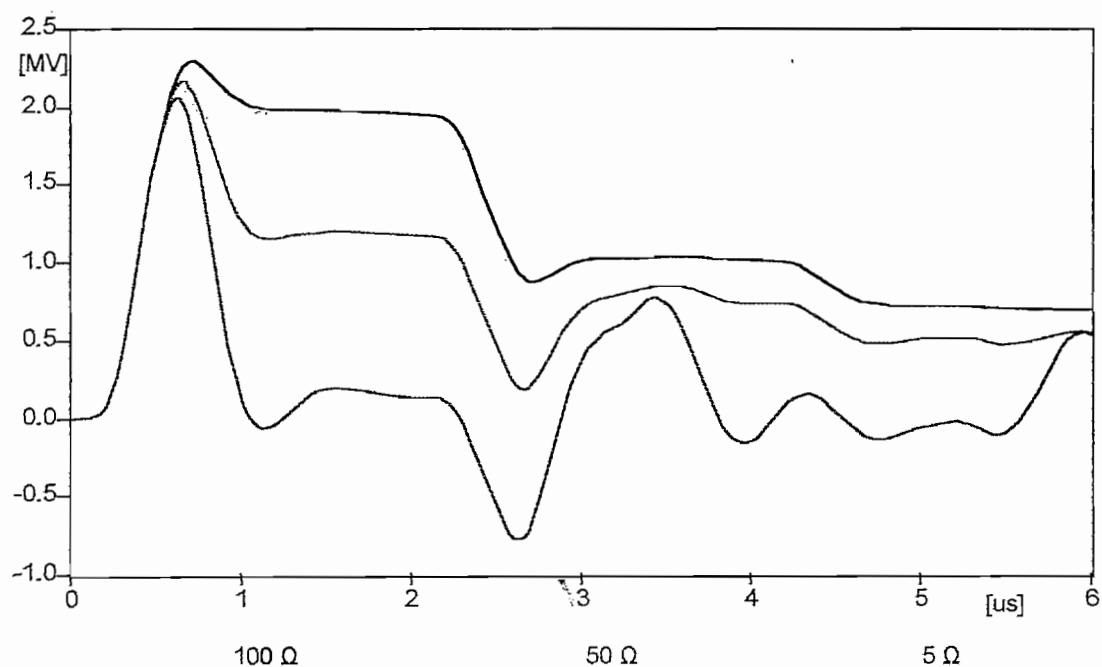


Fig. 5.13: Voltaje en el tope de la torre para distintos valores resistencia y $1.2 \mu\text{s}$ de frente de onda

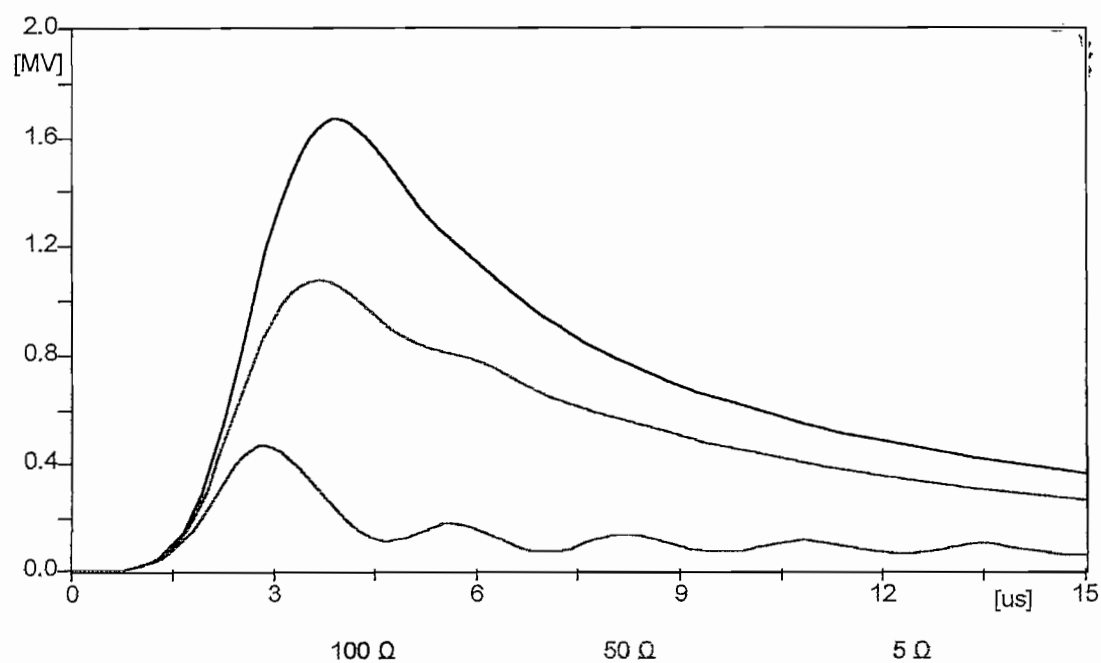


Fig. 5.14: Voltaje en el tope de la torre para distintos valores resistencia y $6 \mu\text{s}$ de frente de onda

5.3 APLICACIÓN A LA LÍNEA SANTA ROSA POMASQUI

La segunda parte de este capítulo corresponde a la aplicación del modelo implementado a la línea de transmisión Santa Rosa - Pomasqui.

La línea de transmisión Santa Rosa - Pomasqui a 230 kV entró en operación en el mes de marzo del 2003. Tiene un total de 81 torres de transmisión repartidas a lo largo de los 46 km. de su recorrido. Es una línea de doble circuito que conecta las subestaciones de Santa Rosa y Pomasqui. La línea se encuentra entre los 2400 y los 4200 msnm. La numeración de las torres corresponde desde Santa Rosa a Pomasqui. En el anexo 1 se presentan los datos utilizados en la simulación.

Con el modelo implementado puede realizarse el análisis para cualquier torre de la línea de transmisión, sin embargo, esto llevaría un sin número de simulaciones con resultados similares en la mayoría de los casos, por lo que el análisis de la línea se realizará en puntos específicos de la línea. Se consideran de análisis los tramos con las características siguientes:

- Un tramo que represente de forma general a la línea
- El tramo que contiene a la torre con menor resistencia de pie de torre.
- El tramo que contiene a la torre con mayor resistencia de pie de torre.
- La Torre más próxima a la Subestación.
- El tramo construido sobre los 4000 metros de altura.
- Falla del apantallamiento.

5.3.1 TRAMO GENERAL

Para un análisis de tipo general se ha seleccionado la torre 68 por tratarse de una torre que representa a la mayoría de las torres de la línea en estudio, pues se encuentra a una altura que puede considerarse como el promedio de la línea y además el valor de la resistencia de pie de torre es similar al de la demás torres.

Los datos considerados para este tramo son los siguientes.

Torre	Altura [msnm]	Resistencia de pie de torre [Ω]	Vano adelante [m]	Presión [cm. Hg.]	Densidad relativa del aire	CFO [kV]	U90 [kV]
64	3028	6.81	660	52.0	0.70	1317	1266
65	2978	4.97	1081	52.3	0.71	1324	1272
66	3075	5.54	211	51.7	0.70	1311	1260
67	3104	5.23	1196	51.5	0.70	1307	1262
68	2998	5.48	984	52.2	0.71	1321	1276
69	2978	4.22	771	52.3	0.71	1324	1279
70	2975	6.79	267	52.3	0.71	1324	1273
71	2964	3.21	367	52.4	0.71	1326	1274
72	2915	8.18	229	52.7	0.71	1332	1281

Tabla 5.10.a: Datos del tramo a ser simulado

En el Anexo 2 se presenta el archivo de entrada en formato ATP y los resultados de la simulación y gráficos con la forma de onda de voltaje en los distintos puntos del sistema modelado para una descarga de 23 kA 1.2/50 μ s.

En la tabla 5.10.b se muestran los resultados de la simulación.

Frente de onda [μs]	Corriente [kA]	Voltajes en la torre de impacto [kV]				
		Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Cadena de aisladores Fase A
1.2	23	1582	227	387	290	1264
2.0	35	1695	255	407	305	1263
4.0	76	1795	283	430	323	1268
6.0	119	1816	293	439	333	1275
8.0	159	1812	295	443	338	1274
10.0	196	1801	296	445	341	1271

Tabla 5.10.b: resultados de la simulación

Para valores mayores de corriente de rayo o valores menores de frente de onda de los presentados en la tabla 5.10.b se esperaría una falla por descarga inversa (backflashover).

La figura 5.15 muestra el voltaje en la cadena de aisladores de la fase A para descarga atmosférica con una corriente de rayo de 24 kA. y un frente de onda de 1.2 μ s, es decir, para el caso en que la corriente del rayo ha superado el valor del

indicado en la tabla 5.10b y por ende provoca una falla del aislamiento. Como puede observarse el voltaje en la cadena se incrementa hasta que alcanza el nivel de aislamiento y se produce la descarga inversa.

