



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del autor.

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE
TRANSMISIÓN FRENTE AL FLAMEO INVERSO BASADO EN EL
MÉTODO MONTECARLO**

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

FAUSTO GONZALO YUGCHA GUEVARA
faustoyg@hotmail.com

DIRECTOR: ING. LUIS RUALES
luis.ruales@epn.edu.ec

Quito, Noviembre del 2010

DECLARACIÓN

Yo Fausto Gonzalo Yugcha Guevara, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada 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.

Fausto Gonzalo Yugcha Guevara

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fausto Gonzalo Yugcha Guevara, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Ruales Corrales
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Ingeniero Orlando Hevia, quien con mucha generosidad y desinterés, contribuyó con nociones claves para la aplicación de ATP en el desarrollo de este trabajo.

Fue para mí muy grato encontrar, con motivo del desarrollo de este trabajo, a Daniel, Luis y Orlando, todos ingenieros, pero más allá del título, gente que realiza sus actividades con pasión y quienes se han convertido para mí en un modelo a seguir ahora que doy mis primeros pasos en mi vida como profesional, y con para quienes guardo un profundo agradecimiento.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, mis guías a lo largo de mi vida, quienes han fomentado en mí principios y valores, y aunque ya no estés presente mamá, tus enseñanzas permanecerán siempre conmigo.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DEDICATORIA	iv
CONTENIDO.....	v
SIMBOLOGÍA	vii
INDICE DE TABLAS.....	ix
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
PRESENTACIÓN.....	xiii
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA STA. ROSA - TOTORAS.....	1
1.2.1 ESTRUCTURAS	1
1.2.2 CONDUCTORES	2
1.2.3 SALIDAS DE LA LÍNEA	3
1.2.4 RESISTENCIAS DE PIE DE TORRE.....	3
1.2.5 AISLAMIENTO DE LA LÍNEA	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	5
2.2 VARIABLES ALEATORIAS DESCRIPTIVAS DE LOS PARÁMETROS DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA	5
2.2.1 FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE DESCARGA.....	6
2.2.2 FUNCIONES DE PROBABILIDAD PARA UN RAYO.....	8
2.2.2.1 Función densidad de probabilidad de una descarga	8
2.2.2.2 Función de distribución acumulada	8
2.2.3 POLARIDAD DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA	10
2.2.4 MEDICIONES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	11
2.3 ONDAS VIAJERAS.....	13
2.4 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO	16
2.4.1 CALCULO DEL ANGULO DE PROTECCIÓN	20
2.5 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	21
2.5.1 DESCARGA EN UNA TORRE O HILO DE GUARDA.....	21
2.5.2 DESCARGA EN UN CONDUCTOR DE FASE	26
2.5.3 SOBREVOLTAJES POR FLAMEO INVERSO	26
2.6 MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	28
2.6.1 MODELO DE LOS CONDUCTORES DE FASE	31
2.6.2 MODELOS DE LAS TORRES.....	31
2.6.2.1 Modelos con una única línea vertical sin pérdidas.....	32
2.6.2.2 Modelos de línea vertical multiconductor	33
2.6.2.3 Modelo multipiso.....	34
2.7 AISLAMIENTO.....	36
2.7.1 REPRESENTACIÓN DE AISLADORES	37
2.7.2 CARACTERÍSTICAS DEL ESPACIAMIENTO DE AISLAMIENTO	39
2.8 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.....	40

2.9 MÉTODO MONTECARLO PARA SIMULACIÓN DE FENÓMENOS FÍSICOS	41
2.9.1 PUNTO DE ESTIMACIÓN VERSUS MÉTODO MONTECARLO	43
2.10 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	44
2.10.1 DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA (GFD)	44
CAPÍTULO III: SIMULACIONES	46
3.1 MAGNITUDES DE LOS PARÁMETROS.....	46
3.1.1 GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS	46
3.1.2 VARIABLES ALEATORIAS.....	47
3.1.2.1 Intensidad de cresta del rayo.....	48
3.1.2.2 Resistencia de puesta a tierra	48
3.1.2.3 Ubicación de la descarga	49
3.1.2.4 Ángulo de fase a frecuencia de operación.....	49
3.1.2.5 Voltaje de contorno del aislamiento	50
3.2 IMPLEMENTACIÓN EN ATP.....	50
3.3 MÉTODOS DE CÁLCULO BASADOS EN MONTECARLO	51
3.3.1 BASADO EN LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE SOBREVOLTAJES	52
3.3.2 BASADO EN EL COMPORTAMIENTO ALEATORIO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LA LÍNEA.....	53
3.3.3 PROCESO DE CÁLCULO	53
3.4 RESULTADOS DE CÁLCULO CON EL MÉTODO MONTECARLO	55
3.4.1 BASADO EN EL COMPORTAMIENTO ALEATORIO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LA LÍNEA.....	56
3.4.2 BASADO EN LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE SOBREVOLTAJES	56
3.5 RESULTADOS EN FLASH.....	58
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE LA DESCARGA INFLUYENTES EN LA TASA DE SALIDA.....	61
4.1 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	61
4.2 CORRIENTE DE CRESTA	62
4.3 TIEMPO DE FRENTE.....	63
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	70
ANEXO 1 FUNDAMENTOS DEL ATP.....	70
ANEXO 2 TORRE TÍPICA TIPO SL2	75
ANEXO 3 TEORÍA DE PROBABILIDAD.....	76
ANEXO 4 CÓDIGO FUENTE EN MODELS	85

SIMBOLOGÍA

As	Altura sobre el nivel del mar
ATP	Alternative Transients Program
BIL	Nivel básico de aislamiento a impulso
CFO	Aislamiento a impulso de tipo rayo
c	Velocidad de la luz
C_c	Capacitancia del conductor de la línea
D_c	Distancias de exposición del conductor de fase
D_g	Distancias de exposición del hilo de guarda
E_o	Gradiente de ionización del suelo [kV/m]
e	Voltaje producido por la descarga
f(V)	Función de densidad de probabilidad de sobrevoltajes
h	Altura de la torre
h_w	Altura de la sección de la torre
I_c	Intensidad crítica para que se produzca flameo
I_g	Corriente limitadora para iniciar ionización del suelo
I_h	Corriente a través del hilo de guarda
I_m	Intensidad máxima de falla de apantallamiento
I_p	Intensidad de cresta del rayo
I_R	Corriente de la descarga a través de la resistencia
I_t	Corriente a través de la torre de transmisión
k	Factor de acoplamiento entre voltaje inducido en el conductor de fase y voltaje en el tope de la estructura
L	Inductancia efectiva de la torre
L'	Inductancia del vano
L_c	Inductancia del conductor de la línea
LTSRT	Línea de transmisión Santa Rosa Totoras
l	Longitud de la línea [km]
M	Valor medio
N_c	Número de casos de estudio
N_d	Número de descargas que produjeron contorneos
N_g, GFD	Densidad de descargas a tierra [descargas/km ² /año]
n	Exponente dependiente de la longitud de la cadena

$P(V)$	Función de probabilidad acumulada de la rigidez dieléctrica
p_b	Presión barométrica en [mmHg]
R	Resistencia efectiva de la torre
RNG	Generador de números aleatorios
R_o	Resistencia de pie de torre a baja frecuencia
R_{pt}	Resistencia de puesta a tierra
r	Radio de la base de la torre
r_c	Distancia de ruptura a conductor de fase o hilo de guarda
r_{eq}	Radio equivalente
r_g	Distancia de ruptura a tierra
r_x	Distancia de ruptura general
r_w	Radio de w secciones de la torre
S_g	Separación entre hilos de guarda
S_w	Pendientes al w por ciento del valor pico de corriente
T	Temperatura ambiente en [°C]
T_d	Nivel ceraúnico
T_s	Tasa de salidas
t_c	Tiempo a valor medio
t_f	Tiempo de frente
t_w	Tiempo hasta w por ciento del valor pico de corriente
U_f	Voltaje originado en conductor de fase
U_g	Voltaje originado en hilo de guarda
$u(t), u(t-t_f)$	Función unidad escalón
V	CFO a cualquier densidad relativa del aire
V_c	CFO a temperatura y presión estándar
V_{fm}	Voltaje máximo en el conductor por impacto de una descarga
w	Ancho de la zona de estudio [km]
Z_c	Impedancia característica del conductor
Z_{eq}	Impedancia efectiva equivalente
Z_g	Impedancia característica del hilo de guarda
Z_t	Impedancia de la torre
α	Coefficiente de amortiguación
β	Parámetro de escala

$\alpha_1, \beta_1, \gamma$	Coeficientes de atenuación
ξ	Valor de truncamiento
λ	Parámetro de la forma
δ	Densidad relativa del aire
ρ	Resistividad del suelo [Ωm]
σ	Desviación estándar
σ_f	Coeficiente de variación

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Características generales de la Línea Sta. Rosa – Totoras	2
Tabla 1.2	Características del conductor de fibra óptica en la LTSRT.....	2
Tabla 1.3	Estadística de salidas por impactos de descargas atmosféricas a LTSRT.....	3
Tabla 1.4	Características de los aisladores utilizados en LTSRT.....	4
Tabla 2.1	Parámetros estadísticos para descargas atmosféricas de polaridad negativa ..	5
Tabla 2.2	Parámetros de la primera descarga para distribución Log-Normal.....	7
Tabla 2.3	Constantes para la distancia de ruptura.....	17
Tabla 2.4	Voltajes en la cadena de aisladores para impacto de la descarga en el vano del modelo de LTSRT.....	27
Tabla 2.5	Guía referencial para la modelación de líneas aéreas	29
Tabla 2.6	Modelos de torres	33
Tabla 2.7	Características de descarga de aisladores de suspensión de 5 ¾ X 10"	38
Tabla 3.1	Distribuciones estadísticas de las variables	47
Tabla 3.2	Parámetros de la corriente de descarga	48
Tabla 3.3	Parámetros de la cadena de aisladores.....	50
Tabla 3.4	Resultados de simulaciones	56
Tabla 3.5	Curvas de ajuste para sobrevoltajes	57
Tabla 3.6	Resultados en FLASH	59
Tabla 3.7	Resultados de contorneos entre los distintos métodos	60
Tabla 4.1	Influencia de la resistencia de pie de torre en el número de contorneos	61
Tabla 4.2	Influencia de la corriente de cresta en el número de contorneos	62
Tabla 4.3	Influencia del tiempo de frente en el número de contorneos	64
Tabla R.1	Salidas por flameo inverso basadas en las distintas expresiones de densidad de descargas a tierra	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Corte transversal de un cable de fibra óptica (OPGW).....	3
Figura 2.1 Forma de onda normalizada de corriente.....	6
Figura 2.2 Onda de descarga de doble rampa.....	8
Figura 2.3 Función de densidad y función de distribución acumulada de la corriente.....	10
Figura 2.4 Polaridad de las descargas atmosféricas.....	10
Figura 2.5 Campo magnético generado por la corriente del rayo.....	12
Figura 2.6 Parámetros distribuidos y constantes.....	13
Figura 2.7 Ondas viajeras sobreponiéndose.....	14
Figura 2.8 Onda viajera reflejada en un punto abierto.....	15
Figura 2.9 Comportamiento de ondas viajeras.....	15
Figura 2.10 Definición de ángulos y distancias para modelo electrogeométrico.....	18
Figura 2.11 Zonas de impacto por modelo electrogeométrico para torre típica SL2.....	19
Figura 2.12 Equipotenciales del líder descendente.....	20
Figura 2.13 Distancias críticas asociadas con cargas en el rayo.....	20
Figura 2.14 Impacto de la descarga en el hilo de guarda.....	21
Figura 2.15 Voltajes producidos por impacto de una descarga de 40 kA en la torre típica SL2.....	22
Figura 2.16 Periodo inicial.....	24
Figura 2.17 Primer periodo de reflexión.....	24
Figura 2.18 Representación de la línea aérea.....	27
Figura 2.19 Parámetros utilizados para la representación de la LTSRT.....	30
Figura 2.20 Resultados del modelo de la LTSRT para cálculo de frecuencia.....	31
Figura 2.21 Modelo de torre multiconductor.....	34
Figura 2.22 Modelo multipiso de una torre de transmisión.....	34
Figura 2.23 Geometría para cálculo de radio equivalente.....	36
Figura 2.24 Resultados para modelo multipiso de la torre típica SL2.....	36
Figura 2.25 Resistencia de impulso, con E_0 de 400 kV/m y ρ de 200 Ω m.....	41
Figura 2.26 Voltaje en la torre típica SL2 para distintos valores de resistencia de pie de torre.....	41
Figura 2.27 Desviación de resultados para número de impactos en el hilo de guarda.....	43
Figura 2.28 Punto de estimación vs. Montecarlo.....	44
Figura 3.1 Distribución de las resistencias de puesta a tierra de la LTSRT.....	49
Figura 3.2 Distribución del ángulo de fase a frecuencia de operación.....	50
Figura 3.3 Esquema en ATPdraw.....	51

Figura 3.4 Porcentaje de impactos en hilo de guarda en función del número de iteraciones del modelo de la LTSRT	52
Figura 3.5 Diagrama general del proceso de cálculo.....	53
Figura 3.6 Diagrama de secuencias en ATP	54
Figura 3.7 Impactos en la zona de apantallamiento	55
Figura 3.8 Impactos en la zona de apantallamiento que produjeron contorneos	55
Figura 3.9 Distribución de sobrevoltajes en la cadena de aisladores por impacto en hilo de guarda	56
Figura 3.10 Cálculo del riesgo de fallo para descargas de polaridad negativa	57
Figura 4.1 Influencia de la resistencia de pie de torre en el número de contorneos	62
Figura 4.2 Influencia de la corriente de cresta en el número de contorneos.....	63
Figura 4.3 Influencia del tiempo de frente en el número de contorneos	64

RESUMEN

Este proyecto de titulación presenta un estudio para el cálculo de la tasa de salida de una línea de transmisión debida al flameo inverso. En ingeniería, para el análisis del comportamiento de fenómenos naturales se trata de establecer un modelo, siempre de validez restringida, el cual servirá finalmente como un simulador para obtener conclusiones y tomar decisiones que permitan aprovechar las consecuencias benéficas del fenómeno y reducir o evitar aquellas que sean perjudiciales. El estudio incluye un análisis de los parámetros más influyentes que favorecen a que se produzca un flameo inverso. Los resultados de este estudio pueden ser aplicados para analizar opciones con el fin de reducir el número de contorneos por descargas atmosféricas y, por lo tanto, reducir las salidas de una línea de transmisión.

Se aplica el programa computacional ATP (Alternative Transients Program) para el cálculo de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas en líneas de transmisión y en estudios paramétricos, cuyo objetivo fundamental es averiguar el efecto que pueden tener algunos parámetros en los sobrevoltajes producidos.

El estudio se aplica al análisis de la línea de transmisión Santa Rosa – Totoras de 230 kV del Sistema Nacional Interconectado.

En el capítulo 1 se presentan las características principales de la línea de transmisión Santa Rosa – Totoras así como también una descripción de sus parámetros.

En el capítulo 2 se mencionan y explican los principales conceptos teóricos involucrados en el comportamiento de una línea de transmisión frente a descargas atmosféricas, y en particular, con énfasis en el flameo inverso, así como también las consideraciones realizadas en este trabajo.

En el capítulo 3 se implementan los criterios de simulación en herramientas computacionales de cálculo y se muestran y analizan los resultados obtenidos.

En el capítulo 4 se realiza un análisis paramétrico, se estudia la influencia del valor medio de la descarga, la resistencia de pie de torre y el valor medio del tiempo de frente.

En el capítulo 5 se mencionan las conclusiones obtenidas en este trabajo, así como también recomendaciones para futuros análisis similares.

PRESENTACIÓN

Las descargas atmosféricas han sido uno de los principales problemas para el diseño del aislamiento de sistemas de potencia y es todavía la causa principal de salidas de servicio no programadas en líneas de transmisión.

Cuando las descargas atmosféricas impactan sobre líneas de transmisión producen sobrevoltajes, los cuáles se calculan con muchas incertidumbres dada la naturaleza aleatoria del rayo y el conocimiento poco preciso de sus parámetros. Para entender el comportamiento de una línea aérea frente a descargas atmosféricas, además, es importante conocer la influencia que pueden tener los distintos parámetros del modelo empleado para representar la línea en las simulaciones.

En el presente trabajo se procede a simular las condiciones que se presentan en una descarga atmosférica que ha impactado en el hilo de guarda de una línea de transmisión y a estudiarlo con un método que se adapta a su naturaleza, un método de tipo estadístico, con el fin de analizar el comportamiento de una línea de transmisión debido al flameo inverso.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 JUSTIFICACIÓN

Los sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas son probablemente la causa más importante de fallo en líneas aéreas de transmisión ya que son las más frecuentes, y hasta el nivel de 230 kV, son superiores a los sobrevoltajes producidos por maniobras. De la importancia de estas líneas se deriva la importancia que puede tener un estudio riguroso de este tipo de sobrevoltajes.

El análisis del comportamiento de una línea aérea frente al rayo está basado en métodos estadísticos, que son los que se adaptan mejor a la naturaleza de este fenómeno, y tiene como objetivo final determinar la tasa de contorneos en una línea por kilómetro y por año. La simulación de este fenómeno puede ser fundamental no sólo en el análisis de fallas actuales, sino también en el diseño de líneas futuras.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA STA. ROSA – TOTORAS

La línea Santa Rosa – Totoras forma parte del anillo de transmisión del Sistema Nacional Interconectado operando a 230 kV. Entró en operación hace 25 años, en un tramo comprendido desde la subestación Totoras a 2716 msnm, en la ciudad de Ambato, hasta la subestación Santa Rosa a 3086 msnm en la ciudad de Quito. En este trabajo se considera que está formada por vanos uniformes de 463 m de longitud, que es el valor promedio de los vanos reales.

La línea de transmisión se extiende a lo largo de una zona con nivel cerámico de 10 días de tormenta por año.

1.2.1 ESTRUCTURAS

Está formada por 238 estructuras, de las cuales 16 son de retención y 222 de suspensión. La estructura que más se repite a lo largo de la línea es la estructura de suspensión SL2, la cual ha sido tomada como referencia para la geometría de la torre con la que se trabajará en este estudio y cuyas dimensiones se indican en

el Anexo 2. El valor de la altura del punto de amarre se ha tomado como el valor promedio de todas las estructuras que componen la línea.

Voltaje (kV)	230
Longitud (km)	109,8
Número de circuitos	2
Conductor (MCM)	1113 ACSR
Capacidad (MVA)	342 ⁽¹⁾

Fuente: División de líneas de transmisión (CELEC EP TRANSELECTRIC)

⁽¹⁾ Capacidad por circuito y por características de diseño de la línea

Tabla 1.1 Características generales de la Línea Sta. Rosa – Totoras

1.2.2 CONDUCTORES

La línea de transmisión Santa Rosa – Totoras posee dos hilos de guarda, uno de acero de 3/8" de diámetro y el otro de aleación de aluminio con fibra óptica. Cabe destacar que los cables de fibra óptica siguen cumpliendo las mismas funciones de un hilo de guarda tradicional además de facilitar la rápida transmisión de datos. Alrededor de los cables de fibra óptica OPGW se colocan conductores de aluminio, aleación de aluminio o acero con recubrimiento de aluminio (AC), como se indica en la figura 1.1.

Los conductores de las fases son ACSR Bluejay, con resistencia DC a 50° de 0.05741 Ω /km, valor de operación normal, y diámetro de 3.2842 cm.

Fabricante		TAIHAN Electric Wire	
Capa interior	Material	Cable ACS	SSLT
	Diámetro	2.7 mm	2.7 mm
Capa exterior	Material	Cable aleación de aluminio (AA)	
	Diámetro	2.45 mm	
Diámetro [mm]		13	
Resistencia DC 20°C [Ω /km]		0.5	

Fuente: División de líneas de transmisión (CELEC EP TRANSELECTRIC)

Tabla 1.2 Características del conductor de fibra óptica en la LTSRT

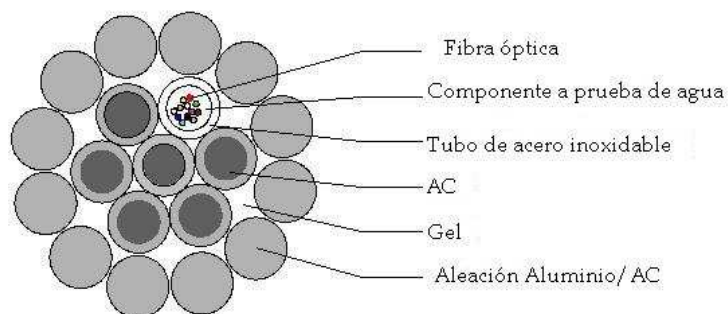


Figura 1.1 Corte transversal de un cable de fibra óptica (OPGW)

1.2.3 SALIDAS DE LA LÍNEA

Los datos de las salidas de servicio por descargas atmosféricas de la línea Santa Rosa-Totoras en los últimos años son:

Año	Circuito	Fecha	Tiempo indisponibilidad (h)
2003	C2	14-Ene	0:19
	C2	06-Sep	0:16
2004	C1	14-Ene	0:16
2005	No hubo		
2006	No hubo		
2008	No hubo		
2009	C1 y C2	15-Ene	2:49
2010	C2	6-Oct	Sin registro

Fuente: División de líneas de transmisión (CELEC EP TRANSELECTRIC.)

Tabla 1.3 Estadística de salidas por impactos de descargas atmosféricas a LTSRT

1.2.4 RESISTENCIAS DE PIE DE TORRE

La línea de transmisión Santa Rosa – Totoras se extiende mayoritariamente a lo largo de una zona de suelo de arcilla arenosa húmeda, por lo que se ha tomado como resistividad media del suelo 200 Ω m. [18]

Se consideró que el valor de la resistencia a baja corriente, R_o , tiene un comportamiento aleatorio según una distribución logarítmica normal. Esto se determinó a partir de un reporte de mediciones de las resistencias de pie de torre de las 238 estructuras realizado por CELEC EP TRANSELECTRIC con el equipo de medición de puesta a tierra SATURN GEO X “LEM”.

1.2.5 AISLAMIENTO DE LA LÍNEA

La línea Santa Rosa – Totoras se encuentra ubicada en una altura superior a las 2700 msnm. Llegando en algunos tramos a los 3500 msnm. Para líneas de transmisión a 230 kV, a este nivel de altura sobre el nivel del mar, el número de aisladores en la cadena varía de 18 a 20 aisladores.

Altura de la unidad [mm]	Diámetro del disco [mm]	Distancia de fuga [mm]	Voltaje de contorno, kV	
			Onda impulso 1 x 50 μ s	
			Positivo	Negativo
140	254	280	120	125

Fuente: División de líneas de transmisión (CELEC EP TRANSELECTRIC.)

Tabla 1.4 Características de los aisladores utilizados en LTSRT

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

La descarga atmosférica es un impulso de alta corriente con una duración de unas pocas millonésimas de segundo. Muchas descargas contienen dos o más descargas individuales que ocurren por el mismo camino, siendo la primera descarga frecuentemente más severa que las subsiguientes.

A pesar de que una descarga es un fenómeno de corta duración, se puede afirmar que no es instantáneo. Empieza ya sea, en una nube o en tierra y progresa a una tasa observable y medible hacia su destino final.

2.2 VARIABLES ALEATORIAS DESCRIPTIVAS DE LOS PARÁMETROS DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Cada rayo presenta un número de descargas, el número de descargas que se han observado por rayo puede ir de 1 a 26, las cuales no tienen igual severidad. Sus amplitudes y formas de onda varían estadísticamente. En la tabla 2.1 se muestran los valores del valor medio y desviación estándar propuestos en [17] para descargas atmosféricas de polaridad negativa.

	M	σ
I_{100} , [kA]	34	0.74
t_f , [μ s]	2	0.494
t_c , [μ s]	77.5	0.577

Tabla 2.1 Parámetros estadísticos para descargas atmosféricas de polaridad negativa

La forma de onda de la corriente por descargas atmosféricas se caracteriza por su polaridad, valor pico, frente de onda y tiempo a valor medio.

2.2.1 FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE DESCARGA

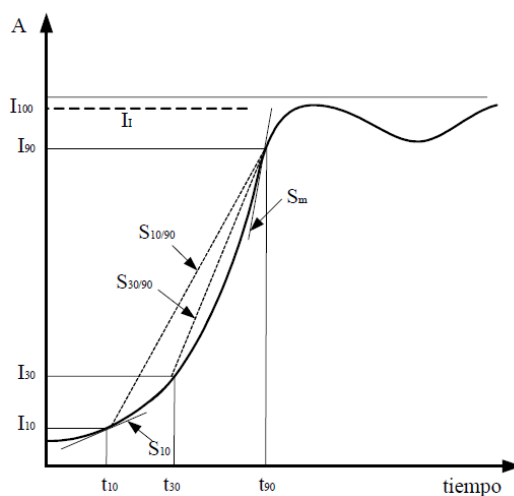
La corriente de descarga se caracteriza por alcanzar su valor pico rápidamente y entonces empieza a decaer a una menor velocidad. La forma de onda generalizada está caracterizada por:

- Valor pico o de cresta (I_p), se ha observado un valor máximo de 400 kA, siendo 30 kA el valor más representativo
- El tiempo de frente de onda (t_f), que varía entre 1 a 10 μ s, siendo 2 μ s el más representativo.
- El tiempo al cual la corriente de descarga disminuye al 50 por ciento del valor de la cresta, (t_c), que se ha estimado varía entre 10 a 100 μ s. [9]

Dada la gran variedad de formas de onda que pueden tener las descargas atmosféricas, se ha establecido que pueden ser representadas por una onda de impulso 1.2/50 μ s.

