

# Sobretensiones en PAT por Descargas Atmosféricas Estadísticas

## Overvoltages in Grounding Systems due to Lightning Statistics

Presentación: 13 y 14 de septiembre de 2023

### Walter Gimenez

Área de Sistemas de Potencia, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe

wgimenez@frsf.utn.edu.ar

### Resumen:

Cuando se realiza un estudio de sobretensiones provocadas por una descarga atmosférica, es usual emplear una magnitud de corriente de descarga de valor unitario lo que arroja como resultado solo un valor de sobretensión. Si se desea otro valor de corriente se repite el proceso y así hasta satisfacer el alcance del estudio. El trabajo propone una nueva forma de desarrollar estos estudios incorporando criterios estadísticos para representar la descarga atmosférica la cantidad de veces que se necesite, generando aleatoriamente todos los valores característicos del rayo. Desarrolla un caso real a modo de ejemplo resumiendo mil simulaciones y finaliza sintetizando las principales ventajas del método y sus potencialidades.

**Palabras claves:** Sobretensión, puesta a tierra, descargas atmosféricas.

### Abstract:

When carrying out a study of overvoltages caused by lightning, it is usual to use a discharge current magnitude of unity value, which results in only one overvoltage value. If another current value is desired, the process is repeated and so on until the scope of the study is satisfied. This work proposes a new way of developing these studies incorporating statistical criteria to represent the lightning, the number of times it is needed, randomly generating all the characteristics values of lightning. It develops a real case as an example summarizing a thousand simulations and ends by synthesizing the main advantages of the method and its potential.

**Keywords:** Overvoltage, grounding systems, lightning.

## Introducción

La simulación de un fenómeno transitorio requiere de una correcta representación de cada componente de la red válida para un amplio rango de frecuencias que van desde DC hasta varios MHz. Así, una buena representación de cada componente en este amplio rango de frecuencias es prácticamente imposible. Para subsanar este inconveniente, la práctica usual es, primero, determinar cuál es el rango de frecuencias donde se manifiesta el fenómeno a estudiar y luego representar los elementos con sus particularidades propias a esa frecuencia, siguiendo las recomendaciones de las principales asociaciones de especialistas (BPA, 1994; CIGRE, 1991).

Tipo de Perturbación	Gama de Frecuencias
Ferrorresonancia	0,1 Hz – 1 kHz
Pérdida de carga	0,1 Hz – 3 kHz
Despeje de faltas	50/60 Hz – 3 kHz
Conexión de líneas	50/60 Hz – 20 kHz
TTR – Falta kilométrica	50/60 Hz – 100 kHz
Cebados y recebados	10 kHz – 1 MHz
Descargas atmosféricas	10 kHz – 3 MHz
Maniobras en SF6	100 kHz – 50 MHz

Figura 1. Rango de frecuencias según el tipo de perturbación

También es muy útil saber que, cuanto más cerca se esté del lugar físico a representar, más exacta y robusta deberá ser la modelización de cada elemento, ya que la calidad en su representación es directamente proporcional al resultado a lograr. Modelos simples son muy fáciles de construir pero arrojan resultados aproximados que pueden ser aceptables según la calidad del trabajo que se necesite; en cambio, la elección de un modelo matemático detallado exige una cantidad y calidad de datos y gran esfuerzo en su construcción, que solo se justifica si está directamente involucrado con el fenómeno a estudiar (Greenwood, 1990; Martínez, 2020).

Actualmente se reconocen cuatro tipos de rayos posibles (Hilemann, 1998) –descendente, ascendente, polaridad positiva y negativa – pero la estadística y registros indican que en el 90% de los casos se trata de descargas descendentes de polaridad negativa que involucran varias descargas consecutivas espaciadas algunos milisegundos. Escogiendo solo el primer impacto, existe un conjunto de parámetros básicos que son necesarios definir a la hora de representar una descarga atmosférica teórica de forma tradicional, a través de su “forma de onda” que son:

- ✓ Amplitud del primer pico de corriente.
- ✓ Tiempo de cresta.
- ✓ Tiempo de semicola.
- ✓ Duración total.

Aunque en la realidad, su valor máximo y su forma de onda son propias de cada descarga y varían enormemente entre cada una de ellas. Por esto, es necesaria la utilización de otras herramientas como pueden ser las estadísticas que permiten a partir de una muestra aleatoria simple representada por su valor medio, la dispersión y su distribución de probabilidad, representar mejor la situación real.