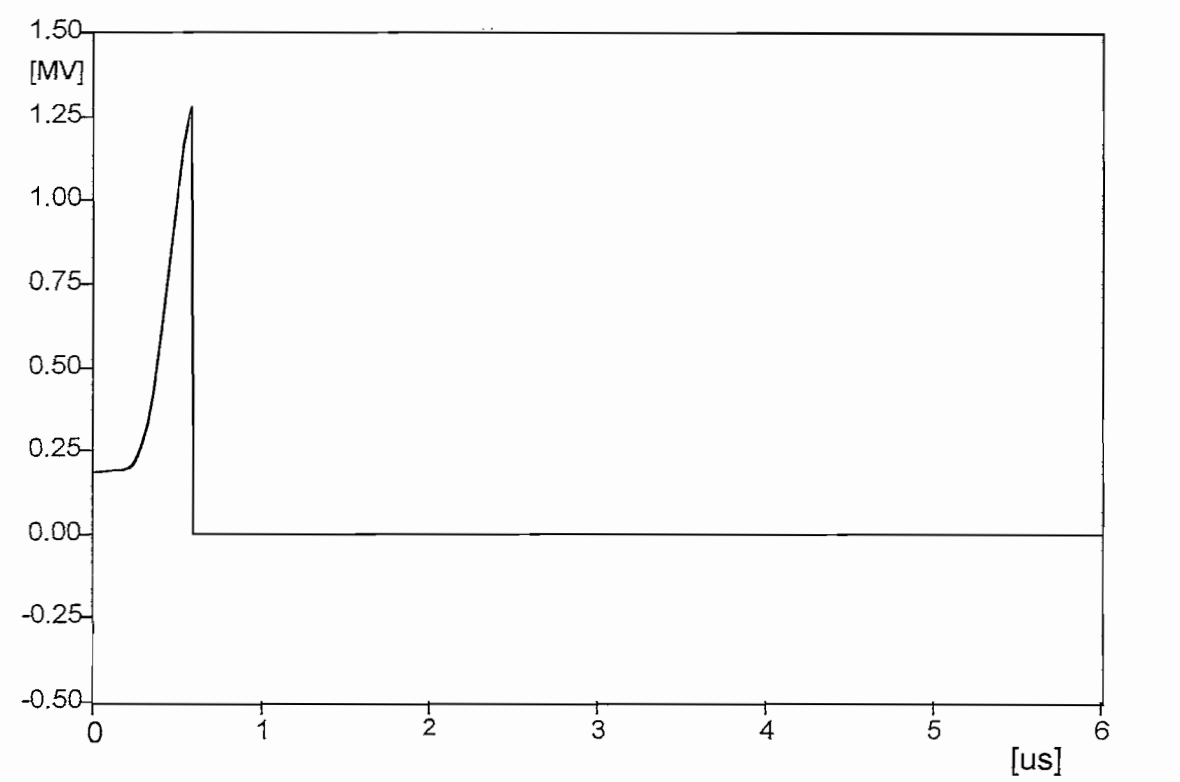


Fig. 5.15 Voltaje en la cadena de aisladores de la fase A

5.3.2 TORRE DE MENOR RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

La torre de menor resistencia de pie de torre es la torre 73 que presenta una resistencia de 0.51Ω. Las características del tramo a simularse son las siguientes:

Torre	Altura [msnm]	Resistencia de pie de torre [Ω]	Vano adelante [m]	Presión [cm. Hg.]	Densidad relativa del aire	CFO [kV]	U90 [kV]
69	2978	4.22	771	52.3	0.72	1341	1288
70	2975	6.79	267	52.3	0.72	1341	1289
71	2964	3.21	367	52.4	0.72	1342	1290
72	2915	8.18	229	52.7	0.72	1349	1296
73	2879	0.51	330	52.9	0.73	1354	1301
74	2825	5.5	725	53.3	0.73	1361	1308
75	2707	7.45	752	54.1	0.74	1377	1324
76	2603	9.72	406	54.8	0.75	1392	1338
77	2527	8.4	484	55.3	0.76	1403	1348

Tabla 5.11.a: Datos del tramo a ser simulado

Los resultados obtenidos de la simulación son los siguientes:

Frente de onda [μs]	Corriente [kA]	Voltajes en la torre de impacto [kV]				
		Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Cadena de aisladores Fase A
1.2	23	1574	225	385	289	1255
2	37	1763	272	419	313	1299
4	84	1873	303	444	333	1297
6	141	1902	317	458	348	1294
8	208	1935	335	477	370	1299
10	277	1957	351	495	390	1300

Tabla 5.11.b: Resultados de la simulación

Para valores mayores de corriente de rayo o valores menores de frente de onda de los presentados en la tabla 5.11.b se esperaría una falla por descarga inversa.

5.3.2 TORRE CON MAYOR RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

La torre con mayor resistencia de pie de torre es la torre 2 con una resistencia de 16.47 ohmios. Los datos del tramo a ser simulado son los siguientes:

Torre	Altura [msnm]	Resistencia de pie de torre [Ω]	Vano adelante [m]	Presión [cm. Hg.]	Densidad relativa del aire	CFO [kV]	U90 [kV]
1	3100	7.2	451	51.49	0.71	1324	1273
2	3080	16.47	470	51.62	0.71	1327	1275
3	3011	7.16	291	52.07	0.72	1336	1284
4	3011	7.08	332	52.07	0.72	1336	1284
5	3015	6.75	591	52.04	0.72	1335	1283
6	3078	7.27	350	51.64	0.71	1327	1275
7	3090	6.55	467	51.56	0.71	1326	1274
8	3112	7.53	502	51.42	0.71	1323	1271
9	3168	4.46	460	51.06	0.70	1315	1264

Tabla 5.12.a: Datos del tramo a ser simulado

Los resultados de la simulación se presentan en la tabla 5.12b en donde para valores mayores de corriente de rayo o valores menores de frente de onda de los presentados se esperaría una falla por descarga inversa.

Frente de onda [μs]	Corriente [kA]	Voltajes en la torre de impacto [kV]				
		Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Cadena de aisladores Fase A
1.2	22	1531	214	378	284	1233
2	33	1656	245	400	300	1252
4	65	1735	269	420	317	1266
6	92	1721	270	423	322	1269
8	113	1696	268	424	331	1267
10	134	1694	276	436	357	1272

Tabla 5.12.b: Resultados de la simulación

5.3.3 TORRE MÁS PRÓXIMA A LA SUBESTACIÓN

En la coordinación de aislamiento resulta de importancia analizar el comportamiento de los equipos de una subestación cuando un rayo cae en las torres cercanas a la subestación. En este trabajo se supone que una descarga cae sobre la torre más cercana de la Subestación Santa Rosa.

Los datos son los mismos que para el caso anterior y la resistencia de pie de torre para la torre en análisis es 7.2 ohmios.

Frente de onda [μs]	Corriente [kA]	Voltajes en la torre de impacto [kV]				
		Torre de impacto			Subestación	
		Guarda	Fase A	Cadena	Descargador	Transformador
1.2	19	1280	128	1219	-183	-183
2	30	1369	128	1237	-183	-181
4	76	1462	136	1261	-176	-172
6	124	1473	146	1268	-170	-164
8	167	1468	153	1270	-165	-160
10	208	1461	158	1271	-161	-157

Tabla 5.13: Resultados de la simulación

Para valores mayores de corriente de rayo o valores menores de frente de onda de los presentados en la tabla 5.13 se esperarí una falla por descarga inversa.

5.3.4 TRAMO CONSTRUIDO SOBRE LOS 4000 METROS DE ALTURA

Los datos considerados para la simulación de este tramo se presentan en la tabla 5.14a.

Torre	Altura [msnm]	Resistencia de pie de torre [Ω]	Vano adelante [m]	Presión [cm. Hg.]	Densidad relativa del aire	CFO [kV]	U90 [kV]
39	3744	5.33*	672	47.49	0.65	1298	1248
40	3922	6.67*	401	46.44	0.64	1275	1225
41	4031	5.00*	1115	45.81	0.63	1261	1212
42	4053	5.67*	550	45.68	0.63	1258	1209
43	4194	4.00*	1130	44.88	0.62	1241	1192
44	4138	4.67*	472	45.20	0.62	1248	1199
45	4053	5.00*	706	45.68	0.63	1258	1209
46	4036	6.00*	274	45.78	0.63	1261	1211
47	4054	4.67*	264	45.68	0.63	1258	1209

Tabla 5.14.a: Datos del tramo a ser simulado
 * Valores de resistencia de pie de torre no verificados

En vista de que los valores de las resistencias de pie de torre para este tramo no han sido verificadas, se utilizará para la simulación una resistencia de 10 ohmios.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

Frente de onda	de [μ s]	Corriente [kA]	Voltajes en la torre de impacto [kV]				
			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Cadena de aisladores Fase A
	1.2	21	1451	193	363	274	1177
	2	32	1573	385	385	290	1191
	4	66	1641	223	402	304	1191
	6	98	1632	243	405	309	1187
	8	126	1618	245	407	313	1186
	10	151	1608	246	409	317	1187

Tabla 5.14b: Resultados de la simulación

Para valores mayores de corriente de rayo o valores menores de frente de onda de los presentados en la tabla 5.14b se esperaría una falla por descarga inversa.

5.3.4 FALLA DEL APANTALLAMIENTO

De las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad, se determinó que para fallas del apantallamiento, la variable de mayor influencia es la intensidad de la corriente del rayo. Por lo tanto, en esta parte se determina la magnitud de la corriente de aquella descarga que provoque una falla del aislamiento. El tramo considerado para determinar esta corriente es el construido sobre los 4000 metros

de altura pues es en este tramo donde se tiene el menor aislamiento de la línea por efectos de la altura.

De las simulaciones se obtiene que la línea puede soportar descargas de hasta 5.9 kA sin provocar un contorneo entre la fase y la torre de transmisión. Los sobrevoltajes ocasionados por esta corriente se presentan a continuación:

Corriente [kA]	Voltajes en la torre de impacto [kV]				Cadena de aisladores Fase A
	Tope	Fase A	Fase B	Fase C	
5.9	107	1195	413	295	1186

Tabla 5.15: Resultados de la simulación

Para corrientes superiores a 5.9 kA se espera una falla del aislamiento y por consiguiente una descarga fase tierra.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizadas las simulaciones y obtenidos las formas de onda y los valores de voltaje máximo que se producen en una descarga atmosférica ya se puede determinar los parámetros de mayor influencia en los sobrevoltajes por descargas atmosféricas directas.

5.4.1 DESCARGA EN EL CABLE DE GUARDA

En una descarga que impacta en el cable de guarda de la torre de transmisión, parte de la corriente viaja hacia las torres adyacentes y la otra viaja a través de la torre produciendo una serie de reflexiones, tanto en las terminales de las crucetas como en la base de la torre, estas reflexiones se evidencian en la figura 5.1, mientras que el viaje de la onda a las torres adyacentes se visualiza en la figura 5.3. La onda viajera induce voltajes también de naturaleza viajera en los conductores de fase como se muestra en la figura 5.2. En realidad el voltaje máximo está determinado por las reflexiones en la torre de transmisión y no por las reflexiones de las torres adyacentes que si bien están presentes, estas no

tienen incidencia en el valor máximo de voltaje, debido al tiempo de viaje de las ondas, pues estas últimas tardan más tiempo en regresar al sitio de impacto.

Si la descarga se produce en la mitad de un vano, puede verse en la tabla 5.3 y figura 5.6, que el voltaje en el punto de incidencia es elevado en comparación al voltaje que se produce cuando la descarga es en la torre. Este voltaje viaja a las torres adyacentes y se amortigua de tal forma que en la torre más próxima se obtienen voltajes incluso un tanto menores a los que se producen cuando la descarga es en la torre, esto se puede ver en la figura 8 y los voltajes compararse con los de la tabla 5.1.

