

**Estudio de las líneas de distribución aéreas con generación distribuida ante descargas
atmosféricas**

Yeinson Andrés Herrera Riasa

Cristian Leonardo Calderón Rojas

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Edison Andrés Soto Rios

Doctor en Ingeniería - Línea Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Consulta Bibliográfica	13
2. Metodología	17
2.1 Modelado en ATPDraw (versión 5.5).....	17
2.1.1 Modelado de los descargadores de sobretensiones de óxido de zinc.....	18
2.1.2 Modelado de la línea.....	20
2.1.3 Modelado del sistemas de puesta a tierra.....	21
2.1.4 Modelado del rayo.	21
2.1.5 Modelado de la generación distribuida y alimentación convencional.	22
3. Resultados	23
3.1 Simulación 1. El rayo impacta directamente sobre la fase B de la línea.	24
3.2 Simulación 2. El rayo impacta directamente sobre el cable de guarda.....	27
3.3 Simulación 3. El rayo impacta directamente sobre la fase B de la línea.	29
3.4 Simulación 4. El rayo impacta directamente sobre el cable de guarda.....	32
3.5 Perfil de tensión sin y con DG.	35
4. Análisis	36
5. Conclusiones	37
6. Recomendaciones	39

Referencias Bibliográficas 40

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Representación del tramo de la línea de distribución de 13.2 kV a analizar.	17
<i>Figura 2.</i> Modelo propuesto por Pinceti y Giannettoni por fase.	19
<i>Figura 3.</i> Respuesta del modelo de un DPS a la forma de onda 8/20 μ s y una corriente de 10kA	20
<i>Figura 4.</i> DG representada por un generador síncrono y un transformador.	22
<i>Figura 5.</i> Datos nominales del generador síncrono	22
<i>Figura 6.</i> Datos nominales del transformador	23
<i>Figura 7.</i> Modelo de la línea con 4 DG y Rayo en la fase B.	24
<i>Figura 8.</i> Modelo de la línea con 4 DG y Rayo en el cable de guarda.	27
<i>Figura 9.</i> Drenando corriente en el punto de impacto del rayo por medio del cable de guarda... ..	29
<i>Figura 10.</i> Modelo de la línea combinada con 4 DG y Rayo en la fase B.	30
<i>Figura 11.</i> Drenando corriente en el punto de impacto del rayo por medio de un DPS.	32
<i>Figura 12.</i> Modelo de la línea combinada con 4 DG y Rayo en el cable de guarda.	33
<i>Figura 13.</i> Señal de la tensión en el sistema sin ser impactada por el rayo.	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Los datos nominales del DPS se pueden encontrar en (GAMMA)</i>	19
Tabla 2. <i>Resistividad por clase de suelo. Fuente. Tierras soporte de la seguridad eléctrica.</i>	20
Tabla 3. <i>Valores de referencia para resistencias de puesta a tierra.</i>	21
Tabla 4. <i>Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.</i>	25
Tabla 5. <i>Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.</i>	25
Tabla 6. <i>Valor máximo de voltajes con la presencia de 9 DG.</i>	26
Tabla 7. <i>Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.</i>	27
Tabla 8. <i>Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.</i>	28
Tabla 9. <i>Valor máximo de voltajes con la presencia de 9 DG.</i>	28
Tabla 10. <i>Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.</i>	30
Tabla 11. <i>Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.</i>	31
Tabla 12. <i>Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.</i>	31
Tabla 13. <i>Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.</i>	33
Tabla 14. <i>Valor máximo de voltajes con presencia de 4 DG.</i>	34
Tabla 15. <i>Valor máximo de voltajes con presencia de 9 DG.</i>	34
Tabla 16. <i>Análisis del perfil de tensión sin y con DG.</i>	35

Resumen

TÍTULO: ESTUDIO DE LAS LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN AÉREAS CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS*

AUTORES: Yeinson Andrés Herrera Riasa
Cristian Leonardo Calderón Rojas **

PALABRAS CLAVES: Descargas atmosféricas, Líneas de distribución, Impactos directos, Generación distribuida, Simulador ATPDraw

DESCRIPCIÓN

Uno de los intereses del sector eléctrico es la implementación de las energías renovables no convencionales, tanto así que se han estudiado la integración de estas tecnologías para la producción, transmisión y distribución de energía eléctrica con la red mediante la generación distribuida. Ahora bien, una problemática en las redes de distribución aéreas es su exposición a las descargas atmosféricas, estas descargas producen salidas del sistema eléctrico generando grandes pérdidas económicas.

Teniendo en cuenta el auge de las energías renovables no convencionales y su implementación en las redes de distribución en Colombia, se realiza este trabajo de investigación en cual se trata el impacto que causa la generación distribuida en las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas en sistemas de distribución; para este trabajo se han realizado simulaciones teniendo en cuenta los impactos directos de rayos, ya sea un impacto producido en el cable de fase con presencia de dispositivos contra sobretensiones o un impacto en el cable de guarda, la cantidad de generadores presentes en la línea, la ubicación de los dispositivos de protección y localización del punto de impacto del rayo entre otras. Las sobretensiones obtenidas en las líneas de distribución con y sin generación distribuida serán comparadas y analizadas con ayuda del software ATPDraw. Por último, se concluyó que las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas en líneas de distribución aéreas con generación distribuida presentan una variación..

* Proyecto de grado

** Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director Edison Andrés Soto Ríos Doctor en Ingeniería - Línea Automática

Abstract

TITLE: STUDY OF OVERHEAD DISTRIBUTION LINES WITH DISTRIBUTED GENERATION AGAINST ATMOSPHERIC DISCHARGES *

AUTHORS: Yeinson Andrés Herrera Riasa
Cristian Leonardo Calderón Rojas **

KEYWORDS: Atmospheric discharges, Distribution lines, Direct impacts, Distributed generation, ATPDraw simulator.

DESCRIPTION

As one of the interests of the electricity sector is the implementation of non-conventional renewable energies, so much so that the integration of these technologies for the production, transmission and distribution of electricity with the grid through distributed generation has been studied. However, a problem in aerial distribution networks is their exposure to atmospheric discharges, these discharges produce exits from the electrical system generating great economic losses.

Taking into account the rise of non-conventional renewable energies and their implementation in distribution networks in Colombia, this research work deals with the impact caused by distributed generation in the overvoltages produced by atmospheric discharges in distribution systems; for this work simulations have been made taking into consideration the direct impacts of lightning, either an impact produced in the phase cable with the presence of anti-surge devices or an impact on the guard cable, the number of generators present in the line, the location of protection devices and location of the point of impact of the lightning and other factors. The overvoltages generated in the distribution lines with and without distributed generation will be compared and analyzed with the support of ATPDraw software. Finally, it was concluded that the overvoltages produced by atmospheric discharges in aerial distribution lines with distributed generation present a variation.

* Bachelor Thesis

** Facultad De Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Director Edison Andrés Soto Ríos Doctor en Ingeniería - Línea Automática

Introducción

Desde hace varios años, uno de los intereses de la industria eléctrica es la implementación de energías renovables no convencionales; conociendo que el impacto de la producción de energía aporta un porcentaje significativo en las emisiones del CO₂, desde el año 2009 la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha venido estudiando en Colombia un futuro energético sostenible. A través de la ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014) se ha buscado regular el Sistema Energético Nacional a partir de la promoción, prevención, desarrollo y la utilización de energías renovables no convencionales, y a su vez se ha estudiado la integración de nuevas tecnologías para la producción, transmisión y distribución de energía con la red mediante la generación distribuida (DG).

Las redes de distribución están expuestas a descargas atmosféricas; según estudios realizados, estas son las principales causantes de fallas momentáneas o permanentes, resultando en daños en los equipos, en la estructura y/o en el sistema eléctrico, generando cuantiosas pérdidas económicas (Sierra, Gonzalo, Morales, & De, 2004) (Pérez, 2006). Los impactos de las descargas atmosféricas se dividen en dos: impactos directos e indirectos. Los impactos directos de rayo son aquellos que golpean los conductores de fase, neutros o de tierra ocasionando sobretensiones. Por otro lado, los impactos indirectos de rayos son aquellos que golpean las estructuras aledañas generando tensiones inducidas que viajan a través de las líneas de distribución (Henaó-Céspedes, Cano-Plata, & Díaz-Cadavid, 2015).

