

# CÁLCULO DE SOBREVOLTAJES ORIGINADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN UTILIZANDO EL ATP (ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM) APLICADO A LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN SANTA ROSA-POMASQUI A 230 kV

Vásquez O. Kléber S., Ing.

Escuela Politécnica Nacional

Ruales C. Luis, Ing.

## RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un estudio del comportamiento de líneas de transmisión frente a descargas atmosféricas directas, determinando la magnitud de los sobrevoltajes ocasionados por dicho fenómeno, para lo cual se ha implementado un modelo en el programa de transitorios electromagnéticos ATP, las magnitudes de los sobrevoltajes se obtienen mediante simulaciones digitales en dicho programa. Las simulaciones se realizan para los casos en que la descarga impacta al cable de guarda o al conductor de fase. También se realiza un estudio de sensibilidad mediante el cual se determinan los parámetros de mayor influencia en los valores máximos de los sobrevoltajes producidos por dicho fenómeno. El modelo es aplicado a ciertos tramos de la línea Santa Rosa-Pomasqui, en donde se determinan las características de aquellas descargas atmosféricas que de presentarse pueden provocar una falla del aislamiento y la consiguiente salida de operación de la línea.

**PALABRAS CLAVES:** ATP, Descargas Atmosféricas, Sobrevoltaje, Líneas de Transmisión

## RESPUESTA DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN A UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA.

Una descarga atmosférica consiste en una descarga eléctrica, en forma de rayo luminoso, desde una nube cargada eléctricamente hacia la tierra o entre nubes. También se puede definir como el rompimiento del aislamiento del aire entre dos superficies cargadas eléctricamente con polaridades opuestas. El proceso es terminado por una descarga que puede llevar corrientes de hasta 200 kA, pero el promedio oscila en 27 kA.

Los parámetros que determinan la forma de onda de la corriente en una descarga atmosférica son

[lruales@transelectric.com.ec](mailto:lruales@transelectric.com.ec)  
[kvasquez@transelectric.com.ec](mailto:kvasquez@transelectric.com.ec)

de naturaleza aleatoria. Estudios realizados han determinado que la amplitud, el frente de onda (tiempo que tarda la onda en alcanzar el 90% de su valor pico), el tiempo de cola (tiempo que tarda la onda en decaer al 50% del valor pico) y la pendiente responden a una función de distribución logarítmica normal cuyos parámetros para la primera descarga son los siguientes [10]:

Tabla 1: Parámetros de la distribución logarítmica de una descarga atmosférica

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

Según CIGRE (Conseil International des Grands Reseaux Electriques), la descarga de corriente más baja es de 3 kA.

La probabilidad de que una descarga atmosférica presente una corriente de cresta igual o mayor que un valor de corriente  $I$  está dada por [13]:

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

Las descargas directas en líneas de transmisión pueden producirse ya sea en el conductor de fase o en el cable de guarda, esto dependerá del grado de protección de la línea de transmisión.

## MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Cuando una descarga atmosférica se aproxima a una línea de transmisión o a la tierra a una distancia  $r$  denominada distancia

de arqueo, la descarga puede hacer impacto ya sea en la línea de transmisión o en la tierra. La distancia de arqueo es una función de la carga y consecuentemente función de la magnitud de la corriente de la descarga. La ecuación (2) permite determinar la distancia de arqueo en función de la corriente [12] [13].

$$r = 10I^{0.65} \quad (2)$$

Donde:  $r$  es la distancia de arqueo en metros  
 $I$  es la corriente de la descarga en kA.

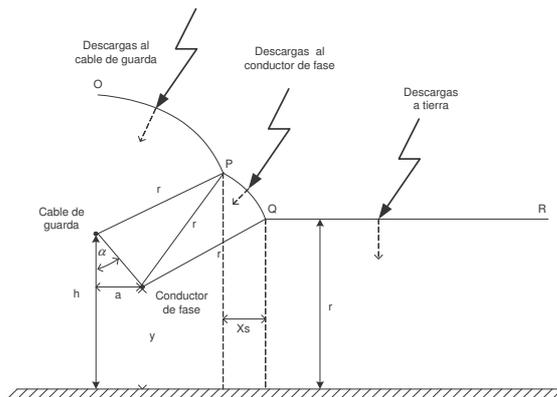


Figura 1: Método electrogeométrico

En una línea de transmisión la descarga puede impactar en el cable de guarda, en el conductor de fase, en la torre o en las proximidades a esta. La figura 1 muestra las alternativas antes descritas. En esta figura se puede ver que el apantallamiento no es completo pues el conductor de fase no está completamente protegido, para un apantallamiento completo la distancia  $X_s$  debe ser igual a cero.