Del análisis de sensibilidad realizado en el numeral 5.2 puede ya determinarse la influencia de la corriente de rayo, del frente de onda, tiempo de cola y de la resistencia de pie de torre en los voltaje producidos por rayos.

En cuanto a la corriente del rayo y como era de esperarse, existe una relación directa entre la corriente y el voltaje, es decir, mientras mayor es la corriente de rayo mayor será el voltaje producido tal como se muestra en la figura 5.16 en la que se presenta la sensibilidad para frentes de onda de 1.2 y para 6 μ s. Como puede verse el voltaje es mayor cuando se tiene un menor frente de onda.

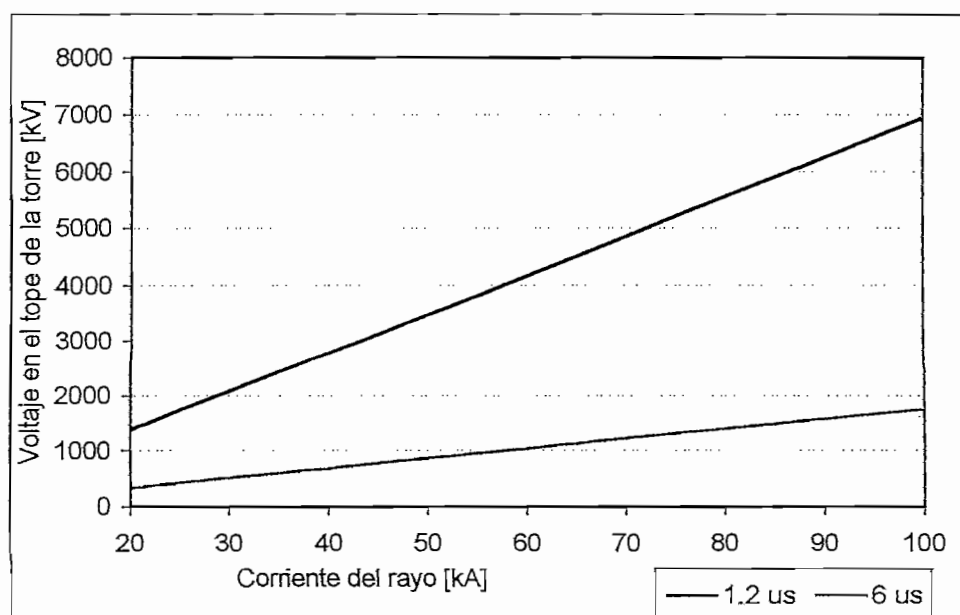


Fig. 5.16 Sensibilidad de la corriente de rayo

En la figura 5.16 ya se puede notar la importancia que tiene el frente de onda de una descarga en estos voltajes. El frente de onda es quizá el parámetro más importante en la generación de estos sobrevoltajes. La figura 5.17 muestra que la característica es inversa, es decir, a menor frente de onda mayor será el voltaje que se produzca en la torre de transmisión. Este hecho se debe a que si el tiempo de frente de onda es menor, entonces el pico de la onda de corriente se producirá mucho más rápido y la reflexión de la base de la torre no es lo suficientemente rápida para evitar el incremento del voltaje. En la figura 5.10 en la que se muestra las formas de onda de voltaje para distintos valores de frente de onda, se puede notar como cambia la forma de cada una de ellas dependiendo del frente de onda.

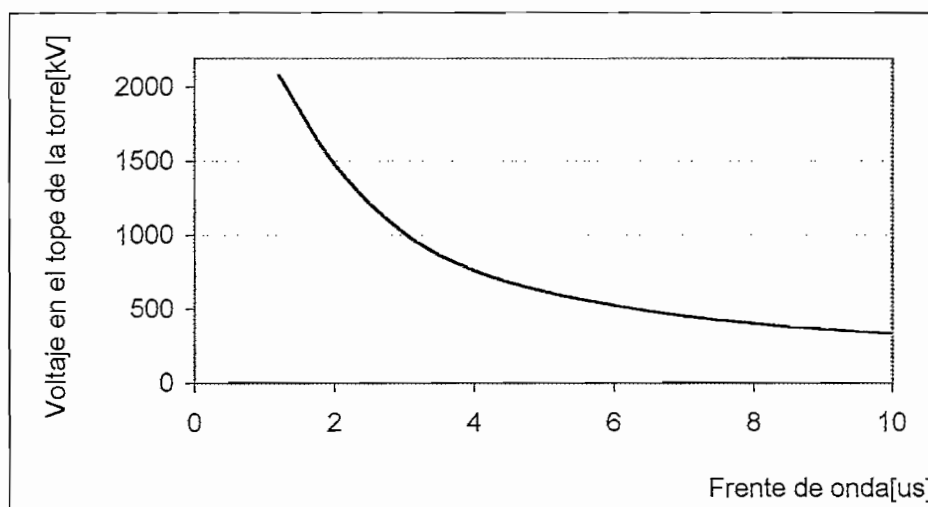


Fig. 5.17: Sensitividad del frente de onda

Otro de los parámetros del rayo es el tiempo de cola de la corriente del rayo, en la figura 5.18 se puede observar como varía el voltaje máximo en función del tiempo de cola. El voltaje es mayor a mayor tiempo de cola, esto puede verse también en la figura 5.12 y en la tabla 5.8. Si bien es cierto, el voltaje se incrementa al incrementarse el tiempo de cola, este incremento es menos representativo en comparación con los dos parámetros analizados anteriormente. En lo que a la forma de onda se refiere esta tiene prácticamente la misma forma y varía solo en los valores pico, figura 5.12.

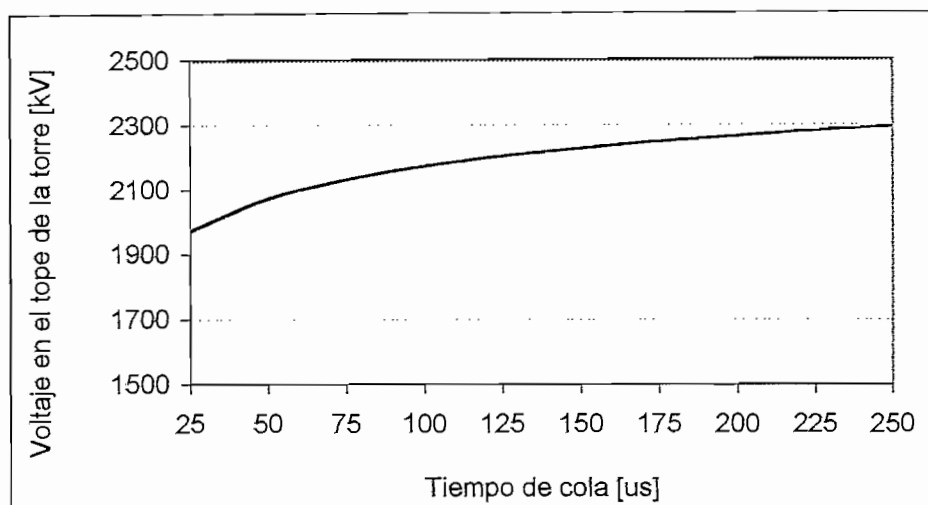


Fig. 5.18 Sensibilidad del tiempo de cola

Quizá sobre el único parámetro que se pueda tener control, cuando se produce una descarga atmosférica en el cable de guarda o en la torre, es la resistencia de pie de torre.

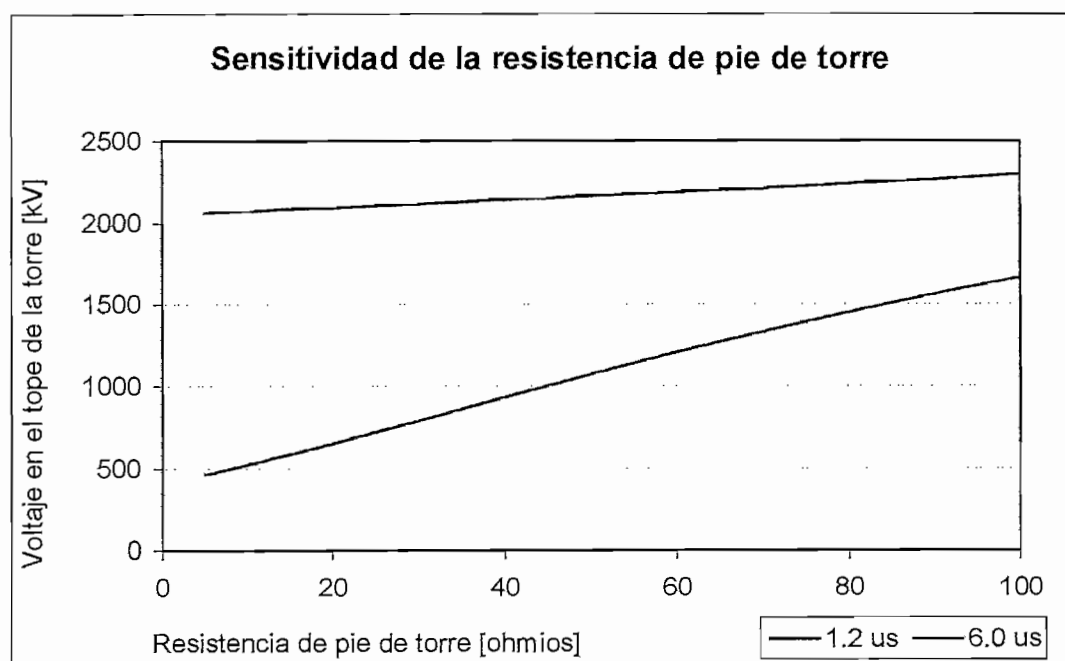


Fig. 5.19: Sensibilidad de la resistencia de pie de torre

En la figura 5.19 se ve la influencia del valor de la resistencia de pie de torre en el valor máximo del voltaje en el tope de la torre. Para frentes de onda pequeños el

valor de la resistencia de pie de torre tiene poca influencia, mientras que para frentes de onda mayores la variación de voltaje es representativa.

