

Revista EDUCATECONCIENCIA.

Volumen 30, No. 35

E-ISSN: 2683-2836

CD-ISSN: 2007-6347

Periodo: Abril-junio 2022

Tepic, Nayarit. México

Pp. 326-346

<https://doi.org/10.58299/h5nj2p10>

Recibido: 29 de marzo del 2022

Aprobado: 16 de junio del 2022

Publicado: 30 de junio del 2022

Análisis y Modelado de Líneas de Transmisión Monofásicas en Estado Transitorio

Analysis and Modeling of Single Phase Transmission Lines in Transient State

Juan Carlos Escamilla Sánchez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

escamilla_14@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6296-1702>

Ismael Albino Padilla

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

ismael.albino@correo.buap.mx

<http://orcid.org/0000-0001-5347-7089>

Rafael Herrera León

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

herreraleonrafael@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-1828-1141>

Guadalupe Jiménez Roano

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

guadalupe.jimenezr@alumno.buap

<https://orcid.org/0000-0001-7316-5015>

Guadalupe Scarlett Tzili C.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

herca.gstzili@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-4692-0895>

Análisis y Modelado de Líneas de Transmisión Monofásicas en Estado Transitorio

Analysis and Modeling of Single-Phase Transmission Lines in Transient State

Juan Carlos Escamilla Sánchez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

escamilla_14@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6296-1702>

Ismael Albino Padilla

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

ismael.albino@correo.buap.mx

<http://orcid.org/0000-0001-5347-7089>

Rafael Herrera León

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

herreraleonrafael@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-1828-1141>

Guadalupe Jiménez Roano

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

guadalupe.jimenezr@alumno.buap

<https://orcid.org/0000-0001-7316-5015>

Guadalupe Scarlett Tzili C.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

herca.gstzili@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-4692-0895>

Resumen

Este trabajo tiene un enfoque cuantitativo con un diseño de investigación no experimental transeccional, el tipo de investigación es exploratorio y descriptivo ya que se base en la descripción y utilización de un método de parámetros distribuidos en el dominio de la frecuencia para el análisis de líneas monofásicas, los resultados en el dominio del tiempo se obtienen a través de la Transformada Numérica de Laplace (TNL), se analizan líneas radiales y anilladas ante diferentes condiciones de operación. Los resultados muestran los voltajes transitorios en los extremos de cada elemento, permitiendo así conocer su magnitud y distorsión armónica para observar la tendencia de la atenuación que presentan las señales de voltaje en cada nodo de la red, lo cual permite evaluar las sobretensiones a las cuales el sistema de estudio estará sometido para poder así diseñarlo y operarlo en aras de soportar los esfuerzos que estas sobretensiones producen.

Palabras clave: Líneas de transmisión, redes eléctricas, transformada numérica de Laplace, transitorios electromagnéticos.

Abstract

This work has a quantitative approach with a non-experimental cross-sectional research design, the type of research is exploratory and descriptive since it is based on the description and use of a method of distributed parameters in the frequency domain for the analysis of single-

phase lines. The results in the time domain are obtained through the Numerical Laplace Transform (NLT), radial and ringed lines are analyzed under different operating conditions. The results show the transient voltages at the ends of each element, thus allowing to know its magnitude and harmonic distortion to observe the attenuation trend presented by the voltage signals in each node of the network, which allows evaluating the overvoltages to which the study system will be subjected in order to design and operate it in order to withstand the efforts that these overvoltages produce.

Keywords: Transmission lines, Electrical networks, numerical Laplace transform, Electromagnetic transients.

Introducción

Un transitorio electromagnético puede definirse como un cambio brusco en la distribución de energía electromagnética de un sistema eléctrico. Los transitorios son causados debido a cambios en las condiciones de la red, por ejemplo: la apertura o cierre de un interruptor para desconectar o conectar parte del sistema, fallas en la operación del equipo eléctrico, descargas atmosféricas, fallas de aislamiento etc. (Anderson *et al.*, 2014, Gomez *et al.*, 2005, Guillén *et al.*, 2015, Braun *et al.*, 2017 y Vidal-García & Gago-Ribas, 2021). A pesar de que los transitorios electromagnéticos tienen una duración muy pequeña (del orden de micro a milisegundos) pueden provocar severos daños al sistema debido a que los componentes del circuito se someten a un gran estrés; por ello es de gran importancia su análisis para el diseño de los equipos y coordinación de aislamiento. principalmente hay dos formas de análisis para transitorios electromagnéticos: los métodos en el dominio del tiempo y los del dominio de la frecuencia. Los métodos basados en el dominio del tiempo son los más empleados hasta ahora por la fácil representación de operaciones de maniobra y no linealidades; sin embargo, la dependencia frecuencial de los parámetros eléctricos de los elementos del sistema se incluye mediante aproximaciones racionales (Manuja *et al.*, 2021). En este trabajo se optó por utilizar un método en el dominio de la frecuencia, por la complejidad de los sistemas, no siempre es posible encontrar en tablas la inversa de la solución en el dominio de la frecuencia, y en ese caso se recurre a algoritmos numéricos, en estos métodos la dependencia frecuencial de los parámetros es posible considerarlos de manera muy sencilla y directa. La implementación del algoritmo presentado se realizó en el lenguaje de programación Matlab, donde se programaron diferentes configuraciones de red monofásica, la solución que se obtiene son las sobretensiones transitorias en cada nodo de los casos de estudio en el dominio de la frecuencia, por lo que fue necesario la programación de la TNL para obtenerlos en el dominio del tiempo. Cada configuración de red

fue programada de forma independiente partiendo de la base inicial de una línea monofásica hasta poder representar una red de anillada de varios nodos con cargas y fuentes localizadas en diferentes puntos del sistema, permitiendo así la extensión y aplicación del método para líneas monofásicas radiales hacia sistemas anillados, además de poder conocer el comportamiento, magnitud y distorsión armónica de las sobretensiones ante diferentes condiciones de red, lo cual permite dimensionar la red en la planeación para corto y mediano plazo.

