

SIMULACIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y SU EFECTO EN REDES ELÉCTRICAS DE POTENCIA

Alvarez, Roberto ¹ Rosales, Luis ²

(Recibido mayo 2010, Aceptado febrero 2012)

¹ Ingeniero Electricista, egresado de la UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz, Venezuela

² Sección de Física, UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz, Venezuela

lrosales2@unexpo.edu.ve

Resumen: En este trabajo se halla una solución numérica a la Ecuación de Heaviside para simular las Descargas Parciales de origen Atmosférico, con parámetros ambientales presentes al norte del Estado Bolívar, Venezuela, que inciden en los Sistemas Eléctricos de Potencia.

Palabras claves: Simulación/ Ecuación del telegrafista/ Descargas atmosféricas/ Redes eléctrica

SIMULATION OF LIGHTING STROKES AND THEIR EFFECT ON A POWER ELECTRICAL GRID

Abstract: This paper finds a numerical solution to the Heaviside equation to simulate partial discharges of origin Atmospheric, with environmental parameters present in the north of Bolivar State, affecting the Electric Power Systems.

Keywords: Simulation/ Telegraphis Equation/ Atmospheric Discharges/ Power Electrical Grid.

I. INTRODUCCIÓN

Diariamente, a nivel mundial se producen alrededor de 5 millones de descargas eléctricas atmosféricas (DEAT). El impacto de estos eventos implican desde pérdidas de activos y bienes materiales, hasta pérdidas de vidas humanas por accidentes relacionados directa o indirectamente con dichas descargas. La naturaleza aleatoria de este fenómeno hace difícil su entendimiento, y después de muchos años de desarrollos científicos aún son desconocidos muchos de sus principales características.

Para el estudio científico es necesaria la medición, representación y simulación de las variables, es por ello que para la comprensión de las descargas, es necesaria la caracterización del mismo, haciendo proyecciones que posteriormente sirvan para el análisis y desarrollo de mejoras al servicio eléctrico.

Con las nuevas tecnologías y el continuo desarrollo de estas, en la actualidad se cuenta con técnicas confiables que miden las variables asociadas al fenómeno, que por su complejidad es necesario el soporte de computadores cada vez más rápidos y de métodos numéricos que permitan representarlo. Con los parámetros que describen la descarga atmosférica, obtener un modelo de sobretensión para este fenómeno y determinar de manera más exacta

las perturbaciones que está genera en todos los elementos pertenecientes a la red eléctrica nacional en Venezuela, es el principal objetivo de esta investigación.

En el año 2004, Miramare realizó la revisión de la coordinación de aislamiento del patio de distribución de Caruachi a 400 kV ante el fenómeno de DEAT, utilizando como herramienta el programa ATPDraw. Fernández, realizó el Estudio para disminuir la tasa de salida anual por DEAT de la línea Palital-Furrial a 400 KV, el cual mostró la forma de disminuir la tasa de salida por DEAT de dicha línea de transmisión haciendo uso de un modelo hecho con el software T-flash. Para el año 2006, Fernández, realizó el estudio del comportamiento de la línea de transmisión Las Claritas-Santa Elena a 230 KV cuando es sometida a sobretensiones provocadas por DEAT. Luego en el 2007, Pedroza, realizó un estudio del comportamiento en estado transitorio de las perturbaciones producidas en los sistemas de control de la S/E Tocoma Construcción 230/34,5/13,8 KV causados por eventos asociados a DEAT.

En el año 2008, Rodríguez, realizó el Estudio de la Variación Espacial-Temporal de los Parámetros de la Descargas Atmosféricas en Venezuela y tuvo como objetivo estudiar el comportamiento y parámetros de este fenómeno.

Las condiciones de aislamiento en subestaciones de transmisión requieren la consideración de magnitud, frecuencia de ocurrencia y tipo de sobretensiones que puedan presentarse durante su operación.

Una sobretensión transitoria importante es la producida por las DEAT que inciden en la subestación; bien sea que lleguen a través de la línea de transmisión o que se deban a descargas directas sobre los equipos de la subestación, producidas por fallas del apantallamiento. Este último tipo de descargas conlleva a unas condiciones difíciles para los aislamientos.

Cuando una DEAT alcanza un sistema de potencia, una sobretensión elevada aparece a través de los equipos en la subestación. Si la sobretensión excede la rigidez del aislamiento, ésta se romperá y aparecerá un arco eléctrico que será mantenido por la tensión a la frecuencia industrial del sistema. Se hace necesaria entonces la operación de interruptores para eliminar el cortocircuito. Si la descarga se produce a través del aire, en una cadena de aisladores o de equipos con aislamiento autorregenerativo, generalmente no se producen daños. Si por otra parte la descarga se produce en aislamientos no regenerativos como motores o transformadores entonces el daño es permanente.

En la práctica, la función del apantallamiento consiste en proteger a los equipos de la subestación contra descargas directas. El conocimiento de la formación de las DEAT es de gran utilidad para entender como los diversos elementos (cables de guarda, mástiles, etc.) ofrecen protección.

En este trabajo se estudian las descargas parciales de origen atmosférico basado en la solución numérica de la ecuación Heaviside, la cual es una ecuación diferencial en derivadas parciales de segundo orden del tipo hiperbólica, y determinar su influencia en redes eléctricas de potencia tomando en cuenta los parámetros de información geográfica y ambiental de la zona donde ocurran estos eventos.

II. DESARROLLO

El análisis estadístico que se muestra a continuación se hizo con la información recibida por parte del Departamento de Gestión Información Geográfica y Ambiental, adscrito a la Gerencia de Gestión Ambiental de Corpoelec Región Sur, en la que se muestra la fecha, ubicación y magnitud de las DEAT registradas en la zona seleccionada durante los años 2000 al 2005. Fueron seleccionados estos años pues fue en ese período donde se registró la mayor actividad de tormentas y el mejor desempeño del SDDA. En cuando a la zona de estudio, fue seleccionada tomando en cuenta la importancia de la línea de transmisión Guri-Guayana B para el suministro eléctrico del parque industrial de la región.

1. Información estadística de la ocurrencia de DEAT por cada año

Una vez procesada toda la información recibida por los

operadores del SDDA, se procedió a la obtención de variables estadísticas básicas cuyos resultados se reflejan en la Tabla I.

Tabla I. Análisis estadístico a los datos recogidos del SDDA de Corpoelec agrupados por año.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Máximo (KA)	-48	-4	58	68	103	18
Mínimo (KA)	-185	-60	-138	-194	-184	-558
Número de DEAT	26	31	1759	3776	2424	810
Corriente promedio (KA)	84,13	17,58	24,04	23	25,75	33,91
Desviación estándar (δ)	36,124	17,58	18,62	17,90	21,207	59,95
Varianza (δ^2)	1248,2	157,21	346,45	320,512	449,589	3590,43

Para el año 2000, el periodo de tormentas se inició en el mes de junio y se extendió hasta el mes de noviembre, registrándose un total de 26 DEAT. Si bien en cierto esta año no fue muy activo en lo a DEAT se refiere, en él se registró el promedio más alto en cuanto a la intensidad de las DEAT. Durante el año 2001 solamente se registraron 31 DEAT, todas ellas de baja intensidad, en el mes de abril.