Los valores antes mencionados son referenciales, más adelante se indicarán los rangos determinados mediante la distribución estadística para cada parámetro de la descarga.

La forma de onda normalizada está descrita por su tiempo a cresta y su tiempo a valor medio medido en la cola. En la figura 2.1 se muestra una forma de onda normalizada. En esta figura, $t_{90} - t_{10}$, es el intervalo de tiempo entre el 10% y el 90% de la corriente de pico de una descarga.



Fuente: Figura 1 bibliografía [2]

Figura 2.1 Forma de onda normalizada de corriente

En la tabla 2.2 se muestran los parámetros más importantes de la primera descarga de un rayo, según el grupo de trabajo 33.01 de CIGRE:

	M, valor medio	σ , desviación estándar
Frente, μs		
t_{10}/t_{90}	5.63	0.576
t_{30}/t_{90}	3.83	0.553
Pendiente, kA/ μs		
S_m , máxima	24.3	0.599
S_{10}	2.6	0.921
$S_{10/90}$	5	0.645
$S_{30/90}$	7.2	0.622
Cresta, kA		
I_1 , inicial	27.7	0.461
Cola, μs	77.5	0.577

Fuente: Tabla 1 bibliografía [2]

Tabla 2.2 Parámetros de la primera descarga para distribución Log-Normal

Para representar la forma de onda de corriente de una descarga atmosférica se lo puede hacer mediante una doble exponencial o mediante una onda triangular. De manera simplificada se puede utilizar una onda con forma en doble rampa para la corriente del rayo, figura 2.2. En este caso, la expresión que sigue la corriente es la siguiente [2]:

$$i(t) = \alpha_1 \cdot t \cdot u(t) - \alpha_2 (t - t_f) \cdot u(t - t_f) \quad (2.1)$$

$$\alpha_1 = \frac{I_p}{t_f} \quad (2.2)$$

$$\alpha_2 = \frac{2t_c - t_f}{2t_f(t_c - t_f)} \cdot I_p \quad (2.3)$$

donde

$u(t)$, $u(t-t_f)$ función escalón unidad

I_p intensidad de pico de la onda de la corriente de una descarga, en A

t_f tiempo de frente de la onda de la corriente de una descarga, en s

t_c tiempo al valor medio de la intensidad de cresta, en s.

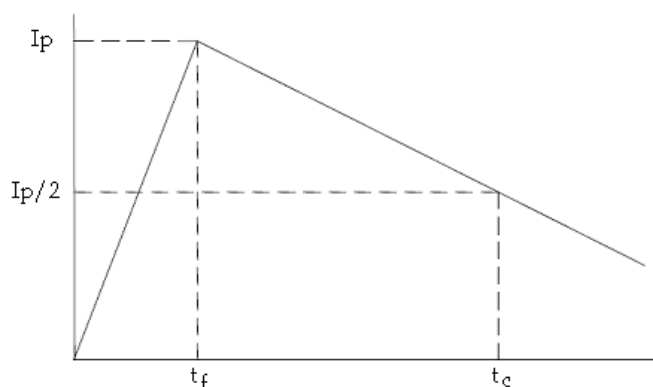


Figura 2.2 Onda de descarga de doble rampa

2.2.2 FUNCIONES DE PROBABILIDAD PARA UN RAYO

2.2.2.1 Función densidad de probabilidad de una descarga

La distribución estadística de todos los parámetros de una descarga atmosférica se puede aproximar por una distribución logarítmica-normal, cuya función de probabilidad viene dada por la fórmula:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x/M)}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.4)$$

Donde M es el valor medio y σ la desviación estándar.

Estos valores están referidos a la primera descarga del rayo, que normalmente es la que presenta un valor de pico más elevado. Generalmente, para la corriente del rayo, se asumen los siguientes valores [17]:

- $\sigma = 0.74$ y $M = 34$ kA para descargas con polaridad negativa
- $\sigma = 0.98$ y $M = 40$ kA para descargas con polaridad positiva

Mientras que para el tiempo de frente de onda se asume:

- $\sigma = 0.494$ y $M = 2$ μ s

2.2.2.2 Función de distribución acumulada

La función de distribución acumulada permite calcular la probabilidad de que la corriente de pico de un rayo, I_p , sea igual o mayor a un valor determinado, i_0 .

Esta función se puede calcular de las siguientes maneras:

- A partir de la función densidad de probabilidad $f(x)$

$$P(I_p \geq i_0) = p(i_0) \cdot \Delta I_p + p(i_0 + \Delta I_p) \cdot \Delta I_p + \dots + p(200kA) \cdot \Delta I_p \quad (2.5)$$

Para que esta expresión sea precisa, el incremento de intensidad, ΔI , debe ser pequeño.

- Mediante una aproximación

La función de distribución acumulada de la corriente de pico de un rayo puede aproximarse mediante una distribución fraccional. Así, la probabilidad de que la corriente de pico, I_p , sea mayor que un valor i_0 se puede obtener según la siguiente expresión:

$$P(I_p \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{I_{50}}\right)^{nc}} \quad (2.6)$$

La función de densidad de probabilidad de la corriente de pico, que representa la probabilidad de que el valor de pico de la corriente inyectada por el rayo sea igual a i_0 , es la derivada de la ecuación anterior.

$$f(I_p) = \frac{nc}{I_{50}^{nc}} \cdot \frac{I_p^{nc-1}}{\left[1 + \left(\frac{I_p}{I_{50}}\right)^{nc}\right]^2} \quad (2.7)$$

en donde n_c e I_{50} se dedujeron a través de observaciones experimentales.

Los valores recomendados para el estudio de líneas en IEEE Std 1410-1997 son $n_c = 2.6$ e $I_{50} = 31kA$. [7] De esta manera:

$$P(I_p \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.8)$$

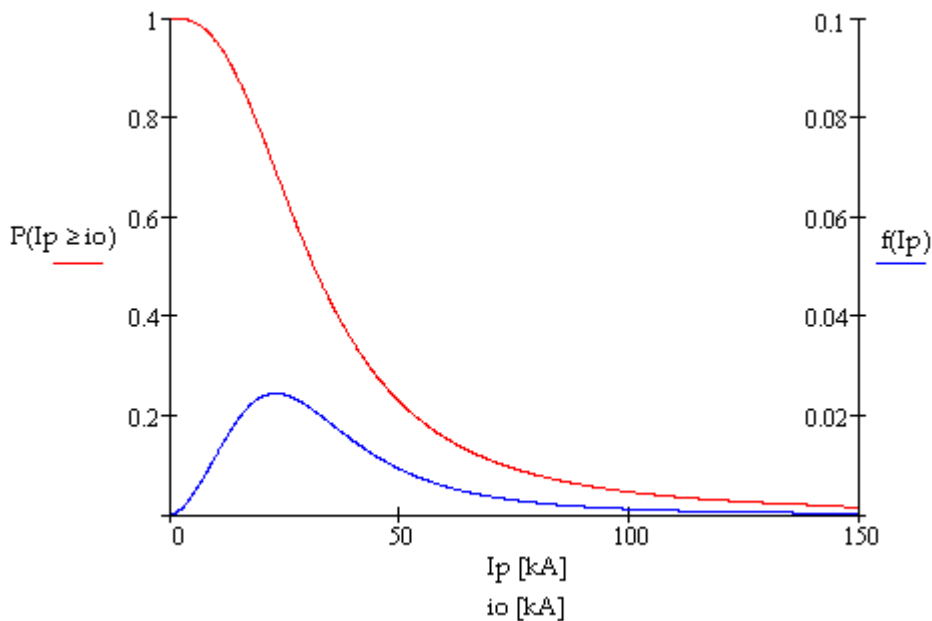


Figura 2.3 Función de densidad y función de distribución acumulada de la corriente

2.2.3 POLARIDAD DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Las descargas negativas forman el 90 % de las descargas que caen a tierra a lo largo de todo el planeta, mientras que, menos del 10% de las descargas son positivas.

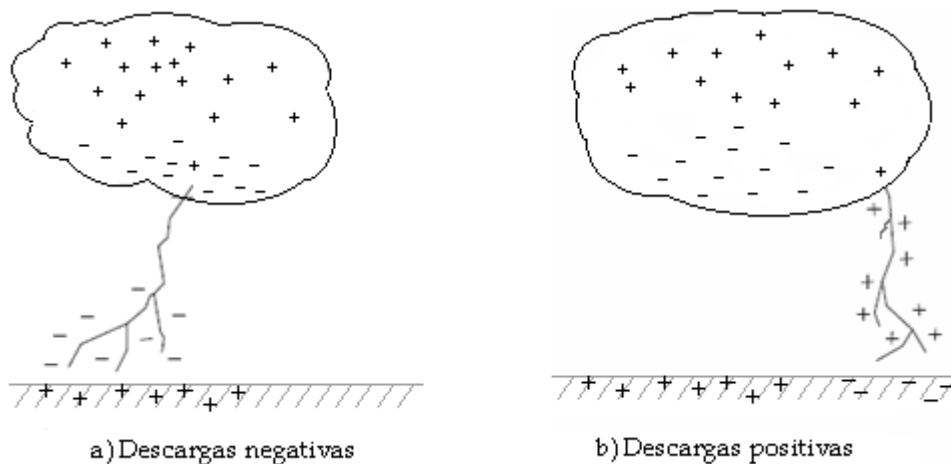


Figura 2.4 Polaridad de las descargas atmosféricas

Los rayos de polaridad positiva tienen un considerable interés práctico porque tanto la corriente de pico como la carga total transferida pueden ser mucho más grandes que las de la mayoría de los rayos con polaridad negativa más comunes.

Los rayos positivos contienen normalmente una única descarga de retorno seguido de un periodo de corriente continua. Tormentas con carga predominantemente negativa acaban a menudo con descargas positivas.

La forma de onda de la corriente de descarga depende de la polaridad del rayo. En rayos de polaridad negativa, la segunda descarga tiene una forma de onda diferente de la primera, presentando generalmente un frente más rápido y una duración menor.

Las descargas pueden distinguirse en cuatro tipos:

- a. Negativo descendente, predomina en las construcciones de altura inferior a 100 metros. La corriente media es de aproximadamente 33 kA.
- b. Descendente positivo, una minoría apreciable de rayos lleva la carga positiva a tierra. Ocurren en la fase de disipación de una tormenta.
- c. Ascendente negativo, predominan en las construcciones altas y tienen una corriente media menor a 25 kA.
- d. Ascendente positivo, las magnitudes de la corriente son de 1.2 a 2.2 veces superiores a las de un rayo negativo descendente. [2]

2.2.4 MEDICIONES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Si bien existen síntomas claros que preceden la ocurrencia de descargas atmosféricas, no resulta posible predecir con certeza el momento, el lugar de impacto, ni la intensidad de sus parámetros. Todas las mediciones realizadas sirven para ser recopiladas y analizadas en términos estadísticos, permitiendo luego hablar sobre la probabilidad de ocurrencia de un tipo de descarga.

Las estaciones encargadas de la detección de las descargas nube – suelo deben estar concebidas para medir por recepción de las ondas electromagnéticas que emiten las descargas la siguiente información: [13]

- Ubicación del punto de impacto
- Momento de ocurrencia (fecha y hora con precisión de 1 ms)
- Amplitud de la onda (0 a x kA)

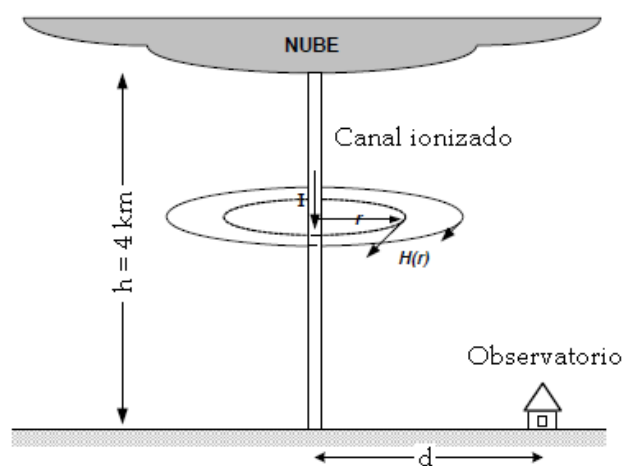
- Número de arcos que componen la descarga

Toda esta información se puede extraer de los registros si se lleva a cabo un monitoreo permanente del área en estudio y se realiza el procesamiento simultáneo de datos aportados por diferentes estaciones ubicadas estratégicamente en el territorio donde se desea estudiar las características eléctricas del fenómeno.

El rayo, por ser una corriente eléctrica variable produce un campo electromagnético irradiado. Este campo aparece como perturbador de los sistemas que presentan lazos o bucles de conducción. La frecuencia equivalente del campo se ubica en la gama de las ondas largas, por tal motivo es difícil de producir un blindaje para evitar su acción. Una forma de medir los parámetros del rayo es aprovechar este campo electromagnético, captándolo y registrándolo como una oscilografía con una base de tiempo exacta y precisa que permita la discriminación de variaciones en una décima de microsegundo.

La antena de donde parte el campo electromagnético es el canal ionizado, el cual puede aproximarse como un conductor rectilíneo aproximadamente vertical.

En una aproximación simplificada, se puede aceptar que para una distancia “d” suficientemente alejada del lugar de impacto, la intensidad de campo magnético está dada por la ley de Ampere.



FUENTE: Bibliografía [13]

Figura 2.5 Campo magnético generado por la corriente del rayo

En el país todavía no se dispone de tales estaciones de medición.

2.3 ONDAS VIAJERAS

Los circuitos de potencia eléctricos transmiten voltajes de impulso no deseados tan efectivamente como voltajes a frecuencia industrial, incluso para frecuencias que alcanzan el rango de los megahertzios. Cuando la geometría del circuito es corta, comparada con la longitud de onda, una representación con constantes de circuito concentrados (L , R , C) es suficiente. Los conceptos usuales de impedancia de línea, expresados como resistencia y reactancia en ohmios, utilizados para cálculos a frecuencia industrial no aplican para la solución de voltajes transitorios de corta duración, tales como las ondas viajeras producidas por descargas en líneas de transmisión. Entonces, para estudios de los efectos de las descargas atmosféricas en líneas de transmisión es necesario utilizar una representación con parámetros distribuidos y constantes.

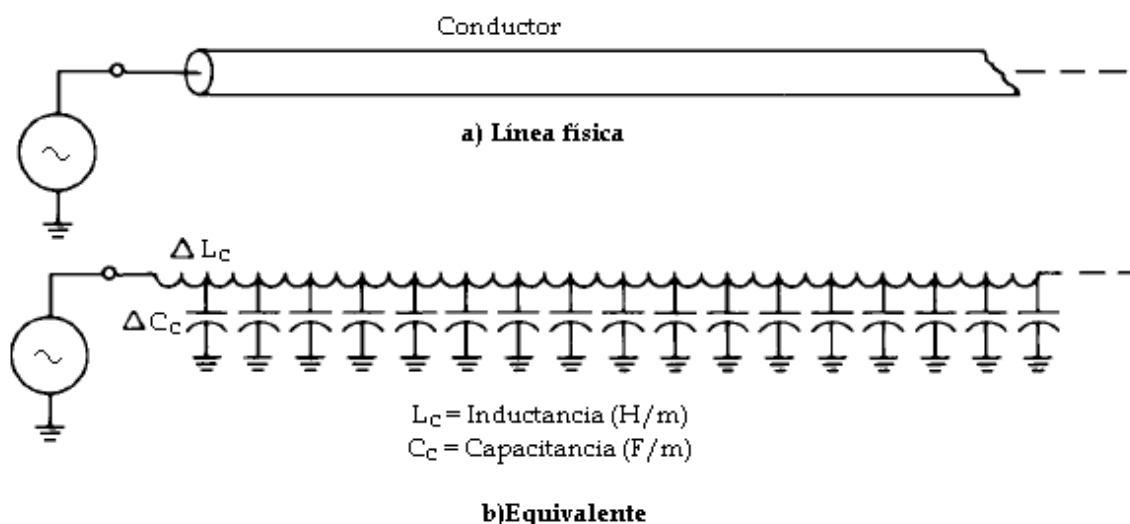


Figura 2.6 Parámetros distribuidos y constantes

El fenómeno de las ondas en las líneas puede ser propuesto de la siguiente manera: refiriéndose a la figura 2.6, si se aplica un voltaje en uno de los terminales de la línea, el primer capacitor se carga inmediatamente al voltaje aplicado en ese instante, sin embargo, debido al primer inductor en serie, el segundo capacitor no responde inmediatamente, sino que sufre un retardo, el fenómeno se repite para los elementos subsiguientes. Si el voltaje aplicado tiene la forma de un impulso, empezando en cero y regresando a cero, se puede observar que los voltajes en los capacitores intermedios aumentan a un valor

máximo y regresan a cero. El disturbio del voltaje de impulso aplicado se propaga a través de la línea en forma de una onda. [5]

Cuando una descarga atmosférica golpea a un conductor de fase o un hilo de guarda, la corriente de la descarga tiende a dividirse, yendo la mitad en cada dirección. Si el hilo de guarda es golpeado en una torre, la corriente fluirá además a través de la torre. La corriente de la descarga se encontrará con la impedancia característica de los conductores, por lo tanto aparecerá un voltaje con la misma forma de onda que la corriente. La impedancia característica de una línea está típicamente dentro de un rango de 300 a 400 Ω y es casi pura resistencia.

La corriente y el voltaje se moverán a través del conductor como ondas viajeras. La velocidad de propagación de la onda es un poco menor que la velocidad de la luz, debido a la resistencia. Con fines prácticos se puede considerar igual.

El comportamiento de las ondas se describe en los siguientes párrafos.

Cuando voltajes de impulso de igual polaridad pasan uno por encima del otro, los voltajes se incrementan, como se muestra en la figura 2.7. Las corrientes se restan, ya que la corriente es el movimiento de la carga en una dirección y, cargas de la misma polaridad que fluyen en direcciones opuestas, se cancelan.

Por otra parte, al llegar el impulso a un punto abierto en el circuito, se refleja. Envía de regreso una onda de voltaje igual a la onda de llegada y el voltaje se duplica, como se esquematiza en la figura 2.8. Mientras que la onda de voltaje se duplica, la onda de corriente se cancela a cero ya que la onda de retorno iguala a la onda de llegada. A la onda resultante se la conoce como onda incidente.

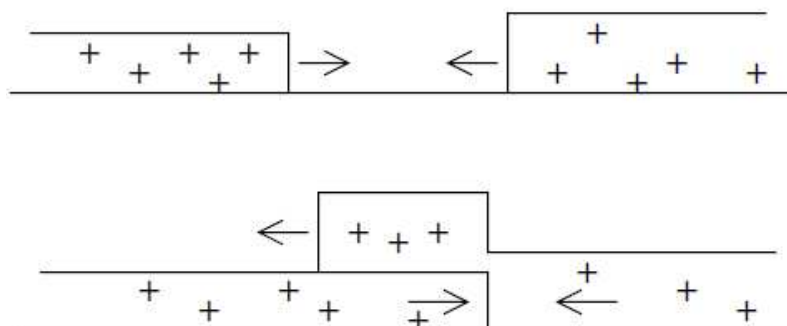


Figura 2.7 Ondas viajeras sobreponiéndose

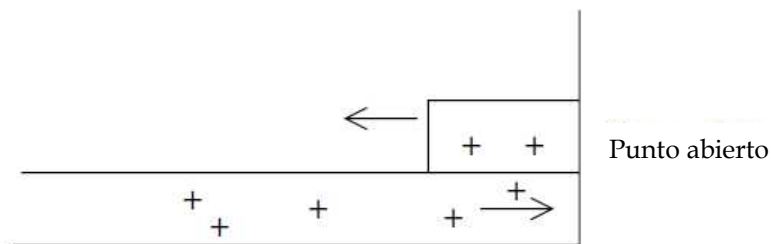


Figura 2.8 Onda viajera reflejada en un punto abierto

Refiriéndose a la figura 2.9, si a cualquier instante E es el voltaje de la onda incidente en la juntura, entonces:

$$\frac{E \cdot (Z_2 - Z_1)}{Z_2 + Z_1}$$

es la onda reflejada del voltaje en la juntura, en donde Z_1 es la impedancia característica del primer conductor y Z_2 es la impedancia característica del segundo conductor. El voltaje de la onda refractada en la juntura es la suma de los voltajes de las ondas incidente y reflejada y es igual a

$$\frac{E \cdot 2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

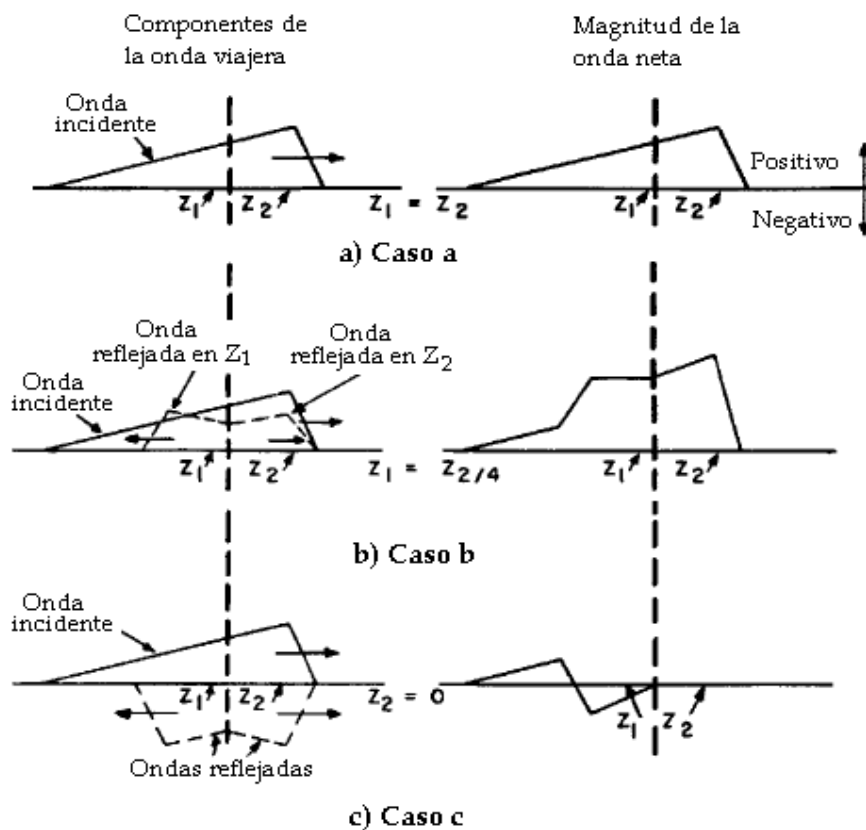


Figura 2.9 Comportamiento de ondas viajeras

En el caso a, la onda viajera está en un medio en el que no cambia la impedancia característica, es decir $Z_1 = Z_2$, por lo tanto no se produce una onda reflejada en la junta entre Z_1 y Z_2 .

En el caso b, Z_2 es mayor que Z_1 . A medida que Z_2 aumente su magnitud en comparación a Z_1 , la magnitud de la onda reflejada se aproxima (como un límite) al valor de la onda incidente.

En el caso c, Z_2 es igual a cero. La magnitud de la onda neta en Z_2 (onda refractada) es cero, ya que los componentes de la onda incidente y reflejada son iguales en magnitud y opuestos en polaridad en la región Z_2 .

La magnitud total de la onda que prevalece es igual a la suma algebraica de la onda incidente y reflejada. Esta es la onda refractada en la junta de las impedancias características.

2.4 MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Debido a que el voltaje que aparece en el aislador después de una descarga al hilo de guarda o a la torre, está afectado por el campo electrostático y electromagnético del ambiente en el que esté la torre, la única manera precisa de predecir la relación entre las características de una descarga y el voltaje en el aislador es con una prueba mediante el modelo electrogeométrico en la estructura.

El objetivo de este modelo es determinar el punto de impacto de una descarga teniendo en cuenta su intensidad máxima de corriente y la localización del canal de esta descarga, que se supone tiene una trayectoria vertical.