Situación problemática

En la actualidad los programas de simulación en estado transitorio permiten analizar redes eléctricas en el dominio del tiempo, sin embargo, aun presentan problemas al analizar sistemas no lineales o asimétricos en las configuraciones de los casos de estudio. Los modelos en el dominio de la frecuencia permiten analizar de manera más precisa tales condiciones ya que no necesitan de aproximaciones al momento de considerar la dependencia frecuencial y con las técnicas numéricas que han tomado auge en los últimos años es posible obtener los resultados en el dominio del tiempo para su interpretación. Estos problemas podrían agravarse cuando se requiere analizar redes eléctricas ya que las aproximaciones deberán realizarse de manera independiente para cada línea que conforma el sistema eléctrico. El programa y técnica utilizado dará pauta a poder crear modelos de redes eléctricas con mayor precisión y con un armado de red más simple y de fácil interpretación además de personalizar las necesidades propias de la red de estudio.

Antecedentes

En sus inicios, los métodos gráficos fueron los que dieron la pauta para comprender el fenómeno físico a través de la teoría de ondas viajeras, empleando los conceptos de impedancia característica, coeficientes de reflexión y de transmisión, estos métodos fueron aplicados a líneas monofásicas ideales. El método gráfico más conocido es el de Bewley, también llamado diagrama de Lattice, (Brajagopal & Saibal, 2013). Otro método gráfico es el de Bergeron, donde se considera una línea sin pérdidas, la onda no cambia de magnitud durante su recorrido en una línea sino hasta el momento en que llega a un punto o nodo de transición. Este método ha sido aplicado a estudios con elementos no lineales y cargas no resistivas. Con la aparición de computadoras analógicas se creó el Analizador Transitorio de Redes (TNA- Transient Network Analyzer), un simulador que recurre al uso de elementos con parámetros concentrados para

representar a escala fenómenos que ocurren en el sistema. Los primeros estudios con simulación digital relacionados a los sobrevoltajes en líneas de transmisión fueron realizados a principio de los años 60, empleando las técnicas de Bewley y el método de Bergeron. La extensión a redes multinodo con parámetros concentrados y distribuidos, así como elementos no lineales, fue realizada por H.W. Domme; esto dio origen al Electromagnetic Transients Program (EMTP) y a otras aplicaciones como el “Alternative Transient Program” (ATP) y el “Electromagnetic Transients for Direct Current” (EMTDC). Los modelos más precisos en cálculos transitorios son aquellos que toman en cuenta la naturaleza distribuida de los parámetros y su dependencia a la frecuencial. Los modelos en el dominio del tiempo carecen de esta exactitud ya que requieren aproximar a través de fracciones racionales las convoluciones recursivas que se presentan al tratar de incluir la dependencia frecuencial en sus modelos. Por otra parte, con las técnicas en el dominio de la frecuencia la dependencia frecuencial de los parámetros de las líneas de transmisión se puede tomar en cuenta de manera muy sencilla y directa ya que se trabaja en ese dominio, y la transformada numérica de Laplace o la transformada discreta de Fourier permite obtener la solución en el dominio del tiempo (Gomez *et al.*, 2005, Guillén *et al.*, 2015 y Manuja *et al.*, 2021).

Objetivo

El objetivo principal es la implementación de un modelo de línea de transmisión en estado transitorio que se pueda extender para el estudio de redes eléctricas monofásicas en el dominio de la frecuencia y que incluya tanto la dependencia frecuencial como la naturaleza distribuida de los parámetros eléctricos, para así poder cuantificar las sobretensiones que se presentan ante diferentes condiciones de operación lo que permitirá tomar decisiones en tiempo real para garantizar la confiabilidad del sistema y en la planeación eléctrica para la posible expansión del sistema eléctrico.

Materiales y Método

Las variables de estudio serán los voltajes transitorios que presenta la red eléctrica que es utilizada como caso de análisis. La investigación realizada en este trabajo es del tipo cualitativa por el hecho de manejar la teoría fundamentada de los modelos matemáticos para análisis transitorio en líneas de transmisión y cuantitativa desde el enfoque de los resultados numéricos que se obtienen.

Participantes

El tipo de investigación requirió de la revisión bibliográfica de artículos relacionados a los modelos de líneas de transmisión en el dominio del tiempo y de la frecuencia, así como de técnicas numéricas de solución. Todas las referencias son de investigación en ingeniería eléctrica en el área de altas tensiones que se enfocan en la obtención de sobrevoltajes transitorios y su impacto en la red eléctrica. El trabajo presentado por (Anderson *et al.*, 2014) utiliza la descomposición modal para la obtención de las sobretensiones transitorias en líneas de transmisión basado en un método en el dominio de la frecuencia. Brajagopal & Saibal (2013), presentan un método basado en el diagrama de red de Bewley el cual es una técnica gráfica que se ha utilizado ampliamente para determinar el valor de una onda viajera en el análisis de transitorios. El método proporciona una representación muy simple de los reflejos de voltaje y corriente a medida que viaja a lo largo del sistema de transmisión. Braun *et al.*, (2017) describen en su artículo una extensión del modelo de línea de transmisión monofásica convencional con parámetros distribuidos uniformemente. El modelo puede tener en cuenta las faltas de uniformidad de la impedancia a lo largo de la línea de transmisión bajo condiciones externas. Garbelim *et al.*, (2022) proponen un modelo de línea de transmisión trifásicas no transpuestas con simetría vertical desacoplando una línea de transmisión en sus modos de propagación usando la matriz de Concordia, que es la forma ortogonal propia de la matriz de Clarke que tiene sus columnas normalizadas. Debido al uso de la matriz de Concordia, la línea de transmisión se desacopla en dos modos acoplados y un modo desacoplado, la solución de la línea de transmisión la comparan con los resultados obtenidos en el ATP/Draw. Gomez *et al.*, (2005) consideran dos métodos para analizar líneas de transmisión multiconductoras no uniformes en el dominio de la frecuencia. El primero se basa en la conexión en cascada de matrices en cadena de segmentos de línea uniformes. En el segundo método, se resuelve un sistema lineal variante en el espacio. Además, se presenta una técnica para introducir el efecto de los campos electromagnéticos incidentes en el modelo de líneas no uniformes. Guillen *et al.*, (2015) obtienen sobretensiones internas transitorias a lo largo de líneas de transmisión multiconductor mediante un modelo descrito en el dominio q-s. En tal dominio, las ecuaciones del telegrafista de la línea se definen en forma algebraica simplificando así su solución. Haginomori *et al.*, 2016) describen en su libro el uso y aplicación del programa de simulación ATP/Draw para el análisis transitorio,