En el año 2002, con excepción de los meses de febrero y diciembre, se registraron tormentas durante todo el año. Esto queda evidenciado con un número total de DEAT de 1759. La actividad fue bastante uniforme, no se encontraron valores de corriente sobresalientes en la muestra. Durante el año 2003 fueron registradas entre los meses de mayo y diciembre un total de 3776 DEAT, siendo este el año con mayor actividad atmosférica. En este año particularmente fue muy común registrar el fenómeno de descargas múltiples idénticas.

En el año 2004 se registraron la cantidad de 2424 DEAT entre los meses de mayo y diciembre, teniendo un comportamiento parecido al año anterior. Durante este año se registra una intensa actividad tormentosa con DEAT que superan frecuentemente los 100 kA.

Ya en el año 2005, con solo 810 DEAT entre los meses de abril y diciembre, se registraron con frecuencia DEAT con magnitudes superiores a los 300 kA, incluso para los meses de junio y junio se registraron valores superiores a los 500 kA, siendo estos valores completamente atípicos para esta región.

La variación de estos valores deja en evidencia la "Hipótesis de la Variación Espacio-Tiempo de los Parámetros de una DEAT" y la cambiante actividad atmosférica presente en las zonas inter-tropicales cercana a la Zona de Convección Tropical. Esto quiere decir que los parámetros característicos de las DEAT cambian anualmente y responden a variaciones en sistemas

mesoclimáticos, es decir, a cambios que no se limitan solamente a nuestra región geográfica en estudio.

Es por ello que se recomienda hacer un estudio de estas variables antes de proceder a la especificación de sistemas de protección contra DEAT y demás elementos en un sistema eléctrico de potencia.

2. Localización espacial de las DEAT

Con la ayuda de la información de ubicación (latitud y longitud) de las DEAT dada por SDDA en nuestra región de estudio, se procedió a su localización mediante un programa de gestión de imágenes satelitales, eso con el fin de conocer cual zona presenta la mayor incidencia de DEAT, así como conocer el lugar donde se han producido singularidades como corriente de retorno positivas y corrientes cuya intensidad puede ser calificada como excepcional.

Durante los 6 años de los que se compone la muestra de nuestro estudio las zonas aledañas a las Centrales Francisco de Miranda (Caruachi) y la José Felix Rivas (Tocoma) son las que presentan la mayor concentración de DEAT.

También puede apreciarse que durante el mes de Julio del año 2005, mes donde se registraron las DEAT de mayor intensidad (≥ 400 kA), gran número de éstas ocurrieron en las adyacencias del Distribuidor Puente Orinoquia, en las afueras de la Zona Industrial De Ciudad Guayana, pudiéndose plantear como posible hipótesis de este fenómeno polución debida a elementos metálicos presentes en la zona que pueden disminuir considerablemente la resistencia eléctrica del canal de descarga.

3. Ecuación de Heaviside (Telegrafista)

Con este modelo se representa el canal de descarga de una DEAT como un circuito eléctrico de una línea disipativa, este sistema continuo es representado por las ecuaciones Ec.1 y Ec.2.

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R \cdot I + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G \cdot u + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2)$$

para $t > 0$, $x \in (0, \lambda)$, siendo λ la altura del canal de descarga.

4. Métodos numéricos y esquema de discretización

El método de diferencias finitas es una clásica aproximación para encontrar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el modelo matemático de un sistema continuo. Es valioso familiarizarse con ésta aproximación porque tal conocimiento reforzará la comprensión de los procedimientos de elementos finitos.

Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es reemplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, escritas en términos de los valores de la

variable dependiente en puntos seleccionados. Las ecuaciones son lineales si las ecuaciones diferenciales parciales son también lineales.

Diferencias finitas

Del teorema de Taylor para funciones de dos variables y truncamiento a segundo orden, se deduce que:

Donde se evalúa en el punto (x_i, t_j) la derivada de primer orden y en $(x_i + \Delta x, t_j)$ la de segundo orden, siendo el error $O(\Delta x)$ igual en ambos casos, queda:

$$I_{i+1,j}^n = I_{i,j}^n + \Delta x \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + O(\Delta x) \quad (3)$$

$$I_{i-1,j}^n = I_{i,j}^n - \Delta x \frac{\partial I}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + O(\Delta x) \quad (4)$$

La primera derivada y segunda derivada son evaluadas en los puntos (i, j) y $(i+1, j)$. Sumando las Ec.3 y Ec.4 queda:

$$I_{i+1,j}^n + I_{i-1,j}^n = 2 \cdot I_{i,j}^n + \Delta x^2 \cdot \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + O(\Delta x) \quad (5)$$

Despejando el término derivativo a segundo orden, finalmente queda:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \approx \frac{I_{i+1,j}^n - 2I_{i,j}^n + I_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \quad (6)$$

Podemos entonces aproximar la segunda derivada como se ve en la Ec.6, donde el error de aproximación sería $O(\Delta x^2)$.

Para determinar la aproximación de primer orden partimos igualmente de las Ec.3 y Ec.4 pero con un truncamiento a primer orden, quedando:

$$I_{i+1,j}^n = I_{i,j}^n + \Delta x \frac{\partial I}{\partial x} + O(\Delta x) \quad (7)$$

$$I_{i-1,j}^n = I_{i,j}^n - \Delta x \frac{\partial I}{\partial x} + O(\Delta x) \quad (8)$$

Si restamos Ec.7 y Ec.8, nos queda:

$$I_{i+1,j}^n - I_{i-1,j}^n = 2 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial I}{\partial x} \quad (9)$$

Despejando el término derivativo a primer orden, finalmente queda:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \approx \frac{I_{(x_i+1,t_j)}^n - I_{(x_i-1,t_j)}^n}{2 \cdot \Delta x} \quad (10)$$

Discretización de un espacio-tiempo continuo

El desarrollo anteriormente expuesto tiene como propósito resolver sistemas diferenciales continuos. En sistemas discretos se resuelven mediante aproximaciones finitas, esto se logra mediante la creación de un número finitos de nodos o puntos que dividen cada eje en pasos o diferenciales.

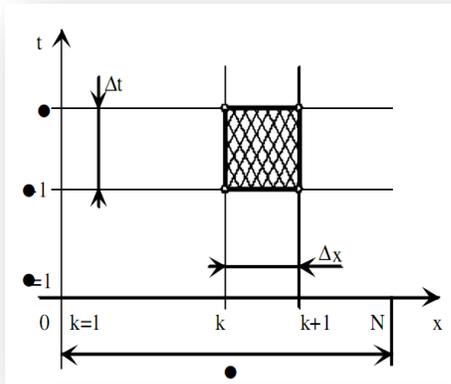


Figura 1. Espacio mallaado donde se aplica la discretización.