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

El método electrogeométrico permite determinar, de forma aproximada, la máxima corriente que provoque una falla del apantallamiento. El método consiste en determinar mediante un análisis geométrico la distancia de arqueo que puede provocar una falla de apantallamiento, tomando en cuenta la disposición geométrica de los conductores en la torre de transmisión, Figura 2,

para lo cual se plantean las expresiones (3) y (4). Una vez conocida la distancia de arqueo máxima se determina la corriente máxima con la ecuación (2).

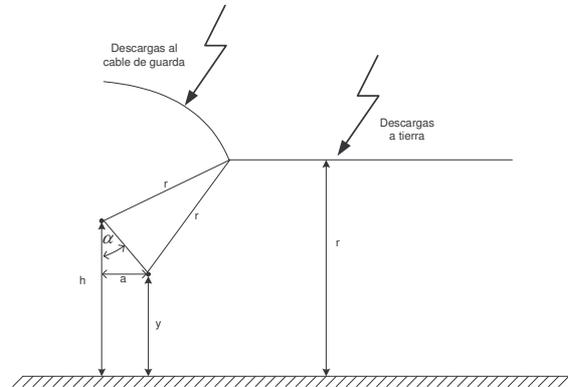


Figura 2: Distancia máxima que produce fallo de apantallamiento

$$a = \sqrt{h(2r-h)} - \sqrt{y(2r-y)} \quad (3)$$

$$r = \frac{h+y}{2(1-\text{sen}\alpha)} \quad (4)$$

Donde:  $a$  es la distancia horizontal entre el cable de guarda y el conductor de fase;  
 $h$  e  $y$  son las alturas del cable de guarda y conductor de fase respectivamente;  
 $r$  es la distancia de arqueo;  
 $\alpha$  es el ángulo de apantallamiento.

### MODELO IMPLEMENTADO EN ATP

El ATP (Alternative Transients Program) o más conocido como EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) es el programa más extensamente utilizado en el mundo para la simulación de transitorios electromagnéticos, electromecánicos y sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia, programa que fue desarrollado por la Boneville Power Administration. [14]

Cada elemento involucrado en los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas debe ser representado por un componente en ATP. Los elementos a ser representados son los siguientes:

- Descarga atmosférica
- Línea de transmisión
- Torre de transmisión
- Resistencia de pie de torre
- Cadena de aisladores
- Pararrayos

### DESCARGA ATMOSFÉRICA

Como se mencionó anteriormente una descarga atmosférica está caracterizada por la presencia de una onda de corriente de alta magnitud y corta duración. En el presente trabajo la descarga atmosférica es representada por una fuente de corriente. El ATP dispone de varios modelos de fuentes para la simulación de transitorios. Para el caso de la simulación de la corriente del rayo se utilizará la fuente de corriente Heidler type 15 pues es la fuente que se ajusta con mayor exactitud a la forma de onda de corriente propuesta por la norma IEC 61-1, figura 3.

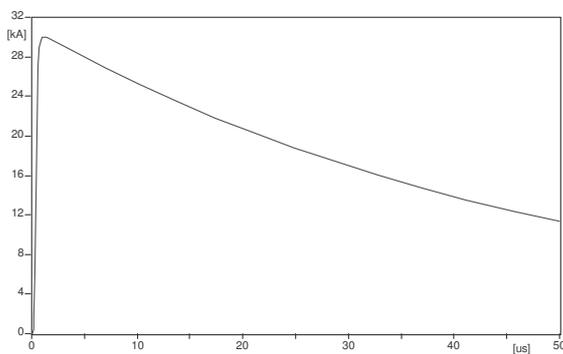


Figura 3: Representación de la corriente del rayo

Para la configuración de la torre de transmisión utilizada en la construcción de la línea Santa Rosa-Pomasqui y aplicando las ecuaciones (2), (3) y (4) se determina que la magnitud de corriente máxima que produce fallo del apantallamiento es de 17.9 kA, por lo que en este trabajo se considera que las corrientes menores a 18 kA. impactarán en el conductor de fase superior, mientras que las mayores o iguales a 18 kA. alcanzarán el cable de guarda.

### LÍNEA DE TRANSMISIÓN

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

$$Z(w) = \sqrt{\frac{R' + jwL'}{G' + jwC'}} \quad (5)$$

$$A(w) = e^{-\gamma l} \quad (6)$$

El exponente  $\gamma$  se denomina constante de propagación y está dado por:

$$\gamma = \sqrt{(R' + jwL')(G' + jwC')} \quad (7)$$

$R', L', G', C'$  son los parámetros de la línea de transmisión. Tanto  $Z$  y  $\gamma$  son complejos y dependientes de la frecuencia, la cual juega un papel importante en la determinación de estos parámetros.