permitiendo así, modelar los diferentes elementos del sistema eléctrico de potencia. Manuja *et al.*, (2021) desarrollan un modelo en el dominio del tiempo para líneas de transmisión no uniformes y dispersivas sobre suelo dependiente de la frecuencia y con pérdidas. El modelo propuesto consiste en ecuaciones de forma cerrada, se implementó utilizando un algoritmo en el dominio del tiempo de diferencia finita modificado. Sus resultados se han comparado y verificado con los obtenidos utilizando un enfoque de onda completa y los datos medidos disponibles en la literatura. Suman *et al.*, (2016) abordan en su trabajo las variaciones en los voltajes del sistema y las corrientes de carga durante las condiciones de falla con cargas lineales y no lineales. Las fallas investigadas incluyen falla de línea a tierra, de línea doble, de línea doble a tierra y trifásicas. El estudio detallado de simulación se implementó en MATLAB/Simulink. Los resultados de la simulación muestran los impactos de las fallas en los voltajes del sistema y las corrientes de carga. Vidal-García & Gago-Ribas, (2021), presentan un análisis de las principales contribuciones a la teoría de líneas de transmisión en cuanto a su caracterización con pérdidas. Se desarrollan dos caracterizaciones, la primera (caracterización directa) se ocupa de la parametrización de los parámetros en términos de pérdidas, mientras que la segunda (caracterización inversa) es particularmente útil para saber qué pérdidas conducen a una determinada especificación de la línea en cuanto a su variabilidad no uniforme. Wardzinska & Bandurski, (2017) presentan una aplicación de un método para modelar una interconexión no uniforme con parámetros dependientes de la frecuencia para una línea de transmisión multiconductora. El modelo utiliza los parámetros en el dominio de la frecuencia el cual se basa en aproximaciones sucesivas para calcular su dispersión lineal con la particularidad de que para estado estacionario solo se necesita una aproximación de segundo orden.

Técnicas e Instrumentos

La técnica utilizada es un método en el dominio de la frecuencia, el cual permite obtener un algoritmo de solución de las ecuaciones del telegrafista para líneas monofásicas con el cual se obtienen los sobrevoltajes transitorios, esta técnica de solución permite incluir de forma directa la dependencia frecuencial de los parámetros eléctricos a diferencia de los métodos en el dominio del tiempo que para su inclusión conlleva a aproximaciones racionales y que además hace más compleja su implementación, aunado a ello, los modelos en el dominio del tiempo presentan cierta inestabilidad en los resultados al modelar líneas de transmisión asimétricas, es por ello que

las soluciones que se obtienen en el dominio de la frecuencia son consideradas como las más precisas ya que no se aproxima ningún parámetro eléctrico y permite modelar líneas con configuraciones tanto simétricas como asimétricas (Gómez *et al.*, 2005, Guillén *et al.*, 2015 y Manuja *et al.*, 2021).

Procedimiento

En esta sección se describe el procedimiento de solución de un modelo de línea de transmisión aplicado a redes eléctricas. La técnica utilizada se basa en las ecuaciones del telegrafista, las cuales han sido objeto de estudios por diferentes autores para el análisis transitorio, para líneas monofásicas en el dominio del tiempo se definen como sigue (Guillén *et al.*, 2015), (Garbelim *et al.*, 2022), Manuja *et al.*, 2021), (Suman *et al.* 2016) y (Wardzinska & Bandurski, 2017).

$$-\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = r(t) * i(z,t) + \frac{\partial l(t) * i(z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = g(t) * v(z,t) + \frac{\partial c(t) * v(z,t)}{\partial t} \quad (2)$$

$r(t)$ representa las pérdidas distribuidas a lo largo del conductor, $l(t)$ es la inductancia y representa el flujo magnético debido a la corriente a través del conductor, la capacitancia $c(t)$ representa la corriente de desplazamiento que fluye entre dos conductores, o bien, entre un conductor y el plano tierra, la conductancia $g(t)$ relaciona la corriente de conducción debida a las pérdidas en el dieléctrico, $v(z,t)$ e $i(z,t)$ representan las variables de voltaje y corriente, z es el eje de propagación a lo largo de la línea y t la variable tiempo. El método consiste en la solución de las ecuaciones del telegrafista en el dominio de la frecuencia que posteriormente se extenderá a redes eléctricas monofásicas. Las ecuaciones en el dominio de la frecuencia se definen como: (Guillén *et al.*, 2015).