El modelo electrogeométrico indica que al acercarse una descarga a tierra hay un momento en el que se supera la rigidez dieléctrica del aire y se produce un arco, a la distancia en que se produce se la denomina distancia de ruptura o distancia crítica. Esta distancia depende de la magnitud de la intensidad de pico de la descarga, pero la distancia de ruptura de un conductor en la punta de la torre difiere de la distancia de ruptura a la tierra, de esta manera se tienen distintas distancias de ruptura, una a los conductores de fase o los hilos de guarda, r_c , y otra distancia a tierra, r_g . [1]

Existen diferentes ecuaciones para determinar las distancias de ruptura. Para la mayoría de las aplicaciones se acepta la siguiente relación simplificada

$$r_x = A \cdot I_p^b \quad (2.9)$$

Expresiones	Distancia a tierra, r_g		Distancia a un conductor, r_c	
	A	b	A	B
Wagner	14.2	0.32	14.2	0.32
Armstrong	6	0.8	6.7	0.8
Brown	6.4	0.75	7.1	0.75
Anderson	6.4, 8 ó 10	0.65	8	0.65
IEEE 1243-1997	β^a	0.65	10	0.65
Love	10	0.65	10	0.65
Whitehead	9.4	0.66	9.4	0.66
Suzuki	3.3	0.78	3.3	0.78
$\beta = 3.6 + 1.7 \ln(43-h)$ Si $h < 40$ m $\beta = 5.5$ Si $h \geq 40$ m				

Tabla 2.3 Constantes para la distancia de ruptura

La estructura que se utiliza en el presente trabajo tiene una altura de 40 m y se tomará las constantes de IEEE 1243 – 1997. De esta manera:

$$r_g = 5.5 \cdot I_p^{0.65} \quad (2.10)$$

$$r_c = 10 \cdot I_p^{0.65} \quad (2.11)$$

En el modelo geométrico se considera el esquema presentado en la figura 2.10, que corresponde a una línea aérea trifásica protegida por dos hilos de guarda.

Las descargas de intensidad I_p que alcancen el arco entre A y B impactarán sobre el conductor de fase, las que alcancen el espacio formado entre A, C y A, impactarán sobre uno de los hilos de guarda y las demás descargas irán a parar a tierra.

Cuanto mayor sea la intensidad de pico considerada, mayores serán las distancias de ruptura r_g y r_c , con lo cual el arco AB disminuirá.

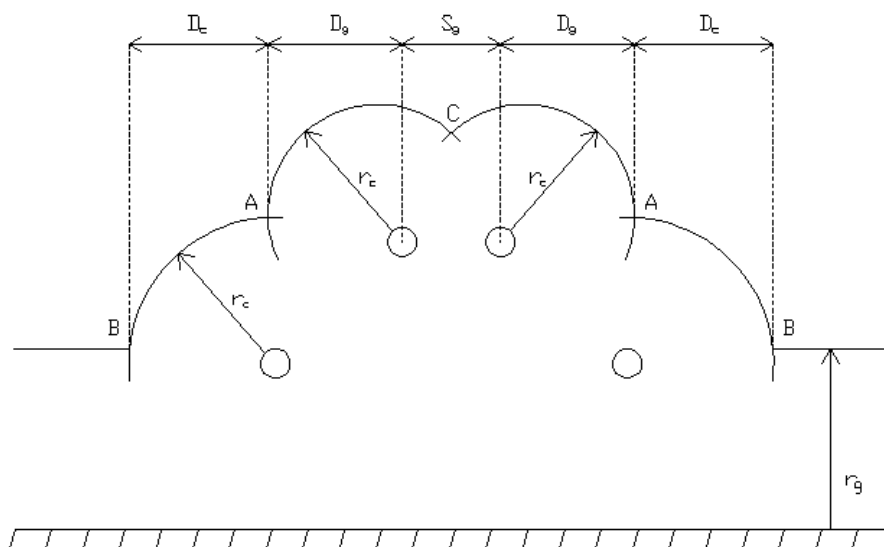


Figura 2.10 Definición de ángulos y distancias para modelo electrogeométrico

La intensidad máxima de falla de apantallamiento (I_m) es aquella para la cual todas las distancias críticas coinciden en un punto, es decir, cuando A y B coinciden. Por lo tanto, las descargas cuya corriente de pico sea superior a la intensidad máxima de falla de apantallamiento impactarán contra el hilo de guarda o contra tierra, pero no contra un conductor de fase. Para intensidades de descarga menores existe la probabilidad de que se produzca un impacto contra un conductor de fase.

La figura 2.11 muestra como varían las distancias A y B en función de la intensidad de la descarga para la estructura que se utiliza en este trabajo. Esta estructura tiene una altura de 40 m, el hilo de guarda y el conductor de fase superior se encuentran separados a 1.6 metros y 3.3 m del centro de la torre, respectivamente. El brazo superior está alineado por encima del brazo inferior, de manera que se considera que no es necesario un análisis con el resto de fases para determinar el punto B, además de que en este trabajo se trata del fenómeno de flameo inverso, por lo tanto la zona de interés de este estudio estará definida por la curva que forme la longitud de A en función de la corriente de descarga. Mediante la figura se puede observar que la línea se encuentra completamente apantallada por el hilo de guarda para intensidades de la descarga mayores a 85 kA, ya que A es igual a B. Además, se puede distinguir que para valores pico de corriente menores existe mayor probabilidad de que la descarga se dirija a tierra, mientras que para corrientes mayores, el punto de impacto va a ser

mayoritariamente el hilo de guarda, llevando así a una situación en que podría producirse un flameo inverso.

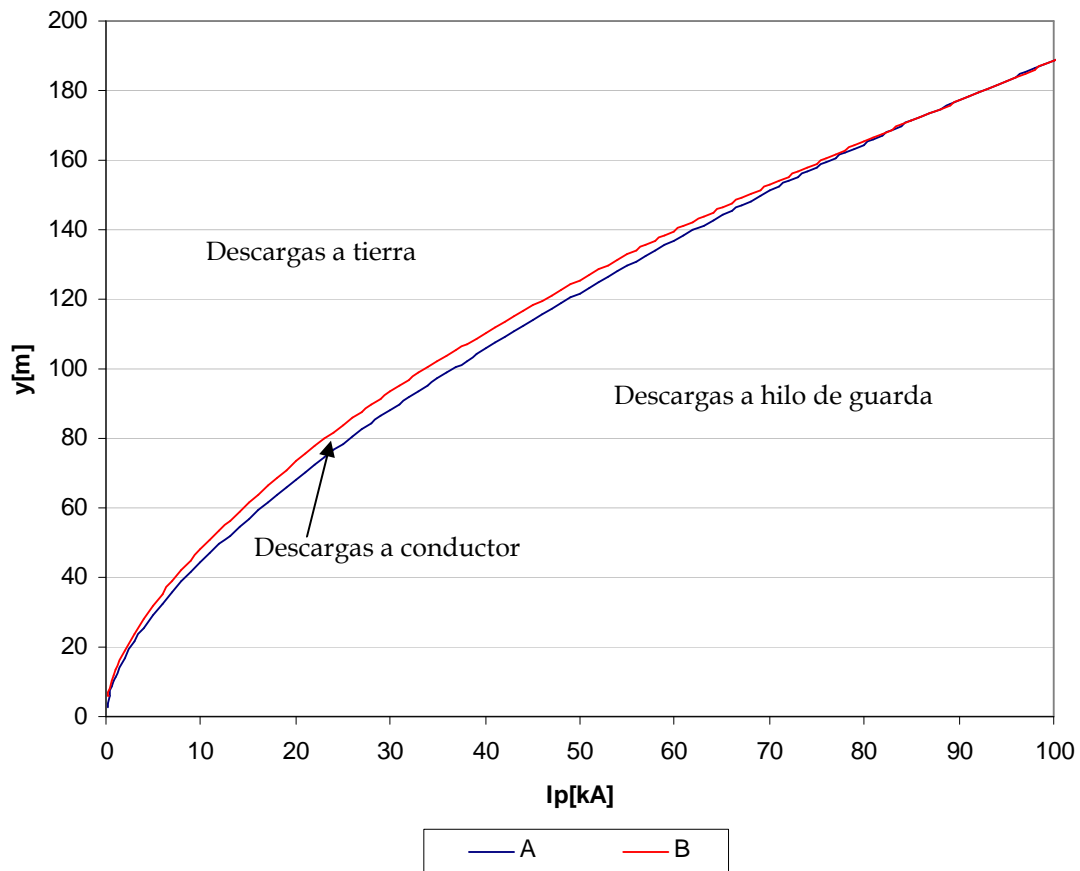


Figura 2.11 Zonas de impacto por modelo electrogeométrico para torre típica SL2

Considerando solamente descargas verticales, para un rayo de intensidad de pico I_p , las distancias D_c y D_g son las distancias de exposición del conductor de fase y del hilo de guarda, respectivamente como se indica en la figura 2.10. Así, si un rayo cae en la línea, la probabilidad de impactar en el cable de guarda es:

$$P_{hg} = \frac{2 \cdot D_g + S_g}{2 \cdot D_c + 2 \cdot D_g + S_g} \quad (2.12)$$

y la probabilidad de que impacte sobre el conductor de fase es: [7]

$$P_{conductor} = \frac{2 \cdot D_c}{2 \cdot D_c + 2 \cdot D_g + S_g} \quad (2.13)$$

2.4.1 CALCULO DEL ANGULO DE PROTECCIÓN

El ángulo de protección de un hilo de guarda se define como el ángulo entre la línea que une al conductor más expuesto con el hilo de guarda y la línea vertical que baja desde el hilo de guarda.

Si se considera la interacción electrostática entre la descarga atmosférica, un conductor y el hilo de guarda, como se muestra en la figura 2.12, se puede apreciar que a medida que el líder de la descarga descende, sus líneas equipotenciales van a interactuar tanto con el conductor de fase como con el hilo de guarda. En el primer caso (a), hay protección y el apantallamiento es efectivo, en el caso (b) no se presenta una protección.

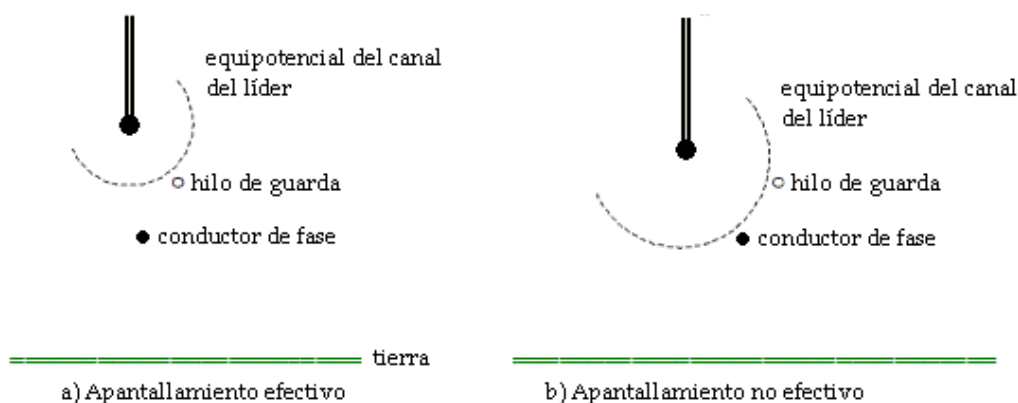


Figura 2.12 Equipotenciales del líder descendente

Para la misma configuración de un conductor se puede presentar tanto un apantallamiento efectivo como uno no efectivo. Por lo tanto es necesario conocer la distancia crítica a la que varias cargas eléctricas van a tierra. El resultado de algunas investigaciones se ilustra en la figura 2.13. [6]

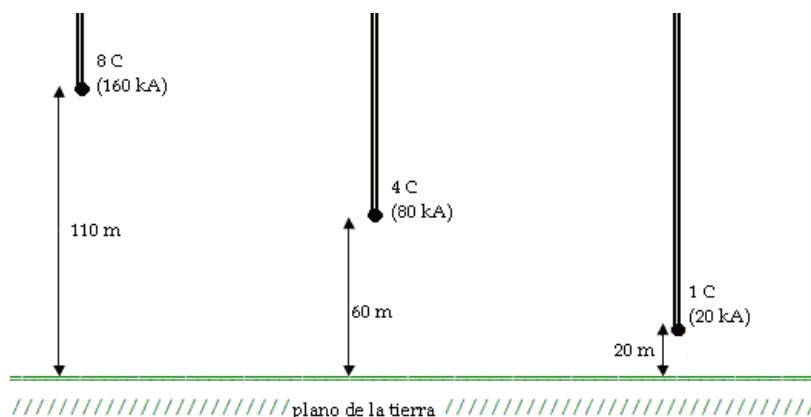


Figura 2.13 Distancias críticas asociadas con cargas en el rayo

El valor pico de la corriente de retorno es aproximadamente proporcional a la carga del líder. Los valores correspondientes se muestran junto al valor de la carga en la figura.

Basado en lo anterior se ha encontrado que un ángulo en el orden de 30° podría dar casi una completa protección, y un ángulo de 90° no daría ninguna protección. Valores típicos para ángulo de protección están en el rango de 22° a 48° . [6] En la torre de trabajo, SL2, se tiene un ángulo alrededor de 20° .

2.5 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.5.1 DESCARGA EN UNA TORRE O HILO DE GUARDA

Cuando una descarga cae en una línea de transmisión, puede terminar en la punta de una torre, en el hilo de guarda o en el conductor de fase. El sitio de impacto se determina con la aplicación del modelo electrogeométrico.

Si la descarga golpea la punta de la torre, parte de la corriente de la descarga fluye por los hilos de guarda y el resto va a tierra a través de la torre, como se puede observar en la figura 2.14a. Si la impedancia de la torre y la resistencia de pie de torre son bajas, y la descarga es moderada en términos de magnitud de corriente y frente de onda, la corriente pasa sin problemas a tierra. Si no se presentan estas condiciones, el flujo de la corriente a través de la torre provoca un alto voltaje en la torre.

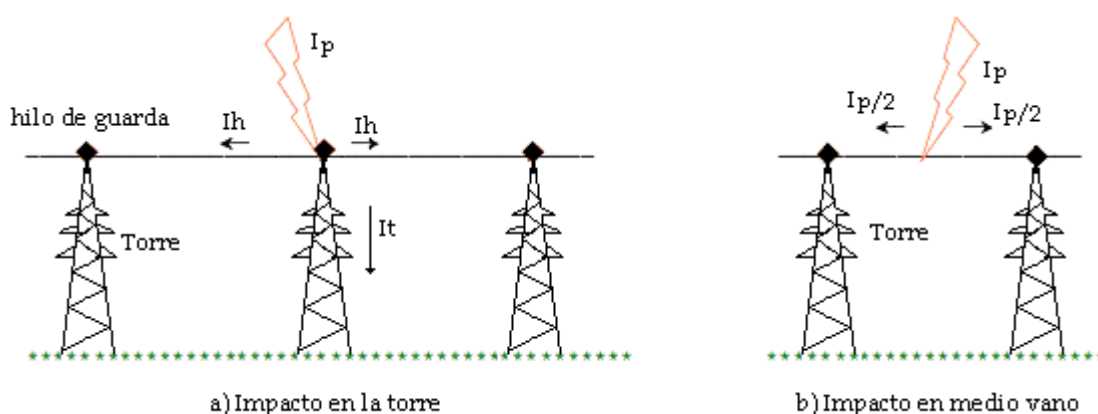


Figura 2.14 Impacto de la descarga en el hilo de guarda

En casos extremos, el voltaje entre la torre y tierra puede ser suficiente para provocar un flameo desde la torre, a través de la cadena de aisladores, hacia uno o más conductores de fase. Los voltajes inducidos en los conductores de fase se determinan por un factor de acoplamiento k veces el voltaje del extremo superior de la estructura. Este voltaje es una función del tiempo, impedancia de pie de torre y geometría de la estructura.

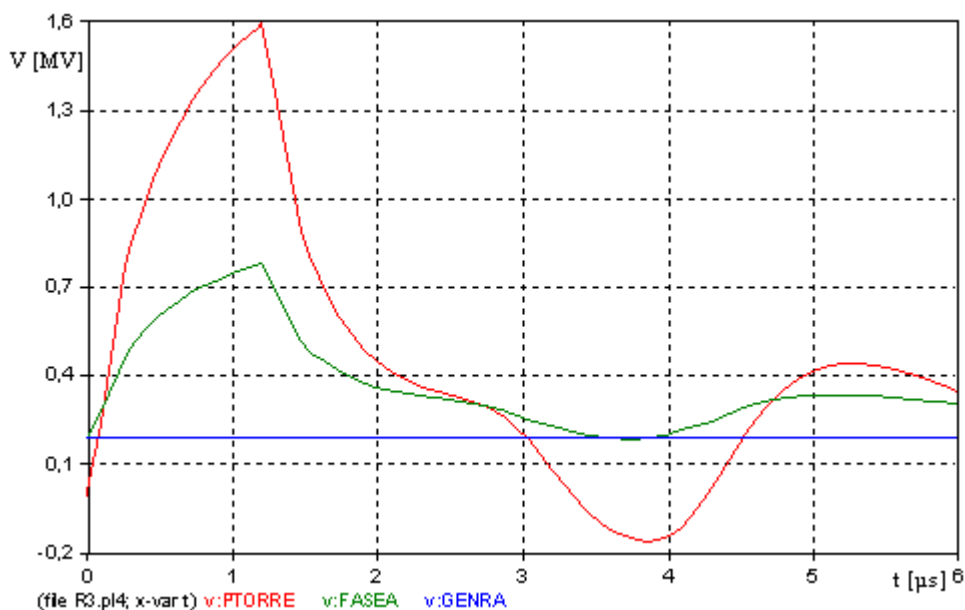


Figura 2.15 Voltajes producidos por impacto de una descarga de 40 kA en la torre típica SL2

En la figura 2.15, *PTORRE* es el voltaje en la punta de la torre para una descarga de 40 kA, *FASEA*, es el voltaje inducido en el conductor de la fase A y *GENRA* es el voltaje de operación normal del sistema.

El voltaje en la cadena de aisladores es igual a la diferencia entre el voltaje en la estructura en la punta de la cadena de aisladores (*PTORRE*) y el voltaje inducido en el conductor de fase, que en este caso es *FASEA*. Si este voltaje excede el voltaje de descarga del aislador, se producirá un flameo.

Si la descarga cae en el hilo de guarda entre torres, se inician ondas viajeras a través del hilo de guarda, como se indica en la figura 2.14b. La corriente de la descarga fluye sin problema a tierra en las torres más cercanas, a menos que la impedancia de pie de torre sea muy alta. Los voltajes originados en el hilo de guarda y en el conductor de fase, respectivamente, serán:

$$U_g = Z_g \frac{I_p}{2} \quad (2.14)$$

$$U_f = kU_g \quad (2.15)$$

Siendo Z_g la impedancia característica del hilo de guarda, I_p , la intensidad de cresta del rayo, y k el factor de acoplamiento entre el hilo de guarda y el conductor. El valor del factor de acoplamiento, k (es menor que 1), depende del número de conductores, de su separación y situación relativa y del efecto corona. Si la diferencia:

$$U_g - U_f = (1 - k) \cdot U_g \quad (2.16)$$

es suficientemente grande, entonces el contorneo se producirá entre el hilo de guarda y el conductor de fase en el punto de impacto. En caso contrario, las ondas de voltaje que se produjeron en el punto de impacto alcanzarán las torres más próximas donde se originarán ondas que viajarán a tierra. El valor de cresta de los voltajes entre los terminales de las cadenas de aisladores dependerá entonces de las distintas reflexiones de ondas que se originen en la torre. [7]

El cálculo del voltaje producido en la torre por ondas reflejadas debido al impacto de una descarga atmosférica se lo hace a través de ATP. A continuación se da una breve descripción del fenómeno.

Cuando la descarga cae en una torre, las ondas de voltaje producidas por la corriente de descarga viajan en ambas direcciones. Al llegar a torres vecinas serán parcialmente reflejadas y regresarán a la torre impactada en dos veces el tiempo de tránsito entre torres. Más reflexiones se presentarán a medida que la onda inicial avance y se encuentre con más torres. En el cálculo de la onda de voltaje resultante y por lo tanto de la diferencia a través del aislador, es útil considerar el período inicial, primer periodo de reflexión, segundo período de reflexión y demás para obtener equivalentes separados.

Para el período inicial y el primer periodo de reflexión se utilizan los siguientes circuitos equivalentes:

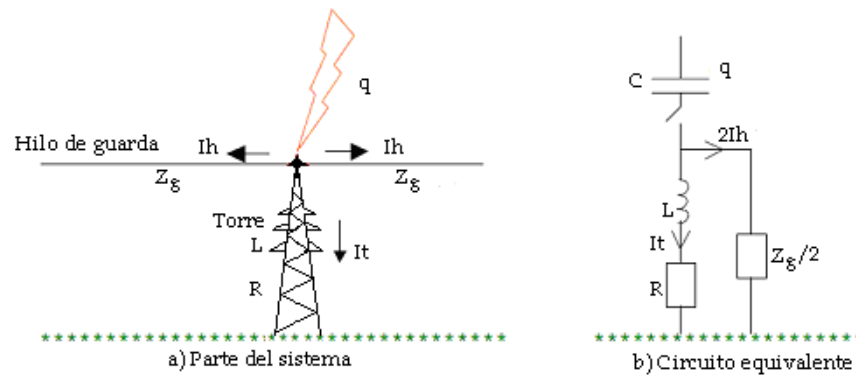


Figura 2.16 Periodo inicial

en donde L es la inductancia efectiva de la torre, R es la resistencia efectiva de la torre y el pie de torre y Z_g es la impedancia característica del hilo de guarda.

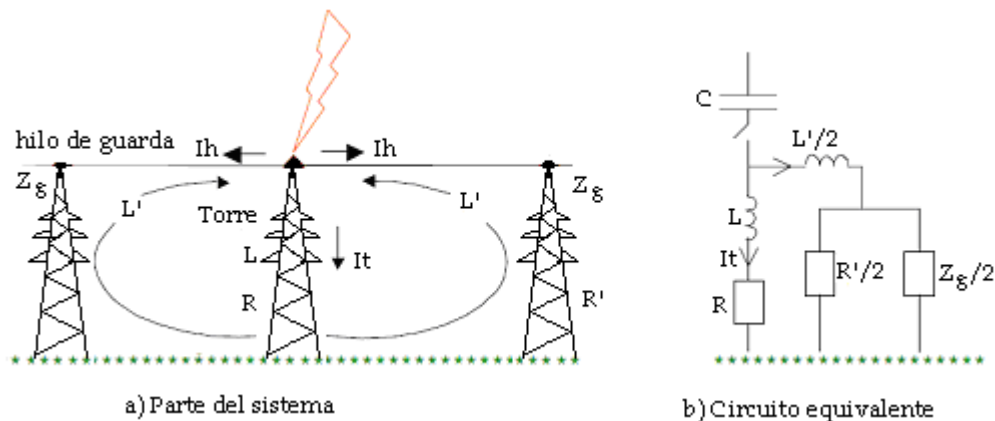


Figura 2.17 Primer periodo de reflexión

Donde L' es la inductancia del primer vano y retorno por tierra.

En el análisis del segundo periodo de reflexión se puede considerar como que el impacto se produjo en dos torres en paralelo, con la impedancia del vano impactado actuando como una extensión del canal de descarga. [6]

Si la descarga atmosférica impacta en una torre, la simulación de sobrevoltajes se realizará representando tres vanos a cada lado de la torre de impacto, más una sección de la línea de longitud suficientemente larga, de forma que se evite el efecto que podrían tener las ondas reflejadas en cada extremo. La longitud de los tramos en este trabajo es de 463 m, que es el valor promedio de la longitud de los vanos de la línea Santa Rosa – Totoras y la sección de la línea se ha tomado como 3 km.

Cuando la descarga impacta en la torre, la impedancia efectiva equivalente resultante es el paralelo de la impedancia de dicha torre con el paralelo de las impedancias correspondientes a las dos direcciones de propagación del hilo de guarda; y ambas en serie con la resistencia de puesta a tierra, siendo su valor para una línea con dos hilos de guarda:

$$Z_{eq} = \frac{Z_T \cdot Z_g}{4 \cdot Z_T + Z_g} + R_{pt} \quad (2.17)$$

donde Z_T es la impedancia de la torre, R_{pt} es la resistencia de puesta a tierra y Z_g es la impedancia característica del hilo de guarda.

La intensidad crítica I_c , para la cual se produce el flameo inverso es la intensidad que produce un sobrevoltaje en la torre que supera el nivel de aislamiento del aislador. [7]

$$I_c = \frac{CFO}{Z_{eq}} \quad (2.18)$$

Según CIGRE, la descarga de corriente más baja es 3 kA, otros investigadores creen más razonable reducir este valor de 1 a 2 kA. Sin embargo, el número de descargas con corrientes pico entre 0 y 3 kA es muy reducido frente al número de descargas totales que impactan en una línea de transmisión. [2]

Cuando la descarga se produce en la torre o en el hilo de guarda, el voltaje por la corriente de descarga es:

$$e = I_p \cdot Z_g + L_c \frac{di}{dt} \quad (2.19)$$

En donde:

Z_g : es la impedancia del hilo de guarda

L_c : es la inductancia del conductor de la línea.

La forma de onda de voltaje de impulso es similar a la de la corriente en la descarga atmosférica, y se describe por:

$$e = \frac{1}{2} \cdot Z_{eq} \cdot I_p \cdot (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\beta_1 t}) \quad (2.20)$$

en donde: α_1 , β_1 son coeficientes de atenuación

2.5.2 DESCARGA EN UN CONDUCTOR DE FASE

El conductor más propenso a ser impactado por una descarga atmosférica es el conductor situado en la fase más elevada o en una fase exterior. La corriente del rayo se dividirá en dos partes iguales que darán lugar a dos voltajes que se propagarán en ambas direcciones. El voltaje máximo será:

$$U_{fm} = Z_c \cdot \frac{I_p}{2} \quad (2.21)$$

Siendo Z_c la impedancia característica de un conductor de fase.