La incidencia de descargas atmosféricas en los conductores de líneas de distribución (DL) o en sus proximidades puede dar lugar a sobretensiones de alta magnitud. De acuerdo con la literatura, las sobretensiones pueden aumentar si la red presenta centrales eléctricas de generación distribuida (Vita, Ekonomou, & Christodoulou, 2016) (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013). Si estas sobretensiones llegan a superar los niveles de aislamiento provocarían alteraciones y/o daños tanto en los dispositivos electrónicos utilizados en la generación no convencional como en los recursos distribuidos; estas alteraciones y/o daños, pueden provocar fallas que harán que los dispositivos de protección actúen (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013). Los equipos usados para la interconexión de la generación distribuida aumentan la sensibilidad del sistema eléctrico, estos equipos (dispositivos de control, medición, detección, comunicación y automatización) son susceptibles a variaciones de tensión y corriente causadas por descargas atmosféricas (Vita, Ekonomou, & Christodoulou, 2016) (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013), por tanto se debe aumentar la protección del sistema eléctrico contra dichas variaciones para garantizar la continuidad, fiabilidad y calidad de la energía suministrada a la red de distribución (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013).

Por lo tanto, este documento tiene como objetivo presentar por medio de simulaciones realizadas con el software ATPDraw el impacto que puede tener la generación distribuida en las sobretensiones generadas por descargas atmosféricas en líneas de distribución ante impactos directos producidos en el cable de guarda y en el cable de fase.

En consecuencia, en la sección II se realiza una consulta bibliográfica acerca de “las líneas de distribución aéreas con generación distribuida ante descargas atmosféricas”. La sección III se demuestran cómo se modelaron cada uno de los elementos utilizados (líneas, descargadores de sobretensión (DPS), generadores, etc.). La sección IV se consignaron los resultados que se

obtuvieron en las diferentes simulaciones y para finalizar en la sección V se encuentra el análisis y las conclusiones del estudio, por último, se plantean una serie de recomendaciones para futuros trabajos.

1. Consulta Bibliográfica

Los rayos son una de las causas principales de las fallas en las líneas de distribución eléctrica. Estas descargas generan sobretensiones que ocasionan interrupciones momentáneas y sostenidas en las líneas (Sierra, Gonzalo, Morales, & De, 2004) (Pérez, 2006). Esta perturbación ha despertado ampliamente el interés de investigadores, siendo estudiada a nivel mundial desde principios del siglo XX. Los primeros estudios realizados datan del año 1908 cuando Wagner argumentó que una nube cargada puede inducir una carga en una línea aérea (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Wagner, 1908). Este estudio fue punto de partida para el inicio de nuevas investigaciones en este campo, fue así como Anderdoff en 1911 (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Adendorff, 1911), estableció que los efectos causados por un impacto directo en la línea se pueden reducir si dicha línea se encuentra aterrizada en postes. Luego en 1942 Wagner y McCann (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Wagnerj & McCann, 1942) por medio de trabajos enfocados en líneas de transmisión demostraron que las sobretensiones inducidas por rayos son producidas principalmente por el campo electromagnético generado en la descarga de retorno. Seis años después en 1948 Szpor (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Szpor, 1948) calculó el voltaje inducido en la línea causado por impactos indirectos. Golde (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Golde, 1954)

en 1954 estudió las sobretensiones generadas en varios tipos de líneas por impactos directos e indirectos, la influencia del cable de guarda reducción de la amplitud de las sobretensiones y la incidencia que tiene los objetos cercanos a la línea en las sobretensiones.

En 1958 Rusck (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Rusck, 1958) (Soto, 2014) (Medina & Castro, 2010) realiza un aporte significativo al incluir el efecto del campo electromagnético en el cálculo de las sobretensiones inducidas en la línea de distribución mediante un modelo de acople. Posteriormente Taylor, Scatterwhite, y Harrison (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Medina & Castro, 2010) (Taylor, Satterwhite, & Harrison, 1965) en 1965 investigaron las sobretensiones producidas por un campo electromagnético no uniforme en una línea de transmisión de dos conductores. En 1969 Chowdhuri y Gross (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Wagner, 1908) (Chowdhuri & Gross, 1969) analizan los voltajes en una línea multiconductora y concluyeron que la magnitud del voltaje inducido en una línea multiconductora es mayor que la de una línea de un solo conductor, por lo que propusieron un modelo de acoplamiento mutuo. Agrawal, Price y Gurbaxani (Master, Uman, & Beasley, 1984) (Wagnerj & McCann, 1942) (Agrawal, Price, & Gurbaxani, 1980) publicaron otro modelo de acoplamiento para el cálculo de sobretensiones en 1980, para el estudio de este modelo se tuvo en cuenta una línea aérea de múltiples conductores sin pérdidas, excitada por un campo electromagnético no uniforme, dicha línea se encuentra ubicada sobre un terreno de conductividad infinita, este modelo es uno de los más utilizados para investigaciones a nivel mundial debido que los resultados obtenidos son similares con respecto a mediciones realizadas en Francia, Italia y Suiza (Eriksson & Meal, 1982). Otros autores que propusieron diferentes modelos de acople fueron S.C. Mar y A.C. Liew (1986), F. Rachidi (1993) y J. Voislav (1997).

De igual forma, se realizaron estudios experimentales entre los que se destacan los realizados por Erikson en Sudáfrica (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Eriksson, Stringfellow, & Meal, 1982) (1982), donde se logró establecer que la mayoría de las sobretensiones inducidas eran de polaridad positiva. Posteriormente Yokoyama et al. (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Yokoyama, Miyake, Mitani, & Takanishi, 1983) (Yokoyama, Miyake, Mitani, & Yamazaki, 1986) entre los años de 1983 y 1986, demostró que las presencias de conductores de apantallamiento aterrizados reducen las tensiones inducidas en las líneas de distribución de manera teórica y experimental. Consecutivamente midió las formas de onda de la corriente y del voltaje inducido por los rayos en una planta de energía en Japón. En 1984, M. Master et al. . (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Master, Uman, & Beasley, 1984) realizaron experimentos en una línea des energizada de 460 m y concluyeron que la polaridad de la onda puede ser positiva o negativa, dependiendo de la ubicación del punto de impacto del rayo. Luego Boaventura et al. (1990) (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Boaventura, 1990) comprobó la influencia de la resistividad del suelo en las tensiones inducidas mediante modelo a escala reducida. Para el año 1996 en California Barker et. al. . (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Barker, Short, Eybert-berard, & Berlandis, 1996) induce tensiones de rayos producidos artificialmente en una línea no energizada, con este estudio él logra descubrir que el campo eléctrico vertical resultante del rayo desempeña un papel dominante en el proceso de inducción, pero el campo magnético también contribuye significativamente al voltaje inducido total. Años más tarde, Piantini (2002).(Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Piantini, y otros, 2002) verificó la influencia de las edificaciones en las tensiones inducidas en redes de distribución a través de un modelo a escala reducido con transformadores y DPS. En el año 2004 en Italia, Paolone et al. (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004) estudió el efecto que tiene el cable de guarda y los DPS en las sobretensiones concluyendo que la efectividad de estos depende

exclusivamente de la separación entre los puntos de conexión a tierra o la distancia de separación entre DPS. Por último, en Colombia, Pérez et. al. (Pérez, 2006) (Soto, 2014) (Perez, Herrera, & Torres, 2003) realizó estudios relevantes, en el año 2003 clasificó los parámetros según su influencia al momento de calcular tensiones inducidas, además en el año 2010 realizó mediciones de tensiones inducidas en redes energizadas, en las cuales analizó la energía disipada en dispositivos de protección.

Posteriormente, con la inclusión de la generación distribuida en las líneas de distribución surgió la necesidad de estudiar los impactos de rayos en este escenario; fue así como en el año 2010, Hong-qiao Yu (Yu, Chen, & Peng-cheng, 2010) mediante un estudio realizado infirió la necesidad de instalar dispositivos de protección en el cable y los transformadores con el fin de disminuir de manera eficiente las sobretensiones inducidas. Más adelante C. Mozina (2014) (Mozina, 2014) comparó el comportamiento de las sobretensiones producidas por rayos ante la presencia de DG basadas en inversores con la DG síncrona y de inducción convencional. Finalmente M. Araújo et al. (2013) (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013) y V. Vasiliki (2016) (Vita, Ekonomou, & Christodoulou, 2016) mediante estudios de simulación realizados concluyeron que las sobretensiones originadas por rayos en las líneas de distribución aumentaban con la presencia de centrales eléctricas de DG.

2. Metodología

2.1 Modelado en ATPDraw (versión 5.5)

El sistema que se va a simular es una línea de distribución de 2 km con DPS, con cable de guarda y bajantes del cable de guarda a tierra representados por una resistencia de 10 Ohm, tiene una altura total de 12 m, un ancho de 2,3 m y una tensión de servicio de 13.2 kV.