$$-\frac{dV(z,s)}{dz} = Z(s)I(z,s), \quad -\frac{dI(z,s)}{dz} = Y(s)V(z,s) \quad (3), (4)$$

Donde $Y(s)$ y $Z(s)$ son los parámetros eléctricos de admitancia e impedancia, respectivamente, $V(z,s)$ e $I(z,s)$ son las variables de voltaje y corriente dependientes de la distancia y de la frecuencia. Expresando en forma matricial las ecuaciones (3) y (4) y desacoplándolas se obtiene:

$$\frac{d^2}{dz^2} \begin{bmatrix} V(z,s) \\ I(z,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z(s)Y(s) & 0 \\ 0 & Y(s)Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(z,s) \\ I(z,s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

La solución de corrientes y voltajes del sistema matricial definido por (5) se expresa en función de la constante de propagación γ y de las constantes de voltaje C_1 y C_2 como:

$$V(z,s) = C_1 e^{-\gamma z} + C_2 e^{\gamma z}, \quad I(z,s) = Y_0 (C_1 e^{-\gamma z} - C_2 e^{\gamma z}) \quad (6), (7)$$

Y_0 y Z_0 , son la admitancia e impedancia característica de la línea respectivamente. Aplicando condiciones de frontera en $\gamma=0$ y $\gamma=\text{longitud de la línea } (l)$, se obtiene el modelo de dos puertos el cual permite que en función de los parámetros eléctricos y señales de excitación se obtengan las sobretensiones transitorias en el dominio de la frecuencia (Gómez *et al.*, 2005) y (Guillen *et al.*, 2015):

$$V_l = \cosh(\gamma l) V_0 - Z_0 \sinh(\gamma l) I_0 \quad (8)$$

$$I_l = Y_0 \sinh(\gamma l) V_0 - \cosh(\gamma l) I_0 \quad (9)$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{Y}{Z}}, \quad \gamma = \sqrt{ZY} \quad (10), (11)$$

La representación que otorga las ecuaciones (8) y (9) son un modelo de nodos modificado ya que existen variables de corriente necesarias para la solución; sin embargo, es posible hacer un desacoplamiento para obtener un modelo nodal conocido también conocido como Ybus (Ybus o modelo nodal es la representación matemática en forma de matriz que hace referencia a la conectividad de un circuito eléctrico) para la solución, al realizar dicho cambio de variable se obtiene finalmente:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SS} & -Y_{SR} \\ -Y_{RS} & Y_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_l \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde:

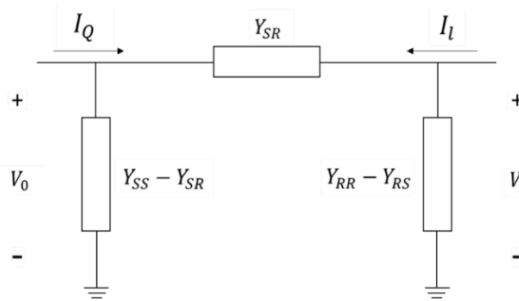
$$Y_{SS} = Y_{RR} = Y_0 \coth(\gamma l), \quad Y_{SR} = Y_{RS} = Y_0 \operatorname{csch}(\gamma l) \quad (13), (14)$$

La ecuación (12) se puede representar de manera circuital como el que se muestra en la figura 1. La cual permite la conectividad de la línea de transmisión a través de circuitos

equivalentes, simplificando así su aplicabilidad para el análisis de sistemas radiales o anillados bajo diferentes condiciones de operación. Los parámetros eléctricos de la línea de transmisión están incluidos en las variables Y_{ss} , Y_{rr} , Y_{sr} e Y_{rs} , estas variables resumen el modelo de la línea de transmisión y a través de ellas se puede formar el arreglo matricial de cada línea.

Figura 1

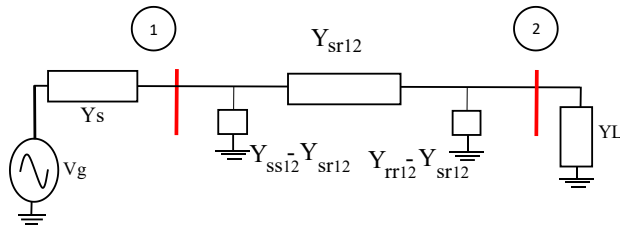
Modelo modificado en forma de circuito Ybus que representa una línea de transmisión monofásica



El cálculo de los parámetros eléctricos monofásicos se realiza por medio del método de las imágenes descrito en (Guillén *et al.*, 2015). El sistema de ecuaciones y la conectividad permite la obtención de las variables de voltaje en estado transitorio para un sistema básico de una línea monofásica radial con un generador y una carga se muestran en la figura 2, la expresión (15) se obtiene a partir de la conectividad de dicha figura en función del modelo de Ybus de la línea de transmisión descrito en la figura 1, I_g es la corriente del generador, Y_s es la admitancia del generador y Y_L es la admitancia de la carga. Esta representación puede ser extendida para redes eléctricas tal y como se presenta en los casos de aplicación.