En las otras fases de la línea también se originarán sobrevoltajes por acoplamiento. El voltaje máximo inducido en la otra fase será:

$$U_{fm2} = k \cdot Z_c \cdot \frac{I_p}{2} \quad (2.22)$$

Siendo k el coeficiente de acoplamiento.

El contorneo en la línea de transmisión puede originarse entre conductores de fase si la diferencia de voltajes:

$$U_{fm} - U_{fm2} = (1 - k) \cdot Z_c \cdot \frac{I_p}{2} \quad (2.23)$$

es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores, o en la cadena de aisladores más próxima al impacto si los voltajes que se propagan desde el punto de impacto superan el voltaje soportado. Sólo se producirá contorneo si la intensidad del rayo que cae sobre un conductor supera un cierto valor crítico. Dada la distribución estadística de la intensidad de las descargas atmosféricas, la mayor parte de las descargas que impactan en conductores de fase produciría un contorneo, es por eso la importancia que tienen los hilos de guarda al servir de pantalla contra las descargas atmosféricas.

2.5.3 SOBREVOLTAJES POR FLAMEO INVERSO

A medida que la onda de impulso viaja a través de los conductores, las pérdidas provocan que la magnitud del impulso disminuya constantemente. Cuando la

descarga impacta directamente en una torre, el voltaje en el hilo de guarda respecto a tierra disminuye a medida que aumenta la distancia de la torre donde se mide este voltaje con respecto a la torre en donde se produce el impacto. Es decir que para el análisis de los efectos de las descargas atmosféricas no es necesario representar la longitud completa de la línea. La simulación de los sobrevoltajes se realiza representando tres vanos a cada lado de la torre de impacto, más una línea de longitud suficientemente larga, de manera que se pueda evitar el efecto que podrían tener las ondas reflejadas en cada extremo. Dado que la representación de la línea no incluye elementos no lineales, los sobrevoltajes serán proporcionales a la intensidad máxima de la descarga atmosférica. Aunque se debe mencionar que la resistencia de pie de torre tiene un comportamiento no lineal frente a descargas atmosféricas.

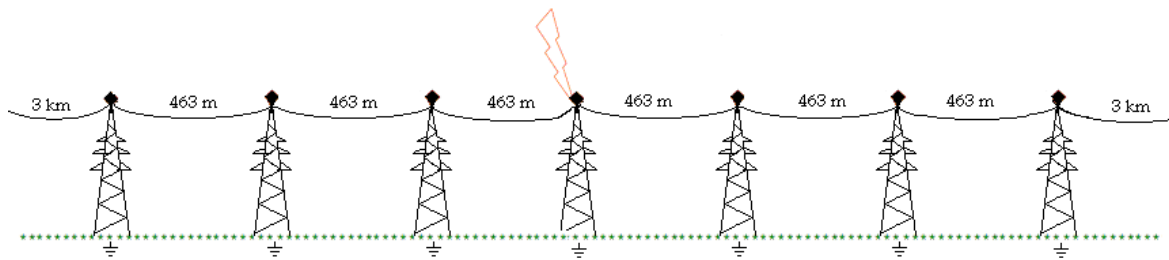


Figura 2.18 Representación de la línea aérea

Cuando la descarga impacta en medio de un vano, las sobretensiones obtenidas en las torres contiguas al punto de impacto con respecto a tierra son algo más pequeñas que cuando el impacto es en la torre; sin embargo, las tensiones en las cadenas de aisladores son algo más elevadas que cuando la descarga impacta en la torre. Para una descarga de 40 kA se muestran algunos resultados en la tabla 2.4.

Sitio de impacto	Tensión máxima en la cadena de aisladores [kV]		
	Superior	Media	Inferior
Torre	721.53	928.46	813.92
Vano OPGW	757.15	984.82	895.94
Vano Acero	752.02	982.19	894.36

Tabla 2.4 Voltajes en la cadena de aisladores para impacto de la descarga en el vano del modelo de LTSRT

2.6 MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Existen diferentes modelos para representar una línea de transmisión. La CIGRE por ejemplo recomienda realizar una representación en función del rango de frecuencias con el que se presenta el proceso transitorio a simular. En EMTP (Electromagnetics Transients Program), varios tipos de modelos son aplicables para el mismo elemento, se puede obtener alta precisión pero con un largo tiempo de cálculo, menor precisión y duración más corta, campo de aplicación amplio o limitado, etc. En simulaciones, la modelación apropiada se debe determinar dependiendo de los propósitos del estudio.

Los sobrevoltajes debido a rayos son transitorios de frente rápido, por lo que la representación de la línea se debe hacer teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- La representación debe extenderse a tres vanos desde el punto de impacto de la descarga atmosférica, porque la reflexión de las ondas debido a vanos más lejanos es despreciable.
- Es necesario desarrollar un modelo que evite reflexiones de ondas en cualquiera de los extremos del tramo de línea representado, esto se puede conseguir haciendo que las dos secciones de los extremos tengan una longitud tal que con el tiempo de simulación escogido ninguna onda reflejada en los extremos abiertos alcance la parte del segmento de la línea que es de interés.
- Para fenómenos de alta frecuencia como los rayos, muchos aspectos determinan la magnitud y la forma del voltaje transitorio que aparece en la base de la torre. Estos incluyen la impedancia de puesta a tierra y la ionización del suelo. [3]
- Se debe incluir la representación de las torres y de sus resistencias de puesta a tierra.
- Para analizar sobrevoltajes de origen atmosférico puede ser suficiente utilizar un modelo de parámetros distribuidos y constantes, cuyos valores hayan sido calculados para una frecuencia cercana a los 500 kHz. [1]

Elementos	Transitorios de frente rápido*	Transitorios de frente muy rápido*
Representación de líneas transpuestas	Parámetros distribuidos modelo multifásico	Parámetros distribuidos modelo monofásico
Asimetría de la línea	Despreciable para simulaciones monofásicas	Despreciable
Parámetros dependientes de la frecuencia	Importante	Importante
Efecto Corona	Muy importante	Despreciable
Torres	Muy importante	Depende de la causa del transitorio
Puesta a tierra	Muy importante	Depende de la causa del transitorio
Aisladores	No incluidos, a menos que se simule contorneo	

FUENTE: Tabla 2.1 [3]

Tabla 2.5 Guía referencial para la modelación de líneas aéreas

* Según definición de IEC 71-1

A partir de una comparación entre los modelos π , K.C.Lee y JMarti realizada en [1] se deduce que:

- El modelo con parámetros concentrados y constantes, π , es muy poco preciso y debe descartarse para calcular sobretensiones de origen atmosférico y el análisis de líneas aéreas frente a descargas atmosféricas.

Debido a la alta frecuencia asociada con transitorios por descargas atmosféricas, no se debería utilizar un modelo π para representar líneas de transmisión.

- El modelo con parámetros distribuidos independientes de la frecuencia, modelo K.C. Lee, presenta una respuesta muy próxima a la exacta en un rango de frecuencias alrededor de la frecuencia escogida para el cálculo de parámetros, 500 kHz, y una desviación significativa para frecuencias muy inferiores a este valor.
- El modelo con parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia, JMarti, es el que muestra un comportamiento más preciso. Por lo tanto, para analizar sobretensiones de origen atmosférico puede ser suficiente utilizar

este modelo y cuyos valores hayan sido calculados para una frecuencia de 500 kHz.

En el presente trabajo, debido al fenómeno en análisis, la línea de transmisión Santa Rosa – Totoras ha sido modelada por tramos de una línea JMarti con los parámetros indicados en la figura 2.19.

The figure shows a software configuration window for a transmission line model. It is divided into several sections:

- System type:** A dropdown menu is set to "Overhead Line". Below it are five checkboxes: "Transposed" (unchecked), "Auto bundling" (unchecked), "Skin effect" (checked), "Segmented ground" (checked), and "Real transf. matrix" (checked).
- Standard data:** This section contains three input fields: "Rho [ohm*m]" with the value 200, "Freq. init [Hz]" with the value 0.1, and "Length [km]" which is empty. There is also a checkbox for "Set length in icon" which is unchecked.
- Model:** This section is further divided into "Type" and "Data".
 - Type:** Five radio buttons are present: "Bergeron", "PI", "JMarti" (which is selected), "Semlyen", and "Noda".
 - Data:** This section contains four input fields: "Decades" (6), "Points/Dec" (10), "Freq. matrix [Hz]" (500000), and "Freq. SS [Hz]" (60). There is also a checkbox for "Use default fitting" which is unchecked.

Figura 2.19 Parámetros utilizados para la representación de la LTSRT

Se han representado los dos circuitos de la línea, además de sus hilos de guarda, cable de acero y OPGW, con sus respectivas características.

Se ha ejecutado un cálculo en ATP para verificar la modelación de la línea obteniendo sus parámetros a frecuencia industrial para un modelo de longitud 110 km y se han obtenido los resultados mostrados en la figura 2.20.

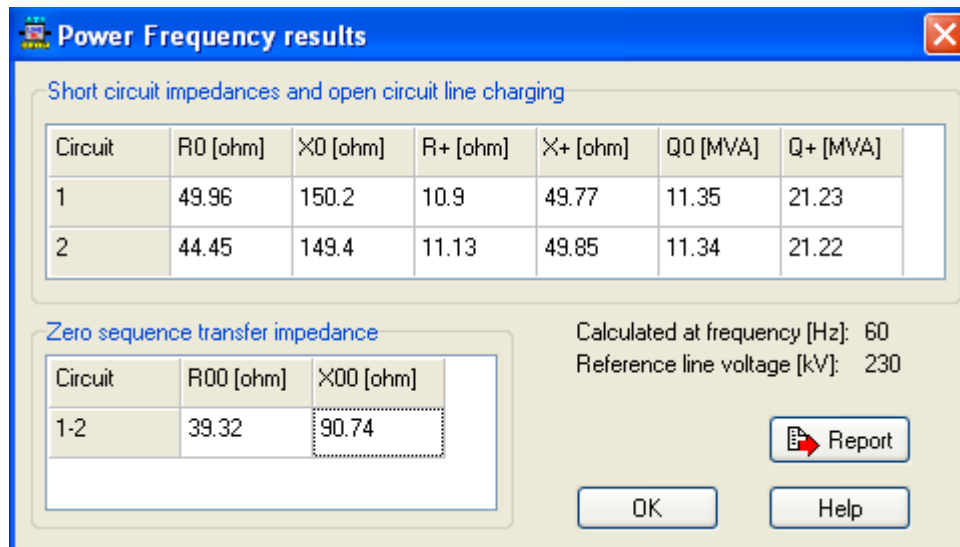


Figura 2.20 Resultados del modelo de la LTSRT para cálculo de frecuencia

Los siguientes aspectos no se han incluido en la representación de la línea ni en el fenómeno en estudio:

- El efecto corona, lo que proporcionará un amortiguamiento inferior al real y valores de sobrevoltaje conservadores.
- Los sobrevoltajes inducidos por descargas a tierra.

2.6.1 MODELO DE LOS CONDUCTORES DE FASE

La línea es representada por tramos cuya longitud es la de un vano. La representación de cada vano se realiza mediante un modelo trifásico con parámetros distribuidos, sin tener en cuenta la dependencia con la frecuencia.

Puesto que no es necesario representar toda la longitud de una línea, esta puede ser adaptada añadiendo en ambos extremos dos tramos de 3 km, esta longitud será suficiente para evitar reflexiones desde sus extremos y por lo tanto permitirán reproducir el proceso transitorio como si la línea fuese de longitud infinita.

2.6.2 MODELOS DE LAS TORRES

A pesar de que la respuesta a una descarga atmosférica de una torre de transmisión es un fenómeno electromagnético, la representación de la torre se la realiza usualmente en términos de circuitos, es decir, las torres se representan mediante líneas ideales cuya impedancia característica tendrá un valor situado

entre 130 y 250 ohmios, y una velocidad de propagación de ondas igual o cercana a la de la luz y que se colocan tomando en cuenta la estructura de la torre.

Debido a que los tiempos de frente de onda asociados con las descargas atmosféricas son rápidos, la mayoría de los modelos de torres asumen que la respuesta de la torre está dominada por una onda transversa de modo electromagnético (TEM) y desprecian otros tipos de radiaciones. Al introducir esta simplificación, una torre se puede representar como una inductancia que conecta los hilos de guarda a tierra, una línea de transmisión de impedancia constante, una línea de transmisión de impedancia variable o una estructura radiante. [3]

Muchos modelos han sido propuestos para la representación de torres de líneas de transmisión, los cuales han sido desarrollados utilizando una aproximación teórica o basados en un trabajo experimental. A continuación se describe brevemente algunos de ellos.

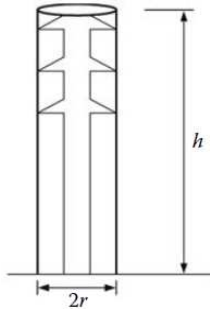
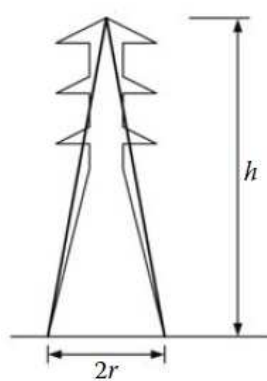
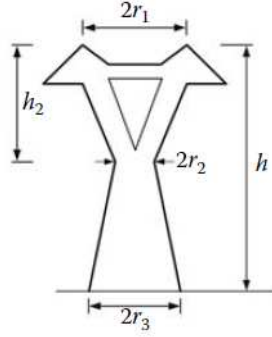
2.6.2.1 Modelos con una única línea vertical sin pérdidas

Los primeros modelos fueron desarrollados utilizando teoría de campos electromagnéticos, representando la torre a partir de formas geométricas simples y asumiendo un impacto vertical en la punta de la torre. Modelos como el cónico y el cilíndrico han sido implementados en el programa digital para cálculo de tasa de salida de una línea de transmisión FLASH de la IEEE, basado en un modelo desarrollado por Anderson.

Se puede asumir que la velocidad de propagación del impulso a través de los elementos de la torre es igual a la de la luz, sin embargo, los múltiples caminos posibles en un diagrama de Lattice y los brazos de la torre introducen retrasos en el tiempo. Consecuentemente, el tiempo para una reflexión completa desde tierra es mayor al que se obtiene del tiempo de viaje cuyo valor es la altura de la torre dividida para la velocidad de la luz. Por lo tanto, la velocidad de propagación en algunos de los modelos se redujo para incluir este efecto en la respuesta de la torre.

Los sobrevoltajes obtenidos utilizando estos modelos deben ser los mismos entre los terminales de todas las cadenas de aisladores, ya que estos modelos no distinguen entre fases de línea. De hecho, algunas diferencias resultan debido a

los diferentes acoplamientos entre el hilo de guarda y los conductores de fase localizados a diferentes alturas sobre tierra.

Forma de la torre	Diagrama	Impedancia característica Tiempo de viaje
Torre cilíndrica		$Z_T = 60 \cdot \left[\ln \left(2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{h}{r} \right) - 1 \right]$ <p>h, altura de la torre en m r, radio de la base en m</p> $t = \frac{h}{0.85 \cdot c}$
Torre cónica		$Z_T = 60 \cdot \ln \left[\sqrt{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right]$ $t = \frac{h}{c}$
Torre cintura		$Z_T = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot 60 \cdot \left[\ln \left(\cot \frac{\tan^{-1}(r/h)}{2} \right) - \ln \sqrt{2} \right]$ $r = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{h}$ $h = h_1 + h_2$ $t = \frac{h}{0.85 \cdot c}$

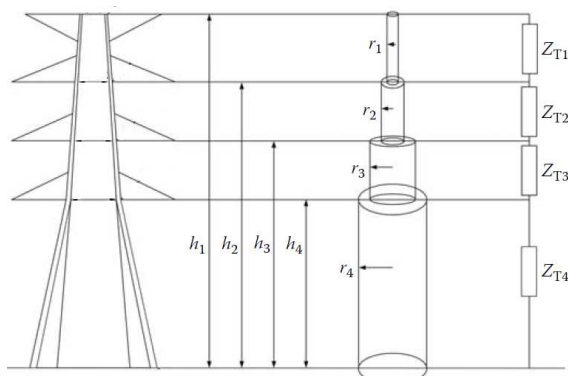
Fuente: Tabla 4.2 bibliografía [3]

Tabla 2.6 Modelos de torres

2.6.2.2 Modelos de línea vertical multiconductor

Cada segmento de la torre entre brazos se representa como una línea vertical multiconductor, la cual puede reducirse a un conductor simple. El modelo de la

torre es entonces una línea monofásica cuya sección se incrementa desde la punta hacia tierra, como se muestra en la figura 2.21. [3]

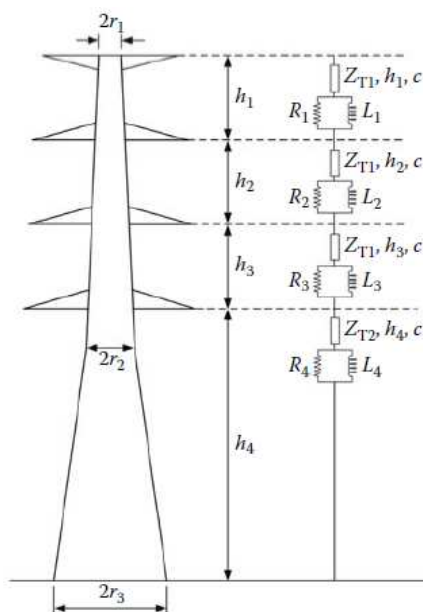


Fuente: Figura 2.29 bibliografía [3]

Figura 2.21 Modelo de torre multiconductor

2.6.2.3 Modelo multipiso

Está compuesto por cuatro secciones que representan las secciones de la torre entre brazos de la torre. Cada sección consiste de una línea sin pérdidas en serie con un circuito en paralelo R-L, incluido para la atenuación de las ondas viajeras. Los parámetros de este modelo se dedujeron a partir de resultados experimentales [3]. El valor de los parámetros, y el modelo mismo, han sido revisados en los últimos años.



Fuente: Figura 2.32 bibliografía [3]

Figura 2.22 Modelo multipiso de una torre de transmisión

Las inductancias y resistencias de amortiguamiento se deducen según las siguientes ecuaciones:

$$R_i = \frac{-2 \cdot Z_{T1} \cdot \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} \cdot h_i \quad (i = 1,2,3) \quad (2.24)$$

$$R_4 = -2 \cdot Z_{T2} \cdot \ln \sqrt{\gamma} \quad (2.25)$$

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2h}{c} \quad (i = 1,2,3,4) \quad (2.26)$$

en donde:

Z_{T1} es la impedancia característica de las tres secciones superiores de la torre

Z_{T2} es la impedancia característica de la sección inferior de la torre

h_i es la altura de cada sección de la torre

y coeficiente de atenuación

α coeficiente de amortiguación

El coeficiente de atenuación está entre 0.7 y 0.8, mientras que el coeficiente de amortiguación es igual a uno.

Una investigación experimental más profunda encontró que un cálculo adecuado para Z_{T1} y Z_{T2} puede estar basado en la fórmula de Jordan: [3]

$$Z_T = 60 \cdot \left(\ln \left(\frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) \quad (2.27)$$

en donde

h es la altura de la torre

r_{eq} es el radio equivalente obtenido de la geometría de la estructura y dado por

$$r_{eq} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} \quad (h = h_1 + h_2) \quad (2.28)$$

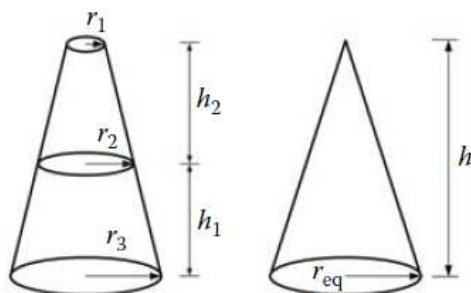


Figura 2.23 Geometría para cálculo de radio equivalente

La velocidad de propagación es la misma que la de la luz.

La selección del modelo puede realizarse según la altura de la torre. Un modelo de línea monofásico sin pérdidas simplificado puede ser suficiente para torres menores a 30 m. Para torres mayores a este valor se sugiere utilizar un modelo como el multiconductor o el multipiso [16], utilizado para la modelación de la torre típica SL2 de este trabajo.

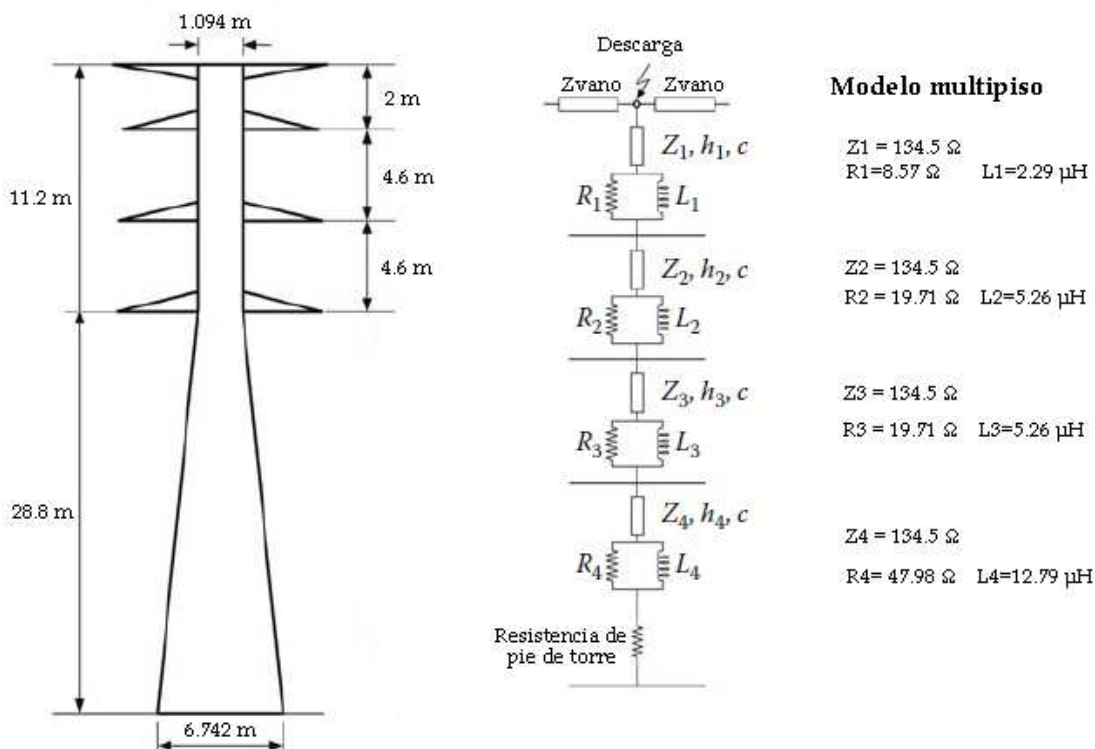


Figura 2.24 Resultados para modelo multipiso de la torre típica SL2

2.7 AISLAMIENTO

Los impulsos provocados por maniobra adquieren más importancia para voltajes de 345 kV o más, para voltajes menores, los rayos dictaminan mayores distancias y longitud de aisladores que los sobrevoltajes ocasionados por maniobra.

El aislamiento utilizado en sistemas de transmisión debe ser suficiente para asegurar la operación confiable de la línea todo el tiempo. Sin embargo, un diseño en el que no se presenten fallas por aislamiento es demasiado costoso.

2.7.1 REPRESENTACIÓN DE AISLADORES

Los valores de la rigidez dieléctrica se pueden caracterizar por una distribución normal para la mayoría de aplicaciones prácticas, pero algunos investigadores han demostrado que las distribuciones de probabilidad de este parámetro no están correctamente representadas por esta función. La distribución normal no tiene límites a la derecha ni a la izquierda, es decir está definida entre $+\infty$ y $-\infty$. Un límite de $-\infty$ indica que existe la probabilidad de que se produzca un contorneo para un voltaje igual a cero, lo cual es físicamente imposible.

La norma IEC 60071 recomienda el uso de la distribución de Weibull, en lugar de la distribución normal, para representar la característica de rigidez dieléctrica. [2]

La distribución acumulativa de esta función es:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V-\xi}{\beta}\right)^\lambda} \quad \xi < V < \infty \quad (2.29)$$

Siendo ξ el valor de truncamiento

β el parámetro de escala

λ el parámetro de forma

En la misma norma, el valor de λ se aproxima a 5 y la distribución se aproxima a la siguiente expresión:

$$F(V) = 1 - 0.5 \left(\frac{Z+1}{4}\right)^5 \quad (2.30)$$

En donde Z está definida como:

$$Z = \frac{V - CFO}{\sigma} \quad (2.31)$$

Siendo σ la desviación típica y CFO (Critical FlashOver Voltage) la tensión crítica de contorneo, es decir la tensión para la que la probabilidad de contorneo sea del 50%.