Las expresiones anteriores muestran la dependencia de los parámetros que caracterizan a una línea de transmisión de la frecuencia y puesto que los fenómenos transitorios son de alta frecuencia, para su análisis se debe tener en cuenta que los modelos para la determinación de los parámetros sean dependientes de la frecuencia o tratarlos como parámetros constantes pero calculados a la frecuencia del fenómeno en análisis.

El ATP dispone de una subrutina llamada "Line Constants" que permite calcular los parámetros de líneas de transmisión y cables. Los parámetros proporcionados por "Line Constants" pueden ser concentrados, distribuidos o dependientes de la frecuencia. El modelo que se utilizó en este trabajo es el JMARTI, que proporciona parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia.

Los parámetros de la línea de transmisión fueron calculados utilizando los datos de la línea Santa Rosa - Pomasqui.

### TORRE DE TRANSMISIÓN

En este tipo de fenómeno la torre de transmisión debe considerarse como una impedancia de impulso que varía a lo largo de la torre en cuya base se encuentra conectada la resistencia de pie de torre. La torre puede ser representada como una línea de transmisión monofásica de parámetros distribuidos con una impedancia de impulso y una velocidad de propagación de onda igual a la de la luz.

Son varios los modelos que se han propuesto para determinar la impedancia de impulso de las torres de transmisión [11]. Uno de los modelos propuestos es el cónico que proporciona una impedancia constante para la torre de transmisión. La impedancia de impulso para descargas verticales está dada por:

$$Z_i = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) \quad (8)$$

Donde:  $h$  es la altura de la torre  
 $r$  es el radio de la base de la torre

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

### RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

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

$$R_T = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (9)$$

Donde:

$R_o$  es la resistencia de pie de torre medida a baja corriente y baja frecuencia,  $\Omega$

$R_T$  es la resistencia de puesta a tierra aparente en el momento de la descarga,  $\Omega$

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

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

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

$$I_g = \frac{E_o * \rho}{2\pi R_o^2} \quad (10)$$

Donde:  $\rho$  es la resistividad del suelo,  $\Omega\text{m}$ .

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

Como se puede ver en las expresiones anteriores la resistencia de pie de torre no es constante, su valor es dependiente de la corriente, por lo que para la resistencia de pie de torre, se utiliza una resistencia con característica no lineal, dependiente de la corriente. El modelo seleccionado es el R(i) "type 99", el cual permite ingresar hasta 16 valores de corriente y voltaje que determinan la característica no lineal de la resistencia.

El valor de  $I_g$  puede determinarse con la expresión (10) que para una resistividad del suelo de 110  $\Omega\text{m}$ , gradiente de ionización del suelo de 300 kV/m es de 52.5 kA.  $R_o$  es la resistencia medida en campo.

### CADENA DE AISLADORES

Para una descarga atmosférica que impacte en la torre de transmisión o en el cable de guarda y que viaje a través de estos, el final de las crucetas de la torre equivale a circuitos abiertos. La cadena de aisladores es representada por interruptores controlados por voltaje, los cuales simularán la descarga inversa, cerrando el interruptor, si el voltaje entre la cruceta y el conductor de fase supera un valor especificado, correspondiente al nivel de aislamiento de la cadena.

El valor del voltaje que haga cerrar el interruptor y simular la descarga inversa será aquel voltaje que no produce contorno en el 90% de las veces que se presente en una descarga atmosférica.

Los catálogos de los aisladores proporcionan el CFO (Critical Flash Overvoltage), que corresponde al voltaje de impulso al cual el 50% de las veces que es aplicado a un equipo produce contorno. El CFO para los aisladores utilizados en la línea en estudio debe ser corregido por efecto de las condiciones atmosféricas. La línea Santa Rosa - Pomasqui se encuentra construida en alturas que van desde los 2400 hasta los 4200 metros sobre el nivel del mar y uno de los aspectos más importantes que influyen en el voltaje de disrupción es la densidad relativa del aire, la corrección por este factor se presenta a continuación [3]:

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

$$\delta = 3.86 \frac{b}{273 + t} \quad (11)$$

Donde  $b$  = presión barométrica, cm Hg  
 $t$  = temperatura, °C

La capacidad de aislamiento disminuye conforme disminuye  $\delta$  y está dado por la relación:

$$V = \delta^n V_o \quad (12)$$

Donde  
 $V$  = CFO a cualquier densidad relativa del aire  
 $V_o$  = CFO a temperatura y presión estándar  
 $n$  = Exponente empírico que depende de la longitud de la cadena. (1.0 si la longitud de la cadena es menor que 1.5 m, 0.9 si la longitud de la cadena está entre 1.5 y 2.5 m, 0.8 si la longitud de la cadena está entre 2.5 y 3 m.)