La línea de distribución está compuesta por 10 tramos de 0.2 km y en cada uno de ellos hay un punto de medición para el análisis del comportamiento de las sobretensiones causadas por una descarga atmosférica con y sin DG; en los extremos de la línea se tendrán generadores síncronos conectados mediante un transformador a una línea de 5 km que representará la alimentación convencional del sistema en estudio (Figura 1).

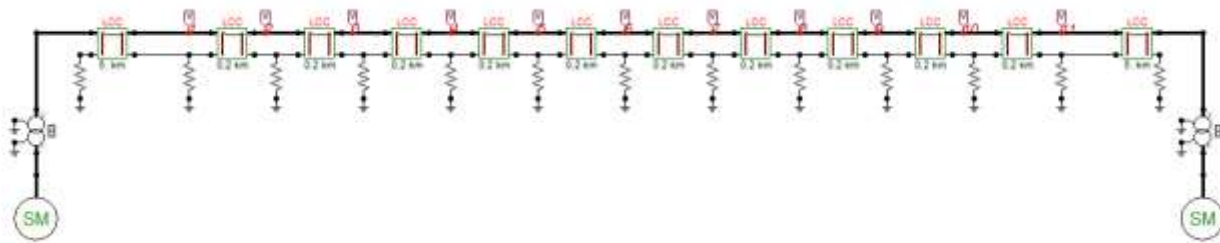


Figura 1. Representación del tramo de la línea de distribución de 13.2 kV a analizar.

Para Modelar en ATPDraw el tramo de línea de 13.2 kV se tienen en cuenta los descargadores de sobretensiones de óxido de zinc, la línea, el sistema de puesta a tierra, la generación distribuida y el rayo, los cuales se representarán con las diferentes herramientas del software.

2.1.1 Modelado de los descargadores de sobretensiones de óxido de zinc. Para la protección del sistema a analizar se usan descargadores de sobretensión de óxido de zinc, los cuales se destacan por su capacidad para actuar adecuadamente en sistemas con flujo de potencia unidireccional o bidireccional.

Estos DPS son usados en líneas de distribución por sus características no lineales de sus bloques de resistencias en la región de corte de baja intensidad, porque esta propiedad implica una menor corriente de fuga drenada. Características como su corto tiempo de respuesta a los transitorios, bajo voltaje residual, alta estabilidad térmica y alta capacidad de absorción de energía cuando hay sobretensiones temporales y transitorias hacen que sea de los más usados en DL (Modrusan, 1983) (De Nigris, y otros, 1998).

El modelo que se implementó en la interfaz gráfica ATPDraw, y las características eléctricas de los DPS están descritas en el modelo de Pinceti y Giannettoni (Pinceti & Giannettoni, 1999) .

En la Figura 2, se visualiza el modelo del DPS por fase en el software ATPDraw, recordando que cada fase lleva su propio DPS; y en la Figura 3 se observa la consistencia del comportamiento del modelo, porque cuando el DPS se sometió a un voltaje mayor que su voltaje nominal, su impedancia disminuyó, permitiendo que la corriente generada por el impacto atmosférico se disipara. Además, se verifica que el valor de la sobretensión resultante fue limitado y se recuperó el valor de alta impedancia de DPS después del final de la tensión de solicitud, por esto, se puede decir que el DPS funciona adecuadamente (Pinceti & Giannettoni, 1999).

Tabla 1.

Los datos nominales del DPS se pueden encontrar en (GAMMA)

Tensión nominal	12kV
Tensión residual (10kA-1.2 μs)	68.2 kV
Tensión residual para una corriente con frente de onda de 8 μs	39,6 kV
Tensión residual para corriente de 10kA con forma de onda de 8x20 μs	39,6 kV
R	1 MΩ
L0	0.7222 μH
L1	2.1667 μH
A0	
A1	

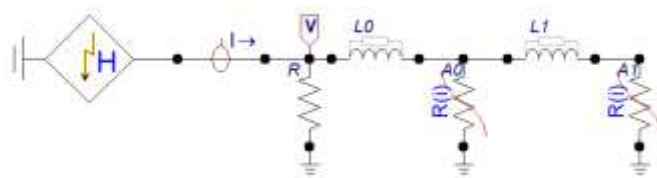


Figura 2. Modelo propuesto por Pinceti y Giannetoni por fase.

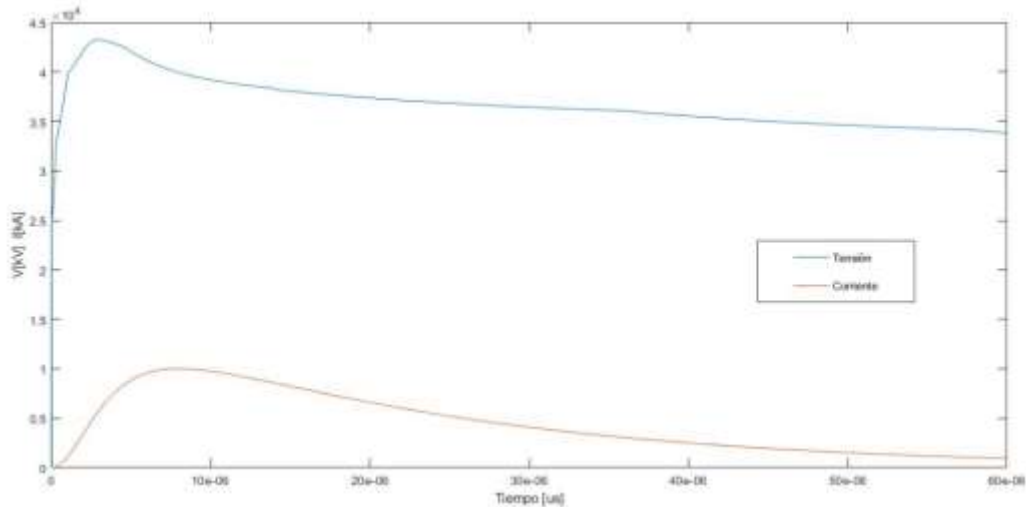


Figura 3. Respuesta del modelo de un DPS a la forma de onda 8/20 μ s y una corriente de 10kA .

2.1.2 Modelado de la línea. Para la DL se utiliza un cable de fase PENGUIN 4/0 ACSR con resistencia de $0.260 \Omega/\text{km}$, reactancia inductiva de $0.3161 \Omega/\text{km}$, 14,31 mm de diámetro. El cable de guarda tiene las mismas especificaciones que el cable de fase. En ATPDraw se utiliza la herramienta “LCC”, en la cual se selecciona el modelo Bergeron en donde se ingresan los parámetros de la DL, el valor de resistividad varía dependiendo del tipo de suelo (Tabla 2), para este estudio se tomó el valor de $150 \Omega/\text{m}$. La frecuencia a la cual viaja la onda es de 100 kHz. Las líneas están a una altura de 11 m y el cable de guarda a 12 m.

Tabla 2.

Resistividad por clase de suelo. Fuente. Tierras soporte de la seguridad eléctrica. (Casas, 2006)

Clase de suelo	Resistividad [Ω/m]
Clase A: Blandos ácidos	Menor a 200
Clase B1: Arenosos semisecos	Entre 500 y 1000
Clase B2: Arenosos secos	Entre 1000 y 2000
Clase C1: Rocosos	Menor a 1000
Clase C2: Rocosos	Mayor a 1000

2.1.3 Modelado del sistemas de puesta a tierra. El reglamento de instalaciones eléctricas – RETIE 2013 indica que para un sistema de protección contra rayos la resistencia a tierra debe ser de 10Ω (Tabla 2). En ATPDraw el sistema de puesta a tierra se representa por una resistencia. Los bajantes del cable de guarda al sistema de puesta a tierra están puestos cada 0.2 km porque según (Paolone, Nucci, Petrache, & Rachidi, 2004) es la distancia adecuada para garantizar que la línea de distribución este bien protegida.

Tabla 3.

Valores de referencia para resistencias de puesta a tierra.

Aplicación	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra
Estructuras y torrecillas metálicas de líneas o redes con cable de guarda.	20Ω
Subestaciones de alta y extra alta tensión.	1Ω
Subestaciones de media tensión.	10Ω
Protección contra rayos.	10Ω
Punto neutro de acometida de baja tensión.	25Ω
Redes para equipos electrónicos o sensibles.	10Ω

Nota. Tomado de. Tabla 15.4 RETIE 2013.

2.1.4 Modelado del rayo. La fuente que se usó en este trabajo para simular la descarga atmosférica es la “Heidler type 15”, la cual se accionará a los $10 \mu\text{s}$ de iniciar la simulación del sistema. Para el análisis del comportamiento de las sobretensiones en la DL, el impacto del rayo se dará en el cable de guarda y en la fase B de la línea. El rayo tiene una forma de onda de $1.2/50\mu\text{s}$ (Hileman, 1999), con una amplitud máxima de 10 kA y una amplitud de 5 kA para el tiempo de cola.