En la tabla 2.7 se indican las características para una onda de impulso de $1.5 \times 40 \mu\text{s}$ con aisladores $5 \frac{3}{4} \times 10''$.

Número de aisladores	V (kV) tipo 1.5 x 40 μs, CFO	
	Positiva	Negativa
18	1585	1616
19	1665	1700
20	1745	1785

FUENTE: Tabla V bibliografía [10]

Tabla 2.7 Características de descarga de aisladores de suspensión de 5 ¾ X 10"

Sin embargo, estos valores son determinados para condiciones ambientales normales por lo que es necesario realizar una corrección ya que la línea se extiende por una zona montañosa a una altura promedio 2900 metros sobre el nivel del mar.

$$\delta = 0.386 \cdot \frac{pb}{273+T} \quad (2.32)$$

Siendo δ , el factor por densidad relativa del aire

pb , la presión atmosférica en mmHg

T , la temperatura ambiente en °C

La necesidad de una corrección por efecto de la densidad relativa del aire está basada en una ley física observada primero experimentalmente por Paschen, que menciona que el voltaje de descarga en un espaciamiento de campo uniforme depende del producto de la presión del gas y la distancia entre electrodos.

La temperatura promedio de la zona es de 20°C. La presión atmosférica para cualquier altura se obtiene mediante:

$$\log(0.1 \cdot pb) = \log 76 - \frac{As}{18336} \quad (2.33)$$

En donde As es la altura sobre el nivel del mar en metros.

El valor de CFO para cualquier densidad relativa del aire, V , está dado por:

$$V = V_c \cdot \delta^n \quad (2.34)$$

En donde:

V_c es el CFO a temperatura y presión estándar

n exponente dependiente de la longitud de la cadena

1 para una longitud menor a 1.5 m

0.9 para una longitud entre 1.5 y 2.5 m

0.8 para una longitud entre 2.5 y 3 m

0.7 para una longitud mayor a 3 m

En la línea de transmisión Santa Rosa – Totoras existen cadenas de 19 aisladores y es así como se ha considerado que es un valor constante a lo largo de la línea.

BIL, es el nivel de aislamiento básico a impulso, representa el valor de la rigidez dieléctrica expresado en términos del valor de cresta del impulso por rayos estándar. El BIL estadístico, es el valor de cresta de impulso por rayo estándar para el cual el aislamiento presenta una probabilidad de soportar de 90%.

$$BIL = CFO \cdot \left(1 - 1.28 \frac{\sigma_f}{CFO} \right) \quad (2.35)$$

En donde σ_f en por unidad del CFO es el coeficiente de variación.

Es importante tener en cuenta que el valor de la tensión soportada será calculado de forma aleatoria mediante el algoritmo de Box – Muller y de acuerdo con una distribución de Weibull.

2.7.2 CARACTERÍSTICAS DEL ESPACIAMIENTO DE AISLAMIENTO

La geometría de las envolturas de espaciamiento entre el conductor y la torre se pueden analizar por la naturaleza del flameo inverso y el efecto del viento en la cadena de aisladores. Los voltajes más severos se desarrollan a través de la cadena de aisladores y espaciamientos de aire únicamente en las dos torres más cercanas al punto de impacto de la descarga. [15]

El viento es un fenómeno que está presente en las tormentas, sin embargo, desde un punto de vista probabilístico, la probabilidad de que se presente un viento lo suficientemente fuerte para causar un ángulo significativo en cadenas con movimiento libre en las dos torres cercanas, al mismo tiempo de impacto de la descarga, es muy baja. Entonces los espaciamientos ideales para descargas atmosféricas no son sensibles a los ángulos debido al viento. [15]

Esto lleva a una geometría en donde todas las superficies de la torre son cercanamente equidistantes al conductor.

2.8 RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

La resistencia de pie de torre se expresa usualmente como el valor medido a 60 Hz, sin embargo, el comportamiento de la línea frente a descargas atmosféricas depende del valor de impulso de la resistencia de pie de torre.

El valor de impulso de la resistencia depende de factores como la resistividad del suelo, ρ , gradiente de ionización del suelo, E_o , magnitud de la corriente de impulso y de la longitud y tipo de puesta a tierra o contrapesos.

Para resistencias de puesta a tierra en el orden de 10 ohmios o menos, la resistencia de impulso es ligeramente menor que el valor a 60 Hz, sin embargo, para altas resistencias de puesta a tierra la resistencia de impulso es considerablemente menor que la del valor de 60 Hz.

La resistencia de pie de torre se representará mediante una resistencia R_i no lineal cuyo valor variará de acuerdo con la magnitud de la corriente de descarga I_R .

$$I_g = \frac{E_o \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot R_o^2} \quad (2.36)$$

$$R_i = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}} \quad (2.37)$$

R_o es la resistencia de pie de torre medida a baja corriente

I_R corriente de la descarga a través de la resistencia

I_g corriente limitadora para iniciar suficiente ionización del suelo

ρ resistividad del suelo [Ωm]

E_o es el gradiente de ionización del suelo [kV/m]

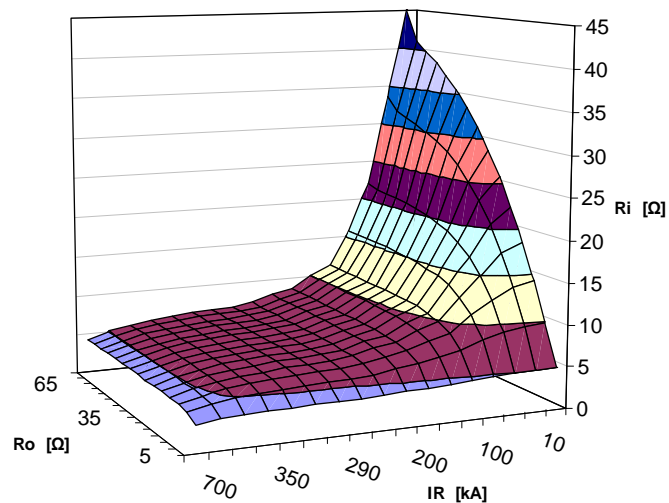


Figura 2.25 Resistencia de impulso, con E_0 de 400 kV/m y ρ de 200 Ωm

La forma de onda del voltaje en la punta de la torre para una descarga en la torre de 40 kA y 1.2 μs , modelada por multipiso, es la mostrada en la figura 2.26 con valores de resistencia 1, 10, 20, 50 y 100 Ω .

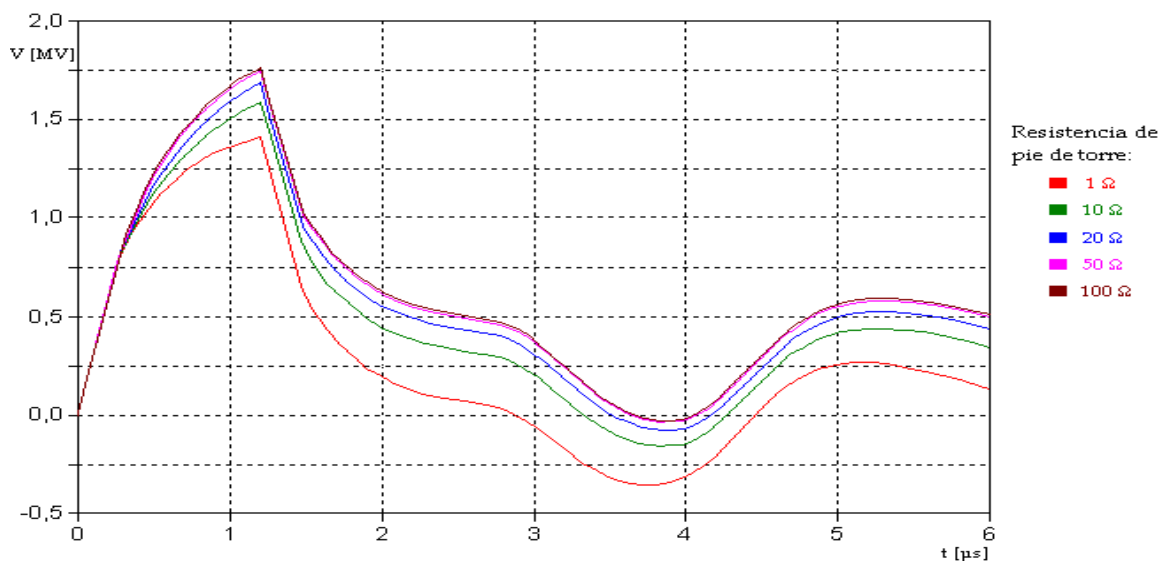


Figura 2.26 Voltaje en la torre típica SL2 para distintos valores de resistencia de pie de torre

2.9 MÉTODO MONTECARLO PARA SIMULACIÓN DE FENÓMENOS FÍSICOS

El método de Montecarlo es un procedimiento numérico iterativo que utiliza en cada nuevo cálculo un conjunto de valores distintos que varían según la

distribución de probabilidad asociada a cada una de las variables involucradas en el proceso. [2]

La principal dificultad en la modelación del comportamiento de una línea de transmisión es la genuina variabilidad de los parámetros principales involucrados. En el método Montecarlo se acomodan estas variabilidades mediante la acumulación de los resultados de simulaciones computacionales realizadas con valores aleatorios de los parámetros.

El método de Montecarlo permite resolver una gran cantidad de problemas ya sean de tipo estocástico o determinístico, aunque su aplicación práctica no fue posible sino hasta la aparición de computadores. Actualmente se emplea este método en disciplinas como la ingeniería, investigación de operaciones o la química.

El método Montecarlo se basa en los siguientes principios:

- Se conoce el modelo matemático del sistema a estudiar. El sistema puede tener un comportamiento enteramente aleatorio y algunos de sus parámetros presentarse con alguna incertidumbre.
- Se conocen las variables de entrada, para las que se asumirá una función de densidad de probabilidad en caso de que presenten una naturaleza aleatoria.
- Se dispone de un procedimiento para la generación de números aleatorios y calcular los valores de las variables de entrada.
- Se dispone de un procedimiento para analizar las variables de salida y obtener su distribución estadística.

La principal desventaja del método está en la cantidad de parámetros y variables de naturaleza aleatoria que se deben manejar para obtener un mejor resultado. Los resultados se ven afectados por incertidumbres estadísticas. Estas incertidumbres se pueden reducir aumentando el número de eventos, y por tanto el tiempo de cálculo. El error obtenido mediante el método de Montecarlo decrece según $1/n^2$, siendo n el número de iteraciones realizadas. En la figura 2.27 se puede comprobar este argumento. En el eje de las ordenadas se representa la desviación entre los resultados referentes al número de impactos en el hilo de guarda con respecto al número de iteraciones. Si, por ejemplo, el valor real de el porcentaje de impactos en el hilo de guarda del muestreo es 60%, entre distintas

iteraciones, se obtiene un valor mayor, menor o igual al anterior, es decir, se obtiene por ejemplo: 65 la primera vez, 58 la segunda, 63 la tercera, etcétera, es decir, cualquier valor alrededor de 60%. Entre mayor sea el número de iteraciones, menor será la distorsión entre los resultados. Es de esperarse entonces que para un número bajo de iteraciones se obtengan resultados como: 76, 32, 90, 65, etcétera. Para este estudio en particular, se puede afirmar que la curva se estabiliza alrededor de las 15000 iteraciones, es decir, no existirá un error significativo entre los resultados obtenidos de realizar 15000 y 30000 iteraciones, pero sí entre realizar 100 y 15000.

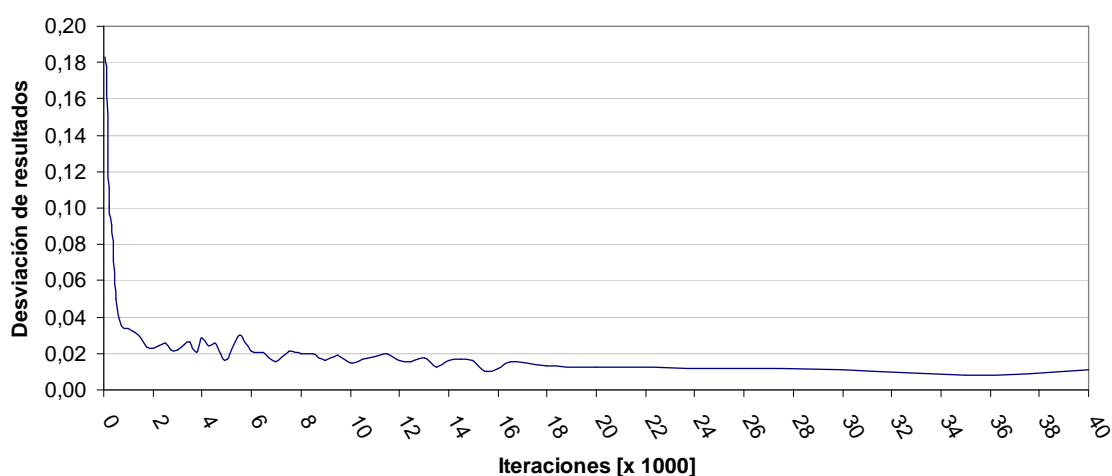


Figura 2.27 Desviación de resultados para número de impactos en el hilo de guarda

Los cálculos a realizar en cada simulación serán:

- Obtener los parámetros de las descargas atmosféricas de naturaleza aleatoria.
- Determinar el punto de impacto final a partir de las coordenadas de la descarga vertical y el modelo electrogeométrico.
- Calcular el voltaje producido en la cadena de aisladores.
- Calcular de la tasa de contorneos.

2.9.1 PUNTO DE ESTIMACIÓN VERSUS MÉTODO MONTECARLO

En predicciones tradicionales, los datos de entrada son puntos de estimación únicos, los cuales se ingresan a un modelo en el que se relacionan matemáticamente los datos de entrada para producir una salida. Cuando las entradas son puntos de estimación, la salida es también un valor único. Mediante

este procedimiento, es necesario que todas las entradas sean exactamente correctas para dar mayor validez al resultado. Se puede realizar una estimación acertada para muchos datos de entrada de predicciones, pero, ya que suceden en el futuro, los valores reales de los datos de entrada no se conocen con certeza.

Para determinar completamente las oportunidades que están siendo previstas se debe colocar las entradas en una forma realista, incluyendo la incertidumbre que ciertos valores pueden tomar. Esto se lo consigue reemplazando los puntos de estimación por distribuciones de probabilidad que cumplan con el rango de valores que la variable puede tomar.

Estas distribuciones se aplican al mismo modelo matemático y debido a que los datos de entrada están definidos de forma estadística, los resultados revelan información que no se la podría conseguir mediante una predicción tradicional.

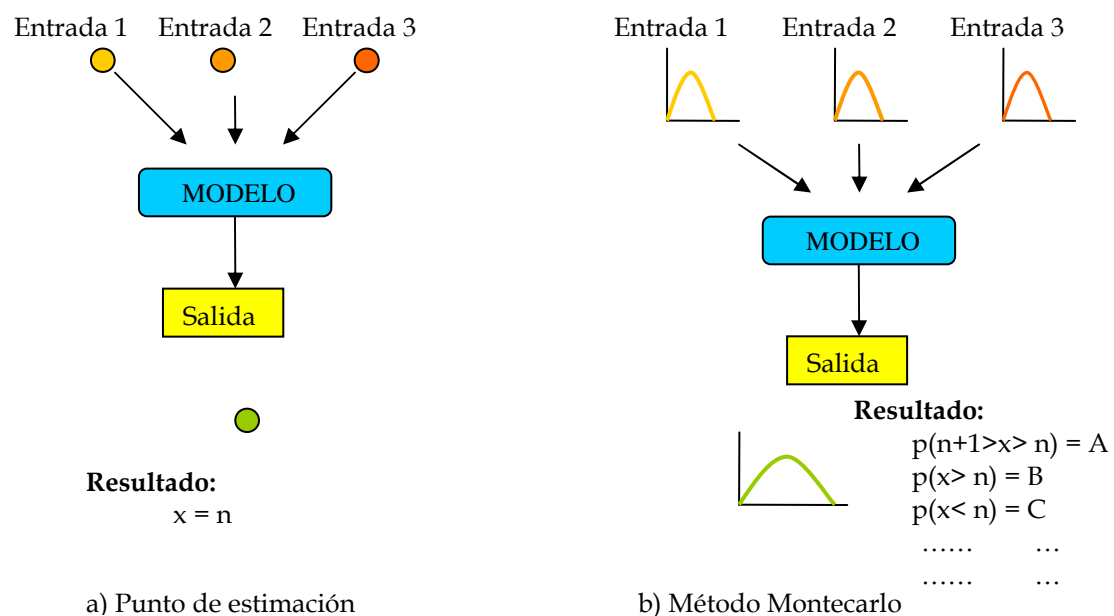


Figura 2.28 Punto de estimación vs. Montecarlo

2.10 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

2.10.1 DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA (GFD)

Es el número de impactos de descargas atmosféricas a tierra por unidad de área por unidad de tiempo en un lugar en particular. Se representa en descargas a tierra por km^2 y año.

Con mapas detallados promediados en un período de tiempo suficiente, un diseñador podría seleccionar la ruta más apropiada para una línea de transmisión con la mínima exposición a descargas atmosféricas, pero esto conlleva a un análisis económico y a la variación antes mencionada, aunque es deseable un mínimo de 5 a 10 años de observaciones del GFD.

Si no se dispone de un valor medido de N_g (GFD), se lo puede estimar utilizando:

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25} \quad (2.38)$$

en donde:

T_d es el número de días de tormenta al año (nivel ceraúnico)

En [11] se recomienda usar para Colombia la siguiente expresión, la cual será considerada por su cercanía al Ecuador.

$$N_g = 0.0017 \cdot T_d^{1.56} \quad (2.39)$$

CAPÍTULO III

SIMULACIONES

3.1 MAGNITUDES DE LOS PARÁMETROS

3.1.1 GENERACIÓN DE NÚMEROS ALEATORIOS

Un valor aleatorio verdadero es generado por un proceso físico como el lanzamiento de un dado, moneda, o el conteo de partículas emitidas por el decaimiento de un elemento radiactivo.

Los números pseudo aleatorios son generados por funciones de software. Se los conoce como “pseudo aleatorios” porque la secuencia de números es determinística. Dada una función particular y un valor “semilla”, la función generará la misma secuencia de números.

La repetibilidad de una secuencia de números pseudo aleatorios puede ser muy útil para depuraciones, ya que el programa calculará el mismo resultado cada vez que sea ejecutado (lo que no sucedería si se utilizara un generador de números aleatorios verdadero). Sin embargo, en estudios con el método Montecarlo se requiere realizar varias simulaciones y el error se reduce a medida que se aumente el número de las mismas. Si el número de simulaciones es mucho mayor al valor a la longitud de la secuencia (j), los resultados se repetirán y el valor del error será el de haber realizado únicamente j simulaciones.

En el presente trabajo se generan los valores de las variables aleatorias con el programa computacional MATLAB. Estos valores vienen dados por sus respectivas distribuciones de probabilidad. Es válido mencionar que una noción de aleatoriedad es formalizada por el teorema central del límite, el cual establece que el promedio de una muestra de un proceso aleatorio siempre se aproxima a una distribución normal.

En MATLAB, los generadores de números aleatorios (RNGs) terminan en “rnd”. Cada RNG representa una familia paramétrica de distribuciones. La función “rand” de MATLAB soporta un método de generación de números aleatorios llamado Mersenne Twister. El algoritmo utilizado por este método genera valores de

precisión doble en un intervalo cerrado $[2^{(-53)}, 1-2^{(-53)}]$, con un periodo de $(2^{19937}-1)/2$.

La semilla para los números pseudo aleatorios se la obtiene del reloj de la computadora, por lo que difícilmente será la misma si se realizan dos simulaciones distintas consecutivas.

3.1.2 VARIABLES ALEATORIAS

En la tabla 3.1 se muestran las distribuciones de probabilidad asumidas para cada valor aleatorio involucrado en el estudio. Se puede analizar brevemente su relación con la realidad, por ejemplo, las distribuciones uniformes tienen la misma probabilidad de suceder, por lo tanto es una función apropiada para representar el ángulo de fase, ya que la descarga atmosférica puede impactar en cualquier instante. Las magnitudes se indican en los apartados siguientes. Los valores de las variables de la descarga atmosférica fueron obtenidos de [17] y [2], al no tener a disposición estadísticas reales en el país de los parámetros de descargas atmosféricas.

Variable aleatoria	Tipo de distribución
Intensidad de cresta del rayo	Logarítmico normal
Tiempo de frente	Logarítmico normal
Tiempo a valor medio	Logarítmico normal
Resistencia de puesta a tierra	Logarítmico normal
Ubicación de la descarga	Uniforme
Ángulo de fase	Uniforme
Voltaje de contorno del aislamiento	Weibull

Tabla 3.1 Distribuciones estadísticas de las variables

El rayo se representa mediante una fuente de corriente de doble rampa, cuyos parámetros se calculan de forma aleatoria siguiendo las leyes estadísticas que se adaptan a cada uno.

3.1.2.1 Intensidad de cresta del rayo

Para descargas atmosféricas de polaridad positiva y negativa se tienen los valores indicados en la tabla 3.2, con los cuales se han realizado los cálculos.

Parámetro	Positiva	Negativa
Valor medio de la corriente de cresta [kA]	40	34
Desviación de la corriente de cresta [kA]	0.98	0.74
Valor medio del tiempo de cresta [μ s]	2	
Desviación del tiempo de cresta [μ s]	0.494	
Valor medio del tiempo a valor medio [μ s]	77.5	
Desviación del tiempo a valor medio [μ s]	0.577	

Tabla 3.2 Parámetros de la corriente de descarga

3.1.2.2 Resistencia de puesta a tierra

Mediante los datos proporcionados por CELEC EP-TRANSELECTRIC, para la línea de transmisión Santa Rosa – Totoras, se determinó que los valores de la resistencia a baja frecuencia se ajustan a una distribución logarítmica normal de valor medio 9.1 Ω y varianza 44.7. En la figura 3.1 se muestra la curva de ajuste y los datos de mediciones de resistencia.

Sin embargo, obedeciendo fielmente a esta distribución, se obtienen valores de resistencia altos con mayor frecuencia que lo que ocurre en la realidad, ya que como parte del mantenimiento se realizan mediciones y correcciones de los valores de resistencia que lo ameriten, manteniendo como valor máximo por norma un valor de 10 ohmios.

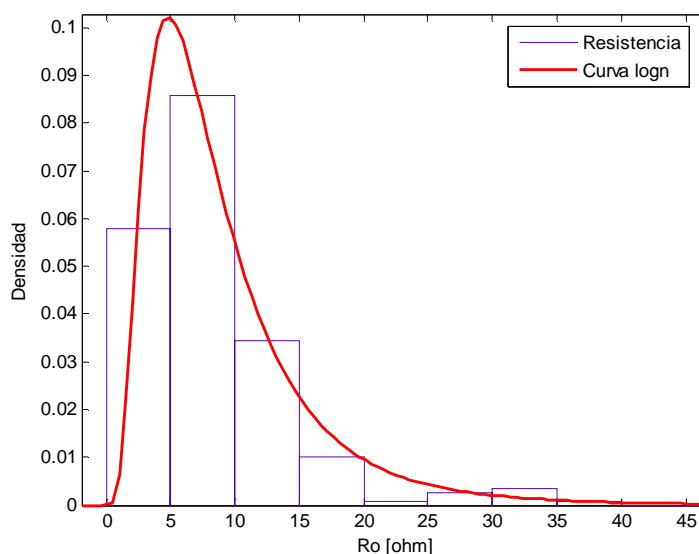


Figura 3.1 Distribución de las resistencias de puesta a tierra de la LTSRT

3.1.2.3 Ubicación de la descarga

La ubicación del canal vertical se obtiene de acuerdo con una función de probabilidad con distribución uniforme. Es decir, cualquier punto del área en la que está tendida la línea tiene la misma probabilidad. El punto de impacto se determinará mediante el modelo electrogeométrico y la localización del canal vertical. El valor máximo en el eje vertical ha sido escogido mediante el modelo electrogeométrico para un valor máximo de corriente común de 350 kA.

Es importante determinar la ubicación del impacto de una descarga atmosférica, ya sea en el conductor de fase, hilo de guarda o tierra, ya que de este punto dependerá la magnitud del sobrevoltaje. La línea de transmisión Santa Rosa – Totoras posee dos hilos de guarda de distintas características, como se mencionó anteriormente, por lo que también se hace una discriminación entre el impacto a cada uno de ellos.

3.1.2.4 Ángulo de fase a frecuencia de operación

El sobrevoltaje máximo que se origina en una línea aérea por descargas atmosféricas depende no solo del sobrevoltaje originado por la corriente del rayo sino también de la tensión de operación en el momento de producirse el impacto.

El valor de la tensión en cada fase se calcula de forma aleatoria con una distribución uniforme del ángulo de fase entre 0 y 360°.