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

$$\log b = \log 76 - \frac{h}{18336} \quad (13)$$

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

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

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

$$U_{90} = CFO(1 - 1.3\sigma) \quad (14)$$

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

### PARARRAYOS

Las funciones de un pararrayos son:

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

Para cumplir con las condiciones anteriores es necesario que la característica del descargador sea una resistencia extremadamente alta en operación normal y una resistencia relativamente baja en sobrevoltajes transitorios. La característica voltaje-corriente de un pararrayos es función de la pendiente del impulso. El pararrayos debe ser modelado con la característica de operación para descargas atmosféricas (8/20  $\mu$ s.) proporcionada por los

fabricantes y para corrientes entre 20 y 40 kA. El modelo utilizado en el ATP para la simulación de descargadores es la resistencia no lineal con característica exponencial (type 92, 5555).

### MODELO IMPLEMENTADO

Una vez que se ha seleccionado los diferentes modelos para los distintos elementos involucrados en una descarga atmosférica, es necesario armar el sistema a ser simulado. Cuando una descarga atmosférica alcanza una torre de transmisión, la onda de corriente provocada por el rayo viaja hacia los dos lados de la línea produciendo sobrevoltajes también en los vanos y torres más próximas. El disturbio no afecta a toda la línea pues a medida que avanza va disminuyendo su efecto hasta desaparecer, por lo que considerar un número de cuatro vanos a cada lado de la torre afectada resulta suficiente. El diagrama del modelo a implementarse es mostrado en la figura 4.

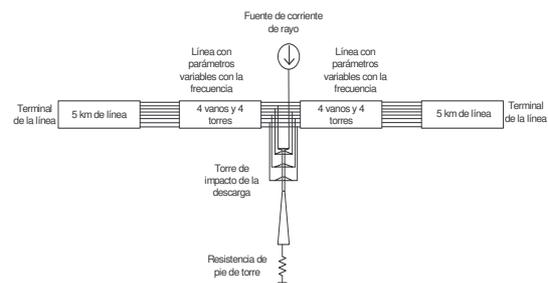


Figura 4: Modelo a implementarse

Un aspecto de elevada importancia al simular descargas atmosféricas en el conductor de fase es la terminación de la línea de transmisión con el fin de evitar las reflexiones. En este trabajo se utilizará la alternativa de colocar un tramo de línea largo de 5 km. que aunque presenta ciertos problemas de memoria y velocidad de ejecución de la simulación es el más adecuado para este caso.

### SIMULACIÓN Y RESULTADOS

#### DESCARGA EN LA TORRE DE TRANSMISIÓN

Cuando un rayo cae en el cable de guarda, parte de la corriente viaja a través de este hacia las torres adyacentes y la otra parte viaja a través de la torre, originando sobrevoltajes tanto en las crucetas como en la

base de la torre debido a la resistencia de pie de torre. En la figura 5 se muestra la forma de onda del sobrevoltaje producido por una descarga atmosférica de 1.2/50  $\mu$ s y 25 kA en el tope o parte superior de la torre de transmisión.

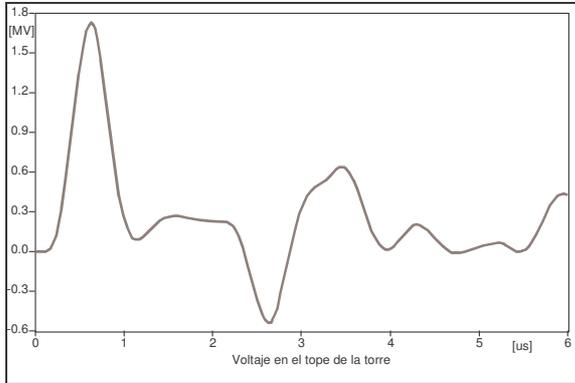


Figura 5: Voltaje en el tope de la torre

La descarga produce también sobrevoltajes inducidos por la descarga en cada una de las fases. La presencia de estos sobrevoltajes pueden provocar descargas inversas desde la torre al conductor de fase conocidas como "backflashover" si el voltaje entre la cruceta y el conductor de fase superan el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores. Los voltajes provocados son mayores en la torre de impacto y van atenuándose a medida que viajan a lo largo de la línea hasta que el efecto de la descarga desaparece al cabo de ciertos vanos.