### La descarga atmosférica teórica

Cuando se trata de representar una descarga atmosférica, el ATP/EMTP (EMTP US, 1990) posee distintas herramientas que han ido evolucionando con los años a medida que se comprendía más el fenómeno del rayo, se disminuían los tiempos de cálculo y se ampliaba la capacidad de programación en los lenguajes informáticos. Las versiones más actuales del programa incorporan distintos tipos de fuentes de corriente y de tensión, capaces de representar la descarga a través de funciones propias cuando en sus comienzos solo se podía usar una rampa de subida con una rampa de bajada inmediatamente (Fuente Type 13) luego de alcanzar su valor máximo. Luego se fueron incorporando otras posibilidades más elaboradas y específicas de fuentes (Fuentes Type 15) como la doble rampa, tipo Heidler o Stadler o CIGRE (BPA, 1994):

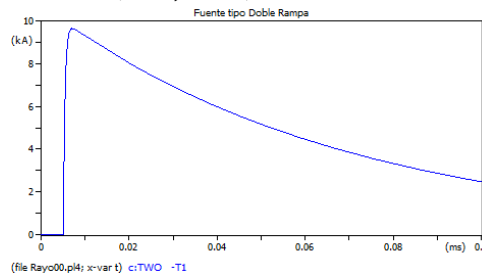


Figura 2. Ejemplo de una fuente Type 15, doble rampa.

Cada una de ellas tiene sus propias ventajas e inconvenientes, adictos y detractores, pero todas ellas son sumamente útiles para analizar casos sencillos y tradicionales de descargas atmosféricas. En el ejemplo siguiente se ha representado una línea monofásica con parámetros distribuidos con sus torres respectivas de 24 m de altura y separadas 300 m. La secuencia del evento es: la descarga atmosférica representada con una fuente de corriente tipo CIGRE impacta en el hilo de guardia de la primera estructura y luego la onda de tensión, a consecuencia de la impedancia propia del conductor, viaja por la línea aérea provocando sobretensiones e infinidad de ondas directas y reflejadas que se crean en cada unión o cambio de impedancia (Greenwood, 1994; IEEE, 1996, IEEE 1997).

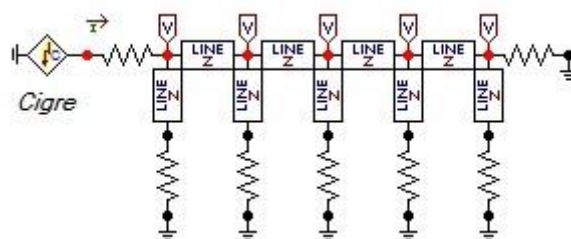


Figura 3. Representación básica de una línea aérea para estudios en alta frecuencia.

Si bien el ejemplo es básico, toda simulación siempre comienza por un caso simple donde se pueda interpretar correctamente el efecto a estudiar, se verifique que la teoría se cumpla, que los valores de tensiones y corrientes respondan a los conocimientos teóricos y que resulten satisfactorias todas las comprobaciones posibles (tiempos de tránsito, pendientes, relaciones de impedancia, etc.). Luego, paso a paso se mejora la representación incorporando modelos más precisos y sofisticados. Recordando siempre que, cuánto más cerca se esté del lugar físico a representar, más exacta y robusta deberá ser la modelización de cada elemento, ya que la calidad en su representación es directamente proporcional al resultado a lograr.

## La descarga atmosférica real

Recientemente, la Sociedad Meteorológica Americana (AMS) confirmó dos hechos singulares: el primero de ellos fue el registro del rayo de mayor longitud (709 km) ocurrido al sur de Brasil y el de mayor duración en tiempo (17,102 segundos aproximadamente) localizado sobre el Río de la Plata (AMS, 2022) y abarca desde el centro sur de la Provincia de Entre Ríos hasta el Partido de General Lavalle en la Provincia de Buenos Aires, a 500 km aprox.

Entonces la pregunta surge inmediatamente: ¿Cómo se representa esta situación? ¿Qué tan probable es que suceda? ¿Cuántas descargas sucesivas existieron? ¿Cada cuántos años se produce? ¿Es válido utilizar una única descarga estandar para representar semejante situación? ¿Cómo se pueden incorporar a la simulación tantas variables? La respuesta es incorporando técnicas estadísticas a las simulaciones matemáticas.

## La descarga atmosférica estadística

Según (Hilemann, 1998) que cita estudios anteriores (Berger y otros) la distribución estadística de todos los parámetros de las descargas se pueden aproximar a una distribución logarítmica normal cuya función de densidad de probabilidad está representada por la siguiente relación.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot x \cdot \vartheta_{\ln x}} \exp\left[-0,5\left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\vartheta_{\ln x}}\right)^2\right] \quad (1)$$

siendo  $\vartheta_{\ln x}$  la desviación estándar del  $\ln x$  y  $X_m$  la mediana de  $x$ .