5.4.2 DESCARGA EN EL CONDUCTOR DE FASE

Las figuras 5.20 y 5.21 muestran la sensibilidad de la corriente del rayo y del frente de onda respectivamente, para una descarga en el conductor de fase A (fase superior), en las cuales se puede ver que el voltaje es proporcional a la corriente del rayo y que el frente de onda no tiene mayor influencia en el valor máximo del voltaje. La figura 5.20 muestra también los voltajes inducidos en las otras dos fases.

La descarga en un conductor de fase implica que la onda viajera de corriente viaja a través de conductor y no encuentra ningún cambio en la impedancia característica, a no ser que la descarga se produzca en las proximidades de la subestación, por lo que no existen reflexiones que puedan influir en el voltaje producido. Entonces, el frente de onda y la posición de la descarga no son de importancia en estos casos.

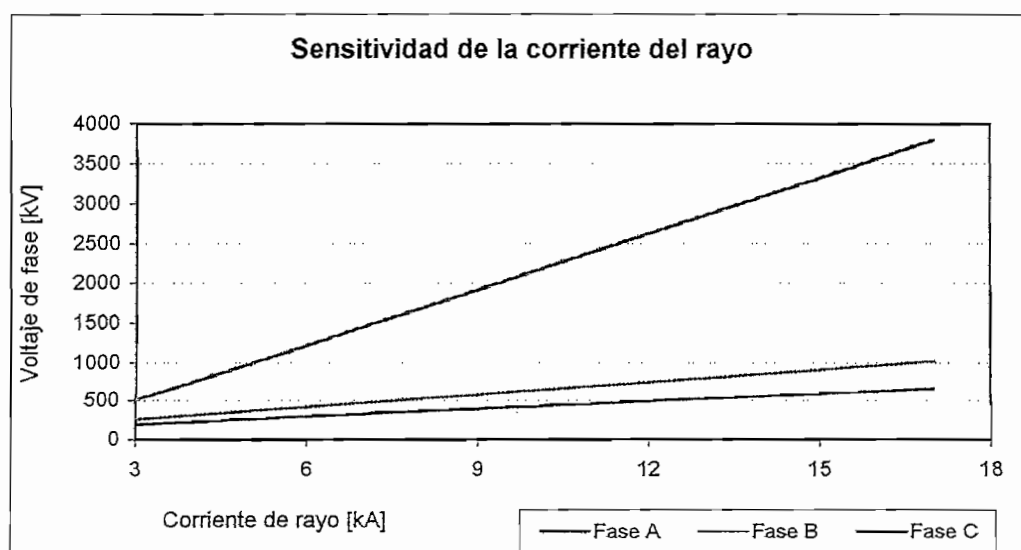


Fig. 5.20: Sensibilidad de la corriente del rayo para una descarga en el conductor de fase A y los voltajes inducidos en las otras fases.

Si la descarga se produce en la cercanía de la subestación, la onda viajera de corriente encuentra tanto a los pararrayos como a la impedancia del transformador que van a influir en el sobrevoltaje máximo.

De este análisis se determina que el único parámetro que influye en el valor máximo del voltaje generado por una descarga atmosférica al conductor de fase es la corriente del rayo. Ni el frente de onda, ni la posición de la descarga y peor aún la resistencia de pie de torre influyen en el voltaje máximo generado.

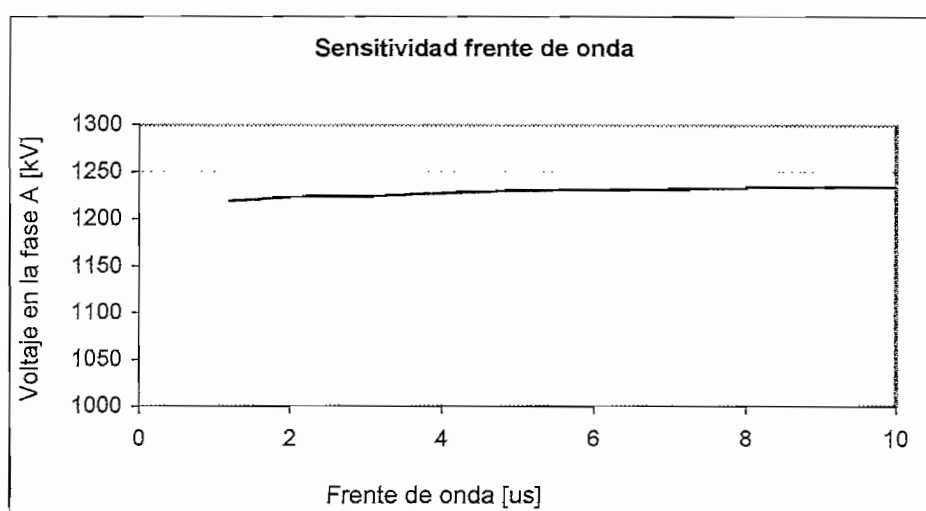


Fig. 5.21: Sensibilidad del frente de onda

Como parte final de este trabajo y aplicado a los tramos analizados para la línea Santa Rosa - Pomasqui se presenta un análisis de tipo probabilístico, para determinar la probabilidad de que se presenten las condiciones que hagan que se produzca un contorno inverso (backflashover) en los distintos tramos analizados.

Como ya se ha visto los parámetros de mayor influencia en el voltaje máximo son la corriente pico y el frente de onda. El voltaje que ocasiona contorno también es aleatorio y para el caso de la simulación se consideró una probabilidad del 90%, entonces si se considera que el valor de estos parámetros constituyen eventos independientes, la probabilidad de que un rayo que impacta en una torre de transmisión produzca contorno estará dada por el producto de las probabilidades de que se produzca cada evento:

$$P = P_f * P_i * P_{U90} \quad (5.1)$$

Donde:

P = Probabilidad de que se produzca contorno

P_f = Probabilidad de tener frentes de onda menor al señalado.

P_i = Probabilidad de tener corrientes mayores a la señalada.

P_{U90} = Probabilidad de que el voltaje especificado en los interruptores no produzca el contorno en la cadena = 90%

En las tablas que se presentan a continuación se muestra la probabilidad de que una descarga que impacta una torre de transmisión provoque falla del aislamiento. Se considera que para descargas con magnitud de corriente superior o frente de onda menor a los señalados en cada una de las tablas se producirá una descarga inversa.

Torre 68

Frente de onda		Corriente		P [%]
[μ s]	P_f [%]	[kA]	P_i [%]	
1.2	0.4	23	68.5	0.2
2.0	3.6	35	42.2	1.4
4.0	27.6	76	8.9	2.2
6.0	54.4	119	2.9	1.4
8.0	72.9	159	1.4	0.9
10.0	84.1	196	0.8	0.6

Tabla. 5.16: Probabilidad de contorno en torre 68

Torre con menor resistencia de pie de torre.

Frente de onda		Corriente		P [%]
[μ s]	P_f [%]	[kA]	P_i [%]	
1.2	0.4	23	68.5	0.2
2.0	3.6	37	38.7	1.3
4.0	27.6	84	7.0	1.7
6.0	54.4	141	1.9	0.9
8.0	72.9	208	0.7	0.5
10.0	84.1	277	0.3	0.3

Tabla. 5.17: Probabilidad de contorno en la torre 73

Torre con la mayor resistencia de pie de torre.

Frente de onda		Corriente		P [%]
[μ s]	P _f [%]	[kA]	P _i [%]	
1.2	0.4	22	70.9	0.2
2.0	3.6	33	45.9	1.5
4.0	27.6	65	12.7	3.2
6.0	54.4	92	5.6	2.7
8.0	72.9	113	3.3	2.2
10.0	84.1	134	2.2	1.6

Tabla. 5.18: Probabilidad de contorno en la torre 2

Torre más próxima a la subestación

Frente de onda		Corriente		P [%]
[μ s]	P _f [%]	[kA]	P _i [%]	
1.2	0.4	19	78.1	0.3
2.0	3.6	30	52.1	1.7
4.0	27.6	76	8.9	2.2
6.0	54.4	124	2.6	1.3
8.0	72.9	167	1.2	0.8
10.0	84.1	208	0.7	0.5

Tabla. 5.19: Probabilidad de contorno en la torre 1

Tramo construido sobre los 4000 metros de altura

Frente de onda		Corriente		P [%]
[μ s]	P _f [%]	[kA]	P _i [%]	
1.2	0.4	21	73.4	0.2
2.0	3.6	32	47.9	1.6
4.0	27.6	66	12.3	3.1
6.0	54.4	98	4.8	2.3
8.0	72.9	126	2.5	1.7
10.0	84.1	151	1.6	1.2

Tabla. 5.20: Probabilidad de contorno en el tramo ubicado sobre los 4000 msnm.

En las tablas anteriores se puede observar la probabilidad de falla del aislamiento si una descarga atmosférica impacta en la torre de transmisión. La mayor

probabilidad de fallas del aislamiento se presenta para descargas con frentes de onda entre 2 y 6 μ s.

Los tramos de mayor probabilidad de que falle el aislamiento y se produzca una descarga inversa (backflashover) son: el que contiene la mayor resistencia de pie de torre (torre 2) y el tramo construido sobre los 4000 metros de altura, mientras que como era de esperarse la torre de menor probabilidad de producirse una descarga inversa es la torre de menor resistencia de pie de torre (torre 73).

Para descargas en el conductor de fase se considera que la línea se encuentra aislada para descargas con corrientes de hasta 5.9 kA, es decir cualquier corriente entre 5.9 y 18 kA, independientemente del frente de onda puede provocar una falla del aislamiento y por consiguiente una falla a tierra en la línea.

La probabilidad de tener corrientes en el intervalo antes mencionado se puede calcular como:

$$P(5.9 < I < 18) = P(I > 5.9) - P(I > 18) \quad (5.2)$$

Las probabilidades $P(I > 5.9)$ y $P(I > 18)$ pueden hallarse con la expresión 4.1, obteniéndose que la probabilidad de tener corrientes en ese intervalo es del 18.25%. Considerando que la probabilidad de que no exista descarga inversa es un evento independiente e igual al 90% para el voltaje especificado para la cadena de aisladores, entonces, la probabilidad de que si un rayo impacta en la línea de transmisión, provoque una falla de apantallamiento y luego una descarga fase tierra estará dada por la multiplicación de las dos probabilidades anteriores y es igual a 16.43%.

Del resultado expuesto anteriormente se puede notar que, si un rayo impacta una línea de transmisión, la probabilidad de que se produzca una falla del aislamiento es mucho mayor cuando existe falla del apantallamiento que cuando la descarga impacta en el cable de guarda o en la torre.