2.1.5 Modelado de la generación distribuida y alimentación convencional. La generación distribuida proporciona un flujo de energía bidireccional; esta generación distribuida en ATPDraw está representada por generadores síncronos (Vita, Ekonomou, & Christodoulou, 2016) (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013) que se conectan a la red por medio de un transformador de 500 kVA (Figura 4).

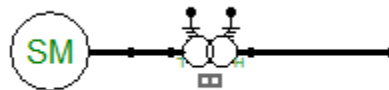


Figura 4. DG representada por un generador síncrono y un transformador.

Los datos que se modificaron al generador síncrono son: La tensión (Volt), la frecuencia (Freq), la potencia (RMVA) y se usó la herramienta SM59 que tiene los siguientes datos nominales..

Component: SM59_NC			Component: SM59_NC			Component: SM59_NC			Component: SM59_NC		
Attributes			Attributes			Attributes			Attributes		
DATA	UNIT	VALUE	DATA	UNIT	VALUE	DATA	UNIT	VALUE	DATA	UNIT	VALUE
Volt	Volt	15	AGLINE	Amps	100	Xq'	pu	0.2	RN	pu	0
Freq	Hz	60	RA	pu	0.03	Td0'	s	4.3	XN	pu	0
Angle	Deg	0	XL	pu	0.13	Tq0'	s	0.85	XCAN	pu	0.13
Poles		2	Xd	pu	1.79	Td0''	s	0.032	HICO		0.03
SMOVT0		1	Xq	pu	1.71	Tq0''	s	0.05	DSR		0
SMOVTQ		1	Xd'	pu	0.169	Xc	pu	0.13	DSD		50
RMVA	MVA	0.5	Xq'	pu	0.228	RN	pu	0	PM		3
RHV	kV	0.208	Xd''	pu	0.135	XN	pu	0	MEDLUM	T-Matic	1

Figura 5. Datos nominales del generador síncrono

Los datos que se modificaron en el transformador son: frecuencia (f), Potencia (So), Tensión de alta (Vh), tensión de baja (VI) y se usó la herramienta TRAYYH_3 que tiene los siguientes datos nominales.

Component: TRAYH_3		
Attributes	Characteristic	
DATA	UNIT	VALUE
f	Hz	60
So	VA	500000
Vh	Volts	10780
VI	Volts	170
Ped	W	18112
Ied	Amps	2.39
Ued	Volts	11010
Psd	W	192530

Component: TRAYH_3		
Attributes	Characteristic	
DATA	UNIT	VALUE
Isd	Amps	153.1
Uzd	Volts	35213
PeH	W	115325
Ieh	Amps	500
Ueh	Volts	1183
Psh	W	8825
Ish	Amps	70
RMS	1:Urms/Irms	0

Figura 6. Datos nominales del transformador

3. Resultados

Para cumplir con el objetivo de este trabajo es necesario analizar las sobretensiones en las DL con y sin DG ante descargas atmosféricas directas, para poder realizar una comparación entre ellas y ver el impacto que tiene la DG en el sistema eléctrico. Para esto se realizaron una serie de simulaciones teniendo en cuenta la variación de parámetros como la ubicación de la DG, la ubicación de los DPS y las distancias entre los bajantes del cable de guarda a tierra; las descargas directas del rayo se ubicaron en el cable de guarda y en la fase B de la línea.

Los resultados tienen 4 simulaciones, a continuación, se mostrarán cada una de ellas. En la simulación 1 el rayo impacta directamente sobre la línea y está protegida solamente por DPS. En la simulación 2 el rayo impacta sobre el cable de guarda y no tiene DPS. Las simulaciones 3 y 4 son la combinación de las protecciones DPS y cable de guarda con impacto de rayo en la línea y cable de guarda respectivamente.

3.1 Simulación 1. El rayo impacta directamente sobre la fase B de la línea.

En este caso se simuló la DL con 3 DPS y sin cable de guarda para poder ver los efectos que tiene la DG en las sobretensiones cuando el rayo impacta la línea y sin que el cable de guarda tenga incidencias en ellas. Se analizó los efectos en las sobretensiones al conectar 4 DG (en los puntos 3,5,7 y 9) y 9 DG (en los puntos 2,3,4,5,6,7,8,9 y 10).

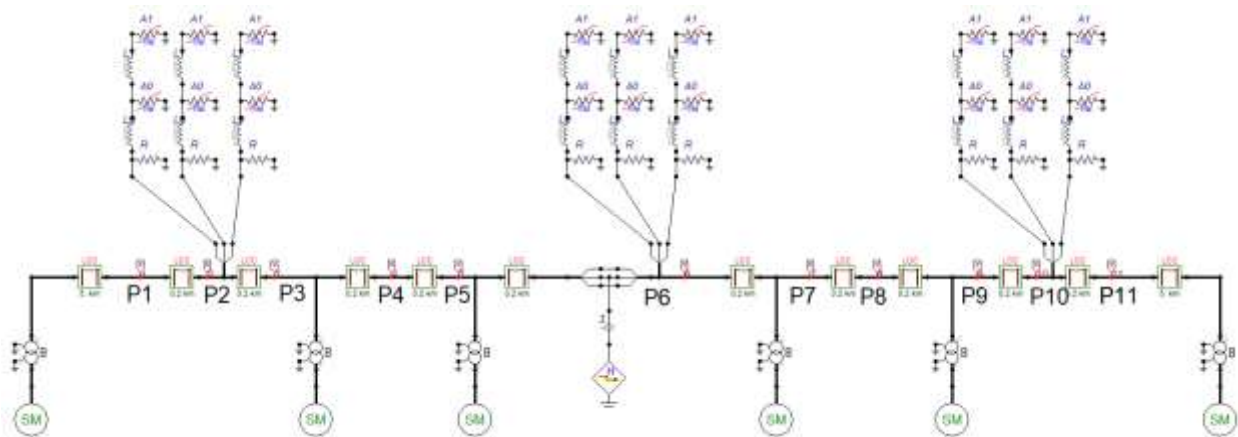


Figura 7. Modelo de la línea con 4 DG y Rayo en la fase B.

Tabla 4.

Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.

Línea con 3 DPS y sin la presencia de DG					
Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
6		1	29,056	38,129	-27,264
	2	2	26,160	37,262	-25,961
		3	41,630	58,992	39,002
		4	41,556	59,833	39,174
		5	41,183	62,705	39,650
	6	6	36,212	78,556	34,678
		7	41,183	62,705	39,650
		8	41,556	59,833	39,174
		9	41,630	58,992	39,002
	10	10	26,160	37,262	-25,961
		11	29,056	38,129	-27,264

Tabla 5.

Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.

Línea con 3 DPS y con la presencia de 4 DG						
Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
6			1	29,054	38,134	-27,251
		2	2	26,158	37,260	-25,956
	3		3	41,615	58,975	38,992
			4	41,548	59,829	39,173
	5		5	41,173	62,702	39,649
		6	6	36,204	78,557	34,678
	7		7	41,173	62,702	39,649
			8	41,548	59,829	39,173
	9		9	41,615	58,975	38,992
		10	10	26,158	37,260	-25,956
			11	29,054	38,134	-27,251

Tabla 6.

Valor máximo de voltajes con la presencia de 9 DG.

Línea con 3 DPS y con la presencia de 9 DG						
Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
6			1	29,057	38,135	-27,249
	2	2	2	26,161	37,259	-25,955
	3		3	41,611	58,968	38,987
	4		4	41,544	59,825	39,170
	5		5	41,171	62,703	39,649
	6	6	6	36,202	78,556	34,678
	7		7	41,171	62,703	39,649
	8		8	41,544	59,825	39,170
	9		9	41,611	58,968	38,987
	10	10	10	26,161	37,259	-25,955
				11	29,057	38,135

La tabla 4 contiene los valores de las sobretensiones cuando no hay DG, estos valores de sobretensiones presentan variaciones al conectar un número mayor de DG, esto se puede observar en la Tabla 5 y tabla 6. Las variaciones más significativas se localizan en la fase B de los puntos de medición 3 y 9 al conectar 4 y 9 DG, esta diferencia es de 17 V y 24 V respectivamente.

En la Tabla 5 se puede observar que en la fase B, en los puntos de medición 1, 6 y 11 se presentó un aumento de la sobretensión, este aumento se debe a la influencia que tiene el tramo de línea de 5 km en la simulación.

En la tabla 6, las sobretensiones disminuyeron a excepción de las fases A y B del punto 1 y 11; y la fase A de los puntos de medición 2 y 10, pero estos valores que se presentaron en esos puntos son menores a las disminuciones encontradas en los demás puntos. Dichos cambios se presentan por la presencia de la línea de 5 km que se tiene en los extremos del tramo que se está analizando.