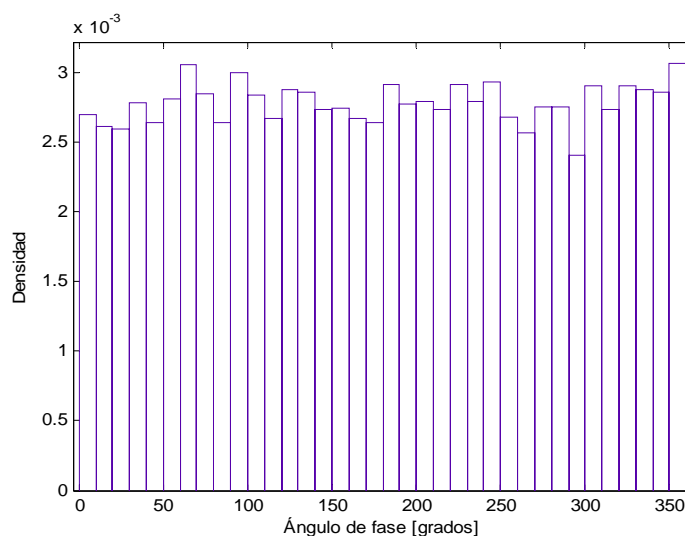


Figura 3.2 Distribución del ángulo de fase a frecuencia de operación

3.1.2.5 Voltaje de contorno del aislamiento

El contorno en la línea se evaluará mediante un Model. Un Model es una descripción de un modelo escrita en lenguaje MODELS para interactuar con ATP. Se compara los voltajes entre cualquiera de las fases y tierra, con la tensión crítica de contorno. En caso de que este valor sea sobrepasado se registra un contorno. El valor de la tensión crítica de contorno es aleatorio. En la tabla 3.3 se muestran los valores medios y la desviación.

Parámetro	Positiva	Negativa
Tensión crítica de contorno [kV]	1245.41	1271.6
Desviación de tensión crítica de contorno [%]	3	5

Tabla 3.3 Parámetros de la cadena de aisladores

3.2 IMPLEMENTACIÓN EN ATP

El programa ATPDraw permite realizar un diagrama de la red eléctrica a ser analizada, para posteriormente interactuar con ATP. Para analizar los efectos del

impacto de descargas atmosféricas en la línea de transmisión y el flameo inverso se utilizan tres MODELS descritos a continuación:

Modelo electrogeométrico que controla los interruptores y determina el punto de impacto según la magnitud de la descarga y la posición del canal vertical.

Resistencia de pie de torre, representa la resistencia no lineal para fenómenos de descargas atmosféricas en los que se involucra la ionización del suelo.

Cadena de aisladores, que va a medir el sobrevoltaje máximo producido en la cadena de aisladores y determina si se produjo o no contorno.

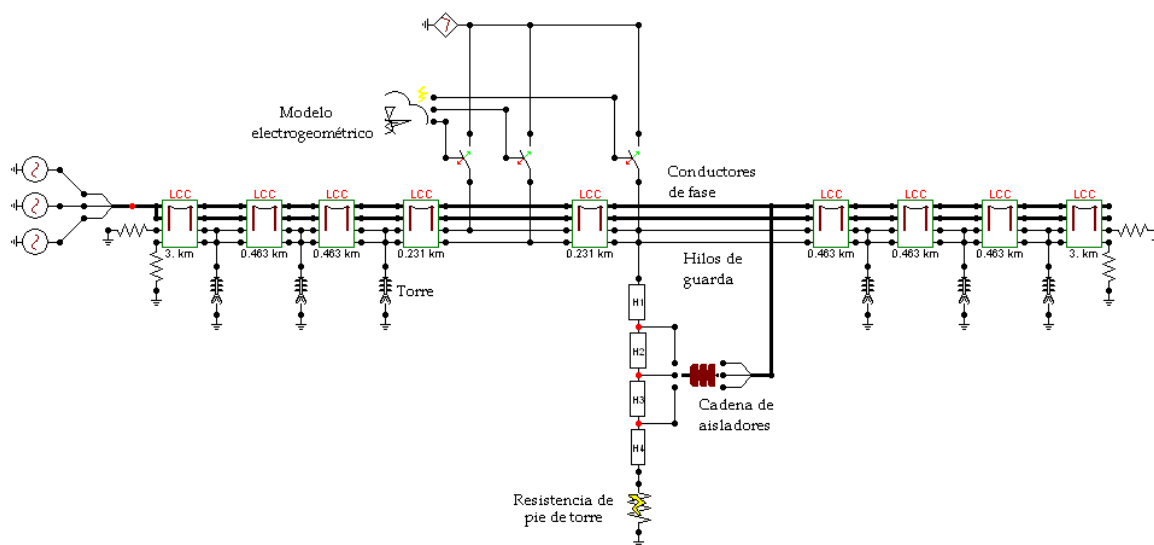


Figura 3.3 Esquema en ATPdraw

3.3 MÉTODOS DE CÁLCULO BASADOS EN MONTECARLO

El método de Montecarlo se trata de un procedimiento numérico que se repite utilizando en cada nuevo cálculo un conjunto de valores distinto, el cual varía en función a una distribución de probabilidad asociada a cada una de las variables involucradas.

El número de iteraciones realizadas determina la autenticidad de los resultados. A mayor número de iteraciones se obtendrá un menor error en los resultados como se mencionó anteriormente, sin embargo, existe un punto de convergencia en el que el mayor número de iteraciones no otorga una mejoría significativa en la disminución del error. En la figura 3.4 se puede observar que el porcentaje de impactos en el hilo de guarda se estabiliza en un valor alrededor de 15000

iteraciones. Esto significa que para obtener resultados lo suficientemente aceptables, sin tener que realizar un número significativo de iteraciones, se puede escoger un valor cercano a 15000.

En este análisis en particular es importante conocer el número de impactos en el hilo de guarda, ya que este es el primer paso para que se produzca un contorno por flameo inverso.

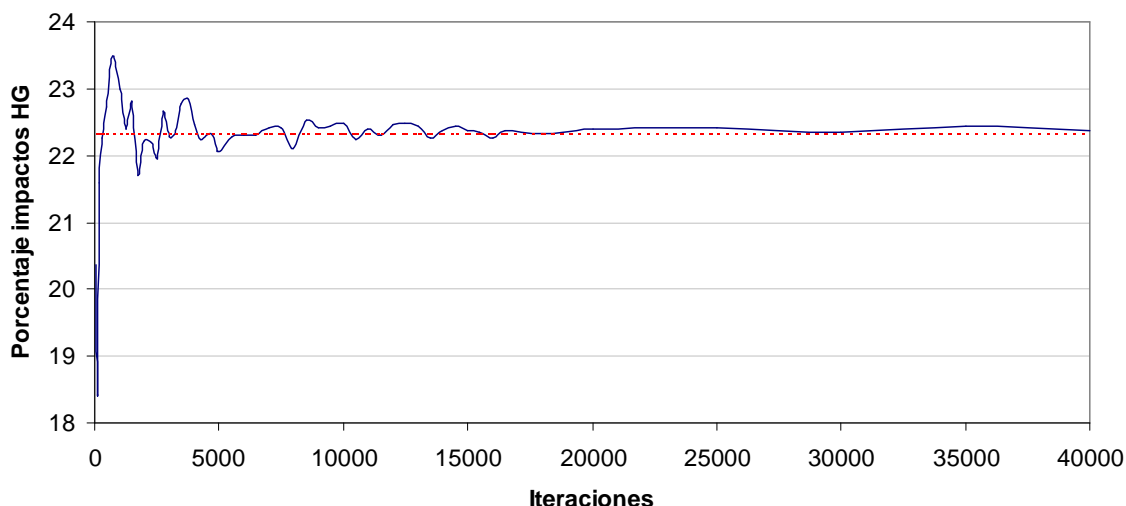


Figura 3.4 Porcentaje de impactos en hilo de guarda en función del número de iteraciones del modelo de la LTSRT

3.3.1 BASADO EN LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE SOBREVOLTAJES

Se obtiene la función de probabilidad de los sobrevoltajes. A partir de esta información y de la función de probabilidad acumulada de la tensión soportada (nivel de aislamiento) de la línea se puede deducir el riesgo de falla o la tasa de contorneos mediante la expresión [2]:

$$N = \int_0^{\infty} f(V)P(V)dV \quad (3.1)$$

Siendo $f(V)$ la función de densidad de probabilidad de los sobrevoltajes y $P(V)$ la función de probabilidad acumulada de la rigidez dieléctrica de la línea. [2]

La tasa de salida se obtiene mediante:

$$Ts = N \cdot N_g \cdot w \cdot l \quad (3.2)$$

3.3.2 BASADO EN EL COMPORTAMIENTO ALEATORIO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LA LÍNEA

Se determina si se produce contorneo para cada una de las descargas generadas aleatoriamente, este paso se debe realizar teniendo en cuenta el comportamiento aleatorio de la rigidez dieléctrica de la línea aérea.

$$T_s = \frac{N_d}{N_c} \cdot N_g \cdot w \cdot l \quad (3.3)$$

en donde: N_d es el número de descargas que produjeron contorneos

N_c es el número de casos

N_g es la densidad de descargas a tierra

w es el ancho de la zona de estudio

l es la longitud de la línea

3.3.3 PROCESO DE CÁLCULO

A continuación se presenta el esquema del proceso de cálculo.

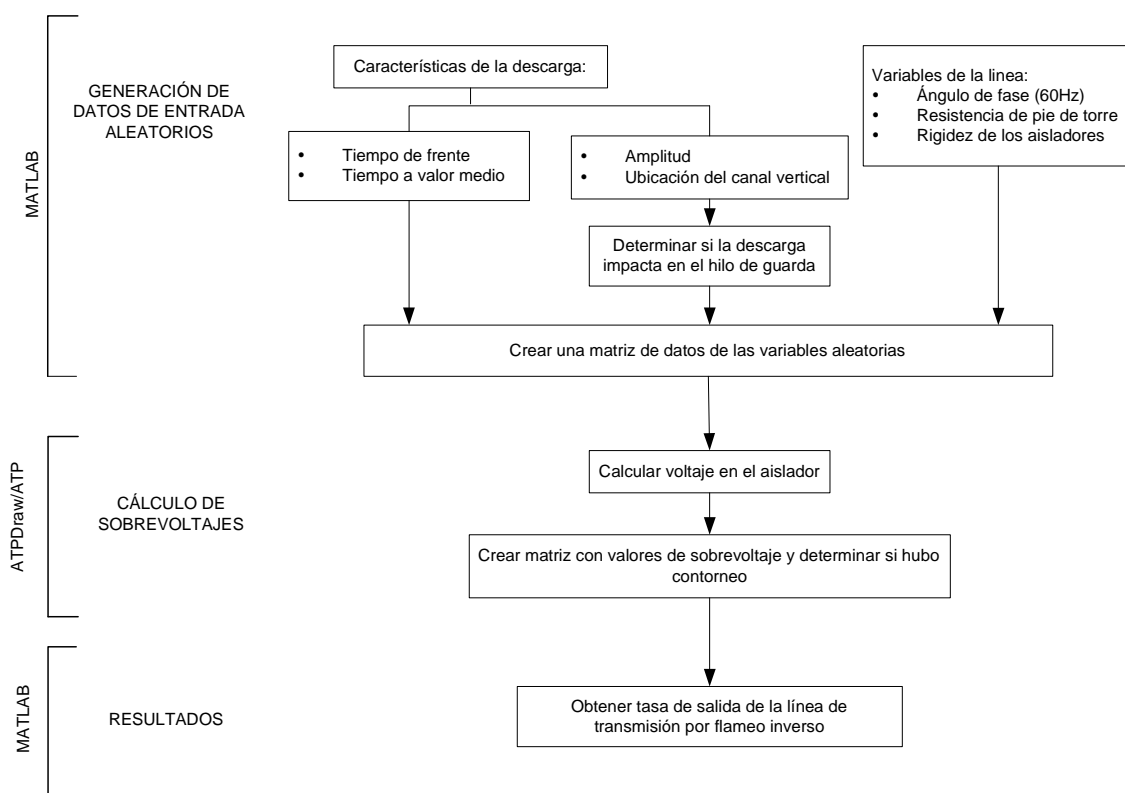


Figura 3.5 Diagrama general del proceso de cálculo

Es menester recordar una definición de flameo inverso. El flameo inverso es un contorno en el aislamiento resultante del impacto de una descarga a una parte de la red eléctrica que está normalmente al mismo potencial que tierra. Por lo tanto, mediante la modelación del modelo electrogeométrico en MATLAB, se puede identificar las descargas que impactarán en tierra y eliminarlas, conservando únicamente las descargas que impactarán en el hilo de guarda, reduciendo considerablemente el tiempo de simulación necesario.

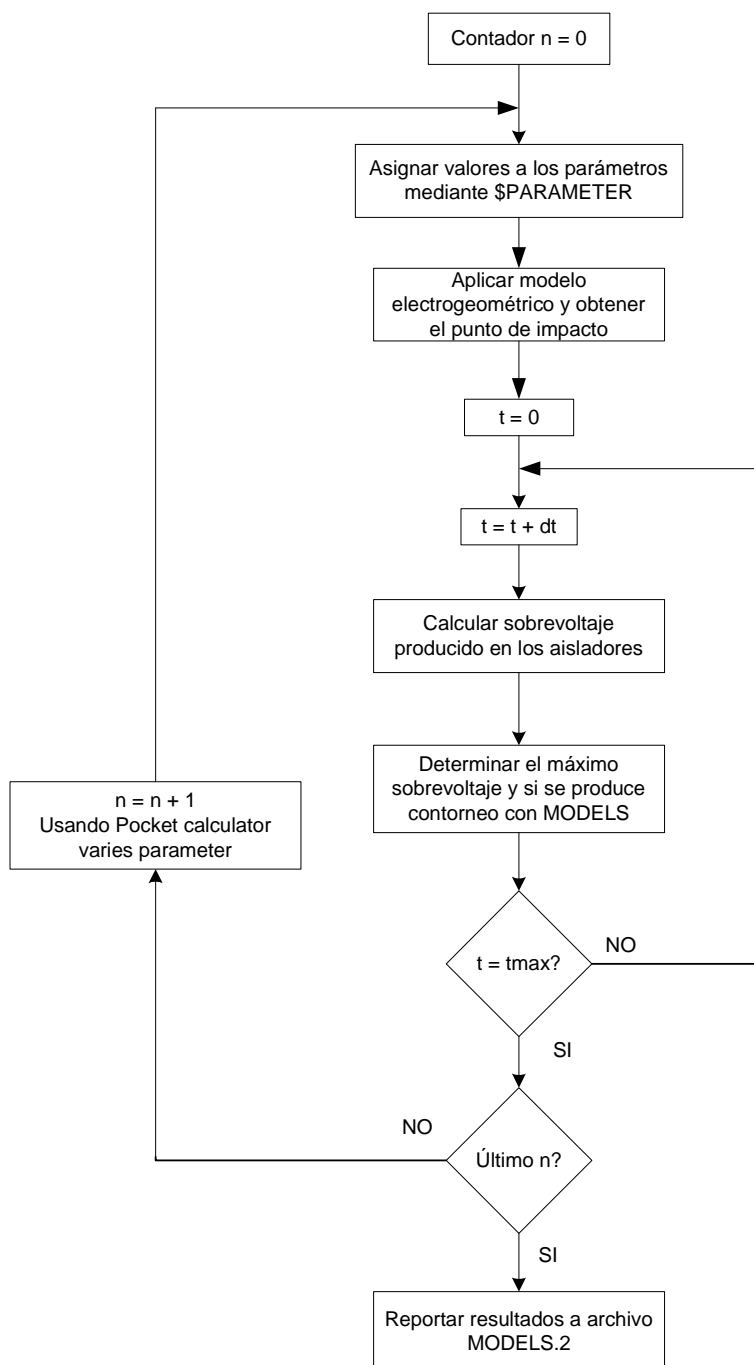


Figura 3.6 Diagrama de secuencias en ATP

3.4 RESULTADOS DE CÁLCULO CON EL MÉTODO MONTECARLO

En la figura 3.7 se muestra la densidad de la magnitud de los sobrevoltajes producidos por impactos en la zona de apantallamiento. La mayoría de los mismos se encuentra por debajo del valor medio de la tensión crítica de contorno.

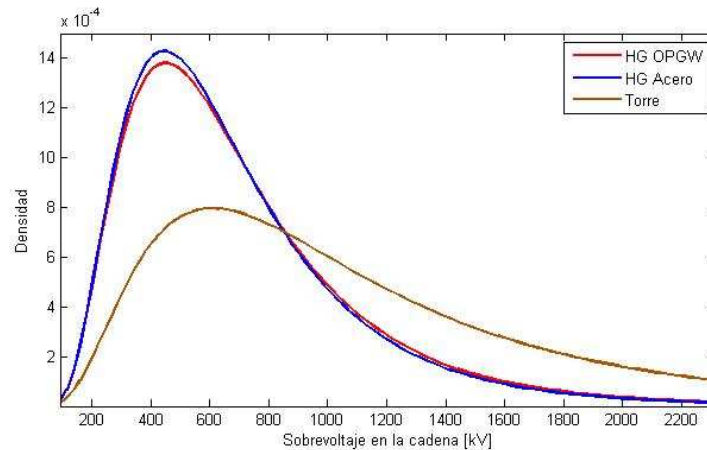


Figura 3.7 Impactos en la zona de apantallamiento

En la figura 3.8 se puede apreciar que los impactos en la torre producirán voltajes de mayor magnitud con más frecuencia que aquellos en los vanos. Estos voltajes en su mayoría darán efecto a un contorno.

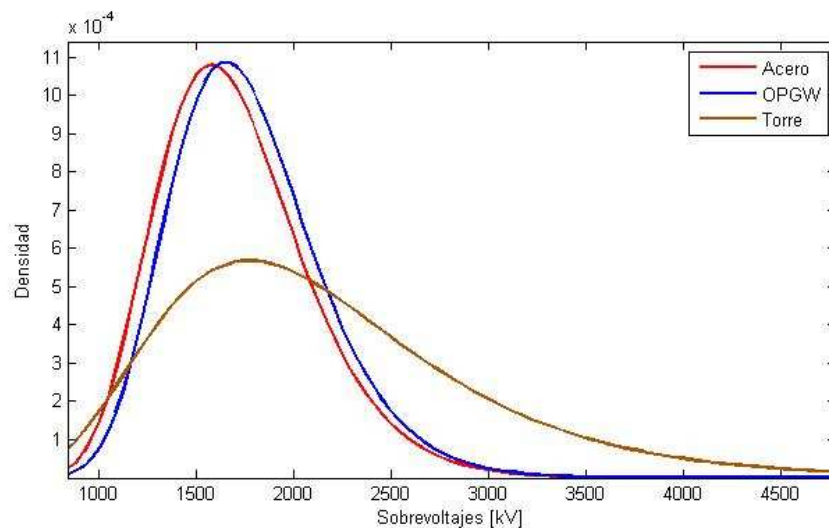


Figura 3.8 Impactos en la zona de apantallamiento que produjeron contorneos

3.4.1 BASADO EN EL COMPORTAMIENTO ALEATORIO DE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE LA LÍNEA

Polaridad	Contorneos	Impactos a hilo de guarda
Positiva	1104	3258
Negativa	636	3081

Tabla 3.4 Resultados de simulaciones

La longitud de la línea de transmisión Santa Rosa – Totoras es 109.8 km y el ancho de la zona de estudio es 0.8 km. El valor del ancho de la zona de estudio se obtiene mediante el modelo electrogeométrico, para una corriente de 350 kA. Se estudiaron 14000 casos. Haciendo uso de la ecuación (3.3) se obtiene:

$$T_{s-} = 2.8384 \text{ contorneos/l/año}$$

$$T_{s+} = 4.9271 \text{ contorneos/l/año}$$

En donde l es la longitud de la línea, 109.8 km.

3.4.2 BASADO EN LA FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE SOBREVOLTAJES

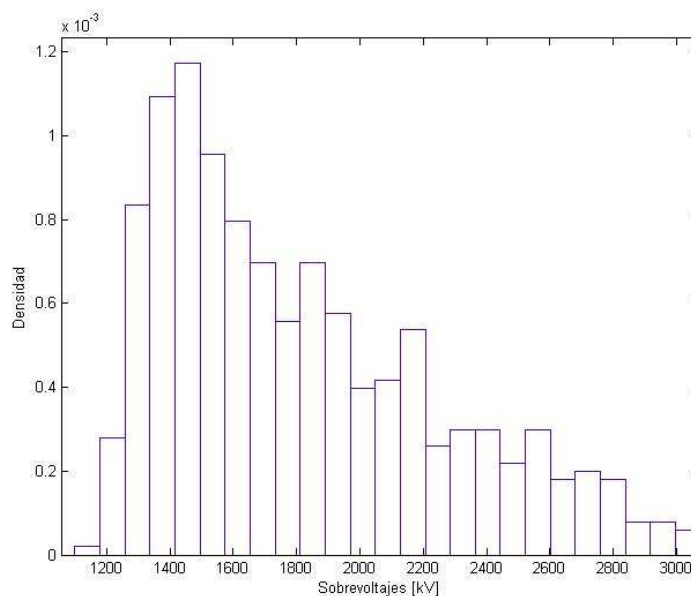


Figura 3.9 Distribución de sobrevoltajes en la cadena de aisladores por impacto en hilo de guarda

La curva de ajuste de esta distribución se la encuentra mediante la herramienta Distribution Fitting Tool de MATLAB. Obteniéndose los siguientes resultados:

	Normal	Std. error	Log normal	Std. error
Valor medio	936.96	13.66	6.61643	0.01161
σ	758.58	9.67	0.644697	0.0082

Tabla 3.5 Curvas de ajuste para sobrevoltajes

Los resultados en la tabla 3.5 indican que existe un mejor ajuste para una distribución logarítmico normal. Para descargas de polaridad negativa se obtienen las curvas de la figura 3.10.

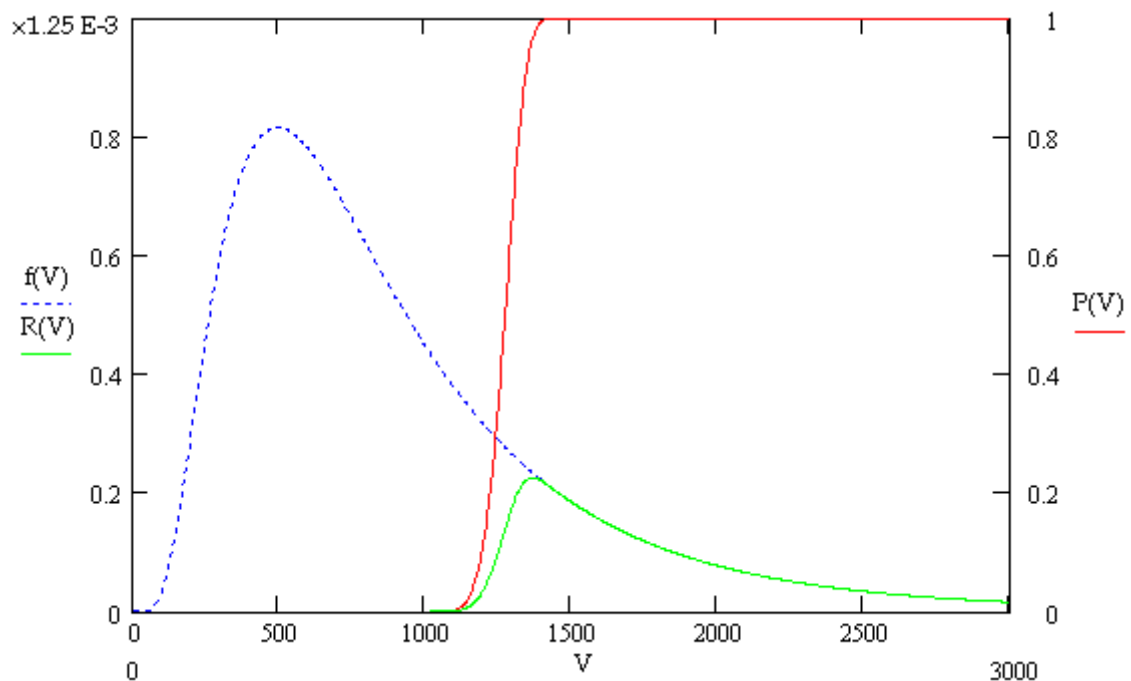


Figura 3.10 Cálculo del riesgo de fallo para descargas de polaridad negativa

Aplicando la ecuación (3.2) se obtiene:

$$T_{s-} = 2.845099 \text{ contorneos/l/año}$$

$$T_{s+} = 5.12271 \text{ contorneos/l/año}$$

Los resultados obtenidos mediante este método son similares, pero en comparación con el método descrito anteriormente, éste último es menos riguroso.

3.5 RESULTADOS EN FLASH

El programa FLASH fue desarrollado para probar e implementar los métodos IEEE. Utiliza modelos de la guía de diseño junto a una descripción de las funciones de una línea de transmisión para estimar la tasa de salida esperada de la línea. Estos modelos simplificados pueden además ser adaptados para evaluar los beneficios de nuevos métodos para mejorar el comportamiento de una línea. [8] Se incluyó en este trabajo un cálculo del comportamiento de la línea mediante el programa FLASH para ilustrar las diferencias entre utilizar un método basado en Montecarlo y un método de punto de estimación.