5. Discretización de la Ecuación de Heaviside

La idea básica de las diferencias finitas es sustituir al espacio-tiempo continuo por un conjunto discreto de puntos. Las distancias entre los puntos de esta red no tiene porqué ser uniformes.

En este paso se sustituyen las Ec.6 y Ec.10 en Ec.3 y Ec.4, dando como resultado una expresión algebraica representada en la ecuación.

$$\frac{I_{i+1,j} - 2I_{i,j} + I_{i-1,j}}{\Delta x^2} - (RC + G.L) \frac{I_{i,j+1} - I_{i,j-1}}{2\Delta t} - LC \frac{I_{i,j+1} - 2I_{i,j} + I_{i,j-1}}{\Delta t^2} - R.G.I_{i,j} = 0 \quad (11)$$

Posteriormente, para obtener un “término futuro” o garantizar el avance en el tiempo del modelo propuesto, se procede al despeje del término $I_{i,j+1}$, el cual se visualiza en Ec.12:

$$I_{i,j+1} = \frac{\Delta t.(RC + G.L)}{\Delta t.(RC + G.L) + 2.LC} I_{i,j-1} - \frac{2.LC}{\Delta t.(RC + G.L) + 2.LC} (I_{i,j-1} - 2I_{i,j}) + \frac{2.\Delta t^2}{\Delta x^2(\Delta t.(RC + G.L) + 2.LC)} (I_{i+1,j} - 2I_{i,j} + I_{i-1,j}) - \frac{2.\Delta t^2.RG}{\Delta t.(RC + G.L) + 2.LC} I_{i,j} \quad (12)$$

6. Resultados

Para validar e ilustrar este método se represente la nube y la tierra como un capacitor cilíndrico de placas paralelas de 1 Km de radio y el canal de descarga de unos 20 cm de

diámetro. En el problema se toma una altura típica de 1000 m la cual se divide en 250 elementos con un paso de tiempo Δt de 0.5 μs .

Los valores usados en nuestra simulación como parámetros eléctricos para el canal de descarga se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del canal de descarga de una DEAT

Altura (X)	1000 m
Inductancia (L)	2.18 mH
Capacitancia (C)	6.95 pF
Conductancia (G)	5 μS
Resistencia (R)	1000 a 5000 Ω

Una vez discretizada la ecuación de Heaviside (Ec.11) se procedió a implementarla numéricamente en MATLAB usando los parámetros mostrados en la Tabla 2, adicionalmente a ello se utilizó la variación de R y G para mostrar el comportamiento disipativo del canal de descarga. En este mismo orden de ideas, para demostrar la estabilidad del código de usaron diferentes valores de dx, esto con el fin de corroborar la condición CFL.

En la Figura 2 puede apreciarse una comparación entre las ondas obtenidas numéricamente (tanto para $G=0$ y $G \neq 0$) y la onda generada a partir de una función analítica. Puede notarse la notoria diferente para la gráfica con $G=0$, esto se debe a que no es están tomando en cuenta las características disipativas del canal de descarga, provocando así una atenuación menor.

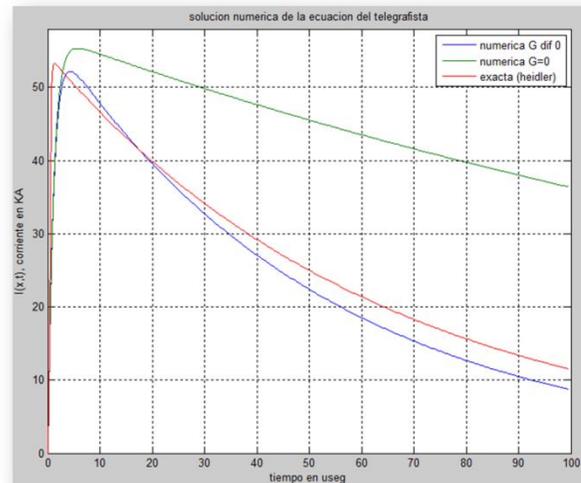


Figura 2. Comparación entre las soluciones numéricas ($G=0$ y $G \neq 0$) y la analítica (Heidler)

En la Figura 3 se aprecia el detalle de las crestas de las ondas representadas en la Figura 2, esto con el fin de visualizar mejor el momento en que ocurren los picos de corriente y también con el fin de apreciar el “frente de onda” de las mismas.

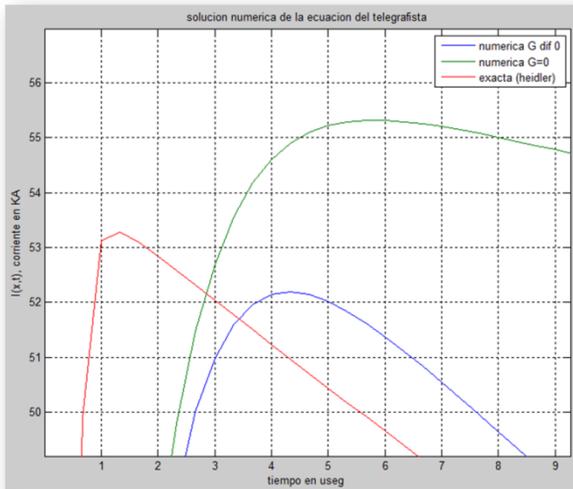


Figura 3. Detalle de los valores picos de las soluciones numéricas ($G=0$ y $G\neq 0$) y la analítica (Heidler)

Una vez comparada la solución numérica implementada con la solución analítica conocida procedimos a simular distintos modelos.

La Figura 4 muestra la corriente calculada a partir de la Ec.11 para distintos valores de G . En todos los casos el tiempo de arranque y los diferenciales fueron los mismos, lo que las diferencia es la atenuación y la estabilidad del código.

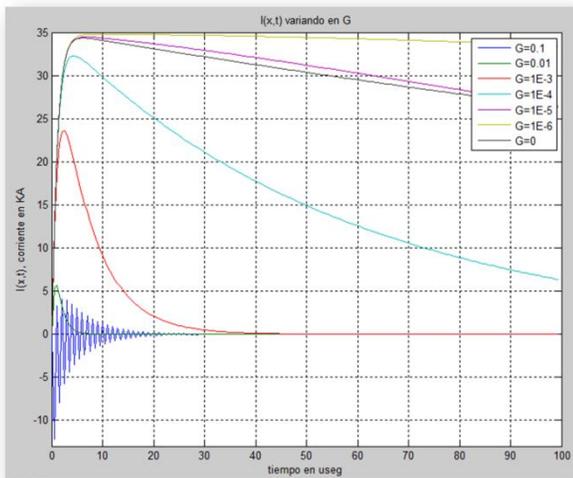


Figura 4. Solución numérica con diferentes valores de G .

Las Figuras 5 y 6 muestran una serie de gráficas para diferentes valores de R tanto para $G=0$ y $G\neq 0$, esto con el fin de simular las diferentes resistividades presentes en la atmósfera al tener zonas con mayor humedad y polución que otras.