3.2 Simulación 2. El rayo impacta directamente sobre el cable de guarda.

En este caso se simuló la DL con cable de guarda, bajantes en cada tramo de 0.2 km de línea y sin DPS para poder ver los efectos que tiene la DG en las sobretensiones cuando el rayo impacta el cable de guarda y sin que los DPS tengan incidencias en ellas. Se analizó los efectos en las sobretensiones al conectar 4 DG (en los puntos 3,5,7 y 9) y 9 DG (en los puntos 2,3,4,5,6,7,8,9 y 10).

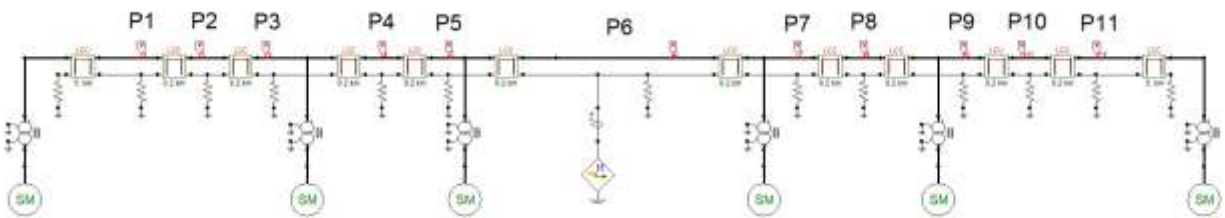


Figura 8. Modelo de la línea con 4 DG y Rayo en el cable de guarda

Tabla 7.

Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.

Línea con bajantes en el cable de guarda y sin la presencia de DG					
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6	1	15,563	-15,512	-17,239
2		2	13,787	-16,222	-18,361
3		3	14,281	-17,646	-19,076
4		4	16,707	-20,791	-22,163
5		5	26,563	-29,046	-29,547
6		6	89,453	80,740	75,276
7		7	26,563	-29,046	-29,547
8		8	16,707	-20,791	-22,163
9		9	14,281	-17,646	-19,076
10		10	13,787	-16,222	-18,361
11		11	15,563	-15,512	-17,239

Tabla 8.

Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.

Línea con bajantes en el cable de guarda y con la presencia de 4 DG						
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6		1	15,550	-15,494	-17,228
2			2	13,774	-16,205	-18,348
3		3	3	14,269	-17,629	-19,061
4			4	16,655	-20,777	-22,152
5		5	5	26,519	-29,032	-29,536
6			6	89,438	80,759	75,292
7		7	7	26,519	-29,032	-29,536
8			8	16,655	-20,777	-22,152
9		9	9	14,269	-17,629	-19,061
10			10	13,774	-16,205	-18,348
11			11	15,550	-15,494	-17,228

Tabla 9.

Valor máximo de voltajes con la presencia de 9 DG.

Línea con bajantes en el cable de guarda y con la presencia de 9 DG						
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6		1	15,512	-15,494	-17,224
2			2	13,736	-16,203	-18,344
3		3	3	14,236	-17,628	-19,061
4			4	16,480	-20,775	-22,150
5		5	5	26,366	-29,033	-29,537
6			6	89,397	80,722	75,254
7		7	7	26,366	-29,033	-29,537
8			8	16,480	-20,775	-22,150
9		9	9	14,236	-17,628	-19,061
10			10	13,736	-16,203	-18,344
11			11	15,512	-15,494	-17,224

La tabla 7 contiene los valores de las sobretensiones cuando no hay DG, estos valores de sobretensiones van disminuyendo al conectar un número mayor de DG, esto se puede observar en la Tabla 8 y Tabla 9, donde al aumentar de 4 a 9 DG, las sobretensiones disminuyeron.

La disminución más significativa al conectar 4 DG se puede ver en la fase A de los puntos de medición 4 y 5 donde la diferencia es de 52 V y 44 V respectivamente. Mientras que cuando se conectan 9 DG la disminución más significativa se puede ver en la fase A de los mismos puntos 4 y 5 donde la diferencia es de 227 V y 197 V respectivamente.

En la Tabla 8 se puede observar que las fases B y C del punto donde impacta el rayo presenta un aumento en las sobretensiones al conectarle 4 DG, pero cuando se conectan 9 DG las sobretensiones disminuyen en el punto de impacto.

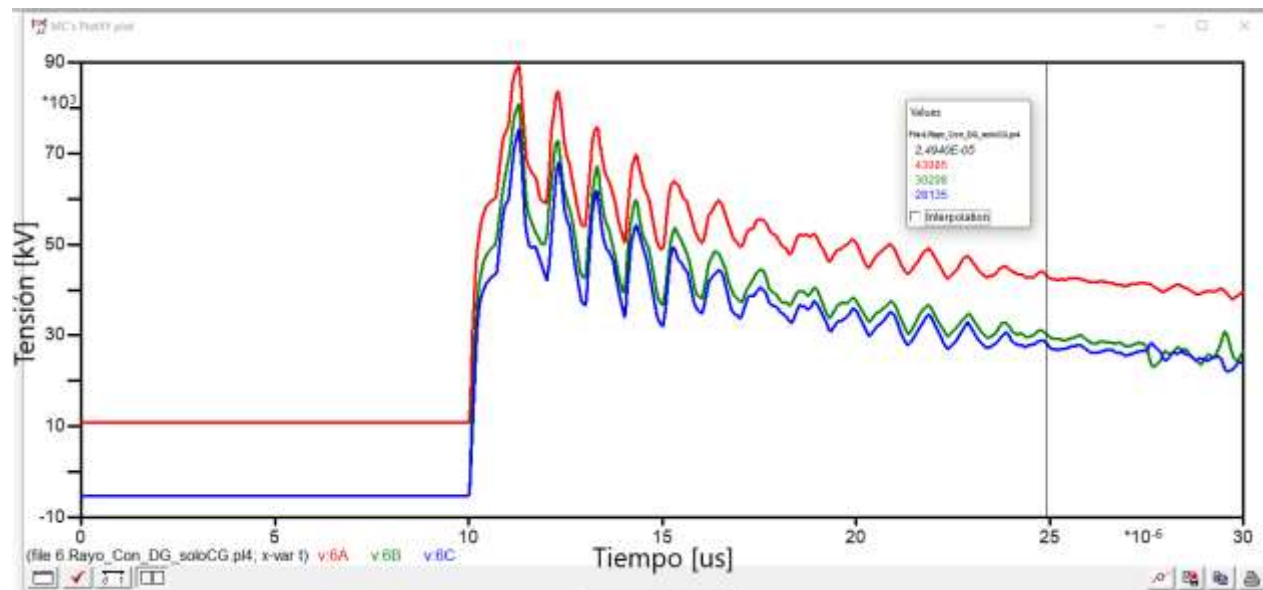


Figura 9. Drenando corriente en el punto de impacto del rayo por medio del cable de guarda.

3.3 Simulación 3. El rayo impacta directamente sobre la fase B de la línea.

Este caso es la combinación de los casos 1 y 2. En este, se tienen los DPS y el cable de guarda en el sistema para poder ver el impacto que tiene la DG en las sobretensiones.

Se analizó los efectos en las sobretensiones al conectar 4 DG (en los puntos 3,5,7 y 9) y 9 DG (en los puntos 2,3,4,5,6,7,8,9 y 10).

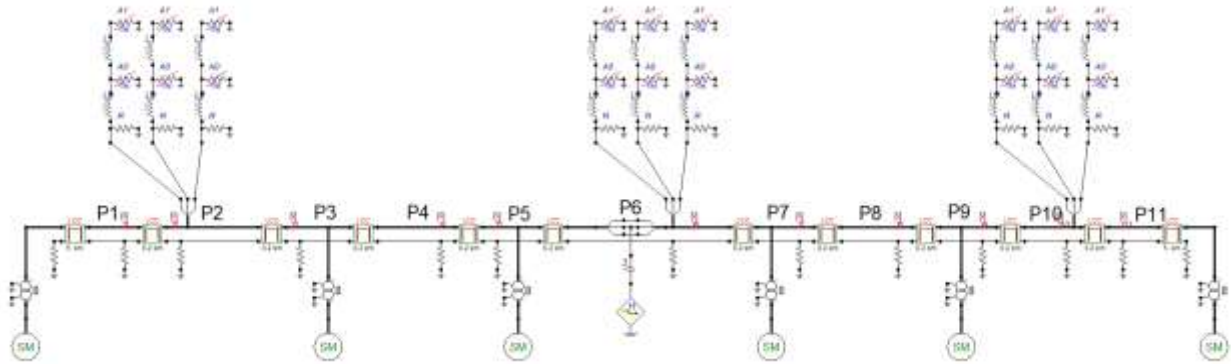


Figura 10. Modelo de la línea combinada con 4 DG y Rayo en la fase B.

