

# Modelado de sobretensiones inducidas en la línea 1 de Planta Centro - Arenosa por descargas eléctricas atmosféricas no directas

Carlos Mejías<sup>\*,a</sup>, Nelson Falcón<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Edo. Carabobo Venezuela.

<sup>b</sup>Departamento de Física, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Carabobo. Valencia, Edo. Carabobo Venezuela.

---

## Resumen.-

Las líneas de transmisión eléctrica utilizadas para la interconexión entre los centros de generación y los centros de distribución son afectados por las descargas eléctricas atmosféricas. El objetivo del presente trabajo es modelar el acoplamiento electromagnético durante la descarga de retorno de la actividad eléctrica atmosférica, para estimar las sobretensiones inducidas en la Línea 1 de Planta Centro- Arenosa. Para ello se emplea un modelo LCSM (Lumped Current Source Model) para el canal de descarga y las matrices de inductancia y capacitancia del sistema para un análisis circuital, que demuestra la existencia de niveles de sobretensión considerables en los cables conductores y cables de guarda, aún en el caso de descargas eléctricas atmosféricas no directas. Se concluye que estas sobretensiones pueden ocasionar en esta línea una indisponibilidad forzada cuando no existe un adecuado aterramiento de los cables de guarda en cada torre de transmisión, reduciendo así la capacidad de transporte de energía eléctrica de la red de transmisión, afectando directamente a usuarios tales como: hospitales, centros urbanos, zonas industriales, etc.

**Palabras clave:** Modelado, acoplamiento, sobretensión, descargas atmosféricas, cables de guarda

## Induced Overvoltage Model in Overhead Line 1 of Planta Centro - Arenosa by Indirect Lightning Discharge

### Abstract.-

Transmission Lines used to interconnection between generation centres and distribution centres are affected by lightning discharge. The objective of this work is modelling the electromagnetic coupling, during return stroke of the atmospheric electric activity to estimate the induced overvoltage in Line 1 of Planta Centro - Arenosa. A LCS (Lumped Current Source) model is employed to lightning channel and the matrices of inductance and capacitance overall system for a circuital analysis, that shows the existence of considerable levels of overvoltage on the conductors wires and shielding wires, even in the case of no direct lightning discharge. It is concluded that overvoltage can cause in this line a forced unavailability when doesn't exist an adequate grounding in every transmission tower, reducing the transport capacity of transmission network's electric energy, affecting directly to users like: hospitals, urban centre, industrial zones, etc.

**Keywords:** Modeling, coupling, overvoltage, lightning, shielding wires

Recibido: julio 2012

Aceptado: agosto 2012.

### 1. Introducción

La descarga eléctrica atmosférica pueden ser positivas o negativas, internubes, desde las nubes de tormenta hacia la superficie terrestre o viceversa. Estas descargas producen campos electro-

---

\*Autor para correspondencia

Correo-e: [cmejias1@uc.edu.ve](mailto:cmejias1@uc.edu.ve) (Carlos Mejías)

magnéticos de magnitudes considerables debido al rápido y violento proceso de descarga, con picos de corriente de hasta 200 kA, transportando hasta 40 Coulomb a través del canal de descarga, en tiempos del orden de  $1\mu s$  en intervalos sucesivos de 20 – 50  $\mu s$  [1, 2]. La rápida corriente genera presiones de hasta 10 atmósferas en el canal de descarga, formando un plasma caliente con temperatura del orden de 30000 kelvin [1, 2].

La determinación del flujo medio anual de descargas eléctricas por kilómetro cuadrado, en una región, se denomina el nivel cerámico; y constituye una medida del riesgo o probabilidad de ocurrencia de eventos electroatmosféricos que afectan las actividades humanas y/o las canalizaciones eléctricas de una región. La actividad cerámica en la región centro-occidental de Venezuela, es de 16 *descargas/km<sup>2</sup>/año*, y las modas de intensidades picos 15 kA y 10 kA para polaridad negativa y positiva respectivamente, en los años estudiados por Raizman *et ál.* [3], que corresponden a 45-50 días de tormentas eléctricas por año [4]. Además, la densidad isocerámica varía apreciablemente en Venezuela para diversas regiones; los resultados del Satélite LIS muestran actividades máximas de 11,56 *descargas/km<sup>2</sup>/año* para San Carlos, Edo. Cojedes y de 17,43 *descargas/km<sup>2</sup>/año* para El Lago de Maracaibo, con una media para Venezuela de 0,56 – 1,8 *descargas/km<sup>2</sup>/año*, que representa el valor máximo para Suramérica [4, 5]. Los valores presentes del nivel cerámico, mediante la curva de probabilidad de Anderson-Eriksson arrojan una tasa anual de salida de línea (cese de operatividad de la línea de transmisión a causa del nivel cerámico) de 2,29 a 3,06 [6, 7]. En el Edo Carabobo, el nivel isocerámico inferido de la data de tormentas eléctricas es de 16 *descargas/km<sup>2</sup>/año* para los años 1998-2002 [4].

Debido a que las descargas eléctricas atmosféricas al impactar sobre una estructura o proximidades, pueden causar pérdidas de vida humana, pérdidas económicas e interrupciones del servicio eléctrico, entonces, existe la necesidad de aplicar medidas de protección contra estas descargas. En este sentido, existen dispositivos captadores, como

pararrayos y cables de guarda, que interceptan las descargas, para evitar el impacto directo sobre las estructuras en riesgo y conducir rápidamente la corriente de la descarga a tierra en forma controlada. Para lograr este objetivo se utilizan los sistemas de puesta a tierra mallados que proporcionan equipotencialidad de los equipos y dispersan la carga en el terreno, disminuyendo las diferencias de potencial de tierra en la zona de instalación, reduciendo de esta forma las tensiones de paso y contacto que podrían ocasionar daños en personas y equipos [8].

Bajo este enfoque, las líneas aéreas de transmisión usadas por los sistemas eléctricos de potencia deben estar protegidos ya que un impacto directo sobre estas líneas puede producir la fusión de los conductores, la ruptura de los aislamientos y equipos conectados a las líneas, debido a los efectos térmicos de la descarga, lo que genera fallos del sistema e interrupciones del servicio. Por consiguiente, se utiliza uno o dos cables de guarda colocados sobre los conductores de fase, en forma paralela, y conectados mediante la misma estructura de soporte a tierra. De este modo, la posición de los cables de guarda define la zona de protección [9].

En esta investigación tiene como objetivo modelar la sobretensión transitoria inducida en esta línea de 230 kV por las descargas eléctricas atmosféricas no directas. Para analizar esta situación, primero se presentará un modelo LCSM (Lumped Current Source Model) que describe el comportamiento de la descarga de retorno. Luego se obtendrá la matriz de inductancias y la matriz de capacitancias del sistema formado por la descarga de retorno, conductores de fase y conductores de guarda, con la finalidad de analizar circuitualmente dicho sistema y estimar el nivel máximo de sobretensión.

En relación a las líneas de transmisión de Planta Centro - Arenosa, se debe recordar que fueron construidas en 1976 para operar a un nivel de tensión de línea de 400 kV con una corriente de diseño de 1090 A, para una capacidad de transmisión de 1000 MW cada una. Las torres de soportes para estas líneas de transmisión son de disposición horizontal, tienen dos conductores por

fase, de tipo ACAR calibre 1100 MCM. Hay que mencionar, que la línea Planta Centro - Arenosa 1 desde el año 2007 opera a 230 kV, por lo que el acoplamiento electromagnético es el mismo al de las líneas que trabajan a 400 kV ya que ninguna estructura física cambió.

