

Simulación de transitorios electromagnéticos en cables subterráneos utilizando discretización tiempo-espacial.

Simulation of electromagnetic transients in underground cables using time-spatial discretization.

Ruiz Lira, Miguel Ángel (1).
Estudiante Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
L19270844@tuxtla.tecnm.mx.

Avisai Sánchez Alegría* (2). Tecnológico Nacional de México /I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
avisai.sa@tuxtla.tecnm.mx.

Rubén Herrera Galicia (3). Tecnológico Nacional de México /I. T. de Tuxtla Gutiérrez. ruben.hg@tuxtla.tecnm.mx.

Joel Gómez Pérez (4). Tecnológico Nacional de México /I. T. de Tuxtla Gutiérrez. joel.gp@tuxtla.tecnm.mx.

*Corresponding author.

Artículo recibido en octubre 06, 2022; aceptado en noviembre 14, 2022.

Resumen.

El presente trabajo consiste en el desarrollo de una metodología para la simulación de transitorios electromagnéticos en cables subterráneos utilizando discretización en tiempo y espacio con el método de las características. Actualmente los principales softwares comerciales de simulación de transitorios electromagnéticos del tipo EMTP, permiten conocer el comportamiento del voltaje en los extremos del conductor, sin embargo, en cables subterráneos es común que las propiedades del dieléctrico no sean uniformes a lo largo del mismo, por tanto, es necesario tener una herramienta que permita conocer la distribución espacial del voltaje y también conocer la distribución temporal del mismo en los puntos internos del conductor. La metodología es implementada en una interfaz gráfica con Matlab para facilitar su uso común.

Palabras claves: Cables subterráneos, método de características, tiempo-espacio, transitorios electromagnéticos.

Abstract.

The present work presents a development for simulation of electromagnetic transients in underground cables, using discretization in time and space with the method of characteristics. Currently the principal commercial software for the simulation of electromagnetic transients (EMTP) allow one to know the voltage's behavior at the ends of the conductor, nevertheless, it is common in underground cables for the dielectric properties to not be uniform throughout, therefore, it is necessary to have a tool that allows one to know the spatial distribution of the voltage and also to know the temporal distribution in the internal points of the conductor. The methodology is implemented in a graphical interface with Matlab to facilitate its common use.

Keywords: Characteristics method, electromagnetic transients, time-space, underground cables.

1. Introducción.

En ingeniería eléctrica se conoce como sistemas eléctricos de potencia (SEP) al conjunto de elementos, herramientas y equipos que influyen desde la generación de la energía eléctrica hasta que es entregado al usuario final. Los SEPs, son divididos en subsistemas entre los cuales se encuentra el subsistema de transmisión, este normalmente es construido utilizando conductores aéreos o cables subterráneos. A lo largo de la trayectoria del sistema de transmisión, los conductores se enfrentan a diversas condiciones medio ambientales, como la variación de las características del terreno, altura de la vegetación, cambios climáticos, variación del dieléctrico que la rodea, o a fenómenos más serios como las descargas atmosféricas que afectan al correcto funcionamiento del sistema y lo exponen a fallas.

Cuando sucede una falla, el sistema desconecta al conductor fallado e inmediatamente intenta restablecer el servicio reconectando los interruptores, sin embargo, en el momento de la reconexión, sucede el fenómeno de transitorio electromagnético (TEM) con una duración del orden de milisegundos pero que tienen magnitudes de voltajes y corrientes muy elevadas, que si no se diseñan correctamente los dispositivos de protección pueden ser destruidos, propiciando que el daño se haga extensivo a otras partes del SEP.

Normalmente las empresas encargadas del servicio eléctrico como la Comisión Federal de Electricidad, realizan mantenimientos periódicos del sistema de transmisión, en este caso, ellos desenergizan/energizan las líneas o cables, y también se presenta el fenómeno transitorio, conocido como “transitorio electromagnético de maniobra”.

Otro fenómeno físico de muy corta duración pero que provoca un efecto aun mayor en transmisión, son las descargas atmosféricas comúnmente conocido como rayos. Los rayos, tienen una duración del orden de microsegundos, pero inducen transitorios de magnitud superior a los de maniobras.

Para evitar al máximo posible los daños que los transitorios electromagnéticos pudiesen generar, los elementos de protección del SEP deben tener la capacidad de soportar los altos niveles de voltaje y corriente, asimismo los dieléctricos deben ser capaces de soportar el estrés al que son sometidos, de aquí la importancia del análisis y simulación de TEMs para el diseño de aislantes.

En cuanto a la frecuencia de operación, los TEMs generados por descargas atmosféricas alcanzan en promedio los 3 MHz, los de maniobras con interruptores están por debajo de los 3 MHz, pero en ciertas fallas como en subestaciones aisladas en gas SF₆ se alcanzan hasta los 50 MHz (Padilla S. 2007).