El análisis realizado en este capítulo ha permitido, determinar la respuesta de una línea de transmisión cuando es impactada por una descarga de origen atmosférico. También mediante un análisis de sensibilidad se han determinado aquellos factores de mayor influencia en los valores máximos de los sobrevoltajes ocasionados por dicho fenómeno.

Finalmente, es necesario expresar que el modelo implementado en este trabajo puede ser utilizado para el análisis de cualquier línea a 230 kV. ya que se ha utilizado la configuración de una línea estándar para alturas sobre 1000 msnm. Las magnitudes de los sobrevoltajes aquí presentados pueden servir como referencia para el diseño del aislamiento de líneas de transmisión.

5.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.5.1 CONCLUSIONES

La simulación y el análisis realizado en el presente trabajo permite expresar las siguientes conclusiones:

- El estudio de los fenómenos de origen transitorio que afectan a los sistemas de potencia, permite determinar ciertos parámetros para el diseño y operación de los mismos (nivel de aislamiento, voltajes máximos de operación, corrientes de cortocircuito, etc.), por lo que la utilización de programas computacionales especializados en este tipo de estudios adquiere extrema importancia.
- Uno de los factores que en líneas de transmisión, de hasta 230 kV., determinan el nivel de aislamiento son los sobrevoltajes ocasionados por descargas de origen atmosférico, por lo que contar con modelos que permitan determinar las magnitudes de estos voltajes de manera mucho más precisa, dependerá de la utilización de la herramienta adecuada y de que los elementos físicos involucrados en el fenómeno sean representados en el modelo de tal forma que simulen los efectos reales que estos ocasionan. Para líneas de voltaje superior a 230 kV., el nivel de aislamiento es determinado por los sobrevoltajes de maniobra
- Una descarga atmosférica, al impactar en una línea de transmisión, provoca un sobrevoltaje transitorio que en general tiene una duración de alrededor de 40 μ s. siendo mayor el tiempo de duración del transitorio si la descarga ocurre en el conductor de fase. El sobrevoltaje dependiendo de la posición de la descarga (cable de guarda, torre de transmisión o conductor de fase) presenta diversas características.
- Si la descarga impacta en el cable de guarda o en la torre de transmisión, el efecto provocado por la onda viajera, desaparecerá al cabo de algunos vanos, debido a que las reflexiones existentes tanto en las crucetas de la

torre como en la resistencia de pie de torre, contribuyen a la atenuación de la onda.

- El valor máximo o pico del sobrevoltaje, provocado por una descarga en el cable de guarda o en la torre, es determinado por las reflexiones en la torre de impacto (crucetas y resistencia de pie de torre). Las reflexiones en las torres adyacentes a la torre de impacto no influyen en el valor máximo del sobrevoltajes, pues estas retornan al sitio de impacto después que el sobrevoltaje ha alcanzado su valor máximo.
- En una descarga en el cable de guarda, a mitad del vano, los sobrevoltajes generados son mucho más elevados en el punto de incidencia, comparados con los sobrevoltajes producidos si la descarga impactaría directamente en la torre de transmisión. Sin embargo, a medida que la onda avanza hacia las torres adyacentes, el voltaje disminuye y sus valores a llegar a las torres son inclusive inferiores a los que se producen si la descarga impactaría directamente en la torre de transmisión.
- Si la descarga impacta en el conductor de fase, falla del apantallamiento, la onda viaja a lo largo de toda la línea y se atenúa por efecto de la parte resistiva del conductor de fase por lo que el efecto de una descarga en el conductor de fase tiene mayor duración que en el caso en que la descarga impacta el cable de guarda o la torre. El valor máximo del sobrevoltaje, depende solamente de la impedancia característica del conductor de fase, salvo en el caso en que la descarga se produzca en las proximidades de la subestación, donde los elementos de la subestación pueden producir reflexiones que influyen en el valor máximo.
- La magnitud de la corriente del rayo, es el parámetro de mayor influencia en el valor máximo de los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas, independientemente de la posición de la descarga. El estudio de sensibilidad determinó que a mayor corriente de rayo mayor es el valor máximo del sobrevoltaje en la torre.

- El frente de onda de la corriente de una descarga atmosférica, es un parámetro muy influyente en los valores máximos de los sobrevoltajes, si la descarga se produce en el cable de guarda o la torre. En este caso, la relación entre frente de onda y el sobrevoltaje es inversa, es decir, descargas con frente de onda pequeño (menores a 2 μ s.) producen voltajes mucho más elevados que descargas con frente de onda grandes (mayor a 6 μ s.). En el caso de falla de apantallamiento, el frente de onda es de poca influencia.
- El incremento en el tiempo de cola de la onda de corriente incrementa también el valor máximo del sobrevoltaje, pero su influencia es menor que la magnitud de la corriente del rayo y el frente de onda.
- La resistencia de pie de torre es un parámetro dependiente de la magnitud de la corriente de rayo y dada la naturaleza aleatoria de la corriente, el valor de la resistencia de pie de torre, en el momento de la descarga, es también aleatorio.
- El estudio de sensibilidad mostró que a mayor resistencia de pie de torre mayor es el sobrevoltaje producido en la torre de transmisión, pero esta dependencia es mucho más notoria para descargas con frentes de onda grandes, mientras que para descargas con frentes de onda pequeños la influencia es menor.
- La importancia del valor de la resistencia de pie de torre, radica en que el sobrevoltaje máximo es determinado por las reflexiones de la onda viajera, por lo tanto, un valor bajo en la resistencia de pie de torre provoca una disminución significativa en la magnitud del voltaje máximo debido a que el operador de reflexión en la base de la torre es negativo.
- En lo que a la línea Santa Rosa – Pomasquí se refiere, se puede expresar que de presentarse descargas atmosféricas con características cercanas a los valores más probables (25 kA. y 6 μ s. aproximadamente), el aislamiento

de la línea (aproximadamente 1300 kV. para sobrevoltajes de impulso), en todos sus tramos, soportaría descargas con estas características sin presentar problema alguno pues se presentan voltajes de alrededor de 500 kV. que es menor al nivel de aislamiento de la línea.

5.5.2 RECOMENDACIONES

La simulación de transitorios y la representación de los elementos involucrados en el fenómeno en análisis constituye una parte fundamental en el diseño y operación de los sistemas, por lo que para su correcto análisis se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El programa de transitorios electromagnéticos, ATP, constituye el de mayor difusión a nivel mundial, por lo que tener un conocimiento de características y bondades del programa constituye una etapa trascendental en la simulación de los fenómenos de tipo transitorio.
- Para la simulación de una descarga en el cable de guarda, basta con representar tres o cuatro torres de la línea, ya que los efectos de la descarga desaparece al cabos de pocos vanos y además el valor máximo del sobrevoltaje originado es determinado por las reflexiones en la torre y en la resistencia de pie de torre.
- Para descargas en el conductor de fase, la simulación del fin de la línea de transmisión adquiere extrema importancia pues deben evitarse las reflexiones, por lo que el fin de la línea debe representarse como un vano largo (5 km.) o colocar resistencias de magnitud igual a la impedancia característica de la línea. Para este trabajo se recomienda utilizar la primera alternativa debido a que los parámetros de la línea son dependientes de la frecuencia. Las resistencias pueden utilizarse cuando se consideran parámetros de la línea constantes.

- A pesar de que la resistencia de pie de torre no es el factor de mayor influencia en el valor máximo de los sobrevoltajes por descargas atmosféricas y debido a la imposibilidad de mantener el control sobre los otros parámetros de mayor influencia (magnitud de la corriente del rayo y frente de onda), el valor de dicho parámetro debe mantenerse lo más bajo posible.
- Todos los parámetros involucrados en una descarga de origen atmosférico son de naturaleza aleatoria, por lo tanto, los valores que deben considerarse para la simulación (corriente del rayo, frente de onda, tiempo de cola, resistencia de pie de torre, etc.) tienen que responder a aquellos que se presentan con mayor frecuencia, los mismos que se pueden obtenerse por medio de mediciones directas, o en el caso de no contar con estos valores se pueden obtenerse de fuentes confiables en el tema.
- Existen otros parámetros (ángulo de fase del voltaje de operación, la velocidad de propagación de la onda, el efecto corona, longitud del vano), para los cuales no se ha realizado un análisis de sensibilidad o que no se han tomado en cuenta en este trabajo, pero, sería importante continuar el análisis de su influencia en los valores máximos de este tipo de sobrevoltajes.
- Uno de los proyectos finales de este tipo de estudios, es realizar un análisis de tipo estadístico, en el cual, las magnitudes de cada una de las variables involucradas en los sobrevoltajes se determinen de forma aleatoria, de esta manera también el sobrevoltaje producido debe tener naturaleza aleatoria. Este tipo de estudios permiten obtener parámetros de diseño de una línea de transmisión (índices de confiabilidad y nivel de aislamiento) desde un punto de vista estadísticos. Realizar este tipo de estudios en el ATP constituye una tarea larga, compleja y requiere de un conocimiento profundo del ATP por parte del simulador.

- El modelo implementado en este trabajo constituye una herramienta, que puede ser utilizada en el estudio de sobrevoltajes de origen atmosférico para cualquier línea de transmisión, pues ha sido realizado tomando en cuenta la configuración de una línea típica a 230 kV utilizada para alturas superiores a 1000 msnm en el SNT(Sistema Nacional de Transmisión).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] FURNAS CENTRAIS ELETRICAS S.A. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento, aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Primera edición, Editorial Universitaria. Brasil. 1987.
- [2] LUCAS, Joseph Rohan. High Voltage Engineering. Sry Lanka. 2001
- [3] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, New York, 1975.
- [4] LEUVEN EMTP CENTER (LEC). Alternative Transients Program, Rule Book. Bélgica, 1987.
- [5] PRIKLER, László; HØIDALEN, Hans. ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT version 1.0, User's Manual. 1998
- [6] DOMMEL, H.W.; Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book); Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [7] PEREIRA, Marco Polo; FILHO, Jorge Amon. Curso Básico sobre utilização do ATP, Outubro 2000.
- [8] MARTÍNEZ, Juan; CASTRO, Ferley. Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Parte 2: Cálculo estadístico de sobretensiones. Revista Iberoamericana del ATP, Volumen 4, Octubre 2002.
- [9] MARTÍNEZ, Juan; CASTRO, Ferley. Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Parte 1: Cálculo de sobretensiones. Revista Iberoamericana del ATP, Volumen 4, Febrero 2002.