Los informes anuales OPSIS entre los años 2005-2008 muestran la cantidad de indisponibilidades forzadas en las líneas del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Los resultados en estos informes indican una media de 14 interrupciones forzadas anuales para la línea 1, 19,75 interrupciones forzadas anuales para la línea 2 y 10 interrupciones forzadas anuales para la línea 3 de Planta Centro - Arenosa. En el periodo Diciembre 2010-Noviembre 2011, el 19 % de interrupciones fueron por sobretensiones en la línea 2, mientras que para la línea 3 fue de 21 %. Lo que sugiere una media del 20 % de interrupciones forzadas por sobretensión, generadas posiblemente por descargas atmosféricas directas o indirectas.

## 2. Metodología

### 2.1. Modelado del canal de descarga

Al iniciarse el proceso de la descarga eléctrica atmosférica, la guía escalonada de la nube desciende hacia la tierra. Cuando dicha guía se encuentra a cierta altura del suelo, se genera el proceso de enlace, que establece un canal conductor entre el suelo y la nube, llamado canal de descarga, [8].

Por lo tanto, se empezará por modelar el canal de descarga, puesto que el proceso de enlace o descarga de retorno es el evento más importante de la descarga eléctrica atmosférica ya que genera perturbaciones en el sistema eléctrico [10]. Desde 1969 se han propuesto varios modelos que describen este comportamiento, siendo la corriente de la descarga de retorno, un pulso de corriente en una línea de transmisión. Para modelar este fenómeno, existen diferentes perspectivas. Por ejemplo, en un primer modelo, se asume que la descarga de retorno es un pulso de corriente originado a nivel de la tierra y se propaga a la nube a través de una línea de transmisión generada por el canal de descarga. Este enfoque se basa en que la luminosidad del canal es una función del tiempo

y espacio, lo que implica una relación temporal de la corriente que viaja por el canal. Este tipo de modelos se conocen como LCSM (Lumped Current Source Models) [10].

En contraste con los modelos LCSM, existe otro tipo de modelo para la descarga de retorno. En este caso, el canal de descenso se sigue modelando como una línea de transmisión cargada; sin embargo, la corriente de retorno es el resultado de la onda de potencial que viaja a lo largo de la línea generada por fuentes que se encuentran de manera distribuida, desde la tierra a la nube. La llegada del frente de onda en un punto dado del canal de la guía de descenso, cambia el potencial de la nube en ese punto al potencial de la tierra lo que genera una liberación de carga produciendo un aumento de la corriente en el canal. Estos modelos de denominan DCSM (Distributed Current Source Models) [10].

En esta investigación se considera al canal de descarga como un modelo LCSM, es decir, una línea de transmisión cargada por una fuente de corriente con características definidas en la Norma IEC 62305-1 [9]; terminada con una resistencia de tierra específica [11]. Hay que mencionar, además, que los parámetros distribuidos R, L y C se consideran constantes, aunque en realidad son variantes en el tiempo y en el espacio, sin embargo, ese problema no es lineal y es necesario el uso de métodos numéricos computacionales para la obtención de la solución, de modo que el grado de exactitud dependerá de la aplicación [12].

Dado que la descarga de retorno es una línea de transmisión, es necesario determinar el valor de la inductancia distribuida,  $L_{canal}$ , del canal de descarga. Por lo tanto, si solamente se consideran los campos electrostáticos ( $\vec{E}$  y  $\vec{H}$ ) producidos por la corriente de retorno; el modelo de la línea de transmisión se puede aproximar a un cable coaxial con conductor interno de radio "a" rodeado de un conductor cilíndrico de radio "D" donde los campos transitorios se vuelven despreciables [11, 12]. Como resultado, la expresión de la inductancia por unidad de longitud viene dada por

$$L_{canal} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ 0,25 + \ln\left(\frac{D}{a}\right) \right] \quad (1)$$

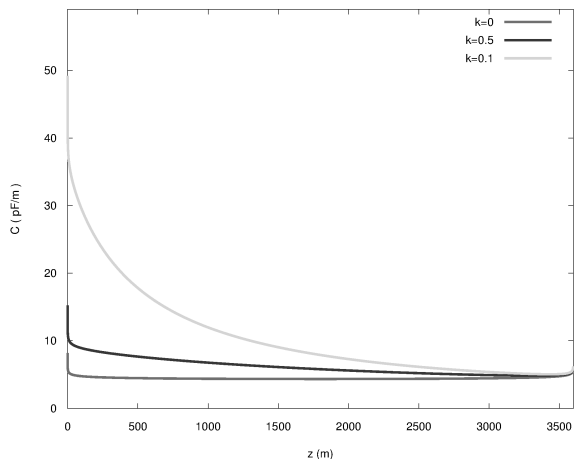


Figura 1: Capacitancia por unidad de longitud del canal de descarga para  $k=0$ ,  $k=0.5$  y  $k=0.01$

Ahora bien, el cálculo de la capacitancia distribuida,  $C_{canal}$ , está definido por el conductor interno de radio “ $a$ ” y el efecto de la tierra como plano conductor perfecto, el cual reduce el potencial en las cercanías de la tierra [11]. Teniendo en cuenta que la densidad de carga superficial varía linealmente desde la punta de la guía de descenso al final de la nube, la expresión de la capacitancia [11] es igual a

$$C_{canal} = \frac{4\pi\epsilon_0}{A \ln \left| \frac{z_2}{z_1} \right| + B \left[ z_1 - z_2 + \frac{l}{a} \right]}$$

siendo

$$z_1 = \frac{z-l}{a} + \sqrt{\left(\frac{z-l}{a}\right)^2 + 1} \quad (2)$$

$$z_2 = \frac{z}{a} + \sqrt{\left(\frac{z}{a}\right)^2 + 1} \quad (3)$$

$$A = \left[ \frac{z}{l} + \left(1 - \frac{z}{l}\right)k \right] \quad (4)$$

$$B = (1-k) \frac{a}{l} \quad (5)$$

donde  $z$  es el punto de observación de la capacitancia,  $l$  es la longitud del canal de descarga y  $k$  es la pendiente de la variación de densidad de carga desde la punta de la guía de descenso al final de la nube. En la Figura 1, se muestra la capacitancia por unidad de longitud de un canal de descarga de longitud  $3600 \text{ m}$  para distintos valores de  $k$ .

Como resultado de la comparación entre las capacitancias de la Figura 1, se puede concluir que para el caso de  $k = 0$ , el canal de descarga de comporta como un cable coaxial con  $D \approx 4000 \text{ m}$ ; considerando que  $a = 1 \text{ cm}$  [12]. Además, si se compara el valor de  $D$  con la altura de la descarga atmosférica, se observa que dichos valores son similares. Por tanto, en una primera aproximación donde la densidad de carga superficial es constante a lo largo del canal de descarga, la inductancia  $L_{canal}$  es igual a  $3 \mu\text{H}/\text{m}$  y la capacitancia  $C_{canal}$  igual a  $4,6 \text{ pF}/\text{m}$ . En esta investigación, el valor de la resistencia por unidad de longitud utilizado para  $R_{canal}$  es de  $0,8 \Omega/\text{m}$ , y el valor de la resistencia de la tierra es igual a  $515 \Omega$  [12].