Además, resume valores estadísticos para la primera descarga y las subsiguientes de la forma siguiente, donde se resalta solo el valor máximo de la primera cresta de 31,1 kA.

Parameter	First stroke		Subsequent strokes	
	Median, $M$	$\beta$ , log std. deviation	Median, $M$	$\beta$ , log std. deviation
Front, $\mu\text{s}$				
$t_{10/90}$	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_{30/90}$	3.83	0.553	0.67	1.013
$t_m = \text{min eq. front}^a$	1.28	0.611	0.308	0.708
$t'_m = \text{min eq. front}^b$	1.14	0.578	0.296	0.708
Steepness, kA/ $\mu\text{s}$				
$S_{10/90}$	5.0	0.645	15.4	0.944
$S_{30/90}$	7.2	0.622	20.1	0.967
$S_{10}$	2.6	0.921	18.9	1.404
$S_m$	24.3	0.599	39.9	0.852
Crest, kA				
$I_c$ , initial	27.7	0.461	11.8	0.530
$I_c$ , final	31.1	0.484	12.3	0.530
Initial/final	0.9	0.230	0.9	0.207
Charge, C	4.65	0.882	0.938	0.882
Tail, $\mu\text{s}$	77.5	0.577	30.2	0.933
$\int I^2 dt$ , (kA) $^2$ s	0.057	1.373	0.0055	1.366
Inter-stroke interval, ms				
			1st to 2nd stroke, $M = 45$ ms	
			2d stroke onward, $M = 35$ ms	
			$\beta = 1.066$ for both	
Flash duration, ms, excluding single stroke flashes			$M = 200$	$\beta = 0.69$

Figura 4. Parámetros para una distribución logarítmica normal (Hilemann, 1998)

Si se aceptan los valores numéricos anteriores y teniendo su relación estadística propuesta, entonces será posible si se generan variables aleatoriamente, “crear” tantas descargas atmosféricas como se necesiten. Entonces, para incorporar a los estudios de simulación una gran dispersión de probabilidades de formas de descargas atmosféricas habrá que generar variables aleatorias y una de las muchas posibilidades es utilizar el “Método de Montecarlo” por ejemplo, que es un método estadístico no determinístico, que permite resolver problemas complejos a través de la generación fortuita de variables involucradas en un suceso.

Para encontrar la frecuencia y distribución de los valores máximos de corriente de descargas según una distribución Log-Normal, cuya función densidad de probabilidad (1) está caracterizada por Mediana ( $P_{50}$ ) igual a 31,1 kA y una desviación estándar logarítmica igual a 0,484, según Figura 4; se pueden generar 1000 valores generados aleatoriamente y se agrupan los resultados de frecuencia en función de la intensidad, por ejemplo, como se muestran en la Figura 5; donde se aprecia que una descarga cuya magnitud máxima sea de 20 kA tiene una probabilidad mayor de ocurrencia que otra de 100 kA cuya probabilidad sea de 5 veces en mil descargas.

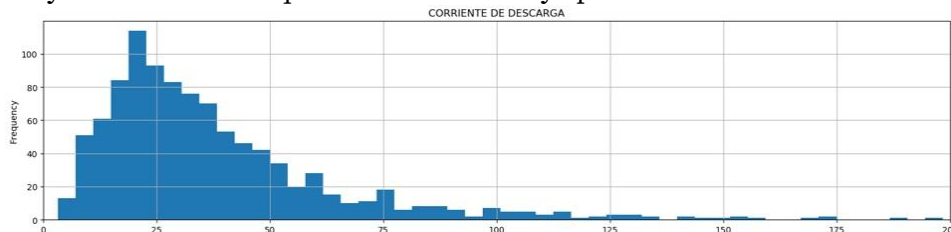


Figura 5. Histograma de la corriente de descarga máxima.

De la misma forma y siempre siguiendo la misma función de probabilidad (1) pero esta vez para el tiempo de frente de onda  $t_{30/90}$  con valor medio igual a 3,83  $\mu\text{seg}$  y desviación de 0,553; se tiene la Figura 6 donde predominan tiempos de entre 3 y 4  $\mu\text{seg}$  con frecuencias alrededor de 70 veces. Seguidamente, resta determinar la máxima derivada de la corriente inicial que, con valores de 7,2 kA/ $\mu\text{seg}$  de mediana y 0,622 de desviación, se calculan y muestran en la Figura 7, resultando valores próximos a 20 kA/ $\mu\text{seg}$  para 60 veces en los mil casos generados.