Figura 2

Representación de un sistema radial monofásico



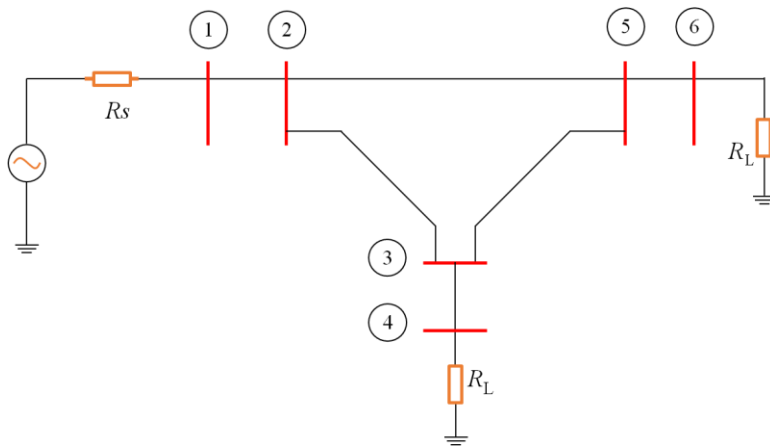
$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = inv \begin{bmatrix} Y_{ss} + Y_s & -Y_{sr} \\ -Y_{rs} & Y_{rr} + Y_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Resultados y discusiones

Se simuló un sistema anillado compuesto por 6 buses como el mostrado en la figura 3. Las condiciones de operación fueron cambiando, variando tanto la longitud de las líneas como los valores de la carga, con el objetivo de ver el comportamiento dinámico de los voltajes transitorios. Las fuentes de excitación utilizadas en el sistema fueron del tipo cosenoidal y de corriente directa con magnitudes unitarias para simular valores en por unidad. A diferencia con los trabajos citados, el modelo utilizado es aplicado a un sistema de líneas monofásicas con una configuración de red específica, contrastando con los resultados de otros autores en donde utilizan el método en el dominio de la frecuencia para el análisis y modelado de líneas multiconductoras y ante condiciones de operación con descargas atmosféricas directas e indirectas, switcheo de interruptores, efecto corona, líneas uniformes y no uniformes, etc. Como tal no hay un antecedente de su utilización y aplicación a un sistema específico como el que se muestra en los casos de estudios, si bien el modelo es el mismo que los autores han utilizado, su aplicabilidad es muy variada por su exactitud y facilidad que presenta su implementación además de lo versátil que es para el análisis de los sistemas en estado transitorio.

Figura 3

Sistema eléctrico monofásico de 6 nodos con una fuente de excitación y cargas conectadas en los nodos 4 y 6. R_s representa la resistencia de la fuente y R_L la resistencia en las cargas



Los parámetros de la línea de transmisión no corresponden a un sistema real, son datos generales usados únicamente para realizar las simulaciones. Los datos para el cálculo de los parámetros eléctricos se muestran en la tabla 1. El diagrama detallado con la conectividad del modelo nodal de cada línea de la figura 3 se muestra en la figura 4, donde las variables que se muestran son la obtenidas a partir de la ecuación (15), los subíndices de cada variable Y_{ssij} , Y_{rrij} e Y_{srij} representan la conectividad de un nodo con respecto a otro, esto permite obtener de manera ordenada la conectividad al momento de armar la ecuación matricial del sistema.

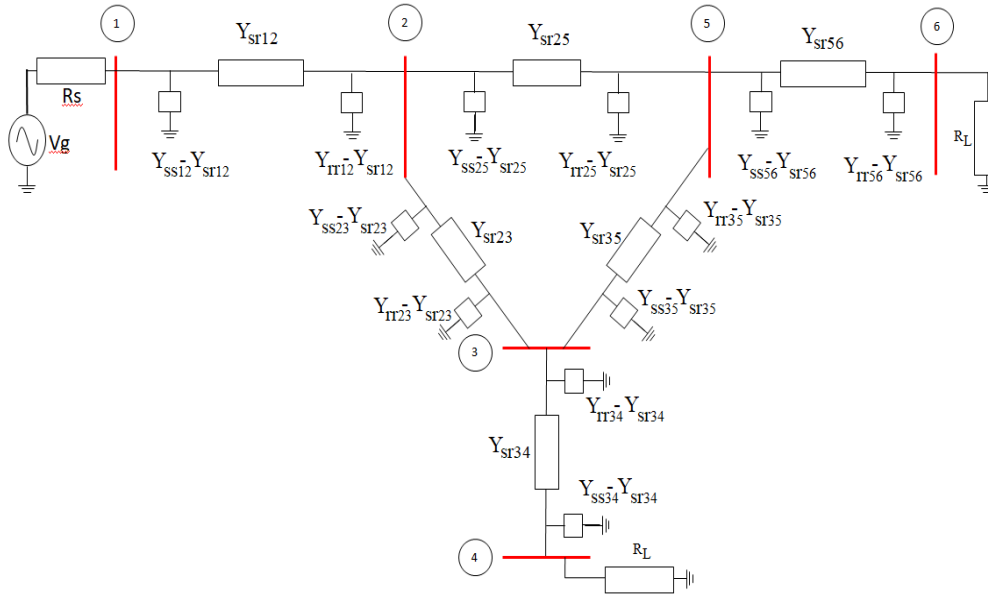
Tabla 1

Datos de las líneas de transmisión

Permeabilidad del vacío	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/m.A}$
Permitividad eléctrica del vacío	$8.84 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N.m}^2)$
Permeabilidad del terreno	$1.2566 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
Permeabilidad del conductor	$1.2566 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
Radio del conductor	0.0254 m
Altura de la línea	28 m
Resistividad del terreno	100 $\Omega\text{-m}$
Resistencia de la fuente	$1 \times 10^{-8} \Omega$

Figura 4

Sistema eléctrico monofásico de 6 nodos representado con el modelo de cada línea de transmisión



Caso 1

Como primer caso de estudio se considera una energización en vacío, es decir líneas abiertas sin cargas conectadas, para simular este comportamiento se asignan valores a R_L de magnitudes considerablemente grandes conectadas a los buses 4 y 6 (*valores por arriba de 1×10^5 ya representa el comportamiento de línea abierta para los casos de estudio*), como se muestra en la tabla 2. Las longitudes de cada segmento de línea también son mostradas en dicha tabla.