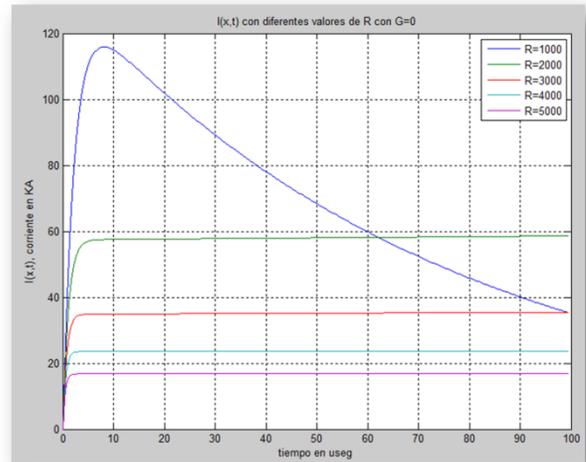


Figura 5. Solución numérica con diferentes valores de R para $G=0$

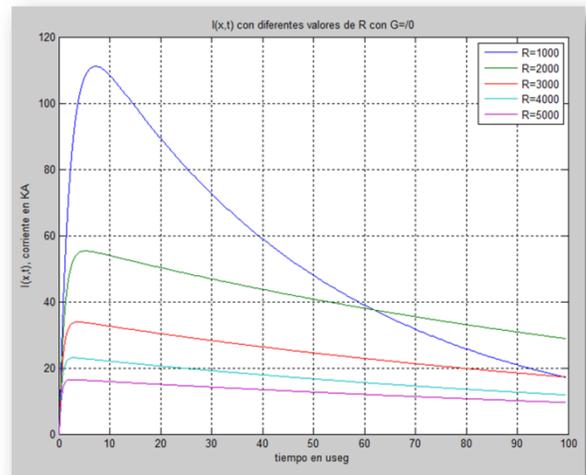


Figura 6. Solución numérica con diferentes valores de R para $G\neq 0$

6.1. Pruebas y Validación

Como prueba y validación de los modelos propuestos en las Figura 7 y Figura 8 se muestran una serie de gráficas para $G=0$ y $G\neq 0$ para diferentes números de nodos, esto con el fin de hacer variar el tamaño de los diferenciales espaciales y poner a prueba los criterios de estabilidad anteriormente expuestos.

Nótese que para un número de nodos $N \geq 1000$ el código comienza a romper la condición CFL y se aprecian oscilaciones, lo que represente un comportamiento atípico para un fenómeno de estas características.

Para un $N \leq 200$ se viola la relación de los Δt y Δx , lo que quiere decir que el tamaño de los diferenciales es mayor a la unidad característica de tiempo del sistema con lo cual la discretización no representaría una aproximación adecuada a la solución del sistema, Nótese en la Figura 8 que la onda para un $N=5$ y $N=105$ no posee una atenuación adecuada.

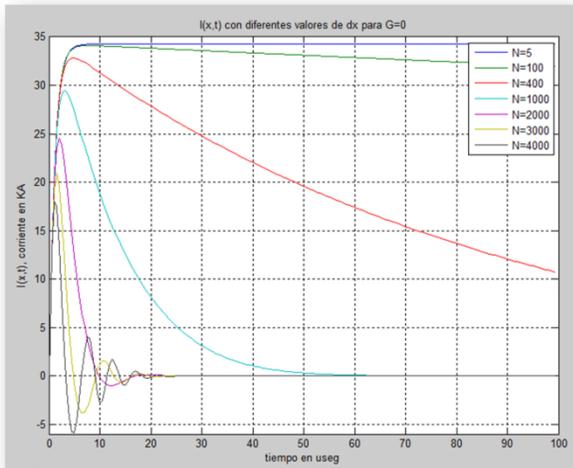


Figura 7. Solución numérica para diferentes valores de dx para G=0

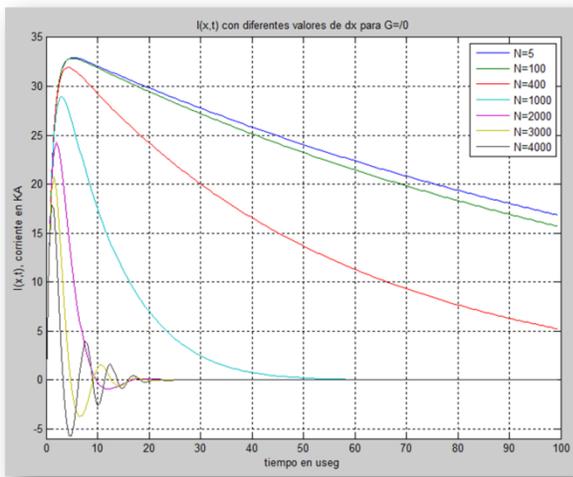


Figura 8. Solución numérica para diferentes valores de dx para G≠0

Simulación del impacto de una DEAT en un Sistema Eléctrico de Potencia

Ya analizado numéricamente el comportamiento del pulso de corriente característico de una DEAT, se procedió a la implementación un modelo de fuente de corriente dependiente, con el cual se implementó un elemento activo perturbativo, a fin de representar el impacto de una DEAT en la simulación de un sistema eléctrico conocido.

Descripción del modelo de una línea de transmisión

A. Modelo de parámetros concentrados (modelo π)

Los circuitos π son una aproximación discreta a los parámetros distribuidos constantes. Corresponde a los modelos que se utilizaron como primera solución al estudio de transitorios en líneas, tanto mediante programas como el EMTP (Electro Magnetic Transient Program), como en los analizadores de transitorios.

Los circuitos π no son generalmente el mejor modelo para

estudios de transitorios, puesto que la solución por parámetros distribuidos es más rápida y usualmente más precisa.

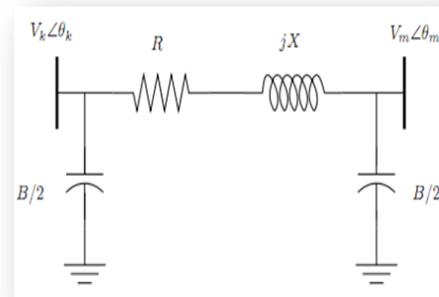


Figura 9. Modelo circuital de una línea de transmisión π

B. Modelo de parámetros distribuidos

El modelo de parámetros distribuidos constantes calcula la propagación de diferentes componentes de modo, siendo estos modos desacoplados. En cada extremo de la línea se convierten los valores de modo a valores de fase mediante la matriz de transformación.

Geometría de la línea de transmisión implementada

Con el fin de obtener los resultados más cercanos a valores reales, el modelo eléctrico a implementar está basado en datos de líneas de transmisión en operación, en tal sentido se seleccionó una sistema de 230 kV apantallado con doble cable de guarda. En sistemas de transmisión de mayor potencial, debido a sus características y especificaciones técnicas, las perturbaciones causadas por el impacto de una DEAT no son notorias, esto se debe a la robustez de su coordinación de aislamientos, al igual que estadísticamente son los menos impactados.