Desde mediados del siglo pasado, se han desarrollado métodos que simulan el comportamiento de una LT, J. desarrolló un modelo para líneas uniformes que hasta hoy sigue siendo ampliamente utilizado Martí (J. Martí, 1982), también está el modelo universal (A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi, 1999). Estos modelos en conjunto con el trabajo de Dommel (H.W Dommel, 1968), son utilizados en softwares de simulación de transitorios electromagnéticos como el EMTP/ATP y PSCAD.

Otra técnica de análisis es modelar la línea como una red de 2 puertos, y realizar el análisis transitorio en el dominio de la frecuencia y posteriormente transformarlo al dominio del tiempo con técnicas numéricas (A. Andreotti, A. Pierno, and V. A. Rakov, 2015).

Las técnicas descritas anteriormente, tienen el inconveniente que de manera directa únicamente se conoce el voltaje en el extremo del conductor. Con el uso de simuladores, es posible conocer la distribución espacial, conectando muchos segmentos en cascada, pero esto es tedioso para el usuario además de que se ve limitado por el número de nodos que permita el software.

En la literatura, se han desarrollado métodos en el dominio del tiempo basados en diferencias finitas (FDTD). Los métodos de FDTD son versátiles y relativamente sencillos de implementar computacionalmente, además de que permiten conocer la distribución del voltaje a lo largo del conductor, sin embargo, debe tenerse en cuenta que comúnmente requieren algunas medidas para disminuir las oscilaciones numéricas (M. Brignone, F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi and F. Raschidi, 2017).

Una técnica similar a FDTD pero que evita las oscilaciones numéricas es el Método de Características (MC), este método ha sido desarrollado para el análisis de líneas aéreas y cables uniformes (García Sánchez Jorge Luis, 2016). Incluso se ha desarrollado para líneas afectadas por descargas atmosféricas y considerando dependencia frecuencial de los parámetros a líneas uniformes (Avisaí Sánchez-Alegría, Pablo Moreno, José R. Loo-Yau and Susana Ortega-Cisneros, July-2019) y no uniformes (Avisaí Sánchez-Alegría, Pablo Moreno, José R. Loo-Yau and Susana Ortega-Cisneros, August-2019), en todos los casos ha demostrado tener mejor estabilidad que FDTD.

En este trabajo se implementará el método de las características para Líneas de transmisión conformadas por cables subterráneos. Se diseñó una interfaz de Matlab amigable para el usuario y que permite decidir en qué parte de la LT se desea conocer el transitorio.

2. Métodos.

El comportamiento del voltaje y corriente en un cable subterráneo con parámetros independientes de la frecuencia está determinado por las ecuaciones siguientes:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_{10}(x, t)}{\partial x} + \mathbf{L}_G \frac{\partial \mathbf{i}_{10}(x, t)}{\partial t} + \mathbf{R} \mathbf{i}(x, t) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{i}_{10}(x, t)}{\partial x} + \mathbf{C}_G \frac{\partial \mathbf{v}_{10}(x, t)}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (2)$$

Donde los vectores de voltaje y corriente representan cantidades de lazo, esto es, $\mathbf{v}_{10}(x, t)$ es el vector de diferencias de potencial entre capas conductoras e $\mathbf{i}_{10}(x, t)$ es el que circula de una capa a otra como se observa en la figura 1. \mathbf{L}_G es la inductancia geométrica, \mathbf{C}_G es la capacitancia geométrica, \mathbf{R} es la resistencia de corriente directa más la resistencia de corriente alterna calculada con una frecuencia representativa de los transitorios usualmente a 3 MHz (Pablo Moreno Villalobos) y considerando que la configuración y características del cable son uniformes.

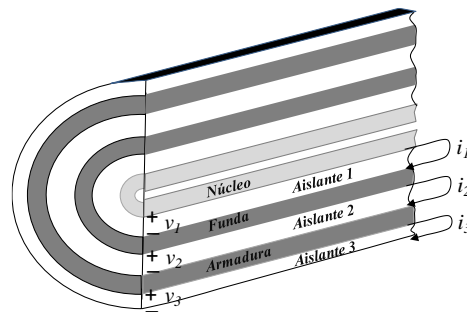


Figura 1. Vista axial de un cable subterráneo tri-capas.