Tabla 2

Longitudes de las líneas de transmisión y cargas conectadas

Longitud de la línea Sección 1-2	100 Km
Longitud de la línea Sección 2-3	150 Km
Longitud de la línea Sección 2-5	200 Km
Longitud de la línea Sección 3-4	80 Km
Longitud de la línea Sección 3-5	150 Km
Longitud de la línea Sección 5-6	100 Km
Resistencia de la fuente	$1 \times 10^{-8} \Omega$
Resistencia de la carga en el nodo 4 y 6	$1 \times 10^5 \Omega$

Para validar los resultados del método implementado en este trabajo se comparan los resultados del caso 1 con los obtenidos en el programa de simulación ATP/Draw (Alternative

Transients Program) el cual es un software gratuito y especializado en el área de transitorios electromagnéticos (Haginomori *et al.*, 2016).

La Figura 5 muestra la red armada en el software de simulación donde se igualaron las condiciones físicas de la red y los datos de simulación. Para una mejor comparación únicamente se grafican los resultados de los nodos 2 y 6 los cuales se muestran en la figura 6, la red es energizada con una señal cosenoidal.

Figura 5

Red eléctrica implementada en el programa ATP/Draw

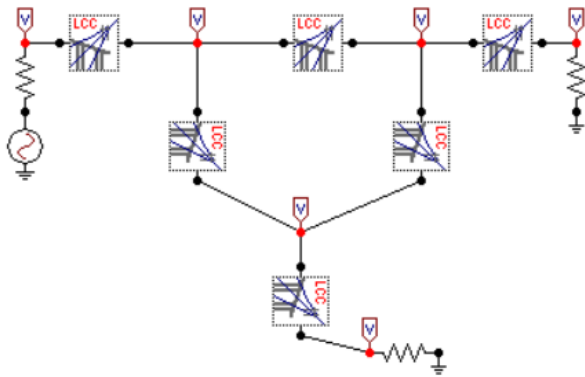
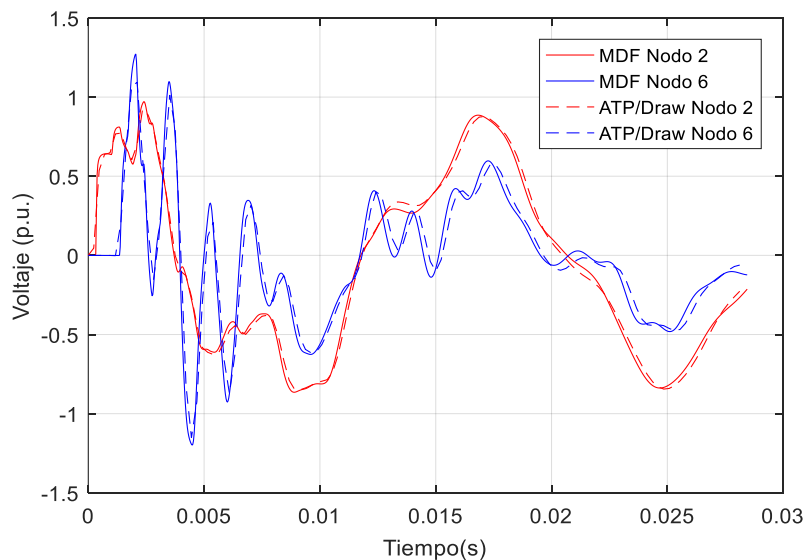


Figura 6

Sobretensiones transitorias en los nodos 2 y 6 obtenidas con el programa de en el dominio de la frecuencia (MDF) y con el ATP/Draw



Los resultados obtenidos en la figura 6 demuestran que ambos métodos obtienen resultados similares tanto en magnitud como en distorsión armónica de las señales de voltaje. Con ello se valida el modelo y los subsecuentes ejemplos de aplicación se toman como válidos. La figura 7 y 8 muestra las sobretensiones transitorias en los Nodos:1, 2, 3, 4, 5 y 6 de la red monofásica energizada con una fuente de voltaje cosenoidal y del tipo escalón las cuales representan corriente alterna y directa, respectivamente.

Figura 7

Sobretensiones transitorias para el sistema en vacío energizado con una fuente cosenoidal

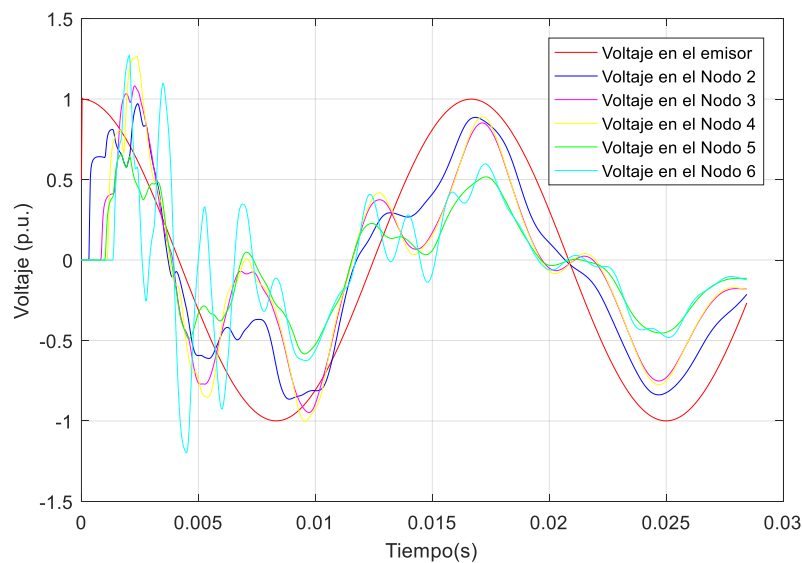
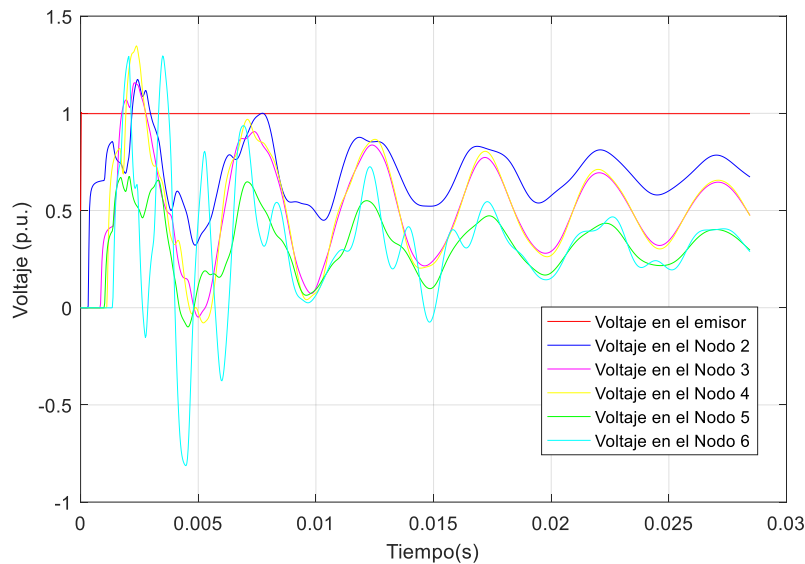