En la Figura 10 se muestra la geometría de la línea de transmisión Guri-Guayana A, estos datos fueron usados para alimentar en el simulador de transitorios electromagnéticos en sistema eléctricos de potencia PSCAD con el fin de determinar la impedancia característica de este sistema de transmisión.

Representación de una línea de transmisión en PSCAD

El primer paso para la creación de un modelo unifilar en la simulación de sistemas eléctricos de potencia es la implementación de las líneas de transmisión que comunican los nodos o barras del sistema. En el caso particular de PSCAD, se logra con la función "T-LINE", con el cual se inserta genéricamente una línea de transmisión en el diagrama unifilar a modelar, mediante su interface gráfica al usuario (GUI). En la Figura 11 se muestra la presentación del elemento "T-LINE" bajo su configuración de terminales remotos, esta configuración gráfica es especialmente útil cuando se desean realizar mediciones individuales en cada fase del sistema de potencia a simular.

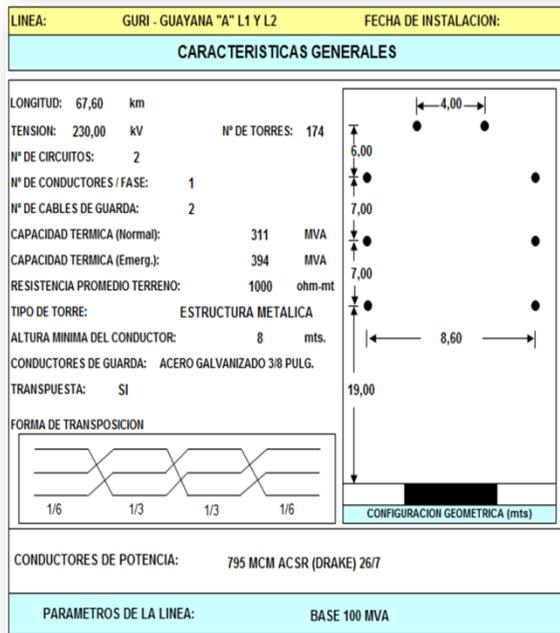


Figura 10. Geometría de una línea de transmisión de 230 kV

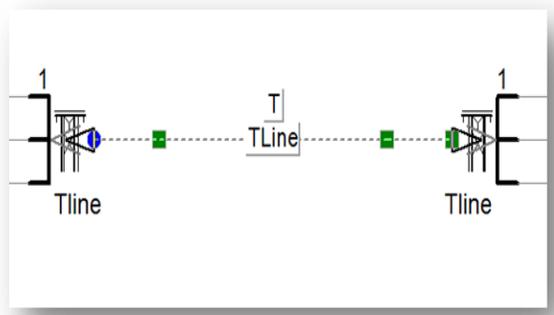


Figura 11. Representación gráfica del elemento “T-LINE” entre dos barras en PSCAD

Una vez realizada la interconexión de los nodos mediante la función “T-LINE”, se procedió a llenar los parámetros característicos de la misma. Bajo este orden de ideas, en la Figura 12 se muestra la pantalla de configuración longitudinal de la línea de transmisión a implementar.

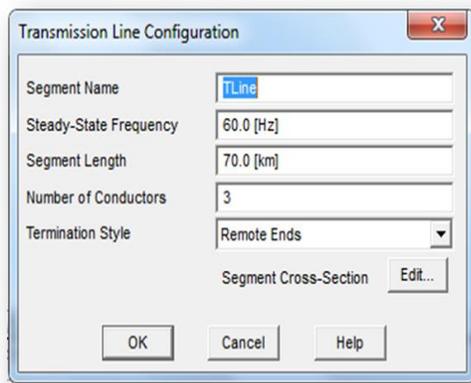


Figura 12. Configuración del elemento “T-LINE” en PSCAD

Para completar el proceso de configuración de una línea de transmisión en PSCAD, se inserta la información correspondiente a la sección transversal de la misma, también conocida como la geometría de la línea de transmisión. En esta parte también se especifican las opciones de dependencia de la frecuencia del modelo a implementar, esto es particularmente útil para los estudio de transitorios electromagnéticos.

Como puede observarse en la Figura 13, otro parámetro importante es el tipo de conductor del que se compone la línea de transmisión a simular, la resistividad del suelo y la forma en que se producen los incrementos de la frecuencia. Cabe destacar que en los simuladores de redes eléctricas de potencia la información referente a la geometría es traducida a los valores de R, L y C característicos de esta, el único parámetro relevante que se usa con unidades de longitud es longitud de la misma línea.

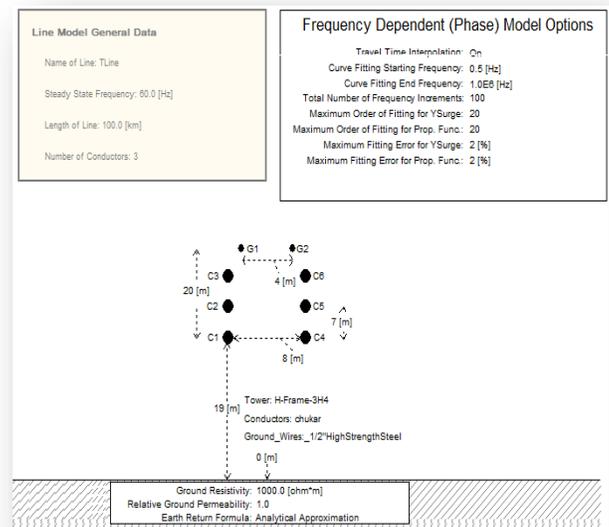


Figura 13. Representación de la configuración del corte transversal (geometría) del elemento “T-LINE”

C. Implementación en PSCAD de una fuente de corriente con los parámetros de una DEAT

Con la finalidad de crear un elemento perturbativo, se procedió a modelar una fuente de corriente dependiente, a fin de poder representar el impacto directo de una DEAT usando la forma de onda y valores obtenidos numéricamente. En PSCAD, esto se logra mediante la herramienta de diseño de componentes, ya que esté estudio en particular no está precargado en su librería.