### DESCARGA EN EL CONDUCTOR DE FASE

Las descargas que llevan corrientes de baja intensidad pueden provocar falla en el apantallamiento e impactar en el conductor de fase. Las descargas que impactan los conductores de fase producen sobrevoltajes en la línea y de acuerdo a su magnitud pueden provocar una falla del aislamiento desde el conductor de fase hacia la torre de transmisión.

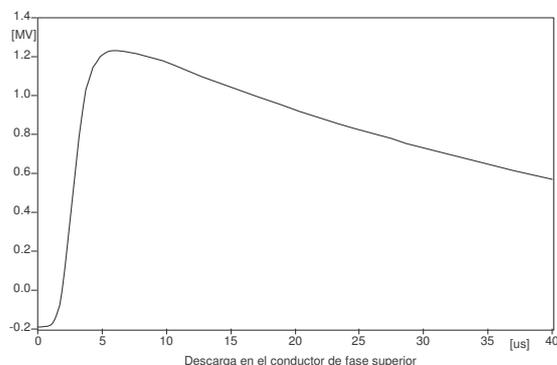


Figura 6: Descarga en el conductor de fase.

La figura 6 presenta el voltaje en la torre de impacto producido por una descarga directa al conductor de fase superior de 6kA y 6/50  $\mu$ s.

La diferencia entre una descarga en el cable de guarda y una descarga en el conductor de fase radica en que en el primer caso la onda viajera encuentra varias discontinuidades que hacen que la onda vaya sufriendo distorsiones y atenuación dependiendo de los coeficientes de reflexión y que su efecto desaparece al cabo de ciertos vanos, mientras que en el segundo caso, la onda no encuentra discontinuidades a lo largo de la línea haciendo que la única variación presente sea un amortiguamiento debido a la parte resistiva de la línea.

### DESCARGA EN LA MITAD DEL VANO

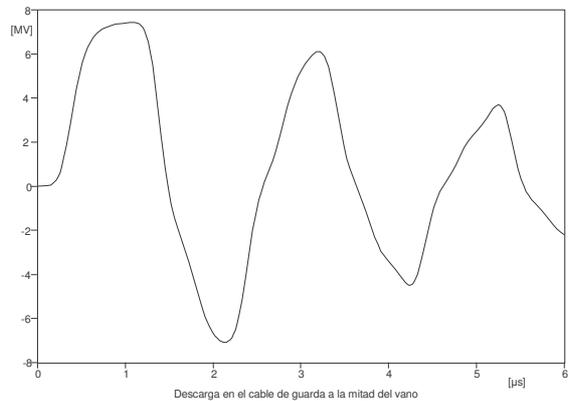


Figura 7: Descarga en la mitad de un vano

La mayoría de las descargas atmosféricas no impactan directamente en la torre sino en algún punto del vano, desde el cual la onda de corriente emprende el viaje hacia las torres adyacentes. El sobrevoltaje ocasionado en el punto de incidencia alcanza algunos Megavoltios (figura 7), sin embargo, el valor pico de la onda de sobrevoltaje que llega a la torre es menor al voltaje producido si la descarga se produciría directamente en la torre.

### ANÁLISIS DE SENSITIVIDAD

Como se ha expuesto anteriormente, los parámetros que caracterizan a una descarga atmosférica son de naturaleza aleatoria, por lo tanto, también lo son los sobrevoltajes producidos por este fenómeno. Con el fin de determinar aquellos parámetros de mayor influencia en los sobrevoltajes de origen atmosférico se realiza un estudio de

sensibilidad de dichos parámetros. Para el análisis de sensibilidad se consideran los siguientes parámetros:

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

**SENSITIVIDAD DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE DEL RAYO**

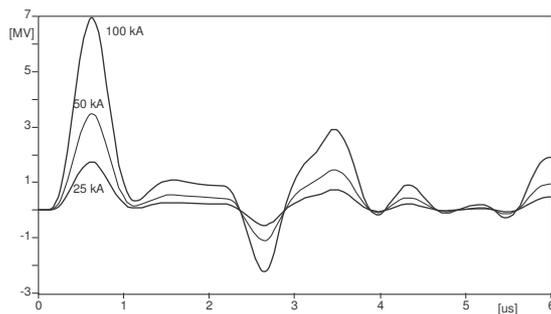


Figura 8: Voltaje para descarga en el cable de guarda para descargas con distinto valor de corriente.