Figura 6. Histograma del tiempo de frente de onda.

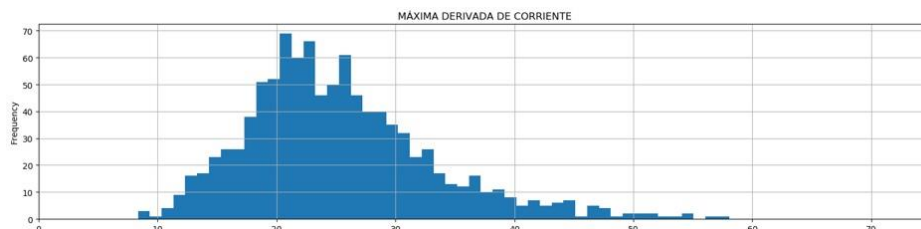


Figura 7. Histograma de la máxima derivada de corriente.

## Representación de un caso real

Cuando se realiza un estudio con descargas es importante alcanzar un buen grado de desarrollo en la modelización de los componentes involucrados, en especial las estructuras donde impacta la descarga atmosférica. Para esta tarea, existe abundante bibliografía que ayuda en la representación de cada elemento (EPRI, 1995; IEEE, 1996; Martínez, 2010).

Resumiendo, los muchos pasos, verificaciones y comprobaciones realizadas, una doble línea aérea se puede simular mediante un modelo matemático con parámetros distribuidos constantes con la frecuencia de 500 kHz contemplándose el efecto pelicular y se representa de forma unitaria para cada vano, incluso sus hilos de guardia. Las estructuras soportes se simulan como si fuera un conductor simple representado por una línea de parámetros distribuidos con su tiempo de tránsito igual al cociente entre la altura de la torre y una velocidad de onda proporcional a la velocidad de la luz con una impedancia característica menor a 300 Ohms; al igual que cada tramo de cruceta o brazos soportes. Cada cadena de aisladores se representa con una capacitancia de 80 pF en paralelo con un interruptor controlado por tensión según una lógica simple que lo cierra para simular el contorno de la cadena.

Por su parte, la puesta a tierra, al ser ejecutada con jabalinas, se modela con una resistencia no lineal dependiente de la corriente, ya que su valor varía desde uno inicial de 150 Ohms aproximadamente a menos de la mitad para un terreno de resistividad próxima a 100 Ohm-m. Para finalizar, en la parte superior del agarre del

cable de guardia se conecta una fuente de corriente que representa la descarga en sí objeto de este trabajo y se completa con tantos voltímetros y amperímetros se deseen distribuidos convenientemente.

## Resultados

Si se quisiera conocer el valor de sobretensión en la bajada de puesta a tierra de la estructura donde impactó la descarga de 31,1 kA, se tendría una sola curva continua en función del tiempo como las tradicionales, donde, a fines prácticos solamente interesa conocer el pico de la mayor magnitud de tensión y, tal vez su forma general de la sobre tensión; pero siempre solo para este valor de descarga. Para cualquier otra variable a estudiar, habría que reproducir el caso manualmente y así sucesivamente como tantas opciones se quieran estudiar.

En cambio, si se incorpora un análisis estadístico como el desarrollado anteriormente, se pueden realizar 100, 1000 o 10000 impactos atmosféricos y el único “costo” serían algunos minutos más de “trabajo” de la computadora. Para el caso de utilizar mil descargas, ya no se puede analizar cómo se hizo anteriormente a través de una curva continua; hay que realizar un análisis estadístico de los resultados y una forma posible es usar percentiles agrupando a voluntad los resultados en grupos.

Otra posibilidad es generar una tabla con el resultado de la variable seleccionada para cada número de descarga y utilizar tantas descargas atmosféricas como se desee. Procesando adecuadamente los resultados, se pueden obtener, por ejemplo nubes de puntos de valores que facilitan la interpretación todos los resultados.