Por otro lado, se considera que la velocidad de propagación en el canal de descarga, es menor a la velocidad de la luz, típicamente entre  $1 \cdot 10^8$  y  $2 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  [10, 12].

## 2.2. Acoplamiento electromagnético entre el canal de descarga y un conductor aéreo

De igual modo, se plantea la necesidad de modelar el acoplamiento inductivo entre la descarga eléctrica atmosférica y las líneas aéreas de transmisión afectadas. En la Figura 2, se observa la geometría generada en el momento de la descarga de retorno, considerando que la tierra es un plano conductor perfecto.

En este sentido, bajo una situación cuasiestática, donde una corriente  $I_0$  circula por el canal de descarga, la densidad de flujo magnético producida por un hilo conductor (canal de descarga) es igual a

$$\vec{B} = \frac{\mu I_0}{2\pi r} \vec{a}_\phi \quad (6)$$

Por otra parte, al calcular el flujo magnético concatenado ( $\Phi$ ) en la espira formada por la línea aérea y el plano de tierra, se observa que las líneas de campo magnético atraviesan la superficie de la espira por ambos lados de la descarga en direcciones opuestas, como se muestra en la Figura 3. Es decir, si una descarga atmosférica ocurre en la mitad de la línea, a una distancia “ $d$ ” como en la Figura 2, entonces,  $\Phi$  en una de las mitades de la espira es de signo contrario al

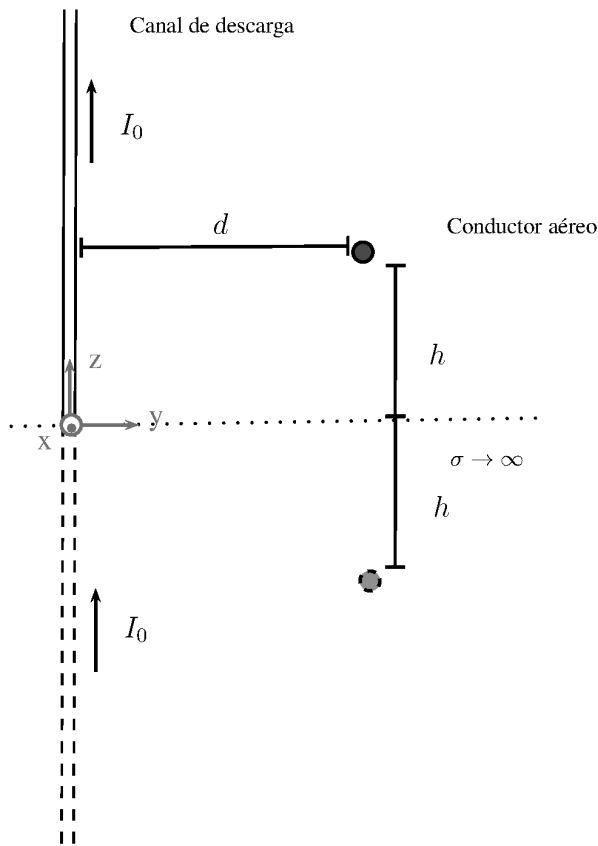


Figura 2: Geometría establecida entre el canal de descarga y un conductor aéreo.

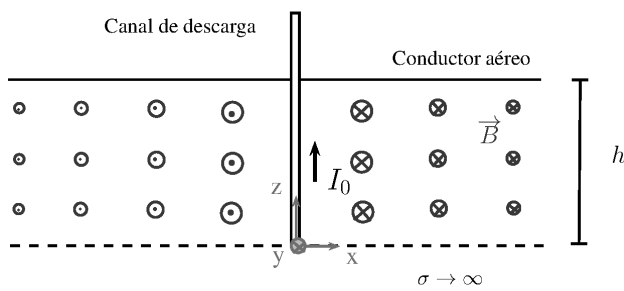


Figura 3: Líneas de campo magnético atravesando la superficie de una espira

$\Phi$  en la otra mitad. No obstante, si la descarga eléctrica atmosférica ocurre paralelo a una torre, entonces, el flujo magnético concatenado entre esa torre y la próxima, no cambiará su polaridad ya que estas líneas de campo magnético atraviesan la espira en un sólo sentido, lo que trae como consecuencia que la sobretensión inducida entre las dos torres sea mayor a la planteada en la Figura 3. Por lo tanto, para esta investigación, se analizará la sobretensión inducida entre dos

torres de transmisión, cuando la descarga eléctrica atmosférica sea paralela a una de las torres, produciéndose dos sobretensiones de polaridad opuestas, inducidas por los flujos concatenado de signos opuestos; viajando por la línea en sentidos contrarios.

Por tanto, si se calcula el flujo magnético que atraviesa (en un mismo sentido) la media espira derecha formada por el conductor y el plano de tierra, queda

$$\Phi \approx \frac{\mu I_0 h}{4\pi} \ln \left[ 1 + \left( \frac{x_L}{d} \right)^2 \right] \quad (7)$$

donde “ $x_L$ ” es la longitud del tramo de línea, “ $d$ ” es la distancia de separación entre la descarga y el conductor aéreo, y “ $h$ ” es la altura a la que se encuentra el conductor. Es necesario aclarar que si se hubiera calculado el flujo magnético de la media espira izquierda, la ecuación (7) lleva un signo negativo, es por esto que existen dos sobretensiones de polaridad opuesta. De acuerdo a este resultado, la inductancia mutua entre el canal de descarga y la línea aérea, en función de la longitud del tramo, es igual a

$$L_{dc}(x) \approx \frac{\mu h}{4\pi} \ln \left[ 1 + \left( \frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (8)$$

En función de lo anteriormente expuesto, como la expresión (8) no es una expresión lineal, se considerará el valor de la inductancia  $L_{dc}$  como un valor promedio  $\bar{L}_{dc}$ , es decir,

$$\bar{L}_{dc} = \frac{1}{x_L} \int_0^{x_L} L_{dc}(x) dx \quad (9)$$

A fin de obtener el orden de magnitud de la sobretensión debido a una descarga eléctrica atmosférica que ocurre a una distancia  $d$ , la expresión de  $L_{dc}$  se puede aproximar a una inductancia distribuida por unidad de longitud, con la finalidad de que el parámetro,  $L_{dc}$ , en las ecuaciones de los Telegrafistas [13], sea uniforme a lo largo de la línea, trabajando así, con ecuaciones diferenciales parciales de coeficientes constantes en cada celda que conforma la línea de transmisión. Es por esto, que surge la necesidad de linealizar la expresión (8) en las cercanías del valor