- [10] IEEE TF ON FAST FRONT TRANSIENTS, Modeling Guidelines For Fast Front Transients. IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen 11, Número 1, Enero 1996.
- [11] CHISHOLM, W.A; CHOW, Y.L; SRIVASTAVA, K.D. Lighting Surge Response of Transmission Towers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, Septiembre, 1983.
- [12] ANDERSON, J. A. Lightning performance of transmission lines.
- [13] T&D COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. Draft Full-Use Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead distribution Lines. Febrero, 2003.
- [14] LIMA A. C, PEREIRA M. P, HEVIA O.; Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão, Revista Iberoamericana del ATP, Volumen 2, Septiembre 2000.
- [15] LIMA A. C, PEREIRA M. P; Análise comparativa dos modelos de Linha de transmissão para o EMTP; Grupo de estudo de sobretensões e coordenação de isolamento, Octubre, 2001.
- [16] FERNANDES A. B. , NEVES W. A.; Modelo de linhas de transmissão no domínio de fases: cálculo da admitância característica e do fator de propagação; Congreso Brasileiro de Automática; Septiembre, 2002
- [17] IITREE.ING.UNLP.EDU.AR/ESTUDIOS/CAUE. Sitio Oficial del Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP

ANEXO 1

A continuación se presentan los datos de la línea Santa Rosa – Pomasqui utilizados para la simulación.

Torre	Atura [msnm]	Vano adelante [m]	Resistencia de pie de torre [Ω]	Presión** [cm Hg]	Densidad relativa del aire**	CFO(+)** [kV]	U90** [kV]
1	3100	451	7.20	51.49	0.71	1324	1273
2	3080	470	16.47	51.62	0.71	1327	1275
3	3011	291	7.16	52.07	0.72	1336	1284
4	3011	332	7.08	52.07	0.72	1336	1284
5	3015	591	6.75	52.04	0.72	1335	1283
6	3078	350	7.27	51.64	0.71	1327	1275
7	3090	467	6.55	51.56	0.71	1326	1274
8	3112	502	7.53	51.42	0.71	1323	1271
9	3168	460	4.46	51.06	0.70	1315	1264
10	3207	350	2.96	50.80	0.70	1310	1259
11	3242	358	8.69	50.59	0.70	1305	1255
12	3782	371	3.82	47.27	0.65	1293	1243
13	3321	558	4.10	50.08	0.69	1295	1245
14	3329	399	1.91	50.03	0.69	1294	1244
15	3329	769	3.12	50.04	0.69	1294	1244
16	3299	1103	5.71	50.22	0.69	1298	1247
17	3574	280	8.04	48.52	0.67	1320	1269
18	3616	1058	6.30	48.26	0.66	1315	1264
19	3511	708	4.73	48.90	0.67	1329	1277
20	3425	363	5.81	49.43	0.68	1282	1232
21	3392	937	7.73	49.64	0.68	1286	1236
22	3076	588	8.79	51.65	0.71	1327	1276
23	3072	858	2.96	51.67	0.71	1328	1276
24	3107	1075	4.70	51.45	0.71	1323	1272
25	3165	281	5.82	51.08	0.70	1316	1264
26	3186	511	6.87	50.94	0.70	1313	1262
27	3232	827	5.17	50.65	0.70	1307	1256
28	3246	361	3.17	50.56	0.70	1305	1254
29	3320	463	3.92	50.09	0.69	1295	1245
30	3227	1214	6.79	50.68	0.70	1307	1256
31	3333	499	7.20	50.01	0.69	1294	1243
32	3438	951	7.69	49.36	0.68	1280	1230
33	3225	659	5.76	50.69	0.70	1308	1257
34	3271	279	6.85	50.40	0.69	1302	1251
35*	3260	1140	5.00	50.47	0.69	1303	1252
36	3433	739	9.97	49.38	0.68	1281	1231
37	3427	623	5.49	49.42	0.68	1281	1231
38	3523	597	5.54	48.83	0.67	1327	1276
39*	3744	672	5.33	47.49	0.65	1298	1248

Torre	Atura [msnm]	Vano adelante [m]	Resistencia de pie de torre [Ω]	Presión ** [cm Hg]	Densidad relativa del aire**	CFO(+)** [kV]	U90 ** [kV]
40*	3922	401	6.67	46.44	0.64	1275	1225
41*	4031	1115	5.00	45.81	0.63	1261	1212
42*	4053	550	5.67	45.68	0.63	1258	1209
43*	4194	1130	4.00	44.88	0.62	1241	1192
44*	4138	472	4.67	45.20	0.62	1248	1199
45*	4053	706	5.00	45.68	0.63	1258	1209
46*	4036	274	6.00	45.78	0.63	1261	1211
47*	4054	264	4.67	45.68	0.63	1258	1209
48*	4035	314	4.33	45.79	0.63	1261	1212
49*	3956	537	3.67	46.24	0.64	1271	1221
50*	3824	1151	4.00	47.02	0.65	1288	1238
51*	3523	200	5.33	48.83	0.67	1327	1276
52*	3506	461	4.67	48.93	0.67	1330	1278
53	3453	545	8.56	49.26	0.68	1278	1228
54	3454	273	8.71	49.25	0.68	1278	1228
55	3459	209	6.95	49.22	0.68	1277	1227
56*	3438	694	3.33	49.36	0.68	1280	1230
57*	3367	306	5.00	49.80	0.68	1289	1239
58	3326	535	3.79	50.05	0.69	1294	1244
59	3287	616	7.33	50.30	0.69	1300	1249
60	3262	462	6.82	50.46	0.69	1303	1252
61	3217	870	7.63	50.75	0.70	1309	1258
62	3115	407	7.70	51.40	0.71	1322	1271
63	3079	478	7.08	51.63	0.71	1327	1275
64	3028	660	6.81	51.96	0.71	1334	1282
65	2978	1081	4.97	52.29	0.72	1341	1288
66	3075	211	5.54	51.66	0.71	1328	1276
67	3104	1196	5.23	51.47	0.71	1324	1272
68	2998	984	5.48	52.16	0.72	1338	1286
69	2978	771	4.22	52.29	0.72	1341	1288
70	2975	267	6.79	52.31	0.72	1341	1289
71	2964	367	3.21	52.38	0.72	1342	1290
72	2915	229	8.18	52.70	0.72	1349	1296
73	2879	330	0.51	52.94	0.73	1354	1301
74	2825	725	5.50	53.30	0.73	1361	1308
75	2707	752	7.45	54.10	0.74	1377	1324
76	2603	406	9.72	54.81	0.75	1392	1338
77	2527	484	8.40	55.33	0.76	1403	1348
78	2451	358	7.42	55.86	0.77	1413	1358
79	2434	1161	13.48	55.99	0.77	1416	1361
80*	2783	296	5.33	53.58	0.74	1367	1314
81*	2827	0	6.33	53.29	0.73	1361	1308

* En las torres señaladas no se ha verificado los valores de las resistencias de pie de torre

** Los valores fueron calculados de acuerdo a lo expuesto en el capítulo 4

ANEXO 2

Datos y resultados de una simulación

En la actualidad, para trabajar con el ATP existe un programa de pre-procesamiento de datos denominado ATPDraw, el cual permite armar los sistemas a simularse desde un ambiente gráfico. ATPDraw es capaz de generar automáticamente un archivo en formato ATP tarea que manualmente puede resultar mucho más demorosa. Sin embargo de la existencia del ATPDraw, muchas veces es necesario realizar ciertas modificaciones en el archivo ATP que no pueden realizarse directamente desde el ATPDraw, sino que se deben realizar desde un editor de texto y siguiendo reglas determinadas. Intentar explicar la elaboración de un archivo ATP resultaría una tarea larga y complicada que no es objetivo de este trabajo.

En un archivo ATP es necesario seguir ciertas normas y reglas en cuanto a la introducción de los datos para la simulación. Cada elemento debe ser especificado en una línea, en la cual se puede especificar el nodo de llegada, el nodo de salida, la resistencia, capacitancia, inductancia, longitud, señales de salida, etc. Los modelos de las líneas de transmisión, la característica no lineal de la resistencia de pie de torre se encuentran en otros archivos dentro de la carpeta SUP del ATP, los cuales deben ser llamados en el archivo ATP. La forma de obtener este tipo de archivos se explica en el numeral 3.2.2.1.2 de este trabajo.

Un archivo en formato ATP para una de las simulaciones realizadas en este estudio es presentado a continuación. El archivo corresponde a una descarga de 23 kA y 1.2/50 μ s en la torre número 68. El archivo es el siguiente:

BEGIN NEW DATA CASE

C -----
 C Generated by ATPDRAW Septiembre, Jueves 4, 2003
 C A Bonneville Power Administration program
 C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-98
 C -----
 C *****

C
 C CALCULO DE SOBREVOLTAJES PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS
 C EN LINEAS DE TRANSMISION DE ENERGIA
 C
 C
 C
 C

C ARCHIVO ATP PARA UNA DESCARGA EN LA TORRE 68
 C
 C

C \$DUMMY, XYZ000
 C

C DEFINICION DE TIEMPOS PARA LA SIMULACION
 C

C Miscellaneous Data Card

C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >

5.E-9 1.E-5

100 1 0 0 1 0 0 1 0

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C DEFINICION DE ELEMENTOS: RESISTENCIAS DE PIE DE TORRE, LINEAS, TORRES
 C

C /BRANCH

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

C TORRE 71
 C

-1XX0025T71G	.01	180.	3.E8	5. 1 0	0
-1XX0027XX0025	.01	180.	3.E8	6.2 1 0	0
-1XX0025XX0030	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0032XX0025	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0034XX0027	.01	180.	3.E8	6.2 1 0	0
-1XX0027XX0037	.01	180.	3.E8	4.75 1 0	0
-1XX0038XX0027	.01	180.	3.E8	4.75 1 0	0
-1BASE71XX0034	.01	180.	3.E8	26. 1 0	0
-1XX0034XX0043	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0044XX0034	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1T71G XX0047	.01	180.	3.E8	2.25 1 0	0
-1XX0048T71G	.01	180.	3.E8	2.25 1 0	0
BASE71	3.21				0