El parámetro de control de la fuente de corriente a implementar es el componente llamando “Pulse Shaper” o definidor de pulso. Este componente usa como parámetros de entrada los tiempos de frente y de cola de una DEAT, así como su magnitud. Dentro del módulo se encuentra una rutina de enlace con la solución numérica hecha en MATLAB, esto con el fin de adaptar la forma de

onda calculada con los parámetros de entrada colocados. A la salida del módulo "Pulse Shaper" se encuentra un elemento de registro analógico de formas de onda y un cuadro multiplicador

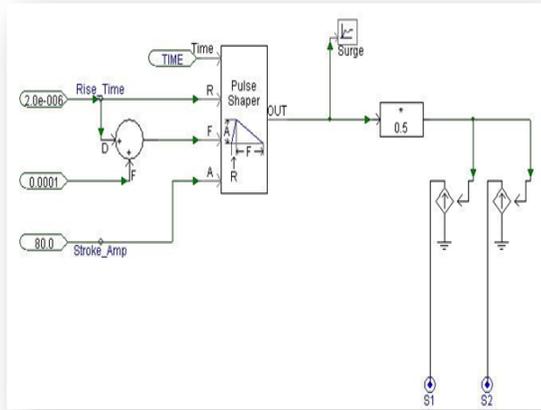


Figura 14. Fuente de corriente dependiente junto a su representación gráfica

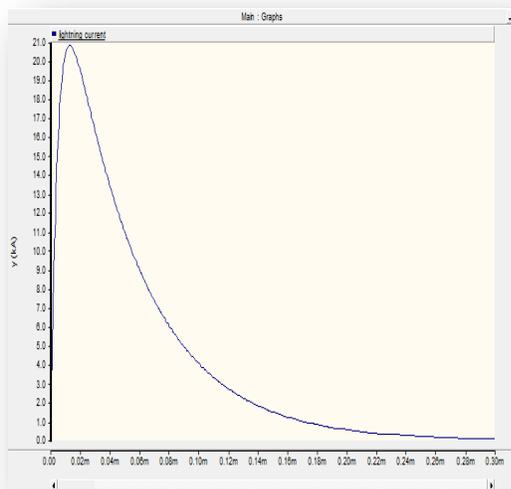


Figura 15. Forma de onda del pulso de corriente inyectado en el sistema representado en la Figura 14.

D. Representación del modelo de un sistema eléctrico de potencia en PSCAD al ser impactado por una DEAT

Se propuso un estudio por casos, esto con el fin de extender el análisis en, por lo menos, dos tipos de condiciones presentes en la industria eléctrica: el caso 1 corresponde al impacto directo en uno de los cables de fase de una línea de transmisión, para el caso 2 se estudió el impacto directo en los cables de guarda de una línea de transmisión. Debido a la corta duración del impacto de una DEAT, en ambos casos se consideran que los sistemas se encuentran sin carga y a tensión cero. La ventaja de usar estas condiciones es el hecho de aislar las variables de estudio de otros efectos dinámicos presentes

en los sistemas de potencia eléctrica. Los resultados a tensión nominal pueden aproximarse por superposición ya que las sobretensiones obtenidas tienen sus componentes en DC.

Caso 1: Impacto de una DEAT en uno de los cables de fase de una línea de transmisión.

El modelo representado en la Figura.16 consta de dos barras, a las cuales se conecta la línea de transmisión a analizar, características ya descritas. Mediante el uso de una fuente de corriente controlada se hizo incidir una DEAT en uno de sus extremos y en el otro extremo se encuentran los elementos de medición analógica en cada fase. A los terminales de cada barra se conectaron resistencias, para hacer que el pulso de corriente circule por la línea de transmisión y no por el aterramiento.

El pulso de corriente inicia en un $t=0$ y tiene una duración aproximada de 300 μ s.

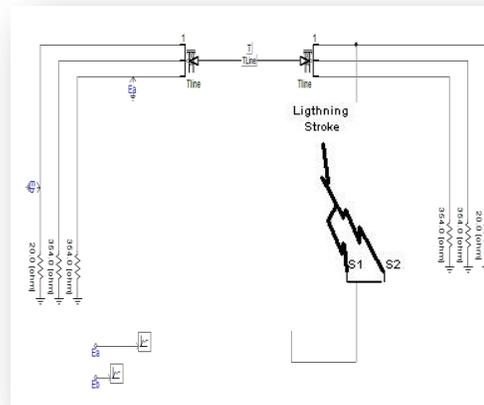


Figura 16. Diagrama unifilar donde se simula el impacto de una DEAT en los cables de fase de una línea de transmisión de 230 kV.

Caso 2: Impacto de una DEAT en los cables de guarda de una línea de transmisión.

El modelo representado en la Figura 17 es un segmento del sistema de transmisión anteriormente descrito donde sólo se muestran vanos, cada uno de ellos representado como una línea de transmisión de longitudes distintas pero de igual sección transversal, el resto del sistema se representa mediante terminales equivalentes de línea. También las figuras de 4 torres de transmisión, realizadas igualmente con la ayuda del módulo de diseño de componentes. Dentro de ellas se colocan los parámetros eléctricos referentes a la impedancia de la cadena de aisladores y la resistencia de conductor de puesta a tierra de los cables de guarda. Esta representación gráfica de las torres antes mencionadas no guarda relación alguna con la geometría de la sección transversal de la línea de transmisión implementada (Ver Figura 13).

Los elementos de medición se colocaron en tres posiciones diferentes, siendo el criterio de ubicación de

éstos la distancia desde el punto de impacto. Bajo este orden de ideas se tienen las siguientes posiciones para la medición de las sobretensiones: medición en la torre de impacto, medición al final del primer vano y medición al final del segundo vano. Con esta metodología de buscó representar los cambios en los perfiles de tensión presentes para cada una de estas condiciones.

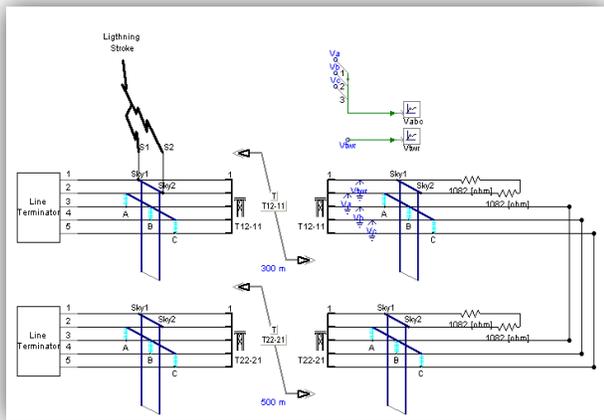


Figura 17. Representación unifilar del circuito donde se simula el impacto de una DEAT en los cables de guarda de una línea de transmisión de 230 kV.

E. Perturbaciones en sistemas eléctricos de potencia a causa del impacto de una DEAT

Se presentan un conjunto de gráficas de tensión (voltaje) en función del tiempo correspondiente a los perfiles observados en el sistema, para diferentes puntos de medición, durante el impacto de una DEAT. Con relación al caso 1, solo se presenta un par de gráficas de tensión; respecto al caso 2, se presentan 3 conjuntos de gráficas, las cuales corresponden a las tres posibles ubicaciones de los sistemas de medición con relación al punto de impacto.

i. Perfil de tensión del impacto de una DEAT en el cable de fase de una línea de transmisión

En la Figura 18 se observan dos gráficas, en la primera de ellas se muestra el perfil de tensión de la fase impactada por la DEAT, en la segunda por su parte se muestra el perfil de tensión de una de las fases vecinas. Nótese que la duración de esta perturbación, bajo estas condiciones ideales, se acerca a los 10ms, es decir, poco más de medio ciclo.