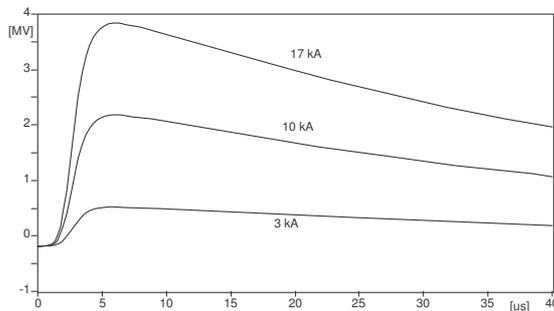


Figura 9: Voltaje para descarga en el conductor de fase para descargas con distinto valor de corriente

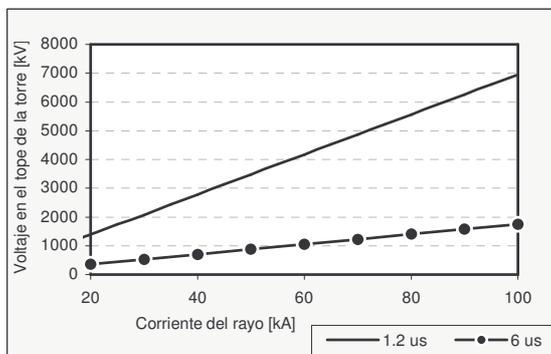


Figura 10: Sensibilidad de la corriente del rayo para descargas con distinto frente de onda

La relación entre la corriente de la descarga y el sobrevoltaje provocado es directa, es decir, mientras mayor es la corriente de rayo mayor será el voltaje producido. Las figuras 8 y 9, muestran la forma de onda del voltaje para distintos valores de corriente del rayo.

La figura 10 presenta la sensibilidad de los voltajes máximos para frentes de onda de 1.2 y para 6  $\mu$ s. Como puede verse el voltaje es mayor cuando se tiene un menor frente de onda.

**SENSITIVIDAD DEL FRENTE DE ONDA**

El frente de onda es un parámetro muy importante en la generación de estos sobrevoltajes. El frente de onda influye no solo en el valor pico del sobrevoltaje sino también en la formas de onda, figura 11, las corrientes con frente de onda menor producen mayor número de reflexiones y por lo tanto la onda es más distorsionada.

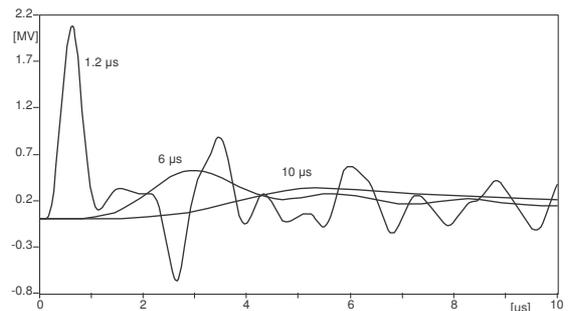


Figura 11: Voltaje para descarga en el cable de guarda para descargas con distinto valor de frente de onda

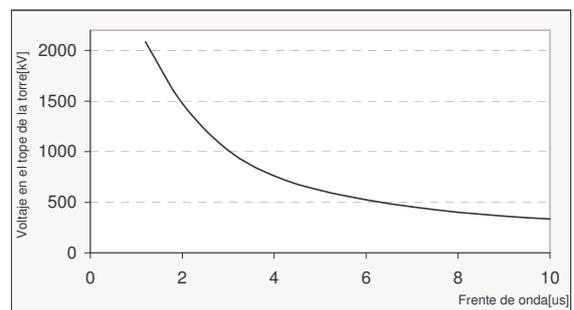


Figura 12: Sensibilidad del frente de onda

La figura 12 muestra que la característica es inversa, es decir, a menor frente de onda mayor será el valor máximo del voltaje producido en la torre de transmisión. Este hecho se debe a que si el tiempo de frente de onda es menor, entonces el pico de la onda de corriente se producirá mucho más rápido y la reflexión de la base de la torre no es lo

suficientemente rápida para evitar el incremento del voltaje.

Para descargas en el conductor de fase, el valor máximo del sobrevoltaje no es mayormente influenciado por el frente de onda, sino que, a mayor frente de onda el sobrevoltaje tarda más tiempo en alcanzar el máximo.

### SENSITIVIDAD DEL TIEMPO DE COLA

Otro de los parámetros del rayo es el tiempo de cola de la corriente del rayo, en la figura 13 se puede observar como varía el voltaje máximo en función del tiempo de cola. El voltaje es mayor a mayor tiempo de cola. Si bien es cierto, el voltaje se incrementa al incrementarse el tiempo de cola, este incremento es menos representativo en comparación con los dos parámetros analizados anteriormente.