C TORRE 72
 C

-1XX0052T72G	.01	180.	3.E8	5. 1 0	0
-1XX0054XX0052	.01	180.	3.E8	6.2 1 0	0
-1XX0052XX0057	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0058XX0052	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0061XX0054	.01	180.	3.E8	6.2 1 0	0
-1XX0054XX0064	.01	180.	3.E8	4.75 1 0	0
-1XX0065XX0054	.01	180.	3.E8	4.75 1 0	0
-1BASE72XX0061	.01	180.	3.E8	26. 1 0	0
-1XX0061XX0070	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0071XX0061	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1T72G XX0082	.01	180.	3.E8	2.25 1 0	0
-1XX0083T72G	.01	180.	3.E8	2.25 1 0	0
BASE72	8.18				0

C TORRE 70
 C

-1XX0104T70G	.01	180.	3.E8	5. 1 0	0
-1XX0106XX0104	.01	180.	3.E8	6.2 1 0	0
-1XX0104XX0109	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0110XX0104	.01	180.	3.E8	4.25 1 0	0
-1XX0112XX0106	.01	180.	3.E8	6.2 1 0	0
-1XX0106XX0115	.01	180.	3.E8	4.75 1 0	0
-1XX0116XX0106	.01	180.	3.E8	4.75 1 0	0

```

C
C
C
TORRE 64
-1XX0286T64G .01 180. 3.E8 5. 1 0 0
-1XX0288XX0286 .01 180. 3.E8 6.2 1 0 0
-1XX0286XX0291 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1XX0292XX0286 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1XX0294XX0288 .01 180. 3.E8 6.2 1 0 0
-1XX0288XX0297 .01 180. 3.E8 4.75 1 0 0
-1XX0298XX0288 .01 180. 3.E8 4.75 1 0 0
-1BASE64XX0294 .01 180. 3.E8 26. 1 0 0
-1XX0294XX0303 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1XX0304XX0294 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1T64G XX0307 .01 180. 3.E8 2.25 1 0 0
-1XX0308T64G .01 180. 3.E8 2.25 1 0 0
BASE64 6.81 0
C
C
C
TORRE 67
-1XX0320T67G .01 180. 3.E8 5. 1 0 0
-1XX0322XX0320 .01 180. 3.E8 6.2 1 0 0
-1XX0320XX0325 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1XX0326XX0320 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1XX0328XX0322 .01 180. 3.E8 6.2 1 0 0
-1XX0322XX0331 .01 180. 3.E8 4.75 1 0 0
-1XX0332XX0322 .01 180. 3.E8 4.75 1 0 0
-1BASE67XX0328 .01 180. 3.E8 26. 1 0 0
-1XX0328XX0337 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1XX0338XX0328 .01 180. 3.E8 4.25 1 0 0
-1T67G XX0341 .01 180. 3.E8 2.25 1 0 0
-1XX0342T67G .01 180. 3.E8 2.25 1 0 0
BASE67 5.23 0
C
C
C
C
C
MODELOS DE LAS LINEAS CON PARAMETROS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA
C
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V5000.LIB, X0073A, X0073B, X0073C, X0093A, X0093B $$
, X0093C, XX0082, XX0083, X0077A, X0077B, X0077C, X0078A, X0078B, X0078C $$
, #####, #####
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V400.LIB, X0088A, X0088B, X0088C, X0101A, X0101B $$
, X0101C, XX0047, XX0048, X0073A, X0073B, X0073C, X0093A, X0093B, X0093C $$
, XX0082, XX0083
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V300.LIB, X0096A, X0096B, X0096C, X0135A, X0135B $$
, X0135C, XX0125, XX0126, X0088A, X0088B, X0088C, X0101A, X0101B, X0101C $$
, XX0047, XX0048
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V800.LIB, X0013A, X0013B, X0013C, T69A##, T69B## $$
, T69C##, XX0159, XX0160, X0096A, X0096B, X0096C, X0135A, X0135B, X0135C $$
, XX0125, XX0126
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V1000.LIB, X0164A, X0164B, X0164C, T68A##, T68B## $$
, T68C##, XX0193, T68G##, X0013A, X0013B, X0013C, T69A##, T69B##, T69C## $$
, XX0159, XX0160
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V1200.LIB, X0017A, X0017B, X0017C, T67A##, T67B## $$
, T67C##, XX0342, XX0341, X0164A, X0164B, X0164C, T68A##, T68B##, T68C## $$
, XX0193, T68G##
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V200.LIB, X0244A, X0244B, X0244C, X0283A, X0283B $$
, X0283C, XX0273, XX0274, X0017A, X0017B, X0017C, T67A##, T67B##, T67C## $$
, XX0342, XX0341
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V1100.LIB, X0278A, X0278B, X0278C, X0317A, X0317B $$
, X0317C, XX0307, XX0308, X0244A, X0244B, X0244C, X0283A, X0283B, X0283C $$
, XX0273, XX0274
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V700.LIB, X0312A, X0312B, X0312C, X0313A, X0313B $$
, X0313C, XX0341, XX0342, X0278A, X0278B, X0278C, X0317A, X0317B, X0317C $$
, XX0307, XX0308
$INCLUDE, C:\ATP_NT~1\USP\V5000.LIB, X0344A, X0344B, X0344C, X0344A, X0344B $$
, X0344C, #####, #####, X0312A, X0312B, X0312C, X0313A, X0313B, X0313C $$
, XX0341, XX0342
C
C
C
DEFINICION DE INTERRUPTORES CONTROLADOS DE VOLTAJE
C
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
XX0178T68A .001 1.276E6 2
XX0184T68B .001 1.276E6 2

```

XX0190T68C	.001	1.276E6	2
XX0177X0164C	.001	1.276E6	0
XX0206X0164A	.001	1.276E6	0
XX0208X0164B	.001	1.276E6	0
XX0224T67A	.001	1.262E6	2
XX0230T67B	.001	1.262E6	2
XX0236T67C	.001	1.262E6	2
XX0143X0013C	.001	1.279E6	0
XX0364X0013A	.001	1.279E6	0
XX0366X0013B	.001	1.279E6	0
XX0223X0017C	.001	1.262E6	0
XX0370X0017A	.001	1.262E6	0
XX0372X0017B	.001	1.262E6	0
XX0144T69A	.001	1.279E6	2
XX0150T69B	.001	1.279E6	2
XX0156T69C	.001	1.279E6	2

C

C

DEFINICION DE FUENTES

C

/SOURCE

C < n 1><< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >

C

C

C

C

CORRIENTE DE RAYO

C

15T68G -1 2.3E4 1.2E-6 5.E-5 5. -1

C

C

FUENTE DE 60 Hz

C

14X0344A 0 -187794. 60. -1. 1.

14X0344B 0 -187794. 60. -120. -1. 1.

14X0344C 0 -187794. 60. 120. -1. 1.

BLANK BRANCH

BLANK SWITCH

BLANK SOURCE

C

C

DEFINICION DE VARIABLES DE SALIDA

C

C

C 1 2 3 4 5 6 7 8

C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

C < >< >< >< >< >< >< >< >< >< >< >

T68G T68A T68B T68C BASE68

T67G T67A T67B T67C BASE67

T69G T69A T69B T69C BASE69

BLANK OUTPUT

BLANK PLOT

BEGIN NEW DATA CASE

BLANK

Una vez que se cuenta con el archivo de entrada en formato ATP se ejecuta la simulación y se obtienen los resultados de la misma. El programa proporciona los valores que toman las variables de salida para distintos tiempos. Estos resultados se muestran a continuación.

Voltaje en la torre 68 [kV.]									
Paso de integración	Tiempo [μs]	Cadena de aisladores			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
		Fase A	Fase B	Fase C					
0	0.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
100	0.5	1024	714	632	1305	146	329	250	23
200	1.0	200	-99	-96	92	-156	121	118	110
300	1.5	285	11	15	134	-149	124	117	102
400	2.0	253	-21	-15	94	-159	116	111	102
500	2.5	259	-16	-11	100	-158	117	111	101
600	3.0	257	-17	-12	98	-159	116	111	100
700	3.5	257	-17	-12	97	-159	116	111	99
800	4.0	256	-18	-13	97	-159	115	110	99
900	4.5	256	-19	-14	96	-160	115	110	98
1000	5.0	255	-19	-14	95	-160	115	110	97
1100	5.5	255	-20	-15	94	-160	115	110	96
1200	6.0	254	-20	-16	93	-160	114	110	95
1300	6.5	254	-21	-16	93	-161	114	110	95
1400	7.0	204	-65	-60	25	-154	132	138	94
1500	7.5	136	-142	-138	-51	-175	117	129	74
1600	8.0	388	108	105	271	-143	111	88	82
1700	8.5	-23	-311	-309	-211	-164	154	192	89
1800	9.0	427	159	153	303	-123	130	107	69
1900	9.5	264	-12	-7	103	-171	100	91	85
2000	10.0	241	-35	-31	76	-165	110	107	83

El programa también proporciona los valores máximos y mínimos de las distintas variables con sus respectivos tiempos en que se presentan. Esto se presenta en la siguiente tabla.

