



Análisis de las Sobretensiones por Descargas Atmosféricas en Líneas de Distribución

Felipe Alegre Chamorro ^{a*}, Edwyn J. Hartel ^a, Roberto J. Cabral ^{a, b}

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *LIDEE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: felipesantiago.ach@gmail.com, edwynjavierhartel@gmail.com, robert_rjc@hotmail.com

Resumen

Las descargas atmosféricas son causantes del gran parte de las fallas ocurridas en las líneas aéreas de distribución, dato que preocupa a las concesionarias de energía debido a que demanda acciones correctivas inmediatas y consecuencias económicas, pero que afecta directamente al consumidor debido al desabastecimiento de energía que produce. Esta problemática persiste principalmente por dos motivos, en principio por la naturaleza del fenómeno en cuestión, ya que medir diferentes parámetros relacionados a la descarga atmosférica es una tarea muy difícil aun hoy en día y por otro lado el alto costo económico relacionado a las protecciones contra estas. El objetivo de este trabajo es exponer el estado del arte de acuerdo a diversas referencias bibliográficas para caracterizar correctamente el fenómeno de sobretensión por una descarga atmosférica. Con las cuales se podrán identificar tramos de las líneas de distribución más vulnerables a sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, principales causantes de fallas en los sistemas eléctricos de distribución y proyectar a futuro posibles soluciones.

Palabras Clave – *Caracterización del rayo, Descargas atmosféricas, Líneas de media tensión, Líneas aéreas, Líneas de distribución, Sobretensiones impulsivas.*

1 Introducción

Las descargas atmosféricas han sido de interés desde incluso antes que se conozcan los principios de funcionamiento de la electricidad y aún más en tiempos actuales en los que representan un gran problema para el sistema de protección utilizado por las concesionarias de energía y para mantener el abastecimiento continuo del servicio a la población en general. Sin embargo, debido a su naturaleza estas son muy difíciles de observar, ya que no se puede detectar con exactitud el momento o lugar donde se producirá una descarga, y cuando es localizada para ser medida, debido a su gran intensidad en corta duración es difícil obtener mediciones con precisión. Aun así, con todas las dificultades que presenta caracterizar el comportamiento de una descarga, a lo largo de los años se fue recopilando información acerca de estas la cual en este artículo buscaremos sintetizar y encauzar para lograr un análisis referido al efecto que tienen sobre las líneas aéreas de distribución eléctrica y como optimizar los sistemas de seguridad para evitar desconexiones indeseadas.

Las desconexiones debido a fallas por descargas atmosféricas son uno de los mayores inconvenientes que se presentan en las líneas de distribución, esto se debe a su bajo nivel de aislación y al elevado costo que presentan los sistemas de protección haciendo inviable su implementación a

lo largo del alimentador en líneas de media y baja tensión. Esta realidad se ve afectada directamente por el número de descargas anuales que se tiene en una región determinada, el análisis realizado en este artículo se enfocará en el noreste argentino (NEA) y principalmente en la provincia de Misiones, siendo esta una de las regiones del país con mayor índice cerámico (n° de descargas atmosféricas anuales por kilómetro cuadrado). Esta región presenta un número de descargas anuales por kilómetro cuadrado y una geografía similar al estado de Santa Catarina de Brasil, por lo que en muchos casos nos valdremos de estudios realizados para esta región.

Por lo mencionado anteriormente se buscará en este artículo presentar herramientas que permitan caracterizar de la manera más apropiada posible el comportamiento de las descargas, y sistemas de protección contra rayos, para así poder a futuro proyectar alternativas eficientes en el uso de recursos optimizando costo en materiales y reduciendo el número de fallas lo que representará una disminución directa en el costo de mantenimiento correctivo de las líneas eléctricas.

2 Descargas atmosféricas

El fenómeno de la descarga atmosférica se da por el rompimiento del dieléctrico del aire, que se encuentra separando dos cuerpos cargados con polaridades opuestas ocasionando entonces el surgimiento de una corriente eléctrica muy intensa. El índice encargado de medir el número de ocurrencias de descargas atmosféricas en una región es el denominado índice cerámico. La Fig. 1 describe el número de descargas por kilómetro cuadrado en una región esta figura fue generada por la NASA [6], en la cual se puede observar que la región noreste de Argentina una muy afectada por las descargas atmosféricas.