Figura 8

Sobretensiones transitorias para el sistema en vacío energizado con una fuente de corriente directa



Se puede observar tanto en el caso de corriente alterna como en el de corriente directa que cuando las líneas se energizan en vacío se presenta el máximo transitorio en el sistema eléctrico debido a las reflexiones producidas por las ondas viajeras de voltaje que se presentan en cada nodo de la red, así mismo la distorsión de las señales son más pronunciadas que cuando hay carga conectada. Lo que permite que la señales puedan irse amortiguando hasta llegar a un comportamiento estacionario son las propias pérdidas a lo largo de las líneas de transmisión las cuales existen de forma natural al presentarse resistencia al flujo de energía aunado a la propia conectividad entre ellas a través de los nodos.

Caso 2

Esta condición de operación se realizó aumentando la dimensión física de las líneas de la red eléctrica y se asignaron valores de carga que representan altas demandas en el sistema. La tabla 2 muestra los valores de las dimensiones físicas de la red y de la carga.

Tabla 3

Longitudes de las líneas de transmisión y cargas conectadas

Longitud de la línea Sección 1-2	190 Km
Longitud de la línea Sección 2-3	195 Km
Longitud de la línea Sección 2-5	200 Km
Longitud de la línea Sección 3-4	185 Km
Longitud de la línea Sección 3-5	195 Km
Longitud de la línea Sección 5-6	200 Km
Resistencia de la fuente	$1 \times 10^{-8} \Omega$
Resistencia de la carga en el nodo 4	1500Ω
Resistencia de la carga en el nodo 6	1350Ω

Las figuras 9 y 10 muestran la sobretensión transitoria ante una excitación con una fuente cosenoidal y del tipo escalón unitario, respectivamente.

Figura 9

Sobretensiones transitorias para el sistema energizado con una fuente de corriente alterna con valores de carga que representan altas demandas

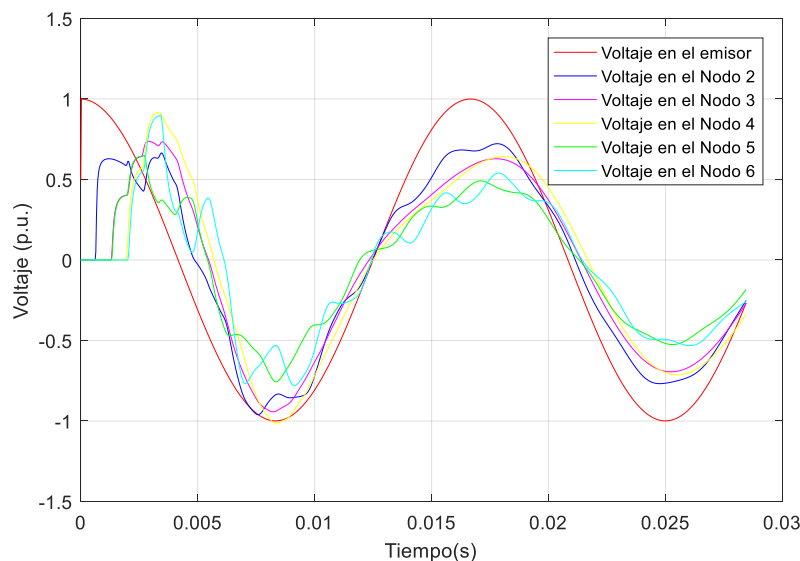
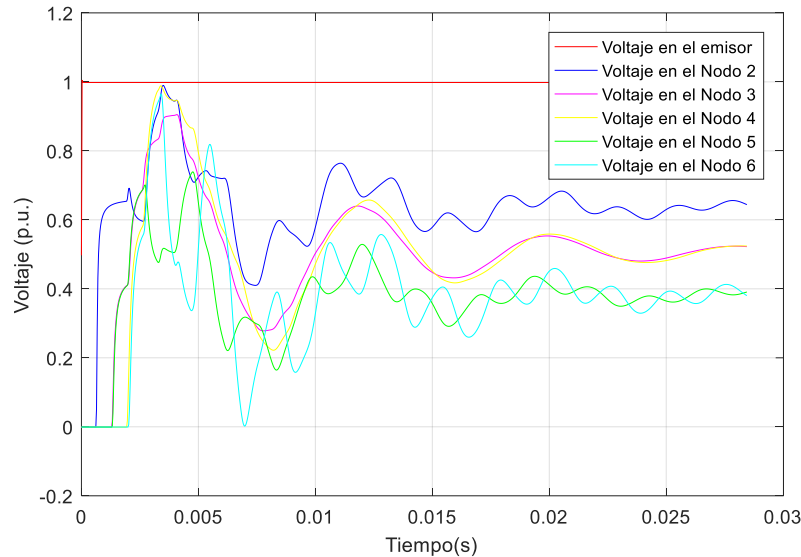