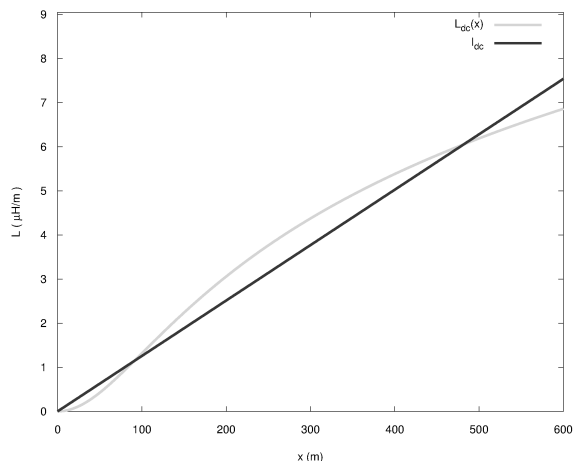
$\bar{L}_{dc}$ , a través de un desarrollo en Serie de Taylor. Por lo tanto, al linealizar la ecuación (8), queda que

$$L_{dc} \approx \bar{L}_{dc} + \frac{\mu}{2\pi} \frac{hx_p}{d \left[ 1 + \left( \frac{x_p}{d} \right)^2 \right]} \Delta x + \text{error} \quad (10)$$

donde error representa el máximo error de truncamiento de la serie y es igual a [14],

$$\text{error} \leq \frac{\mu}{4\pi} \frac{h \left[ 1 - \left( \frac{x_p}{d} \right)^2 \right]}{d^2 \left[ 1 + \left( \frac{x_p}{d} \right)^2 \right]^2} \Delta x^2 \quad (11)$$

(a)  $x_L = 600 \text{ m}$



(b)  $x_L = 1 \text{ km}$

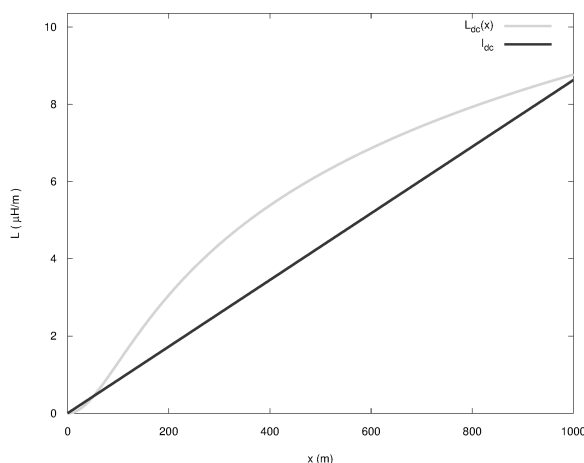


Figura 4: Inductancia mutua  $L_{dc}(x)$  y la linealización  $l_{dc}$  entre una línea de 600 m (a) y 1 km (b) y una descarga no directa a 100 m.

Se puede observar en la ecuación (11), que si  $x_p \sim d$ , entonces, el error en la aproximación

es pequeño, mientras que para el caso de  $d \gg x_p$ , resulta que el error depende del término  $\Delta x^2$ , por lo tanto, dicho error será menor a medida la aproximación sea alrededor del valor de  $x_p$ . En este sentido, si  $x_L = 600 \text{ m}$  y  $d = 1 \text{ km}$ , entonces, el error máximo para la aproximación es de 44,729 nF, lo que representa un error de 145.47 % respecto de la inductancia de la ecuación (8) para  $x_L = 600 \text{ m}$ . Cabe señalar que aunque la diferencia es apreciable, el error obtenido en la aproximación no superó el 15 % en las situaciones planteadas de esta investigación. Para ilustrar mejor esta situación, en la Figura 4 se observa el resultado de la linealización sin considerar el término  $\bar{L}_{dc}$  de la ecuación (10) ya que las ecuaciones diferenciales utilizadas en el análisis circuital son de coeficientes constantes dependientes de los parámetros distribuidos ( $r$ ,  $l$ ,  $g$  y  $c$ ).

Por lo tanto, se puede señalar de la Figura 4 que la aproximación planteada es válida para obtener solamente el orden de magnitud de las sobretensiones inducidas, y no la forma de onda exacta de las sobretensiones ya que se están despreciando los campos de inducción y radiación, sin embargo, estos campos tienen menor amplitud que el campo estático en las distancias consideradas para la investigación. Si las descargas no directas ocurren a distancias mayores, los campos de inducción y radiación tienen mayor amplitud que el campo estático pero no generan perturbaciones que afecten el servicio a 400 kV.

Ahora bien, de acuerdo a la linealización planteada, la inductancia por unidad de longitud es

$$l_{dc} = \frac{\mu}{2\pi} \frac{hx_p}{d^2 \left[ 1 + \left( \frac{x_p}{d} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

donde  $x_p$  la longitud que satisface la expresión  $L_{dc}(x_p) = \bar{L}_{dc}$ , es decir,

$$x_p = d \sqrt{\left[ \left( \frac{x_L}{d} \right)^2 + 1 \right] e^{\left[ \frac{2d}{x_L} \arctan\left( \frac{x_L}{d} \right) - 2 \right]} - 1} \quad (13)$$

Aunque se pudo obtener un modelo matemático para  $l_{dc}$ , la expresión de la capacitancia mutua

existente entre el canal de descarga y el conductor aéreo, resulta un problema complejo, por lo que será útil, la relación que existe entre matriz de inductancia  $\mathbf{L}$  y matriz de capacitancia  $\mathbf{C}$  [13], esto es,

$$\mathbf{LC} = \mu_0 \epsilon \mathbf{I} \tag{14}$$

siendo  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad.

### 2.3. Modelado de multiconductores aéreos



(a)



(b)

Figura 5: (a) Torre usada para líneas de transmisión de Planta Centro - Arenosa 1, 2 y 3. (b) Descargadores de sobretensión para cada fase de estas líneas

Para modelar el tramo de una línea aérea de transmisión es necesario el cálculo de los parámetros  $L, C, R$  de la sección transversal de los multiconductores que se encuentran uniformemente distribuidos y paralelos entre sí. Por consiguiente, se debe considerar el nivel de tensión de operación, ya que define el tipo de estructura de soporte y en consecuencia la geometría del problema. En la Figura 5(a), se muestra el tipo de estructura utilizada en Venezuela para 400 kV en los diferentes tramos de interconexión, como es el caso de las líneas de Planta Centro - Arenosa.

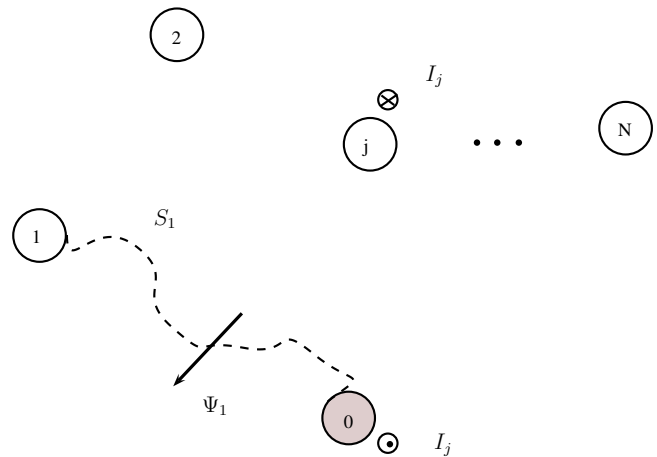


Figura 6: Sección Transversal de “N” Conductores en posiciones arbitrarias y el conductor de referencia para el cálculo de  $L_{1j}$

Para la geometría arbitraria mostrada en la Figura 6, el problema consiste en  $N+1$  conductores con sección transversal uniforme y paralelos entre sí, donde  $N$  son conductores de fase y uno de referencia. Cabe señalar que todas las corrientes que circulan por los conductores de fase retornan por el conductor de referencia, por lo cual, las matrices de los parámetros distribuidos son de  $N \times N$  [13]. En la Figura 6, se observa que la corriente  $I_j$  que circula por el conductor  $j$ -ésimo retorna por el conductor de referencia.