	Valores máximos y mínimos							
	Cadena de aisladores			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
	Fase A	Fase B	Fase C					
Voltaje Máximo [kV]	1264	971	877	1582	227	387	290	111
Tiempo [us]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9
Voltaje Mínimo [kV]	-128	-417	-406	-346	-208	90	84	0
Tiempo [us]	8.6	8.6	8.6	8.6	8.7	1.1	8.1	0.1

Los resultados de la simulación en la torre 67 son los siguientes:

Voltaje en la torre 67 [kV.]									
Paso de integración	Tiempo [us]	Cadena de aisladores			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
		Fase A	Fase B	Fase C					
0	0.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
100	0.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
200	1.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
300	1.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
400	2.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
500	2.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
600	3.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
700	3.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
800	4.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
900	4.5	230	5	62	304	-230	-5	-62	5
1000	5.0	185	-134	-171	-248	-185	134	171	24
1100	5.5	189	-95	-97	-13	-189	95	97	3
1200	6.0	198	-90	-98	-70	-198	90	98	0
1300	6.5	173	-104	-101	59	-173	104	101	1
1400	7.0	182	-100	-101	12	-182	100	101	6
1500	7.5	195	-89	-93	-35	-195	89	93	0
1600	8.0	181	-97	-96	29	-181	97	96	0
1700	8.5	185	-96	-96	9	-185	96	96	3
1800	9.0	196	-89	-93	-39	-196	89	93	2
1900	9.5	190	-91	-93	-6	-190	91	93	-4
2000	10.0	170	-105	-103	65	-170	105	103	2

	Valores máximos y mínimos							
	Cadena de aisladores			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
	Fase A	Fase B	Fase C					
Voltaje Máximo [kV]	233	5	63	392	-150	143	173	31
Tiempo [us]	4.5	4.5	4.5	4.6	4.8	4.9	5.0	4.9
Voltaje Mínimo [kV]	150	-143	-173	-302	-233	-5	-63	-4
Tiempo [us]	4.8	4.9	5.0	5.1	4.5	4.5	4.5	9.5

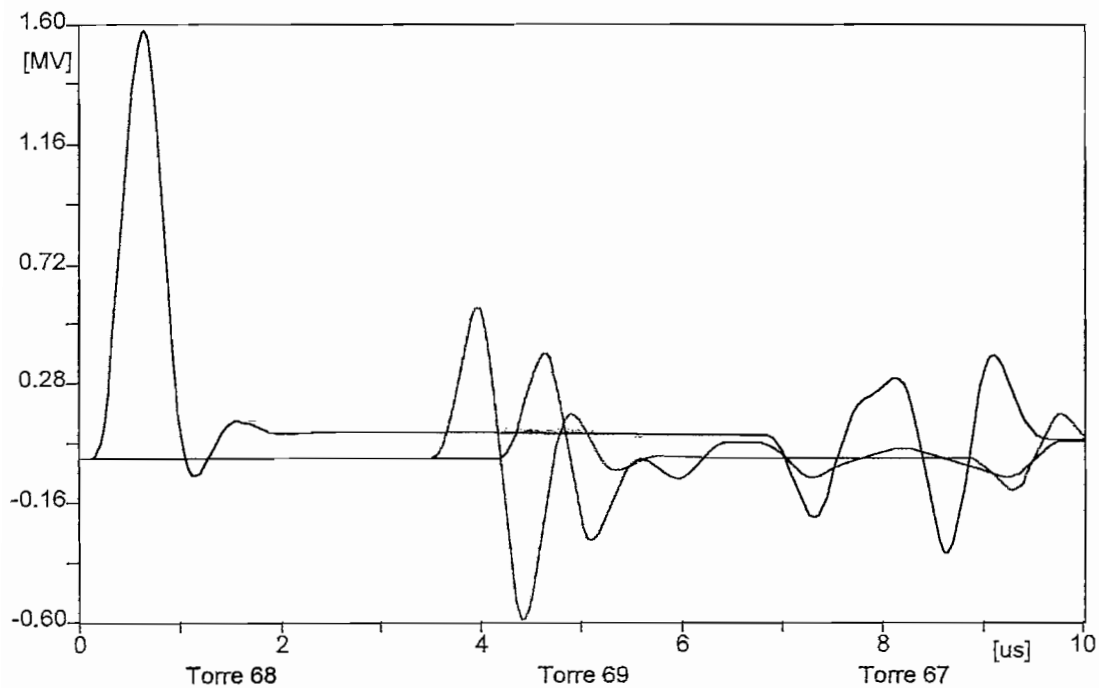
Los resultados de la simulación en la torre 69 son los siguientes:

Voltaje en la torre 69 [kV.]									
Paso de integración	Tiempo [us]	Cadena de aisladores			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
		Fase A	Fase B	Fase C					
0	0.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
100	0.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
200	1.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
300	1.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
400	2.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
500	2.5	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
600	3.0	188	-94	-94	0	-188	94	94	0
700	3.5	190	-91	-91	4	-189	92	91	0
800	4.0	653	390	377	536	-128	90	34	36
900	4.5	-192	-470	-445	-508	-285	47	90	5
1000	5.0	263	-24	-35	122	-151	122	116	5
1100	5.5	173	-107	-107	-19	-190	94	97	3
1200	6.0	190	-92	-94	6	-185	97	98	4
1300	6.5	189	-92	-93	3	-186	95	96	3
1400	7.0	189	-92	-93	3	-186	95	96	3
1500	7.5	190	-91	-92	3	-187	95	95	3
1600	8.0	190	-91	-92	3	-187	94	95	3
1700	8.5	190	-91	-92	3	-187	94	95	3
1800	9.0	173	-105	-106	-20	-186	99	103	3
1900	9.5	182	-103	-106	-8	-196	84	85	-9
2000	10.0	250	-35	-39	86	-177	94	87	9

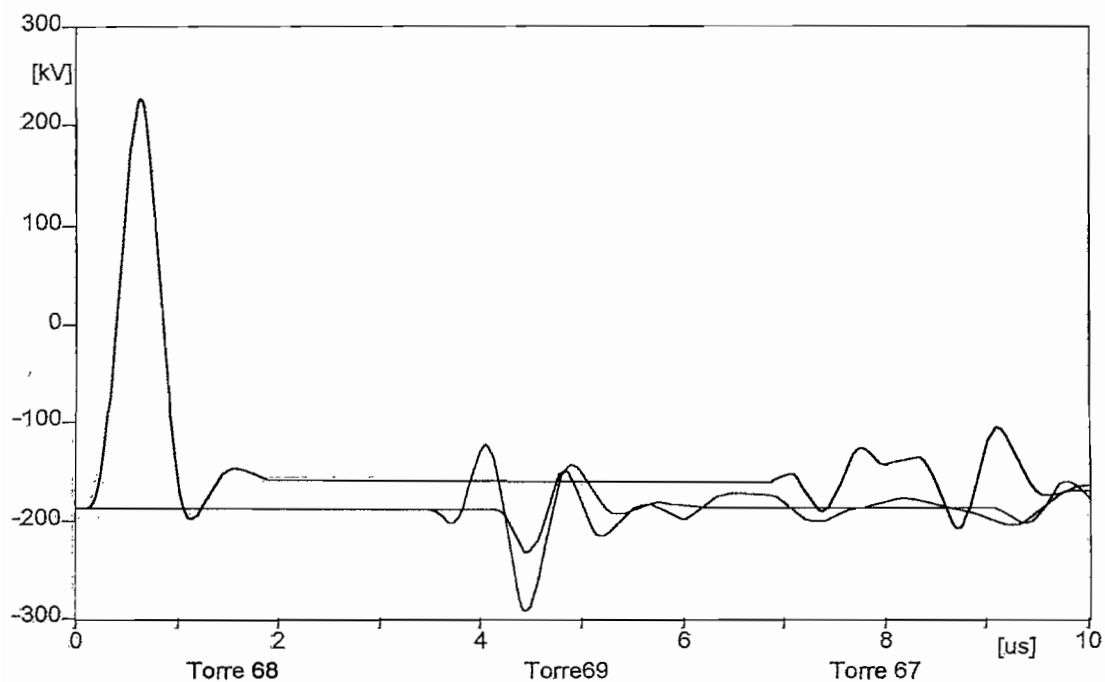
	Valores máximos y mínimos							
	Cadena de aisladores			Tope	Fase A	Fase B	Fase C	Base
	Fase A	Fase B	Fase C					
Voltaje Máximo [kV]	679	417	408	559	-123	130	140	56
Tiempo [us]	4.0	4.0	3.9	4.0	4.1	4.2	4.2	4.2
Voltaje Mínimo [kV]	-281	-566	-534	-594	-292	35	-16	-9
Tiempo [us]	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	3.8	3.8	4.7

La simulación permite obtener una respuesta de tipo gráfico proporcionada por el programa PlotXY y es la siguiente:

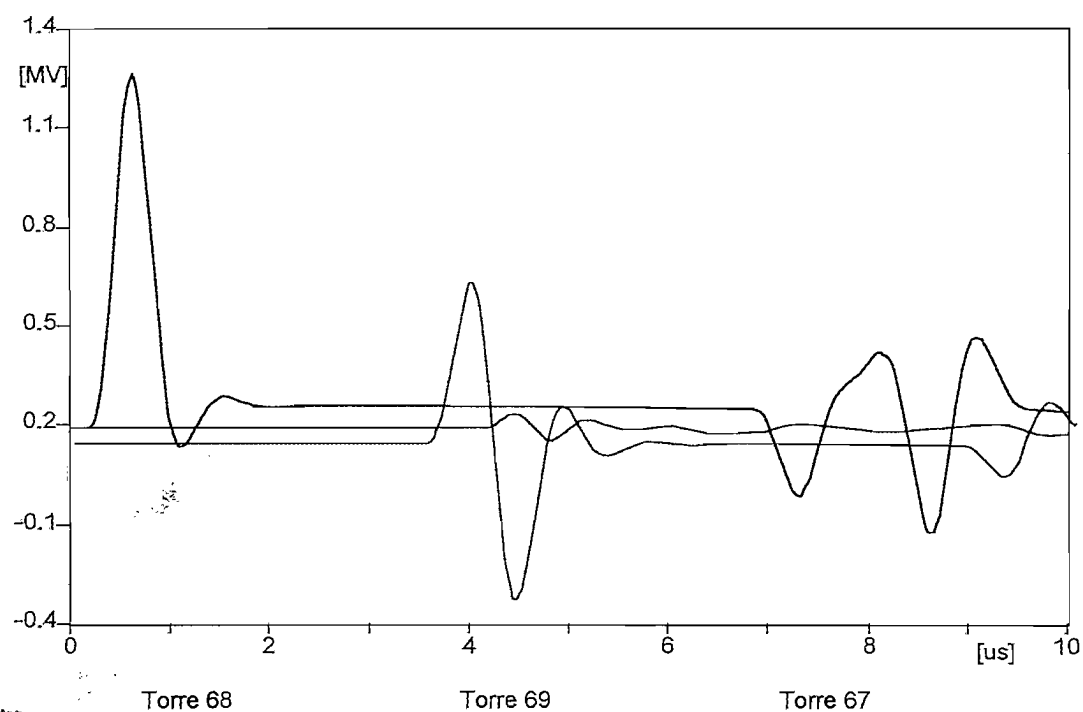
Voltaje en el tope de la torre



Voltaje inducido en la fase A



Voltaje en la cadena de aisladores de la fase A
(entre la cruceta superior de la torre y el conductor de fase A)



Voltaje en la base de la torre (resistencia de pie de torre)