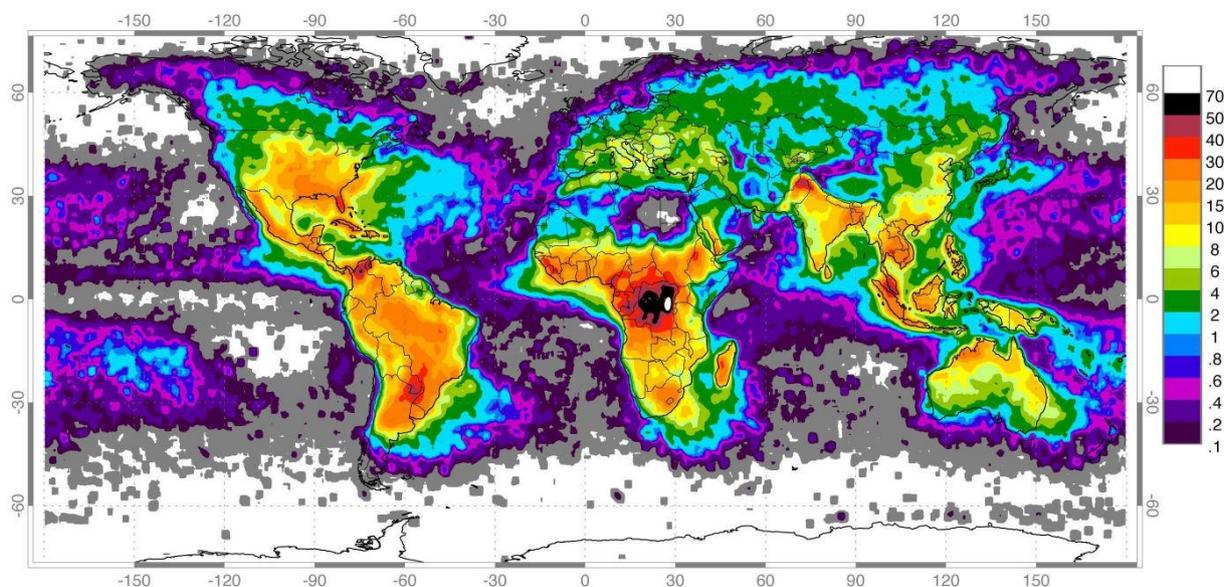


Fig. 1 Numero de descargas por km² en un año.

El conocimiento de las características y la frecuencia de ocurrencia de los rayos es fundamental para desarrollar correctamente los sistemas de protección. unos de los principales parámetros utilizado para caracterizar una descarga atmosférica son la corriente de retorno y la energía específica.

la corriente de pico I_p es obtenida a partir del campo eléctrico radiado por la descarga esto se puede observar en la siguiente ecuación.

$$I_p = -\frac{2\pi\epsilon_0 c^2 D}{\nu} E_p \quad (1)$$

Donde:

$$E = cB.$$

c = velocidad de la luz.

D = distancia de la descarga a la antena.

ν = velocidad de corriente de retorno.

B_p = valor pico de la inducción magnética.

La ecuación (1) está sujeta a errores debido a que considerar la velocidad de la corriente de retorno constante no es correcto, y debido a que las mediciones muy cercanas a la antena pueden presentar un error por la intensidad del campo, mientras que mediciones muy alejadas de la antena presentan un error debido a la resistividad del suelo. Estos errores pueden variar entre un 20 y 50%.

Si busca medir la densidad de descarga de una región lo cual se conoce como GFD por sus siglas en inglés (*Ground Flash Density*), se puede utilizar una ecuación, la cual es altamente aceptada y se presenta en (38).

$$\frac{N_c}{N_g} = 4.16 + 2.16 \cos 3\lambda \quad (2)$$

Donde:

N_c = número de descargas intra-nube y entre nubes.

N_g = densidad de descarga de la nube a tierra.

λ = latitud de la zona considerada.

El valor de N_g se puede obtener a partir de la siguiente ecuación.

$$N_g = 0.04 T_d^{1.25} \quad (3)$$

Donde T_d = índice cerámico de la región.

Por otro lado, la corriente de retorno se analiza por su probabilidad de ocurrencia la cual a partir de observaciones se pudo aproximar a una distribución logarítmica normal y se presenta en la ecuación (38) como la densidad de probabilidad de $p(x)$.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} e^{-\frac{z}{2}} \quad (4)$$

Donde z se obtiene a partir de la siguiente expresión.

$$Z = \left(\frac{\ln \left(\frac{x}{M} \right)}{\beta} \right)^2 \quad (5)$$

Donde:

M = valor mediano del parámetro.