Tabla 10.

Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.

Línea con 3 DPS, Con bajantes en el cable de guarda y sin la presencia de DG						
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6		1	27,240	35,978	-25,134
2		2	2	25,309	33,800	-26,886
3			3	29,004	52,057	-26,451
4			4	29,153	52,777	28,447
5			5	31,482	52,735	28,280
6		6	6	35,518	78,425	32,226
7			7	31,482	52,735	28,280
8			8	29,153	52,777	28,447
9			9	29,004	52,057	-26,451
10		10	10	25,309	33,800	-26,886
11				11	27,240	35,978

Tabla 11.

Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.

Línea con 3 DPS, Con bajantes en el cable de guarda y con la presencia de 4 DG							
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6			1	27,216	35,979	-25,125
2			2	2	25,288	33,798	-26,881
3		3		3	28,962	52,038	-26,439
4				4	29,120	52,767	28,437
5		5		5	31,461	52,728	28,275
6			6	6	35,510	78,425	32,227
7		7		7	31,461	52,728	28,275
8				8	29,120	52,767	28,437
9		9		9	28,962	52,038	-26,439
10			10	10	25,288	33,798	-26,881
11					11	27,216	35,979

Tabla 12.

Valor máximo de voltajes con la presencia de 4 DG.

Línea con 3 DPS, Con bajantes en el cable de guarda y con la presencia de 9 DG							
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6			1	27,202	35,978	-25,123
2		2	2	2	25,278	33,796	-26,880
3		3		3	28,943	52,029	-26,437
4		4		4	29,100	52,756	28,418
5		5		5	31,456	52,729	28,274
6			6	6	35,506	78,425	32,227
7		7		7	31,456	52,729	28,274
8		8		8	29,100	52,756	28,418
9		9		9	28,943	52,029	-26,437
10		10	10	10	25,278	33,796	-26,880
11					11	27,202	35,978

La resultados de la Tabla 11 y Tabla 12 indican que al conectar 4 y 9 DG en el sistema, las sobretensiones disminuyen en todos los puntos menos en la fase C del punto 6, esto se debe al tiempo de drenado del DPS que se encuentra en el punto donde impacta el rayo, porque en los demás puntos si se nota la disminución de las sobretensiones.

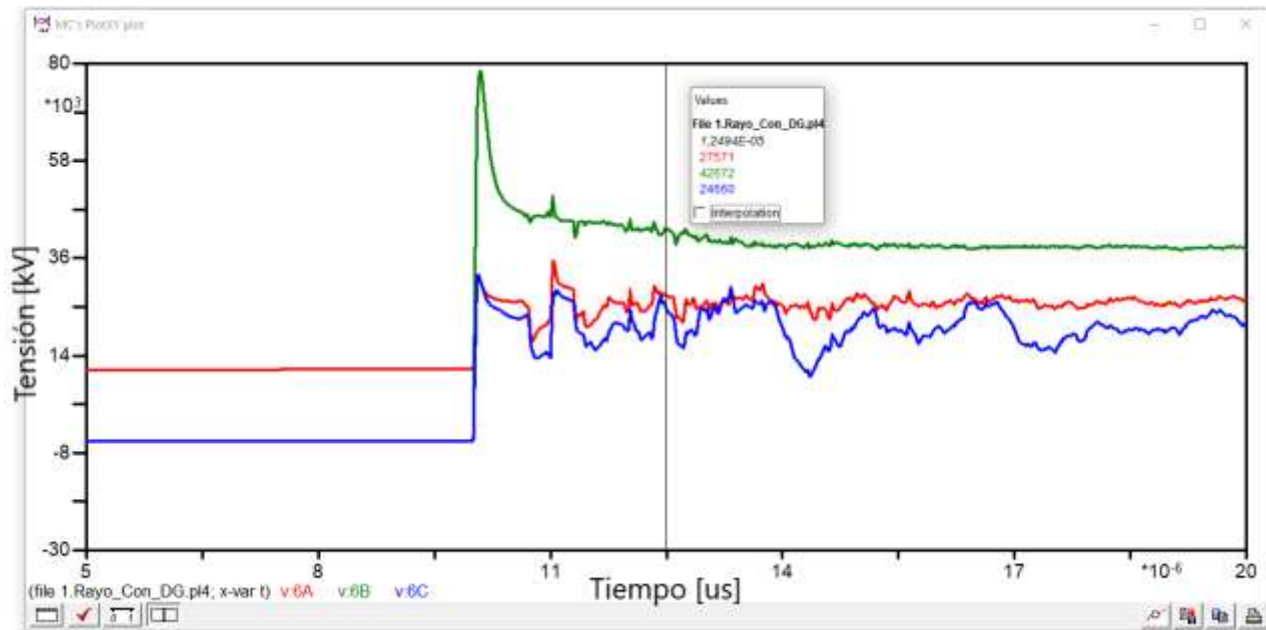


Figura 11. Drenando corriente en el punto de impacto del rayo por medio de un DPS.

3.4 Simulación 4. El rayo impacta directamente sobre el cable de guarda.

Este caso es la combinación de los casos 1 y 2. En este, se tienen los DPS y el cable de guarda en el sistema para poder ver el impacto que tiene la DG en las sobretensiones.

Se analizó los efectos en las sobretensiones al conectar 4 DG (en los puntos 3,5,7 y 9) y 9 DG (en los puntos 2,3,4,5,6,7,8,9 y 10).

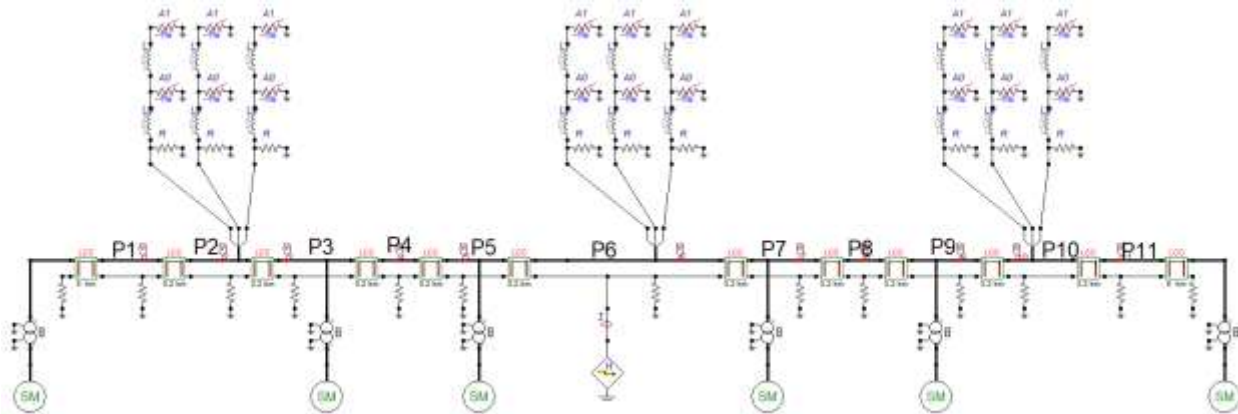


Figura 12. Modelo de la línea combinada con 4 DG y Rayo en el cable de guarda.

Tabla 13.

Valor máximo de voltajes sin la presencia de DG.

Línea con 3 DPS, Con bajantes en el cable de guarda y sin la presencia de DG						
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6		1	-28,926	-30,261	-28,479
2		2	2	-27,141	-28,640	-27,431
3			3	-36,115	-39,994	-37,862
4			4	-39,294	-44,840	-41,753
5			5	-43,184	-50,135	-46,060
6		6	6	33,199	32,723	32,079
7			7	-43,184	-50,135	-46,060
8			8	-39,294	-44,840	-41,753
9			9	-36,115	-39,994	-37,862
10		10	10	-27,141	-28,640	-27,431
11			11	-28,926	-30,261	-28,479

Tabla 14.

Valor máximo de voltajes con presencia de 4 DG.

Línea con 3 DPS, Con bajantes en el cable de guarda y con la presencia de 4 DG							
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6			1	-28,915	-30,252	-28,469
2			2	2	-27,134	-28,630	-27,425
3		3		3	-36,085	-39,970	-37,832
4				4	-39,276	-44,824	-41,735
5		5		5	-43,169	-50,121	-46,045
6			6	6	33,198	32,724	32,082
7		7		7	-43,169	-50,121	-46,045
8				8	-39,276	-44,824	-41,735
9		9		9	-36,085	-39,970	-37,832
10			10	10	-27,134	-28,630	-27,425
11				11	-28,915	-30,252	-28,469

Tabla 15.