Para aplicar el método de las características, se agrupan las ecuaciones (1) y (2) en forma matricial:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{10}(x, t) \\ \mathbf{i}_{10}(x, t) \end{bmatrix} + \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{10}(x, t) \\ \mathbf{i}_{10}(x, t) \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{10}(x, t) \\ \mathbf{i}_{10}(x, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{L}_G \\ \mathbf{C}_G & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{R} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Los eigenvalores de la matriz \mathbf{A} están dados por.

$$\lambda = \pm\sqrt{\mathbf{L}_G \mathbf{C}_G} \quad (6)$$

Donde por la propiedad de los parámetros de un cable subterráneo.

$$\sqrt{\mathbf{L}_G \mathbf{C}_G} = \sqrt{\mu \varepsilon} \mathbf{U} \quad (7)$$

Donde \mathbf{U} es la matriz identidad. Además, los eigenvectores izquierdos están dados por.

$$\mathbf{E}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & +\mathbf{Z}_0 \\ \mathbf{1} & -\mathbf{Z}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde

$$\mathbf{Z}_0 = \sqrt{\mathbf{L}_G \mathbf{C}_G^{-1}} \quad (9)$$

Como cada elemento de $\lambda(x)$ es el inverso de la velocidad de propagación se puede definir.

$$\frac{dt}{dx} \mathbf{U} = \pm \lambda \quad (10)$$

Resolviendo la ecuación diferencial (10).

$$\mathbf{t} = +(\sqrt{\mu \varepsilon} \mathbf{U})x + \alpha \quad (11)$$

$$\mathbf{t} = -(\sqrt{\mu \varepsilon} \mathbf{U})x + \beta \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) representan una familia de curvas con pendiente positiva y negativa respectivamente, y forman una malla como de la figura 2.

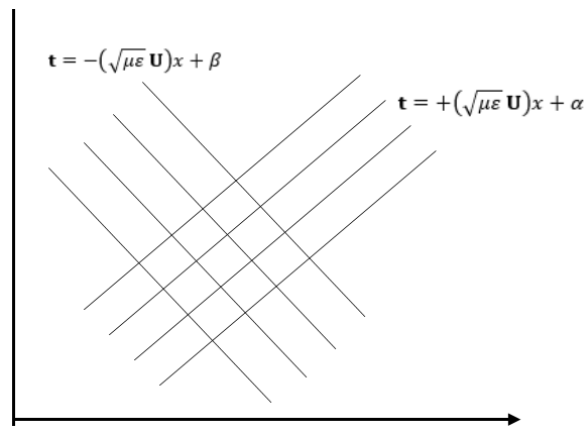


Figura 2. Malla formada por las familias de curvas.

Ahora, multiplicando a (8) por (3) obtenemos.

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{v}_{lo}(x, t) + \mathbf{Z}_0 \left(\frac{\partial}{\partial x} + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{i}_{lo}(x, t) + \mathbf{R} \mathbf{i}_{lo}(x, t) = \mathbf{0} \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} - \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{v}_{lo}(x, t) - \mathbf{Z}_0 \left(\frac{\partial}{\partial x} - \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \mathbf{i}_{lo}(x, t) + \mathbf{R} \mathbf{i}_{lo}(x, t) = \mathbf{0} \quad (14)$$

Restringiendo las soluciones a las curvas características de (11) y (12):

$$\frac{d\mathbf{v}_{lo}(x, t)}{dx} + \mathbf{Z}_0 \frac{d\mathbf{i}_{lo}(x, t)}{dx} + \mathbf{R} \mathbf{i}_{lo}(x, t) = \mathbf{0} \quad (15)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_{lo}(x, t)}{dx} - \mathbf{Z}_0 \frac{d\mathbf{i}_{lo}(x, t)}{dx} + \mathbf{R} \mathbf{i}_{lo}(x, t) = \mathbf{0} \quad (16)$$

Las expresiones (15) y (16) forman un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, equivalentes a las ecuaciones diferenciales parciales originales y para resolverlas se construye una malla de discretización como se observa en la figura 3.

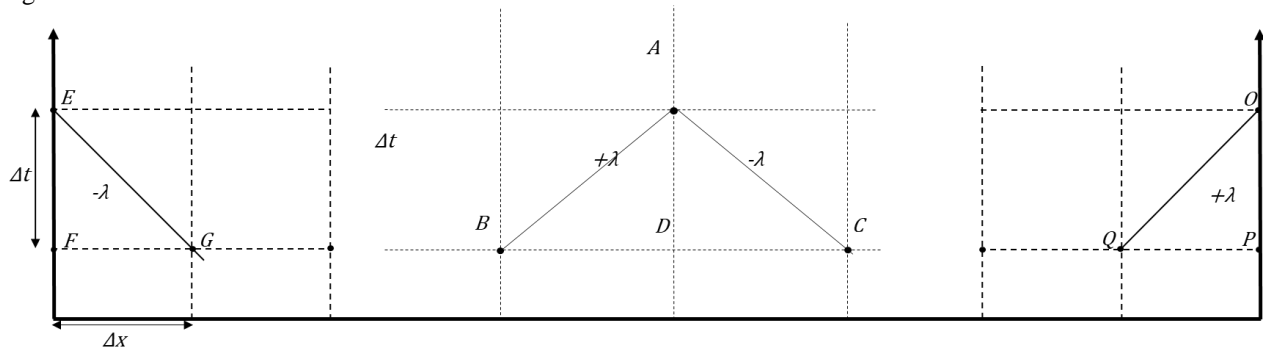


Figura 3. Malla para aplicación de diferencias centrales.