B = desvío logarítmico.

La variación de la corriente de retorno puede ser caracterizada a partir de la ecuación (6).

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{k_s^n}{1 + k_s^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

Donde:

I_p = corriente de pico.

η = factor de corrección de la corriente de pico.

$K_s = t/t_1$.

t_1 y t_2 = constantes que definen el tiempo de subida y bajada de la corriente respectivamente.

n = factor de crecimiento de la corriente.

A partir de lo presentado anteriormente, se puede realizar un análisis profundo de estos parámetros, sin embargo, con el fin de presentar la mayor información posible en este informe, se presentará a continuación la densidad de energía de la descarga, la cual está dada por la siguiente ecuación.

$$E = \int i(t) dt \quad (7)$$

Con las ecuaciones presentadas anteriormente, se obtiene una rápida caracterización de una descarga atmosférica. Sin embargo, al analizar las fallas presentadas en la red, también se debe analizar el efecto de la descarga atmosférica en la red, por lo que a continuación se presenta algunas ecuaciones determinan su impacto.

3 Descargas directas en una red

Para determinar el impacto de una descarga atmosférica en una línea de transmisión aérea, se entiende que la descarga atmosférica inyecta a la red una corriente impulsiva, que se propaga en dos direcciones. Esto da origen a una tensión U en [kV] que puede ser representada por ecuación (38) en

la cual se debe considerar la impedancia transitoria de la red o impedancia característica de la línea conocida en la literatura como Z_0 en $[\Omega]$ y la corriente inyectada por el rayo a la red es I en $[kA]$.

$$U = \frac{Z_0 \cdot I}{2} [kV] \quad (8)$$

El cálculo de la impedancia de característica como se puede esperar, implica la utilización de la resistencia y reactancia de la línea en cuestión, y al considerar tanto su efecto capacitivo como inductivo, se obtiene la ecuación (9). Sin embargo, por las características del fenómeno a estudiar, la misma se puede simplificar como se observa en la ecuación (38), en la cual se considera que la resistencia en serie y la conductancia en paralelo, son despreciables en el análisis. Por otro lado, el valor de capacitancia e inductancia de la línea se pueden estimar a partir de la altura de conductor respecto del suelo h y el radio del conductor r , como se muestra en las ecuaciones (11) y (38).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} [\Omega] \quad (9)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (10)$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \left[\frac{H}{m} \right] \quad (11)$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln \left(\frac{2h}{r} \right)} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (12)$$

Con las ecuaciones presentadas anteriormente se analiza el fenómeno ocurrido en un conductor, pero en las líneas aéreas de transmisión se suele tener más de un conductor, por lo que a continuación es representado en la ecuación (38) el cálculo de la impedancia característica para una línea aérea de transmisión con 3 conductores.

$$Z_0(3) = \frac{1}{9} (Z_{11} + Z_{22} + Z_{33} + 2(Z_{12} + Z_{13} + Z_{23})) [\Omega] \quad (13)$$

El cálculo de Z_{nm} es la impedancia propia de cada conductor y se puede calcular a partir de la ecuación (9), por otro lado, los Z_{nm} son impedancias mutuas y deben ser calculadas con la ecuación (38) que se presenta a continuación.

$$Z_{12} = Z_{21} = 60 \cdot \ln \left(\frac{b_{12}}{a_{12}} \right) [\Omega] \quad (14)$$

En el cálculo de la ecuación (14), a_{12} corresponde a la distancia entre conductores y b_{12} a la distancia del conductor 2 a la imagen del conductor 1. Lo explicado anteriormente se detalla en la Fig. 2.

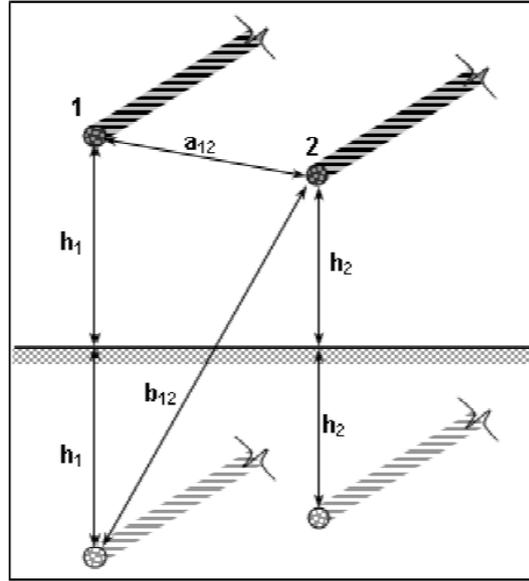


Fig. 2. Análisis de distancias entre conductores.