También es importante notar la magnitud de las tensiones, produciéndose picos de superiores a los 200 kV para el caso de la fase impactada y los 35 kV para la fase vecina. Debido a los efectos de la inducción electromagnética, las gráficas presentadas tienen polaridades opuestas. La envolvente de ambas gráficas se aproxima bastante bien a la forma de onda de la DEAT que incide en ellas.

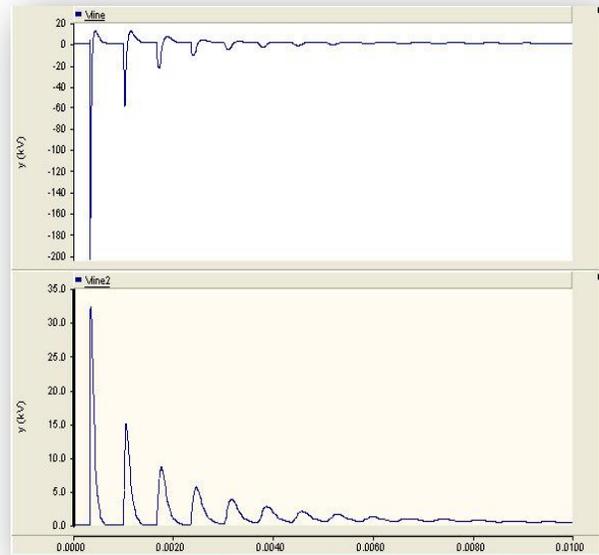


Figura 18. Formas de onda de los voltajes de fase en función del tiempo, ocasionados por el impacto de una DEAT con forma de onda descrita en la Figura 15.

ii. Perfil de tensión del impacto de una DEAT en los cables de guarda de una línea de transmisión

Medición en el punto de impacto

La Figura19 muestra la ampliación de un detalle de la Figura17, en ella se observa la ubicación de los sistemas de medición analógica con respecto al punto de impacto de la DEAT. Con esta configuración se busca registrar la forma de onda de la DEAT sin los efectos atenuadores de la medición de esta onda a través del segmento de línea de transmisión.

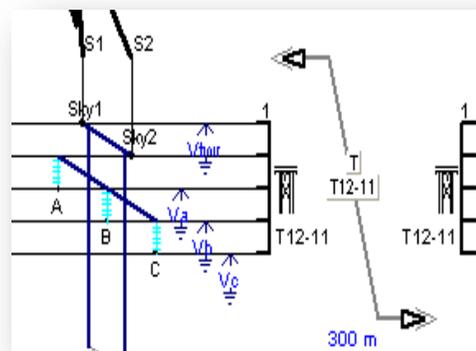


Figura.19: Detalle de la ubicación de los registradores analógicos en el punto de impacto de la DEAT

Se observa en la Figura 20 que los perfiles de tensión son registrados en el origen, es decir, de manera inmediata con el impacto de la DEAT, nótese que también se obtienen las mayores magnitudes debido a que no actúan los efectos de atenuación de la línea de transmisión al circular el frente de onda por ésta.

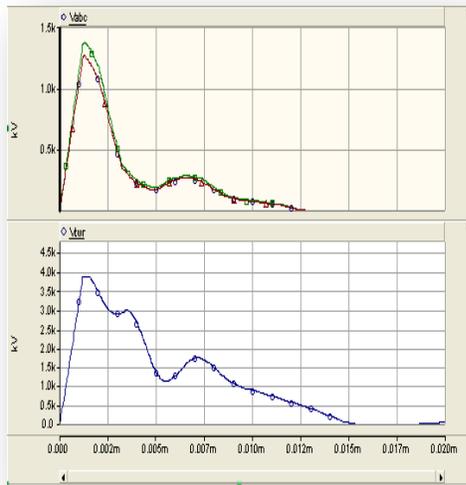


Figura 20. Perfiles de tensión obtenidos para la medición ubicada en el mismo punto de impacto de la DEAT.

Medición a través del primer vano

La Figura 21 muestra la ubicación de los puntos de medición al final del primer vano, esto con el fin de registrar los efectos del tránsito del frente de onda a través de él. Con la presente configuración se están tomando en cuenta dos fuentes de atenuación de la señal, la primera de ellas debida a las características eléctricas del canal de conducción, y la segunda fuente de atenuación del frente de onda corresponde a los elemento de fuga (resistencias y reactivas) que se consideraron en la implementación de las torres de transmisión que unen a los vanos.

Aparte de la atenuación presente en las gráficas de la Figura 22, puede notarse también el desplazamiento en el tiempo o retardo en registro o medición del frente de onda.

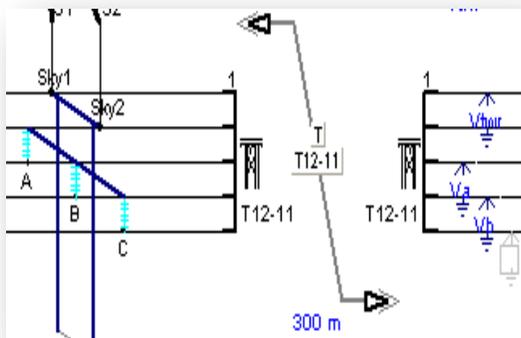


Figura 21. Detalle de la ubicación de los registradores analógicos al final del primer vano con relación al punto de impacto de la DEAT.

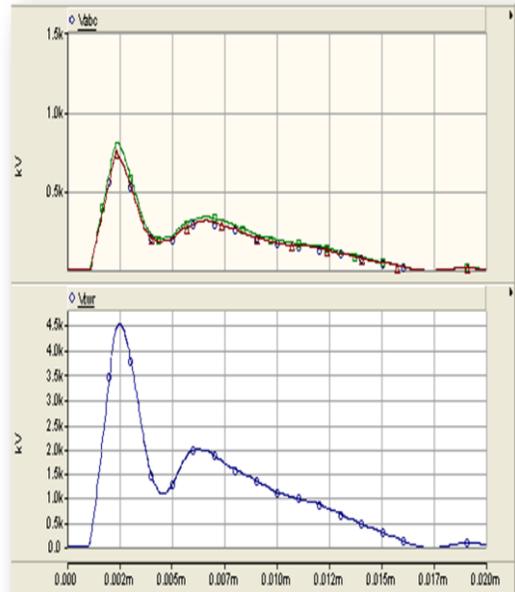


Figura 22. Perfiles de tensión obtenidos por los sistemas de medición ubicados al final del primer vano.

Medición al término del segundo vano

Ya en la Figura 23, la ubicación de los puntos de medición es al final del segundo vano. En este caso, el frente de onda originado por el impacto de la DEAT deberá circular ahora por 4 fuentes de atenuación para luego ser registrada por los sistemas de medición.