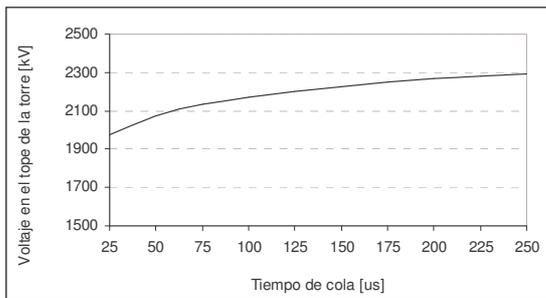


Figura 13: Sensibilidad del tiempo de cola

### SENSITIVIDAD DE LA RESISTENCIA DE PIE DE TORRE

De todos los parámetros en análisis, quizá sobre el único que se puede tener cierto control es la resistencia de pie de torre. El sobrevoltaje producido en la torre es directamente influenciado por este parámetro debido a la reflexión producida en la base de la torre alcanza a modificar la onda de sobrevoltaje mucho más rápido que las ondas reflejadas provenientes de las torres adyacentes.

Las figuras 14 y 15 muestran la influencia del valor de la resistencia de pie de torre en el valor máximo del voltaje en el tope de la torre, donde se puede notar que a mayor resistencia de pie de torre mayor es el voltaje producido. Esta influencia no es tan representativa para ondas con frentes de onda pequeños mientras que para frentes de onda mayores la variación de voltaje es mucho más notoria lo que hace imprescindible mantener valores de resistencia de pie de torre pequeños.

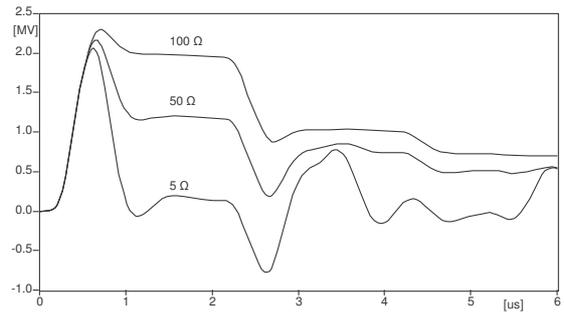


Figura 14: Voltaje para descarga en el cable de guarda para descargas con distinto valor de resistencia de pie de torre y frente de onda 1.2 us.

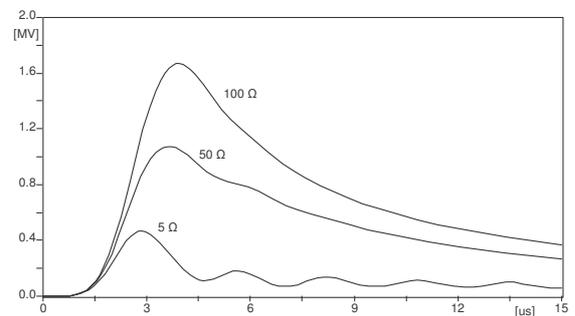


Figura 15: Voltaje para descarga en el cable de guarda para descargas con distinto valor de resistencia de pie de torre y frente de onda 6 us.

### APLICACIÓN A LA LÍNEA SANTA ROSA POMASQUI

La línea de transmisión Santa Rosa-Pomasqui a 230 kV. entró en operación en el mes de marzo del 2003. Tiene un total de 81 torres de transmisión repartidas a lo largo de los 46 km. de su recorrido con altitudes entre los 2400 y 4200 msnm. Es una línea de doble circuito que conecta las subestaciones de Santa Rosa y Pomasqui.

Con el modelo implementado puede realizarse el análisis para cualquier torre de la línea de transmisión. El análisis de la línea se realiza para el tramo construido sobre los 4000 msnm. En la simulación pueden determinarse las características de las descargas atmosféricas que pueden impactar en el cable de guarda de la línea de transmisión sin causar falla de aislamiento, tabla 2. También en la simulación se pueden obtener los voltajes inducidos en cada una de las fases y el voltaje que tiene que soportar la cadena de aisladores.

Tabla 2: Resultados de la simulación

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

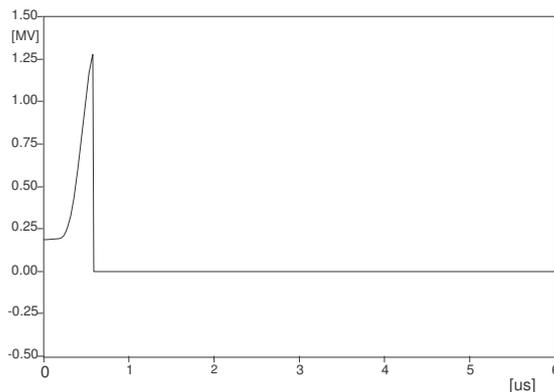


Figura 19: Voltaje en la cadena de aisladores de la fase A

Para valores mayores de corriente de rayo o valores menores de frente de onda de los presentados en la tabla 2 se esperaría una falla por descarga inversa (backflashover). La figura 19 muestra el voltaje en la cadena de aisladores de la fase superior para una descarga atmosférica con una corriente de rayo de 22 kA. y un frente de onda de 1.2 μs, es decir, para el caso en que la corriente del rayo ha superado el valor indicado en la tabla 2 y por ende provoca una falla del aislamiento. Como puede observarse el voltaje en la cadena se incrementa hasta que supera el nivel de aislamiento de aproximadamente 1200 kV. y por consiguiente se produce la descarga inversa.