De manera análoga, para el cálculo de las capacitancias de los multiconductores, el conductor de referencia siempre se encuentra cargado con la carga inducida por cada conductor de fase; a cero potencial. En la Figura 7, el conductor de referencia está cargado con  $-Q_j$ , debido a la carga  $Q_j$  del conductor  $j$ -ésimo.

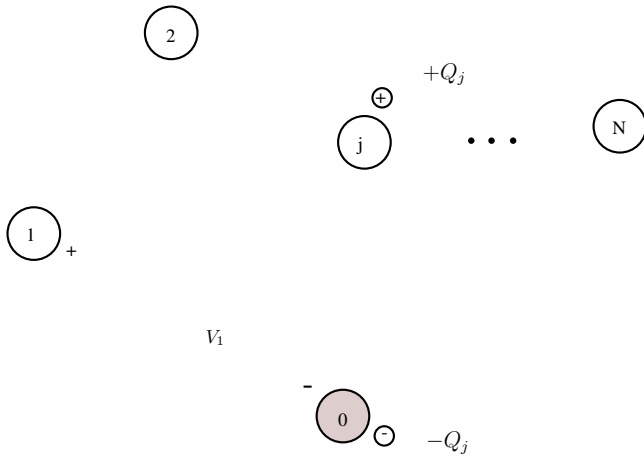


Figura 7: Sección Transversal de “N” Conductores en posiciones arbitrarias y el conductor de referencia para el cálculo de  $c_{ij}$

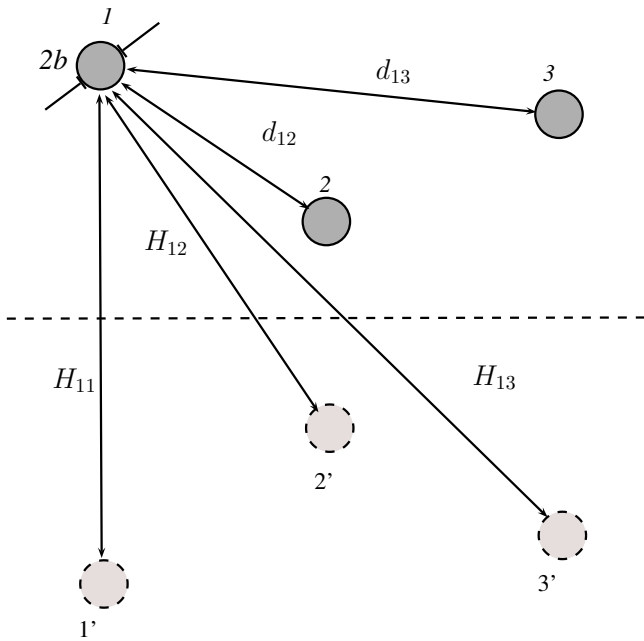


Figura 8: Sección Transversal de líneas conductoras aéreas en posiciones arbitrarias considerando el efecto de tierra

Adicionalmente, en este modelado se incluye el efecto de tierra, es decir, se asume que la tierra se comporta como un plano conductor eléctrico perfecto. En la Figura 8 se muestra el problema desde el punto de vista de la Teoría de Imagen, en otras palabras, cada elemento imagen, posee las mismas características de un conductor de referencia. Se debe agregar que la distancia  $d_{ij}$  corresponde con la separación entre el conductor  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo, mientras que  $H_{ij}$  es la separación

entre el conductor  $i$ -ésimo y el elemento imagen del conductor  $j$ -ésimo. Además  $b_i$  es el radio del conductor  $i$ -ésimo

2.3.1. Matriz de Inductancia por unidad de longitud

El acoplamiento inductivo asociado a las líneas aéreas multiconductoras está definido por las entradas de la matriz inductancia,  $L$ , que relaciona el flujo magnético total que penetra en el  $i$ -ésimo circuito, por unidad de longitud, producidos por todas las corrientes circulantes de cada conductor [13], esto es

$$\Psi = LI, \tag{15}$$

o en forma expandida

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{1n} & l_{2n} & \cdots & l_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}, \tag{16}$$

donde  $l_{ii}$  corresponde con la autoinductancia del circuito  $i$ -ésimo y los elementos  $l_{ij}$  corresponde con la inductancia mutua entre el circuito  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo.

Para el caso de la Figura 8, la matriz de inductancias queda definida como

$$L \approx \frac{\mu}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{H_{11}}{b}\right) & \ln\left(\frac{H_{12}}{d_{12}}\right) & \ln\left(\frac{H_{13}}{d_{13}}\right) \\ \ln\left(\frac{H_{12}}{d_{12}}\right) & \ln\left(\frac{H_{22}}{b}\right) & \ln\left(\frac{H_{23}}{d_{23}}\right) \\ \ln\left(\frac{H_{13}}{d_{13}}\right) & \ln\left(\frac{H_{23}}{d_{23}}\right) & \ln\left(\frac{H_{33}}{b}\right) \end{bmatrix}. \tag{17}$$

2.3.2. Matriz de Capacitancia por unidad de longitud

En cuanto al acoplamiento capacitivo entre los multiconductores aéreas, debe señalarse que existe una representación matricial llamada matriz de capacitancia de Maxwell,  $C$ , donde los elementos  $c_{ij}$  relacionan la carga total  $Q_i$  en el conductor  $i$ -ésimo, por unidad de longitud, producidos por los voltajes aplicados a cada conductor [13], es decir,

$$Q = CV, \tag{18}$$

o en forma expandida,

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{2k} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1n} & c_{2n} & \cdots & c_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}, \tag{19}$$



siendo los coeficientes  $c_{ii}$  los coeficientes de capacitancia o auto-capacitancias y los coeficientes  $c_{ij}$  ( $i \neq j$ ) los coeficientes de inducción o capacitancias mutuas. Se debe agregar que la matriz  $\mathbf{C}$  es simétrica y los coeficientes de capacitancia son positivos ( $c_{ii} > 0$ ) mientras que los coeficientes de inducción son negativos ( $c_{ij} \leq 0$ ).

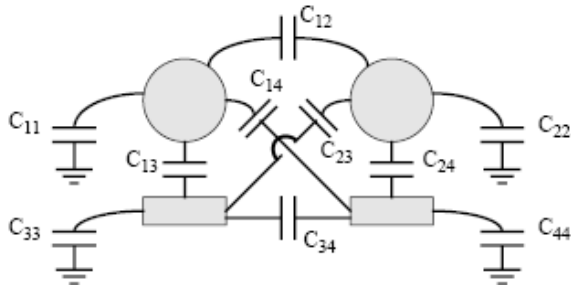


Figura 9: Sección transversal de 4 líneas aéreas [15]

Ahora bien, como las sobretensiones inducidas por el acoplamiento electromagnético entre las líneas aéreas y el canal de descarga se obtendrán por análisis circuital, es necesario determinar la relación existente entre los coeficientes de la matriz de capacitancia de Maxwell y las capacitancias circuitales entre un conjunto de conductores. Para ilustrar mejor esta situación, se puede observar en la Figura 9, las capacitancias circuitales  $C_{ij}$  entre los cuatro conductores. Por tanto, si la carga neta en el conductor 1 es  $Q_1$  y cada conductor se encuentra a un potencial  $V_i$  [15], entonces

$$Q_1 = C_{11}V_1 + C_{12}(V_1 - V_2) + C_{13}(V_1 - V_3) + C_{14}(V_1 - V_4) \quad (20)$$

$$Q_1 = (C_{11} + C_{12} + C_{12} + C_{12})V_1 - C_{12}V_2 - C_{13}V_3 - C_{14}V_4 \quad (21)$$

Se infiere entonces que para  $N$  conductores, la forma expandida de la matriz de capacitancia de

Maxwell es igual a

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n C_{1k} & -C_{12} & \cdots & -C_{1n} \\ -C_{21} & \sum_{k=1}^n C_{2k} & \cdots & -C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -C_{n1} & -C_{n2} & \cdots & \sum_{k=1}^n C_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}, \quad (22)$$

siendo  $c_{ii} = \sum_{k=1}^n C_{1k}$  y  $c_{ij} = -C_{ij}$ . Es conveniente subrayar que el coeficiente de capacitancia  $c_{ii}$  no corresponde con la capacitancia circuital  $C_{ii}$  existente entre el conductor  $i$ -ésimo y el conductor de referencia. Por lo tanto, si se suman todas las entradas de la fila  $i$ -ésima (o columna) de  $\mathbf{C}$  se obtendrá  $C_{ii}$  [13, 15].