A continuación se indica las características del programa en el cálculo del comportamiento de una línea de transmisión utilizando la Versión 1.9 de Mayo del 2007 de FLASH.

El entorno de trabajo es amigable, ya que los datos se ingresan y se obtienen en una hoja de Microsoft Excel. Se deben ingresar como datos el GFD y la longitud del vano. Los datos de los conductores se los realiza por circuitos, indicando las coordenadas de los conductores en la torre y la distancia del aislamiento.

Se evaluó la tasa de salida por flameo inverso con los distintos modelos de torre disponibles en FLASH, excepto "H frame" y se obtuvo un resultado similar en las salidas por flameo inverso. En la bibliografía [3] se realiza un análisis del comportamiento del modelo cónico frente al modelo multipiso para una torre de silueta similar a la utilizada en este trabajo. Como resultado se concluye que el modelo multipiso produce sobrevoltajes mayores. Además, los modelos de línea simple sin pérdidas deben ser aplicados en torres menores a 30 metros.

En FLASH se requiere introducir las coordenadas del hilo de guarda y el diámetro y flecha de los mismos, asumiendo que ambos son del mismo tipo.

Mediante las simulaciones realizadas en este trabajo se ha determinado que la diferencia entre sobrevoltajes producidos por impacto en dos tipos de hilo de guarda diferentes no es significativa.

El valor de la resistencia de pie de torre se lo puede realizar introduciendo el porcentaje de cada valor de resistencia. El cálculo de la tasa de salida por flameo inverso se lo realiza para cada valor de resistencia introducido en los datos. Esto puede asemejarse a un estudio aleatorio del valor de resistencia.

El ángulo de apantallamiento calculado por el programa es función de la longitud del vano.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla para un nivel ceraúnico de 10 días de tormenta por año.

Tasas de contorneo	Modelo de torre		
	Cónica	Cilindro	Cintura
Flameo inverso [contorneo/100 km/año]	0,26	0,23	0,23
Falla de apantallamiento [contorneo /100 km/año]	0,06	0,06	0,06
Total [contorneo /100 km/año]	0,33	0,30	0,30
Ángulo de apantallamiento [°]	Actual	17.52	
	Requerido	-16.69	

Tabla 3.6 Resultados en FLASH

Para comparar los resultados obtenidos entre dos métodos, se debe primero considerar que no existe ningún método que sea más exacto que la precisión de sus datos de entrada. Si bien un método de estimación por punto permite obtener un resultado rápido, el realizar un análisis por un método estadístico permite adaptar mejor las características de la línea en estudio y obtener una mayor similitud con la naturaleza del fenómeno. Como ventajas de un método estadístico se puede destacar la mayor cantidad de información que se puede recopilar a través del proceso, aunque a un costo de tiempo de cálculo mayor.

La información, conseguida a través de los organismos encargados de la operación y el mantenimiento del sistema nacional de transmisión del país, para establecer el valor histórico real de salidas por descargas atmosféricas de la línea es insuficiente y por lo tanto no se ha podido establecer un valor confiable del mismo.

Cómo se mencionó anteriormente, a través del método Montecarlo, se ha intentado modelar los distintos parámetros involucrados en el fenómeno de descargas atmosféricas, intentando un mejor ajuste a la realidad metereológica,

geográfica y eléctrica del país. Por otro lado, el programa FLASH está diseñado para aplicar los métodos de cálculo del comportamiento de líneas de transmisión de la IEEE, los cuales no son objeto de análisis en este trabajo.

En la tabla 3.7 se muestran los resultados obtenidos mediante los distintos métodos y el valor del que se dispone de la realidad. Se ha incluido la expresión recomendada para el cálculo de la densidad de descargas a tierra de Colombia.

	Métodos de cálculo					
	Montecarlo				FLASH	Real*
	M $t_f = 3\text{us}$		M $t_f = 2\text{us}$			
Tasa de contorneo	(2.38)	(2.39)	(2.38)	(2.39)		
Flameo inverso [contorneo/109.8 km/año]	1.54	0.13	2.83	0.24	0.25	0.71

*Este valor corresponde al total de las fallas por descargas atmosféricas directas y por flameo inverso para solamente 7 años.

Tabla 3.7 Resultados de contorneos entre los distintos métodos

Debido a la falta de información de las descargas atmosféricas en el Ecuador y un registro estadístico más extenso de las fallas en las líneas de transmisión, se ha dificultado el poder comparar los resultados obtenidos con los de la realidad, ya que no se dispone de un periodo de recopilación de datos extenso que de una mayor validez al valor determinado.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE LA DESCARGA INFLUYENTES EN LA TASA DE SALIDA

Un análisis paramétrico o de sensibilidad permite averiguar fácilmente como influyen los distintos parámetros, averiguar cuáles son los que más influencia van a tener en los valores máximos de los sobrevoltajes, y por ende el número de contorneos y para que rango de valores puede ser necesario tomar alguna medida preventiva. Los parámetros que se analizan son la resistencia de puesta a tierra, el tiempo de frente y el valor medio de la corriente de cresta.

El estudio paramétrico se lo ha realizado para 14000 casos.

4.1 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Tanto el voltaje en la torre de impacto como entre los terminales de los aisladores aumenta con la resistencia de puesta a tierra ya que la relación entre tensión máxima e intensidad máxima es casi lineal.

	Resistencia puesta a tierra [Ω]	Contorneos inversos	Impactos	
			Hilo de guarda	Tierra y fase
Positiva	5	1056	3282	10718
	30	1347	3282	10718
	100	1409	3282	10718
Negativa	5	605	3163	10837
	30	884	3163	10837
	100	971	3163	10837

MI(+) = 40 kA MI(-) = 34 kA Mtf = 2 μ s

Tabla 4.1 Influencia de la resistencia de pie de torre en el número de contorneos

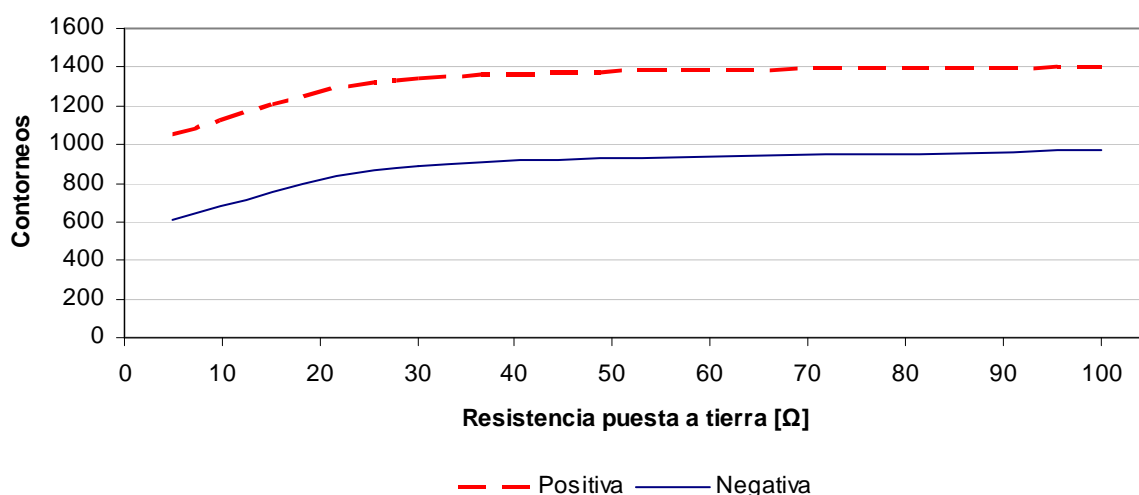


Figura 4.1 Influencia de la resistencia de pie de torre en el número de contorneos

En la figura 4.1 se confirma una premisa realizada en la figura 2.26, acerca de la magnitud del voltaje producido en la torre debido a una descarga atmosférica para una resistencia de pie de torre de 50 y 100 Ω , la magnitud y forma de onda del mismo no diferían considerablemente. Entonces, existe un valor de resistencia a partir del cual no existen cambios significativos en el número de contorneos, sin embargo, este valor es demasiado alto para una resistencia de pie de torre de por sí y un mantenimiento de la línea evitaría que se presente.

4.2 CORRIENTE DE CRESTA

	Corriente pico Media [kA]	Contorneos inversos	Impactos	
			Hilo de guarda	Tierra y fase
Positiva	25	473	2486	11514
	40	1104	3258	10742
	50	1563	3809	10191
Negativa	25	280	2565	11435
	34	636	3081	10919
	50	1410	3919	10081

$MR_o = 9.15 \Omega$ $Mt_f = 2 \mu s$

Tabla 4.2 Influencia de la corriente de cresta en el número de contorneos

La influencia del valor de la corriente de cresta de la descarga es fácil de prever, ya que el modelo utilizado para representar la línea es lineal y por lo tanto existirá

una relación lineal entre el valor máximo de la corriente y el valor máximo de las sobrevoltajes originados, aunque debe considerarse que también está involucrada la resistencia de impulso, la cual tiene un comportamiento no lineal.

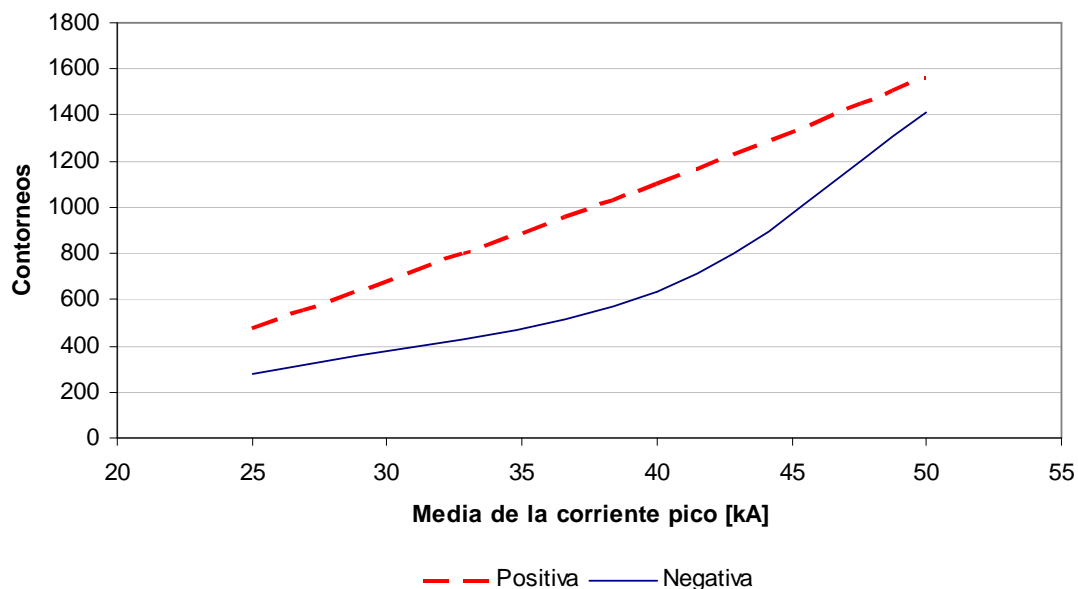


Figura 4.2 Influencia de la corriente de cresta en el número de contorneos

Por otro lado, uno de los principios del modelo electrogeométrico trata acerca de que las magnitudes de corriente mayores tendrán mayor probabilidad de terminar en el hilo de guarda, como se indicó anteriormente en la figura 2.11. Desde un punto de vista probabilístico esto significa que habrá más intentos y por lo tanto una mayor probabilidad de éxito de un evento.

4.3 TIEMPO DE FRENTE

El valor máximo de las sobrevoltajes aumenta conforme disminuye el tiempo a la cresta de la descarga, por lo tanto el número de contorneos disminuye conforme aumenta el tiempo de frente.

En la figura 4.3 se puede evidenciar la importancia que tienen las ondas de frente rápido (hasta 3 μ s) en el número de contorneos. A partir de este valor la variación del número de contorneos disminuye.

	Tiempo frente de onda [μ s]	Contorneos inversos	Impactos	
			Hilo de guarda	Tierra y fase
Positiva	1	1620	3288	10712
	3	536	3254	10746
	5	255	3275	10725
Negativa	1	1067	3073	10927
	3	192	3187	10813
	5	39	3139	10861

MI(+) = 40 kA MI(-) = 34 kA MR_o = 9.15 Ω

Tabla 4.3 Influencia del tiempo de frente en el número de contorneos

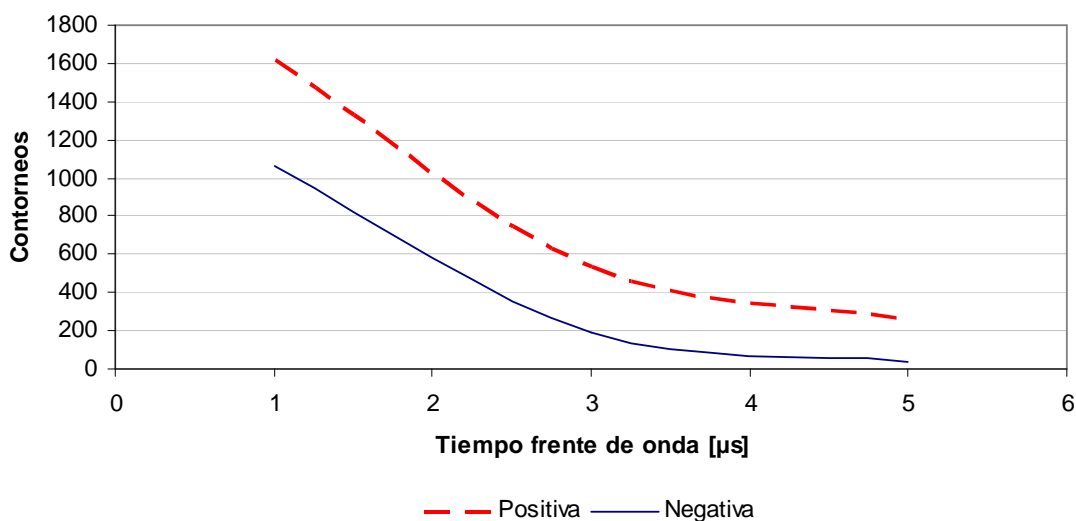


Figura 4.3 Influencia del tiempo de frente en el número de contorneos

En el estudio del fenómeno de impactos de descargas atmosféricas a líneas de transmisión se aplica la teoría de ondas viajeras, mediante la misma se puede verificar la importancia que tiene el tiempo de frente en la magnitud del sobrevoltaje y el número de contorneos

Como observación general de todos los parámetros analizados, se puede mencionar que el número de contorneos bajo un análisis de los mismos parámetros es mayor en descargas de polaridad positiva que con descargas de polaridad negativa.

Dentro de los parámetros analizados, el único valor que está al alcance de ser manipulado es el de la resistencia de pie de torre. De aquí la importancia de un mantenimiento adecuado de las línea de transmisión.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

De acuerdo al modelo electrogeométrico, los hilos de guarda cumplen una función muy importante, ya que mientras mayor sea la magnitud de las descargas atmosféricas, existirá mayor probabilidad de que sean atrapadas por el apantallamiento evitando así que circulen ondas transitorias de mayor magnitud por la red. Así, se puede contrarrestar los efectos de las descargas atmosféricas mediante un mantenimiento adecuado del valor de la resistencia de pie de torre de las estructuras de la línea.

Los sobrevoltajes producidos por impactos en hilos de guarda de distintos materiales no tienen diferencia significativa. Este efecto se debe probablemente al hecho de que la impedancia característica es función de la inductancia y capacitancia de la línea.

Resistencias en el orden de las decenas de ohmios favorecen a la formación de sobrevoltajes elevados, pero se obtiene una diferencia mayor en la magnitud de los sobrevoltajes entre resistencias bajas. Es decir, existe una mayor variación entre los sobrevoltajes producidos por resistencias en el orden de las unidades que entre sobrevoltajes producidos por resistencias en el orden de las decenas.

El tiempo de frente de onda de la descarga presenta una influencia significativa en la formación de contorneos sobre la cadena de aisladores. Esto se debe a la rápida tasa de crecimiento de la magnitud de la corriente y a la reflexión de las ondas viajeras en la red.

El valor de los voltajes a frecuencia de operación tiene influencia en la magnitud máxima de los sobrevoltajes, influencia que adquiere mayor importancia para líneas de transmisión de altos niveles de voltaje.

El analizar el efecto del impacto de las descargas atmosféricas en líneas de transmisión mediante un método estadístico permite superar las incertidumbres de los valores de las variables involucradas y obtener una distribución de los sobrevoltajes sobre la línea. Esto fundamenta criterios de diseño, ya que se puede apreciar que invertir demasiado dinero en proteger la línea para un valor de sobrevoltaje que tenga baja probabilidad de presentarse es un gasto innecesario.

En el diseño de una línea de transmisión se debe tener en cuenta que no solo interviene el comportamiento frente a descargas atmosféricas, existen otros factores de por medio, tales como, longitud de la línea, costo del derecho de paso, construcción, materiales y pérdidas, los cuales también tienen influencia en el costo del diseño de la línea y pueden ser decisivos en el diseño final.

El tamaño del conjunto de valores en el eje vertical de la posición de la descarga puede introducir un error. Si es demasiado extenso, se considera que pocas descargas impactarán en la línea, mientras que, si es demasiado pequeño, el número de descargas en la línea será mayor al verdadero. El límite debe estar determinado por un valor aceptable, ya que elegir el valor máximo de una distribución aleatoria implica confiar en un valor teórico que puede no presentarse en la realidad.

Una de las principales aplicaciones de este trabajo es determinar la curva de distribución de los sobrevoltajes en la cadena de aisladores por descargas atmosféricas, la cual junto a la curva de probabilidad de flameo del aislamiento permite determinar de manera rápida la conveniencia de aumentar o disminuir la longitud de la cadena de aisladores.

Es importante determinar una expresión de la densidad de descargas a tierra para el país mediante estaciones de detección de descargas, ya que es el parámetro de mayor influencia en análisis y cálculos del comportamiento de líneas de transmisión.

RECOMENDACIONES

Existen trabajos en los que se hace un comentario a la guía para mejoramiento del comportamiento de una línea por descargas atmosféricas de la IEEE Std 1410-2004, con respecto a que la ecuación (2.38) de este trabajo, resaltando que es válida para regiones templadas, pero no necesariamente para regiones tropicales. Este parámetro es importante de destacar porque se ve influenciado por la cercanía de la zona a la línea ecuatorial. Se ha encontrado que los errores de aplicar la ecuación (2.38) en Colombia han alcanzado valores de hasta 1568%. En los trabajos antes mencionados, en los que se hace referencia a la bibliografía [11] y [12], se ha observado un comportamiento distinto en los parámetros de una descarga atmosférica en zonas tropicales para regiones montañosas y costeras, y se ha obtenido diferentes ecuaciones para cada tipo de región. Es por lo tanto recomendable que se realice un estudio en el que se obtengan datos propios para el Ecuador mediante LLS (Lightning Location Systems).

En la tabla a continuación se muestra la salida por flameo inverso aplicando las distintas expresiones de densidad de descargas a tierra, para un nivel ceraúnico, (T_d) de 10.

Referencia	Expresión N_g [descargas/km ² /año]	N_g [descargas/km ² /año]	Bibliografía	Flameo inverso [contorneo/100 km/ año]	
				$M_{t_f} = 2 \text{ us}$	$M_{t_f} = 3 \text{ us}$
México	$0.024 \cdot T_d^{1.12}$	0.316	[11]	2.5851	0.6255
Brasil	$0.003 \cdot T_d^{1.12}$	0.040	[11]	0.1437	0.0782
Colombia	$0.0017 \cdot T_d^{1.56}$	0.062	[11]	0.2243	0.1220
IEEE/CIGRE	$0.04 \cdot T_d^{1.25}$	0.711	[2]	2.5851	1.4064
GDF	$0.12 \cdot T_d$	1.200	[19]	4.3611	2.3726

Tabla R.1 Salidas por flameo inverso basadas en las distintas expresiones de densidad de descargas a tierra

BIBLIOGRAFÍA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] MARTÍNEZ, Juan. Power system transients: parameter determination, CRC Press.
- [4] VAN DER SLUIS, Lou. Transients in power systems. John Wiley & Sons, LTD. 2001
- [5] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. Electrical Transmisión and Distribution Reference Book, Cuarta Edición, East Pittsburgh, Pennsylvania, 1964
- [6] LUCAS, Rohan. High Voltage Engineering. Edición Revisada, Universidad de Moratuwa, Sri Lanka, 2001.
- [7] MARTÍNEZ, Juan. Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, Primera edición, McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid, 2008
- [8] IEEE. IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines, IEEE Standards board, 1997.
- [9] HTWE, Nay Kyi. Analysis and design selection of lightning arrester for distribution substation, World Academy of Science, Engineering and technology 48, 2008.
- [10] CRUZ, Rafael. Determinación y selección de la aislación de líneas de transmisión de alto voltaje. Universidad técnica del Estado. Santiago de Chile, 1973.
- [11] TORRES, H. Ground Flash Density: definition of the appropriate grid size and a proposal of relationship N_g vs. T_d for tropical zones. Activity Report

- Of Tf C4.01.02-B. Working Group C4.01.CIGRE, Dallas, TX. Septiembre 2003.
- [12] YOUNES, C. Evaluation of lightning parameters in Colombia from LSS and Satellite data. Msc. Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2002.
- [13] PANDO, Raúl. Aspectos básicos de las descargas atmosféricas. Universidad Nacional de Tucumán, 2006.
- [14] FURST, Gabor. MODELS Primer. Version No. 1.
- [15] EPRI, Transmission line reference book 345 kV and above, New York, 1975
- [16] MARTINEZ, Juan. Modelación de líneas aéreas de transmisión para el cálculo de sobretensiones originadas por el rayo. Ingeniare, Revista chilena de ingeniería, vol. 18 N°1, 2010
- [17] IEEE. TF on parameters of lightning strokes, IEEE Transaction Power Delivery, 20(1), 346, 2005.
- [18] CASAS, Favio. Tierras: Soporte de la seguridad eléctrica, Segunda edición, Bogotá, 2003.
- [19] MEJÍA VILLEGAS Ing. Constructores. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión, Segunda edición, Colombia, 2003.
- [20] RIOFRÍO, Carlos. Comportamiento de líneas de transmisión a descargas atmosféricas directas – Modelos de análisis, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1977.

ANEXOS

ANEXO 1 FUNDAMENTOS DEL ATP

El programa digital de transitorios electromagnéticos ATP (Alternative Transients Program), es el programa más utilizado en la simulación de transitorios y modelos no convencionales de componentes de sistemas de potencia. Fue desarrollado por Scott Meyer a partir de la versión M39 del programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) de Bonneville Power Administration.

El ATP permite la simulación de transitorios electromagnéticos en redes polifásicas, con configuraciones arbitrarias, por un método que utiliza una matriz de admitancia de barras. La formulación matemática está basada en el método de Bergeron para elementos con parámetros distribuidos y una regla de integración trapezoidal para parámetros concentrados. Durante la solución se utilizan técnicas de esparcimiento y de factorización triangular optimizada de matrices.

El ATP comprende un paquete de programas y rutinas de soporte, tales como ATPDraw (programa para creación de un archivo de datos a partir de la elaboración de un diseño del circuito a ser simulado), PCPlot y TPPlot (programas para la presentación de resultados en forma de gráficas), LINE CONSTANTS o CABLE CONSTANTS (programa para cálculo de parámetros de líneas de transmisión o cables subterráneos), TACS y MODELS (programas para la simulación de controles y elementos no convencionales), además de diversas otras rutinas que generan archivos que contienen un conjunto de instrucciones correspondientes a modelos de ATP.

De forma general, la información necesaria para el procedimiento de casos en ATP involucran la formación de instrucciones de información generales (paso de integración, tiempo máximo de simulación, frecuencia de resultados, etc.), información para elementos lineales y no lineales (reactancias, capacitancias, resistencias, transformadores, pararrayos), instrucciones para fuentes, interruptores, instrucciones para la definición de tensiones en las barras (salida de resultados) e instrucciones para la obtención de gráficos.

Los archivos de salida de ATP tienen la terminación “.lis” para los resultados impresos y la terminación “.pl4” para la visualización de gráficos.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

El programa ATP es una herramienta de gran flexibilidad y de gran importancia en la realización de estudios de transitorios en sistemas de potencia. La diversidad de opciones de modelación que ofrece, y la extensa gama de estudios que permite realizar, hacen que el usuario sea responsable de una serie de decisiones, que van desde escoger el paso de integración más adecuado hasta el análisis de los resultados obtenidos. La selección del paso de integración está bastante influenciada por el fenómeno al que se lo está estudiando. Simulaciones en las que intervienen altas frecuencias requieren pasos de integración más pequeños, mientras que fenómenos de bajas frecuencias pueden ser calculados con pasos de integración mayores. Por ejemplo, para estudios de transitorios por maniobra, el intervalo de integración está entre 25 a 100 μ s, y en estudios de descargas atmosféricas está entre 0.01 a 0.1 μ s. El tiempo máximo de simulación también depende mucho del fenómeno en análisis. Para estudios de descargas atmosféricas se puede utilizar más de 20 μ s de simulación mientras que la energización de líneas de transmisión puede ser analizada con 50 ms de simulación.