En el caso de la descarga en el conductor de fase, falla de apantallamiento, las simulaciones determinan que la línea puede soportar descargas de hasta aproximadamente 5.9 kA sin provocar falla del aislamiento, es decir, descargas con corrientes superiores 5.9 kA. provocan voltajes que superan el nivel de aislamiento de la línea y consecuentemente una descarga fase tierra.

### CONCLUSIONES

- Una descarga atmosférica, al impactar en una línea de transmisión, provoca un sobrevoltaje

transitorio que en general tiene una duración de alrededor de 40 μs. siendo mayor el tiempo de duración del transitorio si la descarga ocurre en el conductor de fase.

- Si la descarga impacta en el cable de guarda o en la torre de transmisión, el efecto provocado por la onda viajera, desaparece al cabo de algunos vanos, debido a que las reflexiones producidas en las crucetas de la torre y la resistencia de pie de torre, contribuyen a la atenuación de la onda.
- El valor máximo o pico del sobrevoltaje provocado por una descarga en el cable de guarda o en la torre, es determinado por las reflexiones en la torre de impacto (crucetas y resistencia de pie de torre). Las reflexiones en las torres adyacentes a la torre de impacto no influyen en el valor máximo del sobrevoltaje, pues estas retornan al sitio de impacto después que el sobrevoltaje ha alcanzado su valor máximo.
- La magnitud de la corriente del rayo, es el parámetro de mayor influencia en el valor máximo de los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas. El estudio de sensibilidad determinó que a mayor corriente de rayo mayor es el valor máximo del sobrevoltaje en la torre.
- El frente de onda de la corriente de una descarga atmosférica, es un parámetro muy influyente en los valores máximos de los sobrevoltajes, si la descarga se produce en el cable de guarda o la torre. La relación entre frente de onda y el sobrevoltaje es inversa, es decir, descargas con frentes de onda pequeños (menores a 2 μs.) producen voltajes mucho más elevados que descargas con frentes de onda grandes (mayor a 6μs.).
- El valor de la resistencia de pie de torre resulta determinante, pues el sobrevoltaje máximo es establecido por las reflexiones de la onda en la base de la torre, por lo tanto, un valor bajo en la resistencia contribuye a una disminución significativa en la magnitud del voltaje máximo que aparece en la torre.
- En lo que a la línea Santa Rosa–Pomasqui se refiere, descargas atmosféricas con características cercanas a los valores más probables (25 kA. y 6 μs. de frente de onda), no producen fallas de aislamiento pues los voltajes originados alcanzan aprox. 500 kV. cuyo valor es menor al nivel de aislamiento de la línea.

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

## BIBLIOGRAFÍA

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

Transients. IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen 11, Número 1, Enero 1996.

- [11] CHISHOLM, W.A; CHOW, Y.L; SRIVASTAVA, K.D. Lighting Surge Response of Transmission Towers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, Septiembre, 1983.
- [12] ANDERSON, J. A. Lightning performance of transmission lines.
- [13] T&D COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. Draft Full-Use Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead distribution Lines. Febrero, 2003.
- [14] IITREE.ING.UNLP.EDU.AR/ESTUDIOS/C AUE. Sitio Oficial del Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP

### Kléber Sebastián Vásquez Ocaña



Nació en Quito, en 1979. Sus estudios secundarios los realiza en el Instituto Nacional Mejía. En el 2003 obtiene el título de ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional.

Actualmente se desempeña en la Supervisión de Operación de la Compañía Nacional de Transmisión de Eléctrica, TRANSELECTRIC S.A.

### Luis Ruales Corrales

Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional EPN de Quito, 1978; Egresado del PSEC de GE, Schenectady, NY. Profesor Principal a tiempo parcial de la EPN. Jefe de Sistemas de Potencia y Protecciones de la División de Ingeniería Eléctrica del INECEL hasta 1999; Responsable del Área de Planificación y Estudios de TRANSELECTRIC y desde el mes de mayo del presente año ejerce las funciones de Vicepresidente Técnico de la misma institución.