Valor máximo de voltajes con presencia de 9 DG.

Línea con 3 DPS, Con bajantes en el cable de guarda y con la presencia de 9 DG							
Rg [10 Ω]	Ubicación Descarga Rayo	Ubicación DG	Ubicación DPS	Punto de medición	Fase A Voltaje [kV]	Fase B Voltaje [kV]	Fase C Voltaje [kV]
1	6			1	-28,905	-30,242	-28,463
2		2	2	2	-27,127	-28,619	-27,419
3		3		3	-36,068	-39,955	-37,817
4		4		4	-39,259	-44,805	-41,720
5		5		5	-43,165	-50,116	-46,042
6		6	6	6	33,198	32,723	32,080
7		7		7	-43,165	-50,116	-46,042
8		8		8	-39,259	-44,805	-41,720
9		9		9	-36,068	-39,955	-37,817
10		10	10	10	-27,127	-28,619	-27,419
11				11	-28,905	-30,242	-28,463

La Tabla 14 indica que al conectar 4 DG las sobretensiones en todos los puntos disminuyen con excepción de las fases B y C del punto donde impacta el rayo, pero cuando se conectan 9 DG, estos valores de sobretensión disminuyen.

Los valores de la tabla 16 en donde se conectaron 9 DG se puede observar que entre más DG se tenga conectada, las disminuciones en las sobretensiones serán más significativas.

3.5 Perfil de tensión sin y con DG.

Los valores que se observan en la Tabla 16 son los de la tensión instantanea de cada fase del sistema eléctrico sin ser afectada por el impacto directo del rayo. En la figura 10 se puede observar la señal del sistema completa.

Tabla 16.

Análisis del perfil de tensión sin y con DG.

Perfil de tensión sin DG				Perfil de tensión con 4 DG				Perfil de tensión con 9 DG			
t	7a	7b	7c	t	7a	7b	7c	t	7a	7b	7c
0	10811,5	-5409,29	-5400,76	0	10790,4	-5396,19	-5393,58	0	10785,6	-5393,31	-5391,92
0,000000001	10811,5	-5409,29	-5400,76	0,000000001	10790,4	-5396,19	-5393,58	0,000000001	10785,6	-5393,31	-5391,93
0,000000002	10811,5	-5409,28	-5400,77	0,000000002	10790,4	-5396,18	-5393,59	0,000000002	10785,6	-5393,3	-5391,93
0,000000003	10811,5	-5409,28	-5400,77	0,000000003	10790,4	-5396,18	-5393,59	0,000000003	10785,6	-5393,3	-5391,93
0,000000004	10811,5	-5409,28	-5400,77	0,000000004	10790,4	-5396,17	-5393,6	0,000000004	10785,6	-5393,3	-5391,94
0,000000005	10811,5	-5409,27	-5400,78	0,000000005	10790,4	-5396,17	-5393,6	0,000000005	10785,6	-5393,29	-5391,94
0,000000006	10811,5	-5409,27	-5400,78	0,000000006	10790,4	-5396,17	-5393,6	0,000000006	10785,6	-5393,29	-5391,95
0,000000007	10811,5	-5409,27	-5400,78	0,000000007	10790,4	-5396,16	-5393,61	0,000000007	10785,6	-5393,29	-5391,95
0,000000008	10811,5	-5409,26	-5400,79	0,000000008	10790,4	-5396,16	-5393,61	0,000000008	10785,6	-5393,28	-5391,95
0,000000009	10811,5	-5409,26	-5400,79	0,000000009	10790,4	-5396,16	-5393,61	0,000000009	10785,6	-5393,28	-5391,96

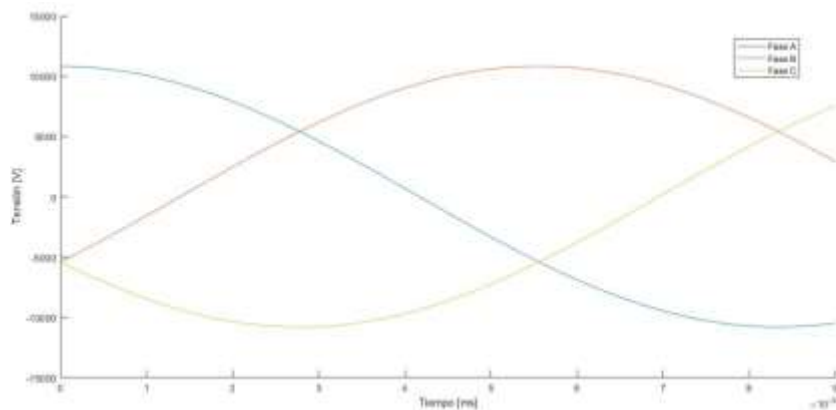


Figura 13. Señal de la tensión en el sistema sin ser impactada por el rayo.

Se midieron los valores de tensión instantánea en varios puntos del sistema cuando estaba energizado sin la presencia de DG, cuando se conectaron 4 DG y cuando se tenían 9 DG más. En la Tabla 16 hay una muestra de ellos tomada en el punto de medición 7. Cuando se tiene la línea con su alimentación convencional y sin la presencia de DG el valor de tensión de cada fase aumenta por los flujos de corriente del sistema. Ahora bien, cuando se empieza a conectar la DG al sistema, las tensiones en cada fase comienzan a disminuir.

4. Análisis

Realizando el análisis de la revisión bibliográfica (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013) se pudo establecer que, a diferencia de esta investigación, en este estudio concluyeron que las sobretensiones aumentan cuando se tiene DG en la línea. En esta investigación realizan simulaciones de una línea de distribución de 69 kV, en las cuales realizan mediciones en 3 puntos de la línea, siendo un punto de medida donde impacta el rayo, estas medidas se realizan sin y con presencia de GD en la línea, la cual se representa por medio de generadores síncronos en estado estable.

El funcionamiento del modelo de DPS que se usa en este trabajo presenta una sobretensión debido a las inductancias que conectan las resistencias no lineales, principalmente la L0. Esto ocurre porque se genera un alto di/dt . Este fenómeno se puede apreciar en la Figura 11 donde la tensión sube hasta tener un pico de 78.425 kV, en dicho punto el DPS comienza a drenar la corriente inducida por el impacto del rayo.

En este trabajo, la DG se caracterizó de manera sencilla por medio de generadores síncronos igual como se encontró en la revisión bibliográfica; por tanto, los modelos utilizados del transformador como del generador síncrono deben modificarse por máquinas de alta frecuencia para efectos de realizar una simulación transitoria confiable y lo asumimos como un trabajo futuro.

El sistema eléctrico que se está simulando está alimentado inicialmente por dos generadores síncronos conectados a la línea por medio de dos transformadores de 500 kVA. La tensión nominal del sistema es de 10.800 V (tensión máxima de fase) en la fase A, pero al iniciar la simulación los flujos de corriente que se presentan en la línea hacen que la tensión suba a 10.811,5 V, pero cuando se conectan 4 DG la tensión disminuye a 10.790,4 V y al conectar 9 DG la tensión disminuye a 10.785,6 V, esto pasa de igual manera en las fases B y C como se observa en la Tabla 16. Por lo tanto, como el rayo impacta al iniciar las simulaciones y en ese inicio los valores de tensión van disminuyendo al conectar DG, esa reducción de tensión se escala al impactar el rayo y se aprecia que las sobretensiones cada vez que se conectan más DG alcanzan picos más bajos. Pero como las máquinas usadas en la simulación no son de alta frecuencia y al parecer estas disminuciones son causadas por la simulación en sí, no se puede concluir sobre el impacto real que tiene la DG en las sobretensiones.

5. Conclusiones

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada en la base de datos IEEE Xplore Digital Library se pudo visualizar que existen numerosos trabajos de investigación acerca del impacto de

descargas atmosféricas en líneas de distribución. Sin embargo, se evidenció una reducción importante en cuanto a la producción bibliográfica del objeto puntual de esta investigación; de esta forma, se resalta la importancia de seguir realizando investigaciones sobre el impacto que tiene la generación distribuida en las diferentes áreas del sector eléctrico.