Figura 10

Sobretensiones transitorias para el sistema energizado con una fuente de corriente directa con valores de carga que representan altas demandas



Los resultados obtenidos en las figuras 9 y 10 muestran que el fenómeno transitorio se amortigua de manera más rápida que en el primer caso de estudio debido a que la carga que representa altas demandas permite atenuar rápidamente la distorsión de las señales de tensión obteniendo así su estado estacionario en casi la mitad de tiempo, sin embargo, los valores finales de tensión en cada nodo están muy por debajo del valor nominal de la fuente (Nodo emisor), lo que indica una descompensación y caída de voltaje, estas condiciones de operación, llevan a la necesidad de agregar elementos de soporte de voltaje que permitan poder operar el sistema bajo condiciones nominales en sus variables eléctricas. Cuando un sistema eléctrico opera con altas demandas de energía el voltaje tiende a disminuir considerablemente si el comportamiento persiste o incluso si la demanda aumenta, se corre el riesgo de tener colapsos por bajo voltaje, por ello, la importancia de contar con recursos de soporte de voltaje.

Conclusiones

Una vez realizadas las simulaciones para los dos casos de estudio bajo las condiciones de operación mostradas se llegó a las siguientes conclusiones:

- a) El transitorio electromagnético tarda más en amortiguarse cuando la longitud de línea es más larga. A mayor longitud de la línea mayor será la longitud de onda del fenómeno.
- b) La resistencia de la carga define la amplitud del transitorio electromagnético. A mayor magnitud de carga, menor será la amplitud del fenómeno. Es importante recalcar que el modelo no permite la conexión de cargas no lineales, para poder incluirlas se tendría que adecuar una representación lineal de las mismas.
- c) En un sistema anillado, la longitud de las secciones de líneas afecta en los voltajes transitorios de cada nodo. Mientras mayor sea la diferencia en longitudes, el transitorio tardará más en disiparse, por lo que tarda en llegar a su estado estacionario. Si se presentan valores altos de carga, los transitorios en el sistema pueden atenuarse de manera más rápida, sin embargo, esto hace que se presenten bajos voltajes una vez que se llega al estado estacionario, lo que implica que se requieren elementos de compensación que ayuden a regular el voltaje. El no incluir la compensación es una limitación del modelo que se presenta y se agregara en trabajos consecuentes.
- d) Para tener un sistema más completo es necesario seguir trabajando y extender el análisis y el modelado a líneas de transmisión multiconductora el cual permitirá la inclusión de varios circuitos por torre de transmisión e hilos de guarda.

Referencias

- Anderson, R., Cleberda, R., & Kurokawa, S. (2014). Using universal line model (ulm) for simulating electromagnetic transients in three-phase transmission lines. *IEEE Latin America Transactions*, 2 (12), 190- 196. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6749537>.
- Brajagopal, D., & Saibal, Ch. (2013, 13 de febrero). *Simulation of Bewley's lattice diagram using MATLAB I* [conferencia]. 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON). Kolkata, India. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6737466>.
- Braun, C., Rahman, M., & Cecchi, V. (2017, 19 de septiembre). *A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance* [conferencia]. North American Power Symposium (NAPS). Morgantown, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8107223>.
- Garbelim, T., Torrez, P., & Kurokawa, S. (2022). Application of the lumped parameter line model to simulate electromagnetic transients in three-phase transmission lines with vertical symmetry. *IEEE Latin America Transactions*, 20 (3), 379 – 385. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9667135>.
- Gomez, P., Moreno, P., & Naredo, J. L. (2005). frequency-domain transient analysis of nonuniform lines with incident field excitation. *IEEE Transactions on Power Deliver*, 3 (20), 2273-2280. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1458907>.
- Guillén, R. N., Gómez, P., & Espino-Cortés, F. P. (2015, 23 de septiembre). *Computation of transient voltage and current profiles along illuminated multiconductor lines by means of the numerical Laplace transform* [conferencia]. North American Power Symposium (NAPS), Manhattan, USA. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6666944>.
- Haginomori E., Koshiduka T., Arai J., & Ikeda H. (2016). *Power System Transient Analysis: Theory and Practice using Simulation Programs (ATP-EMTP)*. Wiley.
- Manuja, G., Ashley, N., & Behzad, K. (2021). Time-domain coupling model for non parallel frequency-dependent overhead multiconductor transmission lines above lossy ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1 (1), 1-9. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9580652>.
- Suman, D., Nagendra, K., Sheesh, R., & Prakash, M. (2016, 9 de junio). *Analysis of transmission line faults with linear and dynamic loads* [conferencia]. Conference on Advances in Signal Processing (CASP). Pune, India. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7746145>.
- Vidal-García, P., & Gago-Ribas, E. (2016, 8 de agosto). *Complex analysis of the Transmission Line Theory: Analytical characterization and examples of use* [conferencia]. Progress in Electromagnetic Research Symposium. (PIERS). Shanghai, China. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7735278>.

Wardzinska, A., & Bandurski, W. (2017, 10 de mayo). Calculations of frequency dependent transmission line model for coupled exponential line [conferencia]. IEEE 21st Workshop on Signal and Power Integrity (SPI). Lake Maggiore, Italy.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7944022>.