Aplicando un esquema de diferencias centrales al punto A de la figura 3,

$$(\mathbf{v}_{lo}^A - \mathbf{v}_{lo}^B) + \frac{\mathbf{Z}_0^A + \mathbf{Z}_0^B}{2} (\mathbf{i}_{lo}^A - \mathbf{i}_{lo}^B) + \frac{\mathbf{R}^A \mathbf{i}_{lo}^A + \mathbf{R}^B \mathbf{i}_{lo}^B}{2} \Delta x = \mathbf{0} \quad (17)$$

$$(\mathbf{v}_{lo}^A - \mathbf{v}_{lo}^C) - \frac{\mathbf{Z}_0^A + \mathbf{Z}_0^C}{2} (\mathbf{i}_{lo}^A - \mathbf{i}_{lo}^C) - \frac{\mathbf{R}^A \mathbf{i}_{lo}^A + \mathbf{R}^C \mathbf{i}_{lo}^C}{2} \Delta x = \mathbf{0} \quad (18)$$

Agrupando términos y considerando que \mathbf{Z}_0 tiene el mismo valor a largo de todo el cable.

$$(\mathbf{v}_{lo}^A - \mathbf{v}_{lo}^B) + \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_{lo}^A - \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{lo}^B = \mathbf{0} \quad (19)$$

$$(\mathbf{v}_{lo}^A - \mathbf{v}_{lo}^C) - \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_{lo}^A + \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{lo}^C = \mathbf{0} \quad (20)$$

Donde.

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{Z}_0 + \mathbf{R} \Delta x \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{Z}_0 - \mathbf{R} \Delta x \quad (22)$$

Resolviendo el sistema formado por (19) y (20), se encuentra las ecuaciones para la corriente y el voltaje en el punto A.

$$\mathbf{i}_{lo}^A = (2\mathbf{R})^{-1}[\mathbf{v}_{lo}^B - \mathbf{v}_{lo}^C + \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{lo}^B + \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{lo}^C] \quad (23)$$

$$\mathbf{v}_{lo}^A = \mathbf{v}_{lo}^B - \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_{lo}^A + \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{lo}^B \quad (24)$$

En todo el desarrollo presentado hasta aquí, se han utilizado cantidades de lazo, sin embargo, en los extremos de la línea, la fuente de voltaje y las cargas se conectan entre fase y tierra, por tanto, para establecer un circuito equivalente de Norton es necesario obtener las ecuaciones expresadas en cantidades nodales, para esto es necesario emplear las transformaciones (25) y (26).

$$\mathbf{v}_{lo} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_v \mathbf{v}_{nodal} = \mathbf{M}_v \begin{bmatrix} v_{nucleo} \\ v_{funda} \\ v_{armadura} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{i}_{lo} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_i \mathbf{i}_{nodal} = \mathbf{M}_i \begin{bmatrix} i_{nucleo} \\ i_{funda} \\ i_{armadura} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Donde \mathbf{M}_v y \mathbf{M}_i son matrices que transforman las cantidades nodales a cantidades de lazo, y están definidas por.

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

En el punto E de la figura 3, solo existe una curva característica que es la ecuación (6) la cual, expresada en cantidades nodales se escribe como.

$$\frac{d\mathbf{M}_v \mathbf{v}(x, t)}{dx} - \mathbf{Z}_0 \frac{d\mathbf{M}_i \mathbf{i}(x, t)}{dx} + \mathbf{R} \mathbf{M}_i \mathbf{i}(x) = 0 \quad (29)$$

Aplicando diferencias finitas.

$$\mathbf{M}_v (\mathbf{v}^E - \mathbf{v}^G) - \frac{\mathbf{Z}_0^E + \mathbf{Z}_0^G}{2} \mathbf{M}_i (\mathbf{i}^E - \mathbf{i}^G) - \frac{\mathbf{M}_i (\mathbf{R}^E \mathbf{i}^E + \mathbf{R}^G \mathbf{i}^G)}{2} \Delta x = \mathbf{0} \quad (30)$$

Resolviendo para \mathbf{i}^E :

$$\mathbf{i}^E = \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{M}_v \mathbf{v}^E - \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{R}_1^{-1} [\mathbf{M}_v \mathbf{v}^G - \mathbf{R}_2 \mathbf{M}_i \mathbf{i}^G] \quad (31)$$

O bien.

$$\mathbf{i}^E = \mathbf{Y}_{en} \mathbf{v}^E - \mathbf{i}_{his}^E \quad (32)$$

Donde.