Existe una diferencia considerable entre (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013) y este estudio; esta consiste en que en el artículo en cuestión llega a la conclusión que las sobretensiones aumentan cuando se tiene DG en la línea, mientras que en el estudio aquí realizado es todo lo contrario, entre mayor número de DG conecte a la línea, las sobretensiones disminuirán a lo largo de la línea. Esto pasa por que en el artículo solo tomaron mediciones en 3 puntos de la línea, siendo un punto de medida donde impacta el rayo, además no conectaron un mayor número de DG para observar que pasaba con las sobretensiones. Por el contrario, en este estudio se tomaron más puntos de medida sobre la línea, donde se evidenció que las sobretensiones disminuían cada vez que se conectaban más DG (se conectaron 4 y se aumentó a 9). Cuando se conectaron 4 DG en la línea, se observó que hubo un aumento de tensión en la fase donde impactó el rayo, esto es lo mismo que pasó en el artículo (Araujo, Flauzino, Batista, Moraes, & Martins, 2013), pero en los demás puntos si se observó la disminución, luego se midió la misma fase que tuvo aumento de sobretensiones con los 4 DG, pero ahora con 9 DG conectados, ahí se pudo observar que la sobretensión disminuyó. Los valores encontrados en las 4 simulaciones realizadas muestran una disminución de las sobretensiones cuando el rayo impacta la línea de distribución aérea y esta tiene conectada DG, pero estas variaciones son muy pequeñas; además, los resultados de la tabla 15 se presentan por efectos de la misma simulación; debido a esto, no se puede establecer el verdadero impacto que tiene la DG en las sobretensiones causadas por impactos directos de rayos en líneas de distribución.

Las variaciones de las sobretensiones causadas por las entradas y salidas de la DG deben ser monitoreadas por lo cual se puede pensar en un sistema de medición, control y coordinación de protecciones por medio de las Smart grid.

Este proyecto es un trabajo preliminar que hace parte de una investigación, el cual es la base para futuros trabajos con la que se busca determinar el efecto que puede tener la DG en las sobretensiones generadas por descargas atmosféricas.

6. Recomendaciones

Para futuras investigaciones es recomendable tener en cuenta los modelos en alta frecuencia tanto del transformador, generador síncrono y demás componentes con el fin de realizar un mejor análisis transitorio.

Se sugiere la aplicación de los modelos en ATPDraw de las generaciones no convencionales en próximas simulaciones para tener un modelo con características y propiedades más reales del sistema eléctrico.

Se recomienda realizar un análisis más amplio que incluya el efecto que tienen la DG en las sobretensiones causadas por los impactos indirectos de los rayos en las DL.

Con el auge de las redes inteligentes, se hace necesario realizar un análisis como el desarrollado en este trabajo donde se tenga en cuenta un sistema de coordinación de protecciones por medio de las Smart grid.

Referencias Bibliográficas

- Adendorff, G. (1911). Fenómenos atmosféricos y su relación con la producción de sobretensiones en líneas aéreas de transmisión eléctrica. *Trans. SAIEE*, vol. 2, 154-179.
- Agrawal, A., Price, H., & Gurbaxani, S. (1980). Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-22 .
- Araujo, M., Flauzino, R., Batista, O., Moraes, L., & Martins, C. (2013). Protection of the distribution lines with distributed generation against lightning overvoltages in the context of smart grids” . *World Congress on Sustainable Technologies (WCST)*, 36-41.
- Barker, P. P., Short, T. A., Eybert-berard, A. R., & Berlandis, J. P. (1996). Induced voltage measurements on an experimental. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 11, no. 2.
- Boaventura, W. (1990). *Estudo da tensao induzida em linhas a ereas por descargas atmosfericas utilizando tecnicas de modelo reduzido*. Ph.D. dissertation, .
- Casas, F. (2006). *Tierras. Soporte de la seguridad eléctrica, 3ª ed.* . Bogotá: ICONTEC.
- Chowdhuri, P., & Gross, E. T. (1969). Voltages Induced on Overhead Multiconductor lines by Lightning Strokes. *Proceedings IEE*, vol. 116, Apr., 561-565.
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley N° 1715* . UPME numero Mayo 2014.
- De Nigris, M., Sironi, A., Bonfanti, I., Giornelli, F., Valagussa, C., & Shing, L. K. (1998). *Most recent developments in surge arresters technology and testing*. Beijing, China: International Conference on Power System Technology Proceedings.

- Eriksson, A. J., & Meal, D. V. (1982). Lightning performance and overvoltage surge studies on a rural distribution line. *IProceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 129, no. 2, March , 59-69.
- Eriksson, A., Stringfellow, M., & Meal. (1982). Lightning induced overvoltage on Overhead Distribution lines. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 4.
- GAMMA. (s.f.). *Polymer Surge Arrester Clase 1 12kV 10kA - PY012B01*. Catalogo.
- Golde, R. (1954). Relámpagos en las líneas de distribución aéreas causados por rayos indirectos y directos. *Trans. AIEE*, vol. 73, 437-447.
- Henaó-Céspedes, V., Cano-Plata, E., & Díaz-Cadavid, L. (2015). Proposal for an automatic system correlation between failures on electrical distribution lines and atmospheric lightning discharges. *Ingeniería e Investigación* vol. 35 Sup n.º 1 SICEL.
- Hileman, A. (1999). *Insulation coordination for power systems*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- López, M., Gallego, R., & Hincapié, R. (2010). Mejoramiento del perfil de tensión en sistemas de distribución usando generación distribuida. *Scientia et Technica, [S.l.]*, v. 1, n. 44, p. , abr. ISSN 2344-7214, 310-315.
- Master, M., Uman, M., & Beasley, W. (1984). Lightning Induced Voltages on Power Lines: Experiment. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 9, 2502-2518.
- Medina, J. M., & Castro, F. (2010). Modelos de acoplamiento para el cálculo de tensiones inducidas en líneas de distribución. *El Hombre y la Máquina*, núm. 35, julio-diciembre, Universidad Autónoma de Occidente Cali, Colombia, 153-160 .
- Modrusan, M. (1983). *Tests on high-voltage metal oxide surge arresters with impulse currents*. Athens, Greece: Fourth international Symposium on High Voltage Engineering.

- Mozina, C. (2014). Impact of green power inverter-based distributed generation on distribution systems. *67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX*, 264-278.
- Paolone, M., Nucci, C. A., Petrache, E., & Rachidi, F. (2004). Mitigation of lightning-induced overvoltages in medium Voltage distribution lines by means of periodical grounding of shielding wires and of surge arresters: modeling and experimental validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, 423-431.
- Perez, E., Herrera, J., & Torres, H. (2003). Sensitivity analysis of induced voltages on distribution lines. *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, Vol.1, 7*.
- Pérez, G. E. (2006). *Avances en el modelamiento y experimentación de tensiones inducidas en redes de distribución*. Bogotá: Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia.
- Piantini, A., Ohara, T., Silva, A., Janiszewski, J., Altafim, R., & Roncolato, R. (2002). A full-scale system for lightning data acquisition with special reference to induced voltages on distribution lines. *International Conference on Grounding and Earthing and 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro, Brazil*, 111–116.
- Pinceti, P., & Giannettoni, M. (1999). A simplified model for zinc oxide surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery* , vol. 14, n° 2, 393-398.
- Rusck, S. (1958). *Sobretensiones inducidas por rayos en líneas de transmisión de energía con referencia especial a la protección contra sobretensiones de redes de baja tensión*". Trans. Roy Inst. de tecnología, no. 120, .
- Sierra, L. J., Gonzalo, T., Morales, A. E., & De, C. M. (2004). *Investigaciones Sobre Descargas Eléctricas Atmosféricas En Colombia*.
- Soto, E. (2014). *Estudio de las tensiones inducidas por rayos en redes de distribución aéreas ubicadas sobre terrenos no planos*. Manizales: Doctorado thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Szpor, S. (1948). *Una nueva teoría de las sobretensiones inducidas*. CIGRE, Informe, 308.

- Taylor, C., Satterwhite, R., & Harrison, C. (1965). The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 13, no. 6, November, 987-989.
- Vita, V., Ekonomou, L., & Christodoulou, C. A. (2016). The impact of distributed generation to the lightning protection of modern distribution lines. *Energy Syst.*, vol. 7, núm. 2, 357–364.
- Wagner, K. W. (1908). Electromagnetische Ausgleichvorgänge in Freileitungen und Kabeln, Leipzig. vol. 5.
- Wagnerj, C., & McCann, G. (1942). Voltajes inducidos en líneas de transmisión. *Trans. AIEE*, vol. 61, 916-930.
- Yokoyama, S., Miyake, K., Mitani, H., & Takanishi, A. (1983). Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 8.
- Yokoyama, S., Miyake, K., Mitani, H., & Yamazaki, N. (1986). Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, no. 2 April., 129-139.
- Yu, H.-q., Chen, S.-m., & Peng-cheng, Y. (2010). "Study on lightning protection of cables and transformer in Microgrid," . *CICED 2010 Proceedings, Nanjing*, 1-5.