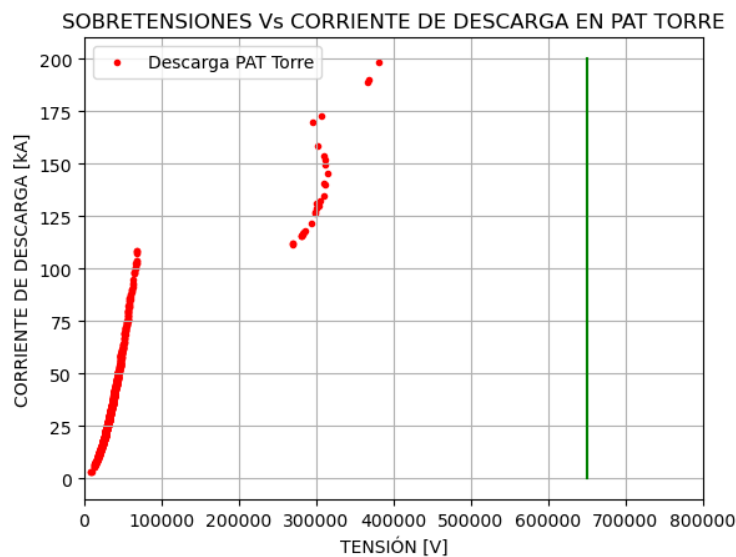


Figura 8. Representación por nube de puntos de las sobre tensiones en función de las intensidades de las descargas.

En la figura anterior, es posible observar sobretensiones en el chicote de conexión de la jabalina de puesta a tierra en la estructura donde impactó la descarga atmosférica. Se puede ver que la gran mayoría de descargas de hasta 110 kA generarán sobretensiones menores a 80 kV en la base y que solo muy pocas y de enorme amplitud generarán elevaciones de tensión de casi 400 kV. También se aprecia un salto en la continuidad de puntos que indica el valor de la intensidad de la descarga que provoca el contorneo de las cadenas de aisladores algo que, con la metodología tradicional se realiza mediante aproximaciones sucesivas con un gran incremento en el tiempo total del estudio.

## Conclusiones

La realización de estudios eléctricos confiables que involucren descargas atmosféricas implica obligatoriamente incorporar la aleatoriedad del fenómeno. Ya no es suficiente utilizar simplificaciones o estimaciones para su modelización matemática como en los estudios convencionales. Usar fuentes que involucren funciones propias, exponenciales u otras, facilitan la visualización del rayo pero siempre tratan de representar solo una descarga que, en la mayoría de los casos, resulta implícitamente aceptada como representativa del fenómeno pero muy alejada de la realidad como se demostró con el megarrayo registrado.

En este trabajo se presentó una metodología que involucra cientos o miles de descargas cuya forma general responde a las propuestas tanto por IEEE como por CIGRE, generando variables aleatorias utilizando el Método de Montecarlo incorporándolo al programa de simulación. Esta enorme cantidad de resultados disponibles solo pueden analizarse estadísticamente como lo realizado anteriormente utilizando, por ejemplo, percentiles para

graficar la posición de cada dato. Otro punto importante, que brinda este tipo de análisis incorporar la probabilidad de ocurrencia de casos extremos como son una descarga con corriente mínima, un rayo “chico” o un megarrayo como el descrito en el trabajo.

Una ventaja adicional es que, si se conoce el nivel isocerámico del terreno por donde cruza una línea de alta tensión, se podría estudiar todas las descargas probables que pueden impactar sobre la instalación durante toda su vida útil; lo cual agrega un eje de “tiempo” en los estudios de simulación.

Realizar histogramas, frecuencias, nube de puntos, analizar tendencias o aproximaciones solo se pueden realizar teniendo una gran cantidad de datos que serán los deseados por el profesional; solo a modo de ejemplo, este trabajo de simulación se realizó variando la cantidad de descargas desde 100, 500, 1000, 5000 y 10000 descargas atmosféricas para determinar luego la mejor relación tiempo versus precisión.

## Referencias

American Meteorological Society (2022), DOI 10.1175/BAMS-D-21-0254.1. Bulletin of AMS.

Bonneville Power Administration (1994). *EMTP Theory Book*. Portland, Oregon, USA. BPA.

CIGRE (1991). Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltage and Insulation Coordination). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. Paris, France. CIGRE Press.

Electric Power Research Institute (2005). *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above*. Palo Alto, California, USA. EPRI Ed.

EMTP User Group (1990). *ATP Rule Book*. West Linn, Oregon, USA. Can / Am Group.

Greenwood, Allan. (1990). *Electrical Transient in Power Systems*. Troy, Nueva York. John Wiley and Sons, Inc

Hilemann, Andrew R. (1998). *Insulation Coordination for Power System*. New York, USA. Marcel Dekker

IEEE (1997). *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines - IEEE Std 1243-1997*. Nueva York, USA. IEEE Press.

IEEE (1996). IEEE Very Fast Front Transient Task Force of Working Group on Modelling an Analysis of Systems Transients. *Modeling guidelines for very fast front Transients*. Nueva York, USA. IEEE Press.

Martinez Velasco, Juan (2010). *Power System Transients, Parameter Determination*. USA. CRC Press.

Martinez Velasco, Juan (2020). *Transients Analysis of Power Systems*. USA. CRC Press.