$$\mathbf{Y}_{en} = \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{M}_v \quad (33)$$

$$\mathbf{i}_{his}^E = \mathbf{M}_i^{-1} \mathbf{R}_1^{-1} [\mathbf{v}_{lo}^G - \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_{lo}^G] \quad (34)$$

De manera similar, la única curva característica que pasa por el punto O del extremo final de la línea es la ecuación (5), y la expresamos en cantidades nodales

$$\frac{d\mathbf{M}_v\mathbf{v}(x, t)}{dx} + \mathbf{Z}_0 \frac{d\mathbf{M}_i\mathbf{i}(x, t)}{dx} + \mathbf{R}\mathbf{M}_i\mathbf{i}(x) = 0 \quad (35)$$

Aplicando diferencias finitas.

$$\mathbf{M}_v(\mathbf{v}^o - \mathbf{v}^q) + \frac{\mathbf{Z}_0^o + \mathbf{Z}_0^q}{2} \mathbf{M}_i(\mathbf{i}^o - \mathbf{i}^q) + \frac{\mathbf{M}_i(\mathbf{R}^o\mathbf{i}^o + \mathbf{R}^q\mathbf{i}^q)}{2} \Delta x = \mathbf{0} \quad (36)$$

Resolviendo para \mathbf{i}^o :

$$\mathbf{i}^o = -\mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{M}_v\mathbf{v}^o + \mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{R}_1^{-1}[\mathbf{M}_v\mathbf{v}^q - \mathbf{R}_2\mathbf{M}_i\mathbf{i}^q] \quad (37)$$

O bien.

$$\mathbf{i}^o = -\mathbf{Y}_{re}\mathbf{v}^o + \mathbf{i}_{his}^o \quad (38)$$

Donde.

$$\mathbf{Y}_{re} = \mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{M}_v \quad (39)$$

$$\mathbf{i}_{his}^o = \mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{R}_1^{-1}[\mathbf{v}_{lo}^q + \mathbf{R}_{2re}\mathbf{i}_{lo}^q] \quad (40)$$

Las corrientes calculadas en los extremos con las ecuaciones (32) y (38) están en cantidades nodales, y se pueden expresar gráficamente como un circuito equivalente de Norton, juntamente con una fuente al inicio de la línea y una carga al final como se observa en la figura 4.

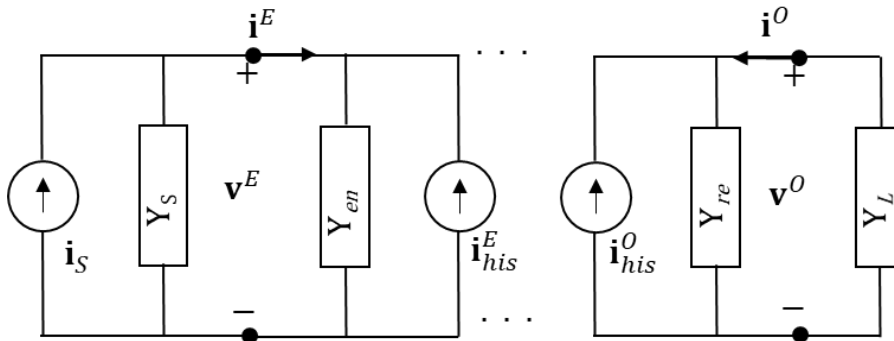


Figura 4. Circuito equivalente de Norton en los extremos del cable.

3. Desarrollo.

La forma en que se implementó el método fue usando una interfaz gráfica diseñada mediante el *editor de diseño GUIDE* incluido Matlab, la interfaz permite introducir los datos necesarios para la realización del cálculo, mostrando finalmente el comportamiento transitorio en forma de gráficas.

El programa posibilita la aplicación del método para cables subterráneos del tipo tricapa (Núcleo, Funda y Armadura), bicapa (Núcleo y Funda) y monocapa (Núcleo); el usuario elegirá el tipo de cable que desee con el panel ubicado en el extremo superior izquierdo de la interfaz, una vez seleccionado, se mostrará una imagen alusiva y los espacios donde

se colocarán los datos de entrada como se observa en la figura 5. Las columnas de datos A, B y C, corresponden a los datos del Núcleo, Funda y Armadura respectivamente y se muestran u ocultan dependiendo de la selección hecha por el usuario.

A la izquierda del interfaz están los espacios de llenado que requisita los datos de tiempo de observación en milisegundos, longitud en metros, profundidad de enterrado en metros, distancia a la que se desea visualizar el transitorio en metros, resistividad del terreno en Ω/m , \mathbf{R}_s y \mathbf{R}_L las cuales son matrices $n \times n$ donde n es el número de capas y representan las resistencias en las terminales de cada capa del cable.

Figura 5. Interfaz designada para cálculo de transitorios en cables tricapa.