TACS Y MODELS

La rutina TACS fue desarrollada para simular interacciones dinámicas entre la red eléctrica y los sistemas de control de un determinado equipo. Los sistemas de control pueden estar descritos por diagramas de bloque en el dominio de la frecuencia con configuraciones arbitrarias de los elementos disponibles. Está permitida la representación de funciones de transferencia, sumadores, multiplicadores, limitadores estáticos y dinámicos, funciones algebraicas y lógicas, fuentes de señal, interruptores controlables, funciones definidas por el usuario, detectores de señales, etcétera.

La rutina MODELS puede ser entendida como una versión moderna de TACS. Presenta ventajas en la representación de sistemas de control complejos y se constituye en una poderosa herramienta para la simulación de algoritmos de sistemas de control.

MODELS es un lenguaje descriptivo de propósito general soportado por un conjunto de herramientas de simulación para el estudio de sistemas variables en el tiempo. MODELS es un lenguaje estructurado, requiere que el código esté

ordenado de acuerdo a una estricta regla de agrupamiento del tipo de bloques en el archivo. [14]

POCKET CALCULATOR VARIES PARAMETER (PCVP) Y \$PARAMETER

Son funciones muy útiles en el estudio de análisis de sensibilidad además de otras aplicaciones. PCVP permite realizar varias ejecuciones del mismo caso, es decir, ejecutar el caso tantas veces como sea necesario para determinar la relación entre los parámetros y los voltajes o corrientes transitorios a analizar.

\$PARAMETER permite asignar un valor distinto al parámetro de interés en cada ejecución del programa.

LINEAS DE TRANSMISIÓN

Los modelos de líneas de transmisión disponibles en ATP son bastantes flexibles en atender las necesidades más frecuentes de los estudios de transitorios.

En la práctica, los modelos de líneas con parámetros distribuidos presentan resultados plenamente satisfactorios y son utilizados en la mayoría de los estudios transitorios en sistemas eléctricos, no siendo esencial la utilización de modelos con parámetros dependientes de la frecuencia.

Una de las funciones especiales de EMTP es el cálculo eficiente de fenómenos en las líneas de transmisión. Para líneas aéreas de transmisión multifase, se pueden aplicar los siguientes modelos:

Modelo PI concentrado (Multi-stage)

- Altamente confiable
- Únicamente para fenómenos de relativa baja frecuencia o líneas cortas
- No límites para el paso de tiempo de cálculo
- Se puede introducir el efecto de capacitancia concentrada.
- Función no dependiente de frecuencia

Modelo parámetros distribuidos, transpuesto

- Cálculo computacionalmente eficiente
- Prácticamente suficiente precisión para cálculos transitorios generales de rango de frecuencia limitado.
- Límite para el paso de tiempo de cálculo (debe ser menor que el tiempo de viaje)
- Función no dependiente de frecuencia

Modelo parámetros distribuidos, no transpuesto

- Similar al anterior excepto que posee la función no transpuesta.
- Muy útil en estudios en el que el desbalance de la línea es importante

Modelo J. Marti, dependiente de la frecuencia

- Preciso para un ancho rango de frecuencia
- Cálculo computacional relativamente eficiente
- Limitación en el paso de tiempo de cálculo
- Puede ser poco preciso para un rango de frecuencias muy bajo.

En EMTP, los datos del modelo se calculan directamente en una subrutina llamada LINE CONSTANTS, introduciendo los parámetros geométricos de las líneas de transmisión.

ELEMENTOS NO LINEALES

El programa permite la representación de resistencias e inductancias no lineales, siendo disponibles diversas alternativas para esta finalidad. Las resistencias son representadas a través de puntos en el plano tensión – corriente y las inductancias por puntos en el plano flujo – corriente, existiendo la posibilidad de representar resistencias variables con el tiempo.

INTERRUPTORES

El programa ATP contiene una gran variedad de modelos de interruptores. Se pueden representar interruptores de tiempo controlado, interruptores estadísticos, sistemáticos, controlados por tensión o señales así como interruptores de medición.

Los interruptores controlados por tiempo pueden efectuar operaciones de cierre o apertura en tiempos especificados por el usuario. Estas operaciones se realizan sólo una vez, siendo que la apertura ocurre conforme a un determinado margen de corriente. Estos interruptores simulan el comportamiento de un disyuntor, con excepción del arco eléctrico entre contactos y pueden ser dispuestos de modo de representar también resistores de reinserción de apertura o cierre.

Los interruptores estadísticos y sistemáticos se utilizan para simular un disyuntor considerándose también la dispersión existente entre los tiempos de cierre de cada contacto. Los valores estadísticos de los tiempos de cierre se generan conforme a una distribución estadística de tipo normal o uniforme cuyos

parámetros son definidos por el usuario. Pueden ser utilizados para los contactos principales y para los contactos auxiliares del disyuntor. Los interruptores sistemáticos realizan la misma función, pero con tiempos de cierre generados de acuerdo con una determinada ley de formación.

Los interruptores controlados por tensión tienen una determinada secuencia de operación especificada por el usuario de modo que un interruptor, estando originalmente abierto, se cierre después de un tiempo superior a un tiempo determinado, desde que la tensión a través del interruptor sea superior a un valor establecido por el usuario.

Los interruptores controlados por señales son aquellos que reciben señales provenientes de TACS o MODELS y cuya función principal se refiere a simulación de diodos o tiristores. Los interruptores de medición son aquellos que se encuentran permanentemente cerrados y cuya finalidad es monitorear la corriente, energía o potencia.

FUENTES

El programa permite la representación de fuentes de excitación, voltaje o corriente, las cuales son definidas analíticamente dentro del programa.

La asociación de dos o más fuentes permite la representación de una función compuesta. El usuario tiene la opción de definir sus propias fuentes de excitación, sea punto a punto, o a través de la subrutina TACS.

La modelación de máquinas rotativas comprende la parte eléctrica y mecánica.

ANEXO 2 TORRE TÍPICA TIPO SL2

ANEXO 3 TEORÍA DE PROBABILIDAD

Experimento aleatorio:

Es todo aquel experimento cuyo resultado no se puede predecir antes de que se produzca el acontecimiento, si bien se conocen de antemano todos los posibles resultados del mismo. Por ejemplo, en el lanzamiento de un dado se conocen los posibles resultados $\{1,2,3,4,5,6\}$ y sin embargo no es posible deducir cuál de los resultados se producirá.

Variable aleatoria:

Dado un experimento aleatorio cualquiera cuyos eventos elementales posibles pueden identificarse fácilmente mediante un número real, se denomina variable aleatoria X al conjunto de estos números.

En el lanzamiento de un dado, la variable aleatoria X será:

$$X = \{1,2,3,4,5,6\}$$

Las variables aleatorias pueden ser continuas o discretas.

Discretas: cuando la variable sólo puede tomar ciertos valores dentro de un campo de variación dado. Existe un número contable de posibles resultados, de valor finito. Por ejemplo lanzar una moneda, arrojar dados, posibilidad de lluvia, etc.

No existe ninguna limitación para los valores que pueden tener una variable aleatoria discreta; sin embargo, las probabilidades asociadas deben cumplir dos condiciones:

1. Todas las probabilidades deben ser mayores que cero

$$p_i > 0$$

2. La suma de las probabilidades debe ser igual a 1

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1$$

Continuas: cuando la variable puede tomar cualquier valor dentro de un campo de variación dado, es decir hay un número infinito de resultados.

Ejemplo: el experimento aleatorio consiste en medir la altura que es capaz de saltar cada miembro de un conjunto de personas. Cada miembro da lugar a un número, por lo que se toma como variable aleatoria el conjunto de las medidas de

las alturas que son capaces de saltar distintas personas. Si una persona alcanzó 105 cm y otra 106 cm, no existe ninguna razón para que otra no hubiera alcanzado un valor intermedio entre estas dos medidas, como por ejemplo 105.6 cm.

Una variable aleatoria continua queda definida si se conoce su función de densidad de probabilidad $f(x)$ en el intervalo (x_{\min}, x_{\max}) .

Definiciones de probabilidad:

Clásica

Dado un experimento aleatorio cualquiera, se define como probabilidad de un evento A, al cociente entre el número de eventos favorables m y el número de eventos posibles n .

$$P(A) = \frac{m}{n}$$

Esta definición se aplica cuando todos los resultados son igualmente probables. Se define como probabilidad empírica de un evento A, a la frecuencia de aparición de dicho evento, cuando el número de observaciones crece indefinidamente.

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} fr(A)$$

Su interés práctico es evidente puesto que autoriza a admitir que el límite de los valores tomados por la frecuencia equivale a la probabilidad para n creciendo indefinidamente.

Ejemplo:

Sea el experimento aleatorio de lanzar una moneda al aire. Los eventos posibles son obtener “cara” o “cruz”. Si en 500 lanzamientos se han obtenido 246 veces cara, la frecuencia del evento es:

C = “obtener cara”

$$fr(C) = \frac{246}{500} = 0.492$$

Si en otros 500 lanzamientos el evento “obtener cara” ha resultado 250 veces, la frecuencia del suceso en los 1000 lanzamientos totales será:

$$fr(C) = \frac{496}{1000} = 0.496$$

Por los resultados obtenidos en los 1000 lanzamientos puede deducirse que la probabilidad de obtener una cara en el lanzamiento al aire de una moneda es aproximadamente 0.5. Para obtener más cifras significativas se debe efectuar mayor número de observaciones.

Conjuntos y probabilidades

Si S es el conjunto universal; A, B son subconjuntos; Φ es el conjunto vacío; $P(A)$ es la probabilidad de A ; $P(\Phi) = 0$.

Axiomas

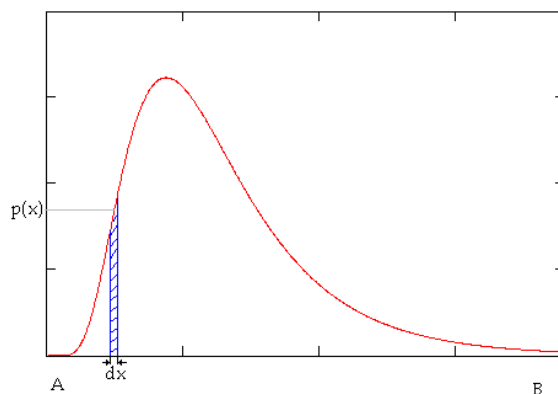
1. $P(A) \geq 0$
2. $P(S) = 1$
3. Si $A \cap B = \Phi$, $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

Ley de probabilidad de una variable continua

La variable aleatoria, por ser continua, no sólo adoptará ciertos valores dentro de un campo dado, sino que, por el contrario, se puede obtener cualquier valor de la variable X dentro de un campo dado. No tiene sentido identificar todos los posibles valores de X_i de la variable que serían infinitos, y en lugar de esto se especifican únicamente los dos valores extremos A, B , entre los cuales puede variar la variable X . Así mismo, no tiene sentido asociar una probabilidad a cada valor de la variable, dada la continuidad de ésta. Por este motivo se asocia a cada elemento diferencial, dx , dentro del campo de variación de la variable, m , la probabilidad correspondiente $p(x)$, que se denomina densidad de probabilidad.

Esta función $p(x)$ debe ser tal que:

$$\int_A^B p(x) \cdot dx = 1$$



Función densidad de probabilidad

En teoría de probabilidad, una función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria es la función que describe la probabilidad relativa de que ocurra esa variable en un punto dado en un espacio de observación.

La probabilidad de que la variable aleatoria caiga dentro de un conjunto está dada por la integral de su densidad dividida para el conjunto.

La función de densidad de probabilidad de una variable continua debe cumplir con las siguientes condiciones:

1. $f(x) > 0$

2.
$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x) dx = 1$$

Función de distribución acumulada

En teoría de probabilidad y estadística, la función acumulada describe la probabilidad de que una variable aleatoria X sea menor o igual a un valor dado de X . La función de distribución acumulada de una variable aleatoria continua, $F(x)$, es la probabilidad de que el valor de la variable sea igual o inferior a un valor determinado x .

$$F(x) = P[X \leq x] = \int_{x_{\min}}^x f(x) dx$$

La función $F(x)$ es continua, no decreciente y varía entre $F(x_{\min}) = 0$ y $F(x_{\max}) = 1$.

A partir de esta función se puede deducir la probabilidad de que una variable aleatoria continua tenga un valor situado dentro de un intervalo determinado.

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a)$$

Funciones de distribución de variables aleatorias continuas

Función de distribución uniforme:

Una variable aleatoria continua está uniformemente distribuida en un intervalo (x_{\min}, x_{\max}) si la probabilidad es la misma para cualquier valor de la variable situado dentro del intervalo, y es nula fuera del intervalo.

$$f(x) \begin{cases} \frac{1}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq X \leq x_{\max} \\ 0 & X < x_{\min}; x_{\max} < X \end{cases}$$

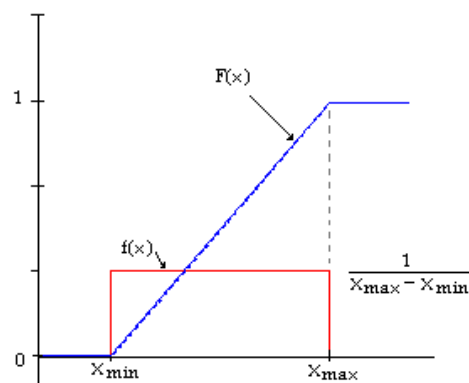
El valor medio es: $M(X) = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$

La desviación uniforme: $\sigma(X) = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2\sqrt{3}}$

La función de distribución acumulada, que resulta de integrar la función de densidad de probabilidad en el intervalo (x_{\min}, x_{\max}) es

$$F(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

El valor de $F(x)$ crece linealmente entre $F(x_{\min}) = 0$ y $F(x_{\max}) = 1$.

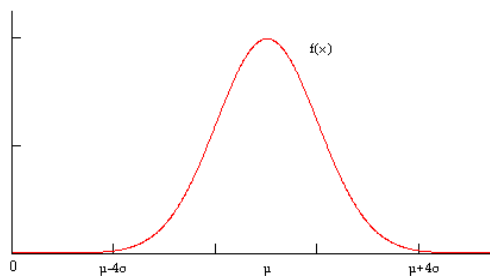


Función de distribución normal:

La función de densidad de probabilidad normal o gaussiana tiene la expresión:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{\left[\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right]}$$

Donde μ es el valor medio y σ es la desviación estándar. El parámetro μ desplaza la curva a lo largo del eje de abscisa, mientras que el parámetro σ deforma la curva, cuanto más elevado es el valor de σ , más aplanada aparecerá la curva.



Esta distribución presenta algunos inconvenientes:

- No existe una expresión matemática de su integral, es decir, su distribución acumulada.
- La variable aleatoria tiene un intervalo de $-\infty$ a $+\infty$.

Función de distribución Weibull:

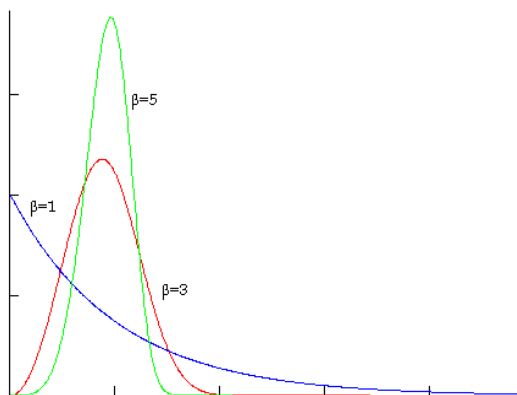
Presenta la siguiente distribución de probabilidad:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \lambda}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x - \lambda}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$$

en donde α es el factor de escala, β es el factor de forma y λ es la localización. Se puede comprobar que para valores positivos de β mayores que 2, la curva se asemeja a la de la distribución normal. La expresión de la función acumulada es:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - \lambda}{\alpha} \right)^{\beta} \right]$$

La distribución Weibull es recomendada por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) para representar el voltaje soportado por un aislamiento regenerable en lugar de la distribución normal.



Función de distribución logarítmica normal

Una variable aleatoria presenta esta distribución si su logaritmo normal tiene una función de distribución normal. Es decir, si X es una variable aleatoria con

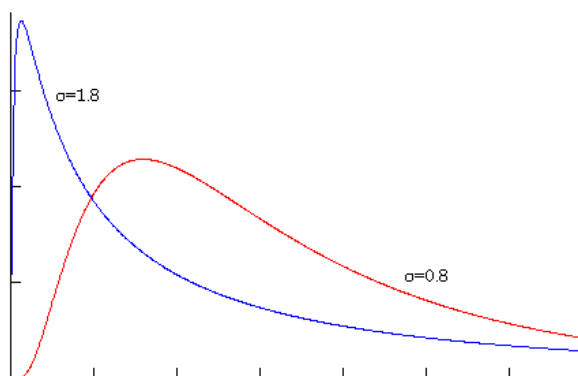
distribución normal, la variable $Y = e^X$ es una variable logarítmico normal. La función de densidad de probabilidad de esta distribución viene dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

El valor medio y la desviación estándar son:

$$\mu_L = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

$$\sigma_L^2 = [\exp(\sigma^2) - 1] \cdot \mu_L^2$$



Generación de números aleatorios

En la aplicación del método de Montecarlo se requiere la generación de números aleatorios de acuerdo con las distribuciones especificadas o asumidas para las variables de naturaleza aleatoria. Los procedimientos para generar números aleatorios se basan en la generación de números con distribución uniforme y en el empleo de la función de distribución acumulada de la variable que se quiere generar. A continuación se detalla el procedimiento para generación de números aleatorios conocido como método inverso.

Método inverso

Una variable aleatoria continua puede definirse mediante su función de densidad de probabilidad, $f(x)$, o mediante su función de distribución acumulada, $F(x)$.

La función de distribución acumulada, $F(x)$, es una función continua no decreciente, que tiene por tanto una inversa $F^{-1}(x)$.

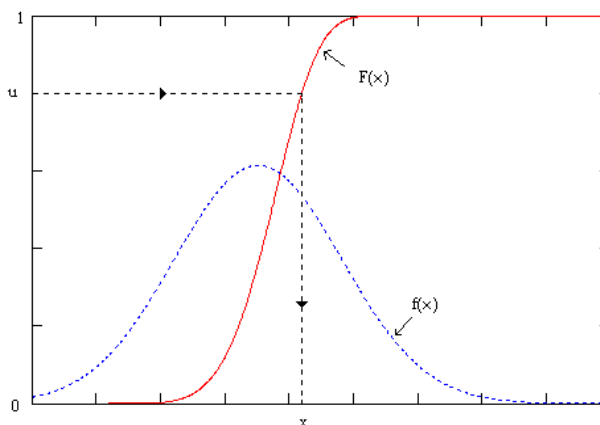
Si se asume la nomenclatura $F_X(x)$, en donde tal, designa a una función de distribución acumulada de la variable aleatoria X , se tiene que:

La transformación $u = F_X(x)$, define una variable aleatoria cuyos valores se encuentran dentro del intervalo $(0,1)$. Supóngase que U es la variable aleatoria con distribución uniforme, definida en el intervalo $(0,1)$ y con función de distribución acumulada $F_U(u)$. Si

$$x = F_X^{-1}(u)$$

Entonces, (ver la figura):

$$u = F_X(x)$$



y la probabilidad de que la variable X sea igual o inferior a un valor determinado x es igual a la probabilidad de que la variable U sea igual o inferior a $F_X(x)$:

$$P(X \leq x) = P[F_X^{-1}(u) \leq x] = P[U \leq F_X(x)]$$

El último término de la expresión no es otra cosa que la función de distribución acumulada uniforme en el intervalo $(0,1)$ aplicada al valor $F_X(x)$. Se tiene, por tanto,

$$P(X \leq x) = F_U[F_X(x)]$$

Puesto que para la función F_U se tiene la igualdad entre la variable y la función, se deduce finalmente:

$$P(X \leq x) = F_X(x)$$

Es decir, cualquier número aleatorio obtenido por aplicación de la inversa de $F_X(x)$ a un número aleatorio con distribución uniforme es un número aleatorio con función densidad de probabilidad:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$$

En resumen, el procedimiento para obtener un número aleatorio distribuido de acuerdo con una determinada función de densidad de probabilidad consiste en

generar un número aleatorio con distribución uniforme en el intervalo (0,1) y en resolver la inversa de la función distribución acumulada. Para aplicar este procedimiento se debe disponer de un generador de números aleatorios con distribución uniforme en (0,1) y de la expresión matemática de la inversa de la función acumulada.

Método de Box – Muller

Es un método empleado en la generación de números aleatorios y parte de la base de que cualquier computador tiene incorporado un sistema para generar números con distribución $N(0,1)$. Para las distintas funciones de distribución se tiene:

Función de distribución uniforme: a partir de la secuencia de números aleatoria generada con una densidad de probabilidad uniforme en el intervalo (0,1), U , se puede obtener una secuencia de distribución uniforme en un intervalo (a, b) mediante el algoritmo:

$$X = a+(b-a)U$$

Función de distribución normal: se generan dos variables aleatorias U_1 y U_2 con distribución uniforme en el intervalo (0,1), una variable con distribución normal $N(0,1)$ se obtiene empleando cualquiera de las expresiones:

$$Z_1 = \sqrt{-2 \cdot \ln U_1} \cdot \cos(2\pi U_2)$$

$$Z_2 = \sqrt{-2 \cdot \ln U_1} \cdot \text{sen}(2\pi U_2)$$

El cálculo de números con una distribución normal genérica $N(\mu, \sigma)$ se obtiene mediante la siguiente transformación de variables:

$$X = \mu + Z\sigma$$

Función de distribución Weibull: una secuencia de números aleatorios con distribución Weibull, factor de escala α , factor de forma β y localización λ se puede obtener a partir de una variable U con distribución uniforme en (0,1) mediante el algoritmo:

$$X = \lambda + \alpha[-\ln U]^{1/\beta}$$

Función de distribución logarítmico normal: se genera inicialmente una variable, X , con distribución normal $N(\mu, \sigma)$. La variable con distribución logarítmica normal Y se obtendrá mediante la transformación de variables:

$$Y = e^X$$

ANEXO 4 CÓDIGO FUENTE EN MODELS MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Mediante este Model se controla el sitio de impacto de la descarga atmosférica.
Los interruptores se cerrarán dependiendo de los datos de entrada.

```

MODEL Meg
INPUT tmax
DATA
  posicy {dflt: 0}
  posicx {dflt: 0}
  Corrip {dflt: 0}
VAR rc rg
  alfa beta teta
  tripa tripb tript
  dc a p
  pt lpico
OUTPUT tripa
        tripb
        tript
INIT lpico:=Corrip/1000
  rc:=10*lpico**0.65
  rg:=5.5*lpico**0.65
  alfa:= atan(1.7/4.66)
  beta:=asin((24.6056**0.5)/(2*rc))
  teta:=0
  dc:=0
  a:=0
  pt:=0
  tripa:=0
  tripb:=0
  tript:=0
ENDINIT
EXEC
-----
IF rg<=35.34 THEN
teta := 0
ELSE teta:=asin((rg-35.34)/(rc))
ENDIF
-----
dc:=rc*(cos(teta)-cos(alfa+beta))

```

```

-----
IF dc <= 0 THEN
  a:=1.6+(rc**2-(rg-40)**2)**0.5
ELSE a:=3.3+rc*cos(alfa+beta)
ENDIF
-----

```

```

IF abs(posicy)<=a THEN
  pt:= a*(237/54900)
  IF posicx < pt THEN
    tript:=1
  ELSE
    IF posicy < 0 THEN
      tripa:=1
    ELSE
      tripb:=1
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
ENDIF
IF t>tmax THEN
  p := atp(voltbc[1])
  write1('a b t', tripa,tripb,trip)
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

MODELO DE LA RESISTENCIA DE IMPULSO

```

MODEL resvar
INPUT Itorre
DATA Robf
VAR lioniz
  Rimpul
OUTPUT Rimpul
INIT
  lioniz:=(20000000)/(pi*Robf**2)
ENDINIT
EXEC
  Rimpul:= Robf/((1+(Itorre/lioniz))**0.5)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

MODELO DEL VOLTAJE EN LA CADENA DE AISLADORES

Con este Model se registra si hubo o no contorno y las magnitudes de los voltajes en la cadena de aisladores

```

MODEL bflcon
INPUT A
    B
    C
    PA
    PB
    PC
    tmax
DATA CF
VAR bkfl
    UA UB UC p
    CFO UT MUT
INIT
    MUT:=0
    UT:=0
    bkfl:=0
    CFO:=1000*CF
ENDINIT
EXEC
    UA:= ABS(A-PA)
    UB:= ABS(B-PB)
    UC:= ABS(C-PC)
    UT:=max(UA,UB,UC)
    IF UT > MUT THEN
        MUT:= UT
    ENDIF
    IF (UA>CFO) OR (UB>CFO) OR (UC>CFO) THEN
        bkfl:=1
    ENDIF
    IF t>tmax THEN
        p := atp(voltbc[1])
        write2(MUT, bkfl)
    ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```