La forma sencilla de obtener los elementos de  $\mathbf{C}$ , es invirtiendo el cálculo de los coeficientes de potencial,  $\mathbf{P}$ , definida como

$$V = \mathbf{P}Q \quad (23)$$

en forma expandida

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}, \quad (24)$$

donde

$$\mathbf{C} = \mathbf{P}^{-1}. \quad (25)$$

Así, por ejemplo, para el caso de la Figura 8, los coeficientes de potencial quedan definidos como

$$\mathbf{P} \approx \frac{1}{2\pi\epsilon} \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{H_{11}}{b}\right) & \ln\left(\frac{H_{12}}{d_{12}}\right) & \ln\left(\frac{H_{13}}{d_{13}}\right) \\ \ln\left(\frac{H_{12}}{d_{12}}\right) & \ln\left(\frac{H_{22}}{b}\right) & \ln\left(\frac{H_{23}}{d_{23}}\right) \\ \ln\left(\frac{H_{13}}{d_{13}}\right) & \ln\left(\frac{H_{23}}{d_{23}}\right) & \ln\left(\frac{H_{33}}{b}\right) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

#### 2.4. Modelado de la corriente de la descarga eléctrica atmosférica

Para la protección de los sistemas eléctricos contra descargas eléctricas atmosféricas, es necesario conocer y caracterizar la corriente de descarga. En este sentido, existe una cantidad de modelos para el canal de descarga, cada uno

con diferentes grados de complejidad [16], con la finalidad de caracterizar la corriente de descarga. En virtud de ello, para la corriente de descarga, se considera el modelo descrito en la norma IEC 62305-1 [9], esto es

$$i(0, t) = \frac{I}{\alpha} \cdot \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1 + (t/\tau_1)^{10}} \cdot \exp(-t/\tau_2) \quad (27)$$

donde  $I$  es el valor de cresta de la corriente,  $\alpha$  de corrección de la cresta,  $\tau_1$  es la constante de tiempo del frente de corriente y  $\tau_2$  es la constante de tiempo de la cola de la corriente.

Cabe señalar que las características de la onda de corriente  $i(0, t)$  dependen del tipo de descarga. Por lo tanto, si se considera que el terreno es de poca elevación, entonces las descargas son a tierra [9]. Por otra parte, el 90 % de las descargas descendientes son de carga negativa [17] y pueden estar compuesta por un primer impacto y/o varios impactos cortos subsiguientes. En virtud de ello, los parámetros de la corriente de la descarga se tomarán de la norma [9], que están basados en los resultados del Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE).

### 3. Resultados

#### 3.1. Extracción de los parámetros $L$ y $C$

Tabla 1: Matriz de Capacitancia del sistema en pF, utilizando una herramienta computacional de extracción de capacitancias parásitas

	DC	R	S	T
DC	294.7254	-28.9431	-13.2684	-7.3244
R	-28.9431	325.1712	-37.9506	-15.6217
S	-13.2684	-37.9506	328.4731	-42.3668
T	-7.3244	-15.6217	-42.3668	321.9687

Autores: C. Mejías y N. Falcón

Para la línea de transmisión Planta Centro – Arerona de 230 kV y 400 kV de longitud 40 m, dispuesta en una configuración geométrica como la mostrada en la Figura 5a, con 3 conductores de fase (R, S y T) de radio  $b = 15,32 \text{ mm}$ , y una descarga eléctrica atmosférica no directa a 8,5 m con  $a = 1 \text{ cm}$ , se obtuvo a través de

Tabla 2: Matriz de Capacitancia de sistema en pF, utilizando el modelado planteado

	DC	R	S	T
DC	296.7487	-30.0658	-12.2818	-6.1919
R	-30.0658	295.7733	-42.3498	-17.1117
S	-12.2818	-42.3498	298.6527	-43.3378
T	-6.1919	-17.1117	-43.3378	292.8563

Autores: C. Mejías y N. Falcón

una herramienta computacional de extracción de capacitancias parásitas, que  $C$  está en la Tabla 1.

Ahora bien, al calcular la matriz de capacitancia con las expresiones anteriores, se obtuvo la Tabla 2.

Por lo tanto, al comparar ambos resultados, se puede observar que la aproximación de las Ecuación (8) genera valores del mismo orden de magnitud de los valores de la Tabla 1 con un error de aproximación del 15 %; por consiguiente, el modelo planteado para la inductancia mutua entre la descarga y un conductor de fase,  $L_{dc}$ , de la Ecuación (8), es una aproximación válida para los casos analizados en esta investigación.

Así mismo, al considerar  $D \approx 4 \text{ km}$  y que los conductores de guarda son Alumoweld 7 # 9 de radio 4.355mm para una línea de transmisión de 600 m, dos conductores ACAR 1100 MCM por fase, separados 0,4 m y una descarga indirecta a 100 m, la matriz  $L$  y la matriz  $C$  por unidad de longitud resultante están en la Tabla 3 y 4.

#### 3.2. Análisis Circuitual

En vista de que el modelo planteado es una aproximación válida, se realizó el análisis circuitual mediante de las matrices  $L$  y  $C$  para acoplar líneas de transmisión con la finalidad de obtener en una primera aproximación el orden de magnitud de las sobretensiones inducidas. Por lo tanto, para todos los casos analizados se consideró una línea con una longitud de 600 m entre dos torres como la mostrada en la Figura 5(a), asumiendo que la descarga eléctrica atmosférica es paralela a una de las torres y acoplando seis líneas de transmisión (tres líneas aéreas de dos conductores por fase, dos líneas de transmisión para los cables de guarda

Tabla 3: Matriz de Inductancias en  $nH/m$  para descarga no directa a 100 m

	DC	R	S	T	G1	G2
DC	2579,84	16,040	13,578	11,612	20,380	16,744
R	16,040	1424,54	247,811	131,636	369,757	204,57
S	13,578	247,811	1424,54	247,811	334,888	334,888
T	11,612	131,636	247,811	1424,54	204,57	369,757
G1	20,380	369,757	334,888	204,57	1737,361	267,996
G2	16,744	204,57	334,888	369,757	267,996	1737,361

Autores: C. Mejías y N. Falcón

Tabla 4: Matriz de Capacitancia en  $fF/m$  para descarga no directa a 100 m

	DC	R	S	T	G1	G2
DC	4308,69	-31,105	-18,587	-17,520	-34,371	-25,240
R	-31,105	8455,18	-947,679	-264,027	-1504,48	-524,342
S	-18,587	-947,679	8683,81	-947,738	-1178,55	-1178,59
T	-17,520	-264,027	-947,738	8455,03	-524,385	-1504,62
G1	-34,371	-1504,48	-1178,55	-524,385	7094,07	-578,036
G2	-25,240	-524,342	-1178,59	-1504,62	-578,036	7093,95

Autores: C. Mejías y N. Falcón

Alumoweld 7 # 9 y una línea de transmisión que modela el canal de descarga).