Para las líneas aéreas de transmisión un valor importante a determinar es y_{min} que es la distancia mínima a partir de la cual una descarga atmosférica deja de llegar al conductor y la misma puede ser determinada a partir de las ecuaciones (15) (16) y (38) de la teoría del modelo electrogeométrico.

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} [m] \quad (15)$$

$$R_s = (\alpha \cdot I_0)^\beta [m] \quad (16)$$

$$r_g = K_g \cdot r_s [m] \quad (17)$$

Para el análisis de las ecuaciones anteriores los valores de α , β , K_g pueden ser determinados a partir de la guía de la IEEE Std. 1410 [7] para redes de media tensión, la cual sugiere valores de 10; 0,65 y 0,9 respectivamente. Sin embargo, para valores de h menores de 10m se sugiere determinar el valor de K_g con la ecuación (38) recomendado por [2].

$$k_g = 0.36 + 0.17 \ln (43 - h) \quad (18)$$

4 Tensiones inducidas en la red

Muchas de las fallas producidas en las líneas aéreas son producto de descargas próximas a la red eléctrica, las cuales inducen tensiones en esta, generando fallas. Aunque no hay unanimidad en cuanto a la forma más adecuada de calcular los campos electromagnéticos [3], [4] y las tensiones inducidas, la metodología desarrollada por Rusk [5] es muy utilizada.

En el modelo de Rusk se realizan ciertas simplificaciones que se presentan a continuación.

- El tipo más común de descarga es negativa.
- La primera fase de la descarga ocurre con una velocidad insuficiente para provocar variación de campo.
- En canal de descargas posee ramificaciones, sin embargo, el modelo considera rectilíneo, vertical, sin ramificaciones y con un diámetro mucho menor a la distancia al punto de observación.
- El canal se comporta como una línea de transmisión ideal.
- La tierra se considera como un conductor perfecto (resistividad nula).

Tras estas consideraciones y considerando las ecuaciones de Maxwell, utilizada para determinar campos eléctricos y magnéticos, se realiza el análisis para detallar el modelo de Rusk. Además, se determina el valor de la densidad de carga con la ecuación que servirá para el cálculo de los campos inducidos.

$$\nabla^2 A - \mu\epsilon \cdot \frac{\delta^2 A}{\delta t^2} = -\mu J \quad (19)$$

$$\nabla^2 V - \mu\epsilon \cdot \frac{\delta^2 V}{\delta t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (20)$$

$$E = -\nabla V - \frac{\delta A}{\delta t} \quad (21)$$

$$\mu H = \nabla \times A \quad (22)$$

$$\rho_0 = \frac{I_0}{v} \left[A \cdot \frac{s}{m} \right] \quad (23)$$

Considerando las ecuaciones anteriores se puede calcular el potencial escalar y vectorial del sistema.

$$V_i = \frac{\rho_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dl}{R} \quad (24)$$

$$A_i = \frac{\mu_0 I_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dl}{R} \quad (25)$$

También a partir de (21), estableciendo los límites de integración en función del tiempo y del comportamiento del canal de descarga, lo que se refleja en las ecuaciones (26) y (27).

$$\begin{aligned}
 E_v = +30 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} & \left[\frac{1}{\sqrt{(vt-h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} \right] \\
 & + 30 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt+h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} \right] \\
 & - 30 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{(L-h)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L+h)^2 + r^2}} \right]
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$E_A = -30 \cdot I_0 \cdot \frac{v}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt-h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt+h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} \right] \tag{27}$$

Donde E_v es el campo eléctrico debido al potencial escalar y E_A es el campo eléctrico debido al potencial vectorial.