Cuando se han ingresado todos los datos, se presiona el botón “Graficar”, el cual es un push button programado para convertir los strings introducidos por el usuario en variables e iniciar el proceso de cálculo del método, resultando en las gráficas que nos muestran el transitorio en el punto que se haya definido. Para un nuevo caso de estudio, se puede cambiar el dato deseado y el programa hará el cálculo sin necesidad de resetear la interfaz.

En la figura 6 y 7 se observa el transitorio en el inicio de un cable tricapa de 2 km. de longitud, enterrado a 1 metro, con la fuente conectada en el núcleo y el resto de terminaciones en circuito abierto. El tiempo de observación normalmente se elige del orden de milisegundos, y la fuente de excitación se considera un escalón unitario.

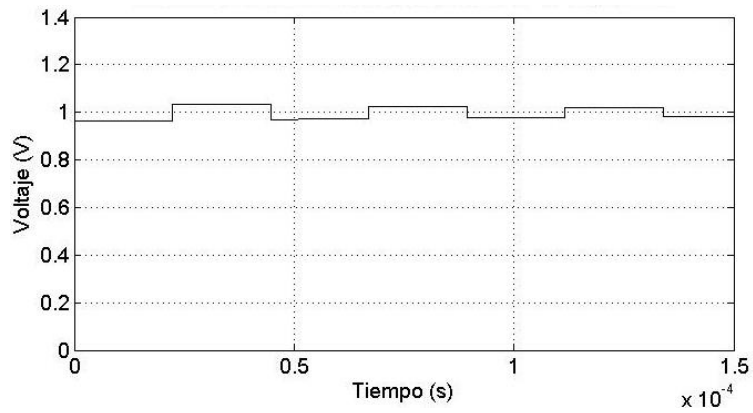


Figura 6. Transitorio del núcleo en el inicio del cable.

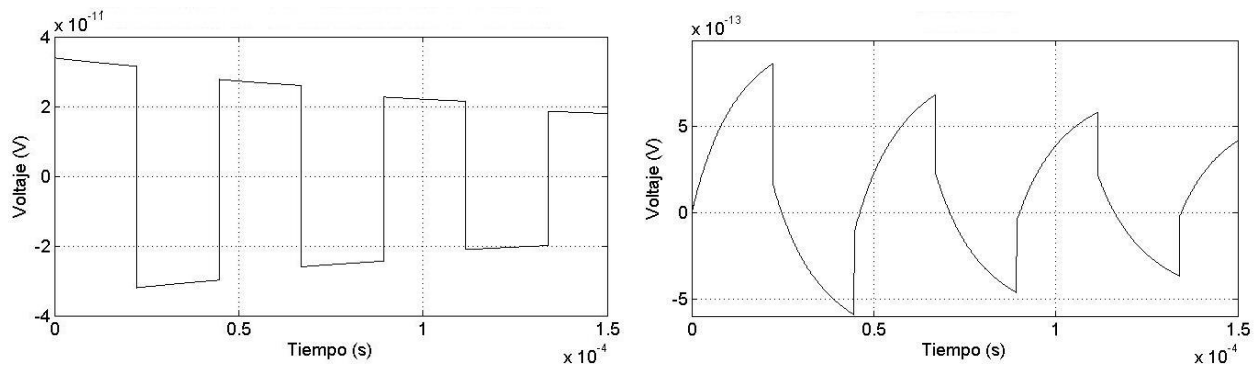


Figura 7. Transitorio en la funda y armadura al inicio del cable.

En una siguiente simulación se obtuvo el transitorio justo a la mitad del cable (100 mts), y se observa en las figuras 8 y 9.

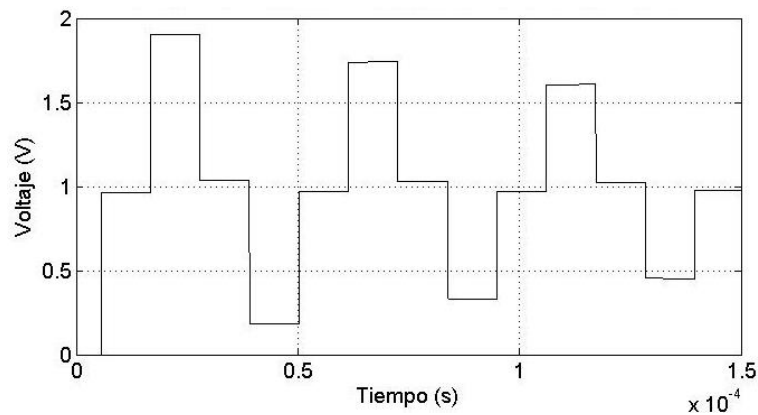


Figura 8. Transitorio del núcleo a mitad del cable.