Con respecto a la corriente de descarga de retorno, se consideró un pulso con valor de cresta de 25 kA, con constante de tiempo del frente de corriente de 0,454  $\mu s$  y constante de tiempo de la cola de corriente de 143  $\mu s$  [9]. Se debe señalar que las características anteriores corresponden a la corriente máxima de un impacto corto subsiguiente para los niveles de protección de rayo (NPR) III y IV, definidos en la Norma IEC-62305-1. Conviene subrayar que la elección del impacto corto subsiguiente se debe a que estos impactos tienen una mayor rapidez de cambio en la corriente de la descarga de retorno, respecto del primer impacto, lo que sugiere mayores niveles de sobretensión inducida.

Dicho lo anterior, primero se analizó el efecto de los cables de guarda en las sobretensiones inducidas, esto es, acoplando 4 líneas de transmisión (tres conductores de fase y el canal de descarga). Luego se incluyeron los cables de guarda y se obtuvo las sobretensiones resultantes mostradas en la Figura 10, donde se observa que el valor máximo de sobretensión inducida en

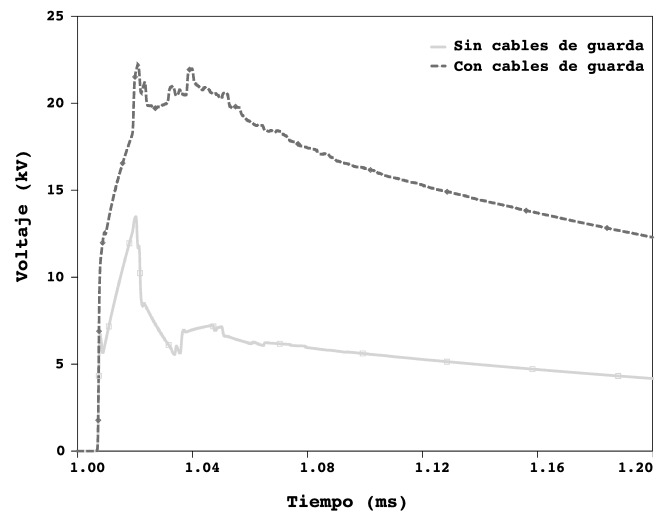


Figura 10: Efecto de cables de guarda en la sobretensión en la fase R debido a una descarga eléctrica atmosférica indirecta a 100 m

cada fase cambia y tuvo un aumento cercano al 64% en las fases R y T. Además, la constante de tiempo de la cola de la sobretensión también cambió, debido al aumento de la capacidad de almacenamiento de energía del sistema (formado por los conductores de fase y los cables de guarda). Por lo tanto, al considerar dichos cables de guarda,

el decrecimiento o cola de la sobretensión tiene mayor duración.

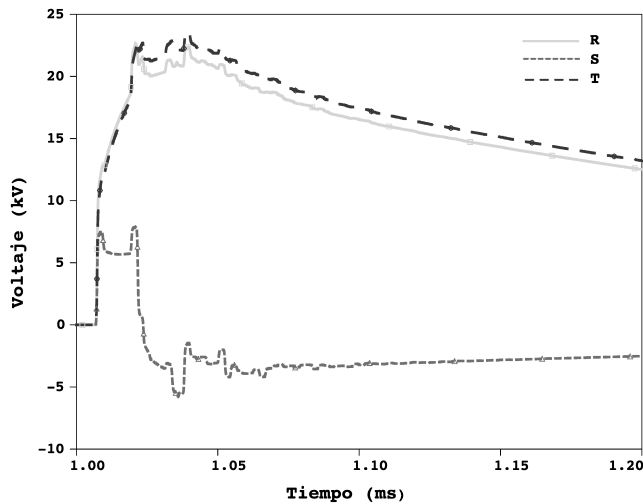


Figura 11: Sobretensión en las fases R, S y T debido a una descarga eléctrica atmosférica indirecta a 100 m.

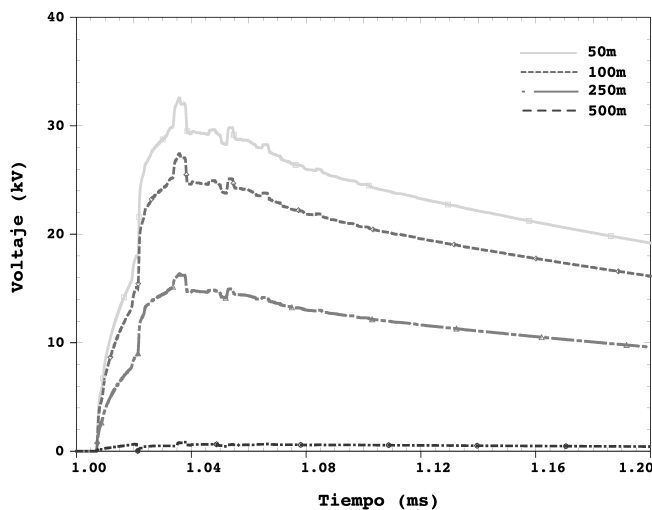


Figura 12: Sobretensión entre la fase R y S debido a una descarga eléctrica atmosférica indirecta a 50, 100, 250 y 500 m.

Por otro lado, las sobretensiones inducidas en cada fase, mostradas Figura 11, se observa que en la fase S, la sobretensión es menor que en las otras fases, debido a que se encuentra rodeada por las fases R, T y los cables de guarda. Sin embargo, este efecto disminuye a medida que la descarga eléctrica atmosférica indirecta ocurre a distancia mayor a 500 m ya que la sobretensión inducida en cada fase alcanza (aproximadamente) el mismo

valor pico. Esto puede evidenciarse en la Figura 12.

Al analizar la sobretensiones entre la fase R y S de la línea de transmisión, para descargas eléctricas atmosféricas ocurridas a 50 m, 100 m, 250 m y 500 m, se obtuvo los resultados mostrados en las Figura 12, donde se observa que estas sobretensiones disminuyen a medida que la descarga eléctrica atmosférica se originan en zonas más alejadas de la línea. Por lo tanto, las descargas que ocurren a distancias mayores a 500 m no representan ningún tipo de riesgo ya que no supera la tensión máxima de servicio de 245 kV para la línea 1 ni 420 kV para las líneas 2 y 3 de Planta Centro - Arenosa. No obstante, para distancias menores a 500m, estos límites se pueden superar, sin embargo; estas sobretensiones no serán mitigadas por la protección de sobretensión del transformador debido a la corta duración de las mismas, siendo absorbida por el sistema.