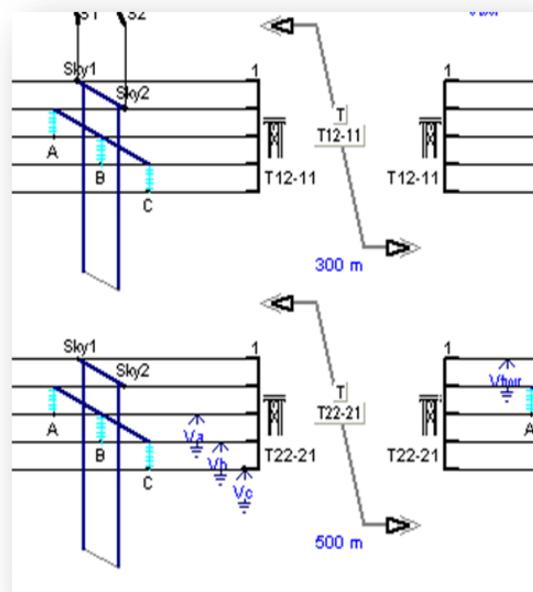


Figura.23: Detalle de la ubicación de los registradores analógicos al final del segundo vano.

La atenuación y el retardo observados en la Figura 24 son aún más pronunciados, quedando incluso la tensión en el cable de guarda por debajo de los 0,30 kV, valor que por sí mismo es muy bajo como para ser considerado una sobretensión, resultado que es completamente coherente a lo que se espera en un sistema de transmisión en operación.

La magnitud de la perturbación registrada en los cables de fase, debido a los efectos inductivos, presenta una atenuación mucho menor, ya que estos conductores se encuentran aislados, quedando de parte de otros elementos activos del sistema de potencia o incluso de la dinámica del sistema en sí mismo la supresión de esta perturbación. Los valores registrados están lejos de ser considerados como factores de riesgo para el aislamiento o la dinámica del sistema de potencia.

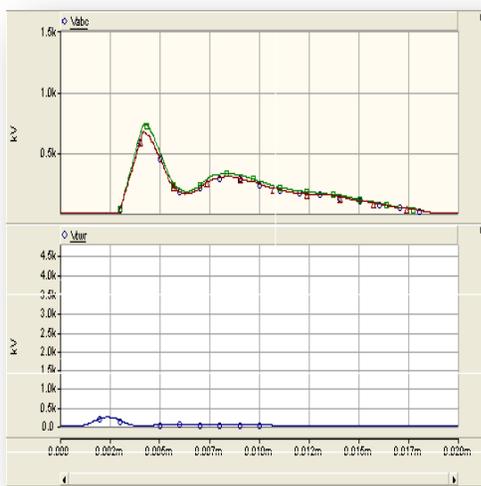


Figura 24. Perfiles de tensión obtenidos por los sistemas de medición ubicados al final del segundo vano.

III. CONCLUSIONES

Una vez presentados los resultados, se concluye en base a: Resultados del análisis estadístico:

1. La variación espacio-tiempo de los parámetros de las Descargas Atmosféricas expuesta por Horario Torres-Sánchez, cada año, en las zonas de convección intertropical, se presentan variaciones en la intensidad y ocurrencia de las descargas, estos cambios se repiten cíclicamente, esta variación se presenta también al norte del estado Bolívar.
2. Las zonas con mayor cantidad de impactos registrados son las correspondientes a las cercanías de las centrales hidroeléctricas Caruachi y Tocoma.
3. En estudios referentes a las Descargas Atmosféricas, como la tasa de salida anual de una línea de transmisión, donde comúnmente es usado

el valor cerámico del sitio, las curvas de la densidad de la probabilidad de la corriente de retorno también deben ser tomadas en cuenta.

4. Debido a los altos niveles de polución de elementos metálicos, que pudiesen reducir la resistencia eléctrica del canal de descarga, en zonas cercanas a las empresas básicas de Guayana se produjeron singularidades como corrientes de retorno positivas y picos de corriente superiores a los 400 kA.
5. Tomando en cuenta el inicio de las temporadas de lluvias de cada año, los datos históricos de los niveles del embalse de Guri y la actividad de tormentas en la zona, queda en evidencia una relación directa entre la estación lluviosa en los embalses del Bajo Caroní y los parámetros de las descargas atmosféricas registradas al norte del estado Bolívar.

Resultados de la solución numérica de la ecuación de Heaviside:

1. Se demostró que el código es estable y convergente para diferentes tipos de malla, siendo los mejores resultados los obtenidos con un número de nodos comprendido entre los 300 y 400.
2. La magnitud de la corriente de retorno de una DEAT se ve afectada de manera inversamente proporcional por el valor de la resistencia del canal de conducción.
3. Los tiempos de cola se ven afectados por la conductividad (G) presente en el canal de descarga.
4. El código es oscilante e inestable para valores de G superiores a los 0.001 mho
5. Con derivadas (rampas) de frente de onda superiores 71kA/μs y tiempo de atenuación menores a los 100 μs, estos valores presentados por las ecuaciones de doble Exponencial y Heidler, las cuales fueron diseñadas para zonas de estudio no tropicales, son notablemente diferentes a los datos arrojados por la solución numérica propuesta en este trabajo.
6. Los paquetes informáticos tradicionales (T-flash) no presentan una solución exacta de los fenómenos asociados a las Descargas Atmosféricas, se basan en soluciones probabilísticas.

Resultados de la simulación de un sistema eléctrico de potencia en PSCAD:

1. En base al primer caso de simulación, donde no se consideran en su totalidad las características constructivas de un sistema de transmisión con el fin de tener condiciones ideal y mínimas de operación, las sobretensiones inducidas en los sistemas de transmisión de hasta 230 kV tienen tiempos de duración equivalentes a 10 tiempos de cola de la Descargas Atmosféricas que indican en ellos.

2. En base al segundo caso de simulación, donde se toman en cuenta condiciones reales en sistemas de transmisión en subestaciones, los sistemas de transmisión superiores a los 230 kV no se ven afectados por sobretensiones inducidas por Descargas Atmosféricas debido a sus características constructivas, éstas son: sistema de pararrayos, rigidez dieléctrica de la cadena de aislamiento, distancia de separación entre fases y sistema de coordinación de aislamientos.
3. Debido al aterramiento de los cables de guarda, la sobretensión inducida por éstos en los cables de fase tienden a ser más extensas, siendo únicamente suprimidas por la inercia eléctrica, por la operación del sistema eléctrico o interrupción del mismo.
4. Debido a la naturaleza de onda viajera del fenómeno, el tiempo de registro del frente de onda

va a presentar un desplazamiento horizontal respecto al tiempo de inicio de la perturbación, esto dependerá de la ubicación relativa del punto de medición.

IV. REFERENCIAS

1. El Rayo, Horacio Torres-Sanchez, 2004.
2. EMTP PSCAD Reference Guide, Manitoba Research Center, 2007.
3. MATLAB Reference Guide, MathWorks, 2011.
4. Simulación de elementos axial simétricos en relatividad general mediante diferencias finitas, 2001, Luis Rosales.