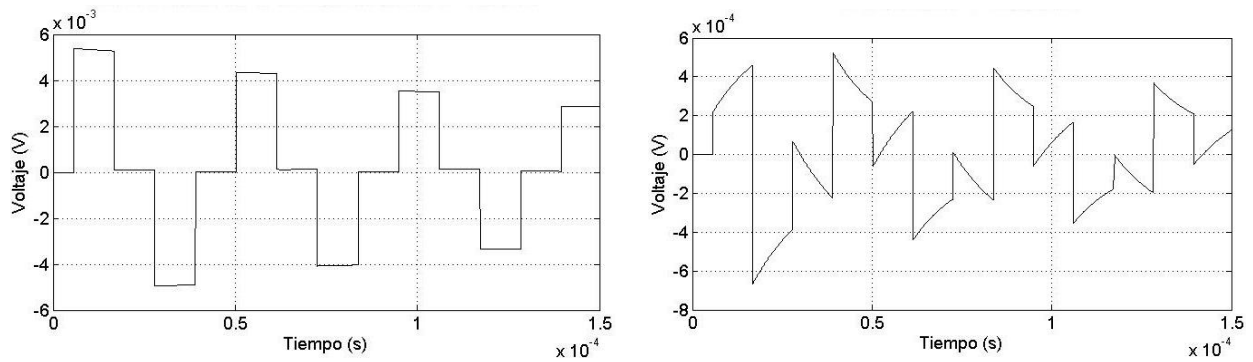


Figura 9. Transitorio de la funda y armadura a mitad del cable.

Finalmente, en las figuras 10 y 11 se presenta una nueva simulación donde se ha indicado que se desea el transitorio en el extremo final del cable.

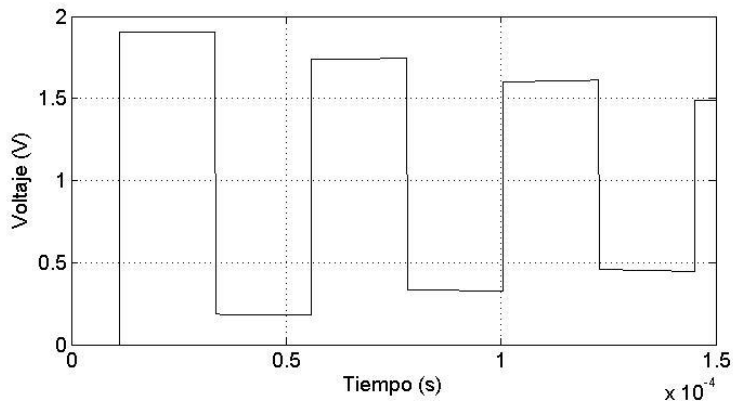


Figura 10. Gráfica del transitorio del núcleo en el extremo final del cable.

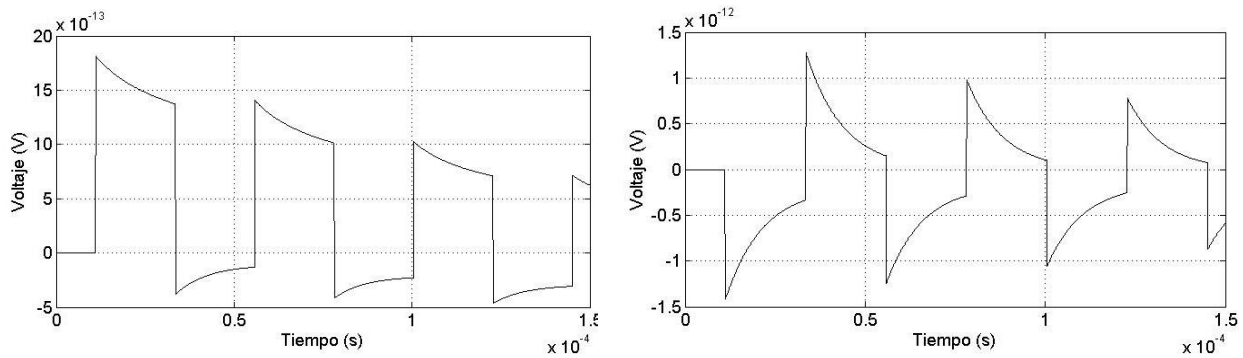


Figura 11. Gráfica del transitorio de la armadura en el extremo final del cable.

Conclusiones.

La metodología desarrollada basada en el método de las características permite conocer el transitorio electromagnético de un cable subterráneo en cualquier punto deseado por el usuario. Al ser un método numérico, la exactitud de la solución estará condicionada por el número de muestras elegidas, entre mayor exactitud se requiera, mayor será el número de muestras a utilizar. Esto podría ser un problema al momento de la implementación de cables con longitudes físicas muy largas, o bien si es necesario un análisis exhaustivo donde los segmentos en los que se divida el cable sean demasiado pequeños, lo que podría saturar la capacidad del equipo de cómputo.