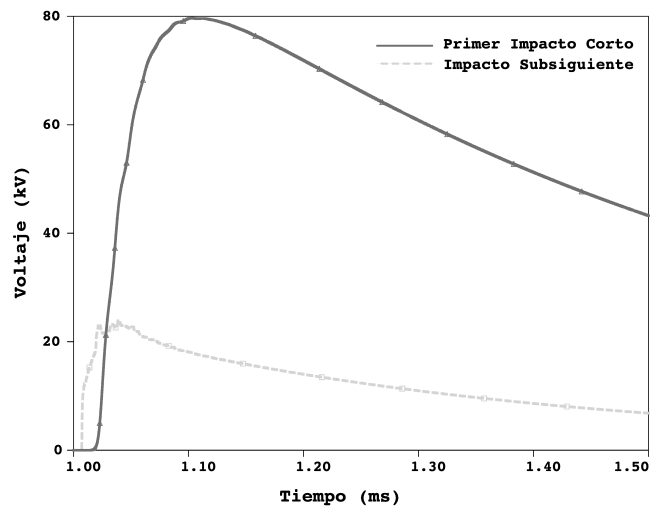


Figura 13: Sobretensión entre la fase T debido a un primer impacto e impacto subsiguiente indirecto a 100m.

Hasta el momento, se analizó la sobretensión debido a un impacto corto subsiguiente ya que la corriente, en estos casos, tiene una mayor rapidez de variación de la corriente. Sin embargo, al considerar el primer impacto corto, como se muestra en la Figura 13, donde la corriente de retorno tiene un valor de cresta de 100 kA, constante de tiempo del frente de la corriente de 19  $\mu s$  y constante de tiempo de la cola de la corriente de 485  $\mu s$  [9], se obtuvo que este tipo de

impactos cortos también puede superar la tensión máxima de servicio de las líneas, generando una interrupción de servicio.

#### 4. Conclusiones

El análisis circuital del acoplamiento electromagnético modelado a través de las matrices  $L$  y  $C$ , es una herramienta alternativa que permite estimar el valor pico de la sobretensión inducida en cada conductor de fase cuando se produce la descarga de retorno.

Los valores picos de la sobretensiones inducidas en las líneas de Planta Centro - Arenosa 1,2 y 3 por descargas eléctricas atmosféricas producidas a menos de 500 m, pueden superar la tensión máxima de servicio pero depende del valor de cresta y la máxima rapidez de cambio de la corriente de la descarga de retorno. Cabe señalar que este nivel de sobretensión puede alcanzarse en torres de disposición horizontal. Por lo tanto, se recomienda un estudio similar para los diferentes tipos de estructuras y ver cómo afectan las sobretensiones inducidas.

En cuanto al efecto de los cables de guarda, es importante señalar que aunque estos dispositivos captadores protegen las líneas contra las descargas eléctricas atmosféricas directas, se evidencia un incremento en los valores picos de las sobretensiones inducidas cuando dichos dispositivos están presentes, así como un aumento en el tiempo de decrecimiento de la sobretensión transitoria. Esto implica que un bajo mantenimiento o una falla en el cable de puesta a tierra conectado a cada cable de guarda, puede causar un aumento en la capacidad de almacenamiento de energía del sistema, lo que produce un mayor tiempo de decrecimiento, un aumento en los niveles de sobretensión y una posible interrupción forzada del servicio, situación que se intensifica en las zonas de mayor nivel cerámico, ya que genera una mayor cantidad de sobretensiones que tendrán que ser absorbidas por el SEN, disminuyendo la vida útil de todos los dispositivos conectados. Como se ha dicho, el incremento de estos efectos se debe a que aumenta el tamaño de la espira generada por los cables de guarda y el plano de tierra.

Por lo tanto, se recomienda un mantenimiento y una revisión continua de la puesta a tierra de los cables de guarda para controlar y evitar que dichos impactos indirectos generen daños mayores e interrupciones del servicio, disminuyendo así, el porcentaje anual de indisponibilidad forzada por descargas eléctricas atmosféricas.

#### Agradecimientos

Se agradece el financiamiento parcial del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología e Innovación (FONACIT) de la República Bolivariana de Venezuela, a través del Proyecto Estratégico 2011-000326 "Caracterización de Fenómenos Transitorios en la Troposfera: Electrometeoros, Litometeoros, Microtornados y Trombas Marinas". A los profesores Rafael Albornoz y Dr. Alfonso Zozaya, por sus comentarios y sugerencias.

#### Referencias

- [1] Baba Y. y Rakov V. Present understanding of the lightning return stroke. In HansDieter Betz, Ulrich Schumann, and Pierre Laroche, editors, *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, pages 1–21. Springer Netherlands, 2009.
- [2] Rakov V. y Uman M. *Lightning: Physics and Effect*. Cambridge Univ. Press., 2003.
- [3] Raizman S., Mendez Y., Vivas J., y J. Arevalo. Caracterización del nivel cerámico de venezuela a partir de un sistema de detección de descargas atmosféricas (sdda). *IV Congreso Venezolano de Ingeniería Eléctrica Universidad Simón Bolívar*, pages 1–6, 2004.
- [4] Martínez M., Ramírez L., y Montaña D. Actividad de rayos en venezuela utilizando la data del sensor óptico (lis) del proyecto trmm de la nasa. *Revista Técnica de Ingeniería - LUZ*, 26(2):127–139, 2003.
- [5] Albrecht R., Goodman S., Buechler D., y Chronis T. Tropical frequency and distribution of lightning based on 10 years of observations from space by the lightning imaging sensor (lis). Preprint, Fourth Conf. on Meteorological Applications of Lightning Data, P2-12, 2009.
- [6] Ferro C., Tarazona J., y Urdaneta A. Caracterización cartográfica de la actividad cerámica venezolana y su uso en el diseño de líneas aéreas. *VI Jornadas Profesionales de CVG EDELCA*, 2005.
- [7] Anderson J. G. *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*. EPRI, 2 edition, 2001.

- [8] Briozzo C. and Simon M. Pararrayos no convencionales. In *7mo Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, EPIM 08. Montevideo, Uruguay.*, pages 207–227, 10, 2008.
- [9] IEC TC/SC 81. *IEC 62305-1 Ed. 1.0 b:2006, Protection against lightning - Part 1: General principles*. Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), 8 2007.
- [10] Cooray V. y Becerra M. Engineering return stroke models. *Proceedings of the IX International Symposium on Lightning Protection*, pages 117–122, 11 2007.
- [11] Hoole P. R. P. Modeling the lightning earth flash return stroke for studying its effects on engineering systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(2):1839–1844, 1993.
- [12] Hoole P. R. P. y Hoole S. R. H. A distributed transmission line model of cloud-to-ground lightning return stroke: Model verification, return stroke velocity, unmeasured currents and radiated fields. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(16):3851–3866, 2011.
- [13] Paul C. R. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. Wiley-IEEE Press, 2 edition, 10 2007.
- [14] Taylor A. E. *Advanced Calculus*. Ginn and Company, 1955.
- [15] Di Lorenzo E. The maxwell capacitance matrix. White paper, FastFieldSolvers, 3 2011. Recuperado el 7 de Noviembre de 2011, del sitio Web de FastFieldSolvers: <http://www.fastfieldsolvers.com>.
- [16] Djalel D., Ali H., y Benachiba C. Coupling phenomenon between the lightning and high voltage networks. *Proceedings of Word Academy of Science, Engineering and Technology (WASET)*, 21:95–101, 2007.
- [17] Bazelyan E. M. y Raizer Yu. P. *Lightning Physics and Lightning Protection*. Institute of Physics Publishing, 2000.