Igualando h a cero se obtienen las siguientes ecuaciones de campo eléctrico al nivel del suelo.

$$E_v = 60 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 [(ct)^2 - r^2]}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + r^2}} \right] \tag{28}$$

$$E_A = -60 \cdot I_0 \cdot \frac{v}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 [(ct)^2 - r^2]}} \right] \tag{29}$$

Por otro lado, para el cálculo del campo magnético sustituyendo (25) en (22) obteniendo la siguiente ecuación.

$$H = \frac{I_0}{2\pi r} \cdot \frac{\frac{vt}{r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 \left[\left(\frac{ct}{r}\right)^2 - 1\right]}} \tag{30}$$

Con los datos de campo proporcionados anteriormente se calcula las tensiones inducidas en las líneas de transmisión con las ecuaciones (31) (32) y (38).

$$U = U_1 + U_2 \quad (31)$$

$$U_1 = V_1(+x) + \frac{1}{2} \cdot h \cdot \frac{\delta A_i}{\delta t} \quad (32)$$

$$U_2 = V_1(-x) + \frac{1}{2} \cdot h \cdot \frac{\delta A_i}{\delta t} \quad (33)$$

Donde U es la tensión inducida total en el punto de la línea, V_1 es el potencial escalar obtenido por la ecuación (38) a partir del campo eléctrico E_v de la ecuación (29).

$$v_1 = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h \cdot \left(\frac{v}{c}\right)}{y^2 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 (ct - x)^2} \cdot \left[\frac{xtc - x^2 - y^2}{\left(\left(\frac{v}{c}\right)^2 (ct)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)(x^2 + y^2)\right)^{\frac{1}{2}}} + ct - x \right] \quad (34)$$

Para el cálculo de v_2 simplemente se sustituye el valor de x por $-x$ en la ecuación anterior.

El valor máximo de tensión inducida U es el punto más próximo de descarga ($X=0$) y está dado por la siguiente expresión.

$$U_{o \max} = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h}{y} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right] \quad (35)$$

Por otro lado, para el cálculo de una tensión inducida en un punto distante de la línea se puede utilizar la ecuación (38).

$$U_{\infty \max} = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h}{y} \quad (36)$$

El valor de la tensión inducida por una descarga, en los terminales de una línea larga, en un punto distante de ocurrencia de la descarga puede ser deducido por la ecuación (38).

$$U_{FR} = 2U_{\infty \max} = \frac{60 \cdot I_0 h}{y} \quad (37)$$

En los cálculos anteriores, se considera el suelo como un conductor perfecto. Por lo que, se presenta la ecuación (38), la cual incluye estos valores y disminuye los errores en los cálculos.

$$U_{max} = 33 \cdot I_0 \cdot \frac{h}{y} + 1.1 \cdot I_0 \sqrt{\frac{\rho}{y}} \quad (38)$$

Siendo ρ la resistividad del suelo.

5 Conclusiones

Las ecuaciones presentadas a lo largo del artículo sirven como herramienta para caracterizar el fenómeno de un rayo y además conocer su efecto de las sobretensiones por descargas atmosféricas en las líneas aéreas de distribución. Tanto si son sobretensiones producidas por descargas atmosféricas directas, como si son sobretensiones inducidas por los efectos electromagnéticos de descargas atmosféricas que impactan en las cercanías de la línea. El conocimiento de estas ecuaciones proporciona una correcta interpretación de las causas de posibles fallas en las líneas aéreas de distribución y permitirán a futuro seleccionar los elementos de protección contra las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas directas e indirectas en líneas de distribución.

Sin embargo, en este análisis no se contemplan las protecciones que puedan encontrarse ya instaladas en las redes eléctricas, ni el efecto que estas tienen en el comportamiento ante las descargas atmosféricas. Por lo que a futuro se plantea la presentación de más ecuaciones que permitan entender mejor el fenómeno y mejorar el comportamiento de las líneas de distribución frente a las descargas atmosféricas.

Referencias

- [1] V L Coelho “Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas” Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2010.
- [2] P. Chowdhuri, “Significant Parameters in Estimating the Striking Distance of Lightning Strokes to Overhead Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.4, n°3, July de 1989.
- [3] A. F. L. da Fonseca, "Cálculo do Campo Eletromagnético e Análise da Tensão Induzida em Linhas Aéreas Devido a Descargas Atmosféricas", Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1990.
- [4] Alexandre Piantini; “Contribuição ao Estudo das Tensões induzidas em Linhas de Distribuição por Descargas Atmosféricas Indiretas”. São Paulo, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [5] S. Rusck, “Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over Voltage Protection of Low Voltage Networks”. Göteborg, 1957.
- [6] NASA - Global Hydrology and Climate Center. Website: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/2002/where-lightning-strikes>
- [7] IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std 1410. New York, 2004.