Afortunadamente, en la malla de discretización se observa que las soluciones dependen únicamente de las soluciones de un paso de tiempo anterior, lo que hace al método un fuerte candidato para el cómputo en paralelo, más aún si se piensa en aplicaciones como *Hardware In The Loop (HIL)*. Y considerando que los extremos de la línea se modelan como un circuito equivalente de Norton, el método también puede ser incluido en simuladores generales de redes eléctricas del tipo EMTP.

Se ha desarrollado el método para cables monofásicos tricapa, sin dependencia frecuencial de los parámetros. En sistemas eléctricos de potencia, normalmente se utilizan sistemas trifásicos dentro de ductos lo que afecta el comportamiento de los parámetros y el tamaño de las matrices. Además, la resistencia, es afectada por la frecuencia, y puede haber casos como cables de comunicaciones, donde el valor de la conductancia deberá considerarse. Se considera expandir el método para los casos mencionados.

Referencias bibliográficas.

- A. Andreotti, A. Pierno, and V. A. Rakov (2015)**, *A New Tool for Calculation of Lightning-Induced Voltages in Power Systems-Part I: Development of Circuit Model*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 30, no.1, pp. 326-333.
- A. Morched, B. Gustavsen, M Tartibi, (1999)** *An universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on Overhead Lines and Underground cables*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.14, No. 3, pp. 1032- 1038.
- Avisaí Sánchez-Alegría, Pablo Moreno, José R. Loo-Yau and Susana Ortega-Cisneros (July 2019)**, *An alternative model for aerial multiconductor transmission lines excited by external electromagnetic fields based on the method of characteristics*, Electrical Engineering,, Iss. 3, pp. 1-12.
- Avisaí Sánchez-Alegría, Pablo Moreno, José R. Loo-Yau and Susana Ortega-Cisneros (August 2019)**, *Time domain Electromagnetic Transient Analysis of Aerial Nonuniform Transmission Lines*, Matematical problems in Engineering, Vol. 2019, pp. 1-12.
- García Sánchez Jorge Luis (2016)**, *Análisis de líneas aéreas y cables subterráneos empleando el método de las características*, Tesis de Doctorado, CINVESTAV, Guadalajara Jalisco, junio 2016.
- H. W. Dommel, (1968)**. *Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single a Multiphase Networks*, IEEE 68TP 657-PWR, summer Power Meeting.
- J. Martí (1982)**. *Accurate modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetics transients simulation*, IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. pas-101, No. 1, pp. 147-155.
- M. Brignone, F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi and F. Raschidi (2017)**, "Evaluation of power system lightning performance, Part I- Model and numerical solution using the PSCAD-EMTDC platform." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no.1, pp. 137-145.

Pablo Moreno Villalobos (2012), *Análisis de transitorios electromagnéticos con la transformada numérica de Laplace*, Editorial Académica española.

Padilla Sánchez Felipe Octavio, (2015). *Análisis de transitorios electromagnéticos debido a fallas en Líneas de Transmisión Multiconductoras no Uniformes utilizando el método de las características*, Tesis de maestría, CINVESTAV, Guadalajara Jalisco, Enero 2015.

Información de los autores.



Miguel Ángel Ruiz Lira, estudiante del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), actualmente se encuentra cursando el séptimo semestre de la carrera en Ingeniería eléctrica, ha recibido varias capacitaciones durante su formación tales como cursos de instalaciones áreas y subterráneas, cálculo de corto circuito, diseño de diagramas unifilares, entre otros, todos estos acreditados por la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC).



Avisá Sánchez Alegría, es Doctor en Ciencias en la especialidad de ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica e Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, actualmente es profesor por tiempo determinado en el departamento de ingeniería Eléctrica y Electrónica en el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, es candidato en el Sistema Nacional de Investigadores, e Investigador honorífico en el Sistema Estatal de Investigadores.



El **Dr. Rubén Herrera Galicia** tiene el título en México de Doctor en Eléctrica y es egresado de la *Technical University of Warsaw*, Polonia. Actualmente se encuentra laborando como profesor de tiempo completo en el Departamento de Eléctrica y Electrónica del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, trabajando actualmente en proyectos de Control inteligente aplicado a Sistemas Eléctricos de Potencia, Eficiencia Energética y Calidad de la Energía.



Joel Gómez Pérez, es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), graduado en 2005; Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), graduado en 2013. Ha colaborado con diversas universidades; entre ellas la Universidad Politécnica de Chiapas (UPCH) en el área de Ingeniería Mecatrónica, Biomédica, Energía; entre otros. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010 y colaborador en la Universidad del Valle de México (UVM) desde 2013. Es profesor con perfil deseable PRODEP desde 2017 y jefe de laboratorio de Física en el departamento de Ciencias Básicas.