

**MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN  
POR MEDIO DEL MODELO J. MARTÍ**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN  
SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL MODELO J. MARTÍ**

**AUTOR:  
ROBINSON QUILUMBA COLLAGUAZO**

**DIRECTOR:  
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

**Quito, Junio 2017**

Robinson Quilumba Collaguazo

**MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL MODELO J. MARTÍ**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Robinson Quilumba Collaguazo** (Y'1991-J'04). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Tecnológico Superior Central Técnico. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la Modelación de Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Transmisión por Medio del Modelo J. Martí  
[rquilumba@est.ups.edu.ec](mailto:rquilumba@est.ups.edu.ec)

Dirigido por:



**Diego Francisco Carrión Galarza** (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).  
[dcarrion@ups.edu.ec](mailto:dcarrion@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2017 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO-ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Modelación de Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Transmisión por Medio del Modelo J. Martí* realizado por Robinson Quilumba Collaguazo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Junio 2017



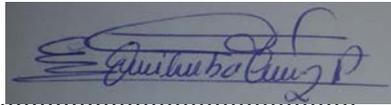
.....  
Diego Francisco Carrión Galarza  
Cédula de identidad: 1713703062

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Robinson Quilumba Collaguazo, con documento de identificación N° 172080750-0, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL MODELO J. MARTÍ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Robinson Quilumba Collaguazo

Cédula: 1720807500

Fecha: Junio 2017

## INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. ORIGEN DE LOS TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS.....	3
2.1. Revisión de modelos de línea.....	3
2.2. Modelo de J. Martí.....	4
2.3. Desarrollo matemático del modelo.....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
3.1. Modelo de análisis de transitorios.....	7
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	8
4.1. Estado estable.....	8
4.2. Cierre de línea.....	9
4.3. Apertura de línea.....	9
4.4. Falla monofásica a tierra.....	10
5. CONCLUSIONES.....	10
6. REFERENCIAS.....	11
6.1 ESTADO DEL ARTE.....	14

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelación de Transitorios Electromagnéticos en Sistemas de Transmisión por Medio del Modelo J. Martí.....	3
Figura 2. Modelo CP de una Línea sin Pérdidas.....	4
Figura 3. Circuito Equivalente del Modelo de J. Martí.....	6
Figura 4. Esquema de Prueba.....	7
Figura 5. Datos de Línea de Transmisión.....	7
Figura 6. Voltajes de Entrada y Salida en Estado Estable.....	8
Figura 7. Comportamiento del Sistema en Cierre de Línea.....	9
Figura 8. Comportamiento del Sistema en Apertura de Línea.....	10
Figura 9. Comportamiento del Sistema en Falla Monofásica a Tierra.....	10
Figura 10. Indicadores del Estado de Arte - Solución.....	18

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de líneas de acuerdo a su longitud.....	5
Tabla 2. Términos utilizados en el modelo.....	6
Tabla 3. Casos de Prueba.....	8
Tabla 4. Resultado análisis en estado estable.....	9
Tabla 5. Resultado análisis en cierre de línea.....	9

# MODELACIÓN DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DEL MODELO J. MARTÍ

## Resumen

En este artículo se presenta un problema que trata la modelación de líneas de transmisión, el cual tiene la finalidad de analizar el comportamiento de estos elementos durante los eventos transitorios. El desarrollo de este modelo por su naturaleza involucra métodos matemáticos que tienen esencia no lineal es por eso que para el presente trabajo se empleará el Modelo de J. Martí también llamado Modelo de Línea Dependiente de la Frecuencia, que tiene una gran aplicación dentro de los análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de transmisión, por su complejidad a ser analizado en el dominio tiempo, para su desarrollo se empleará herramientas computacionales en conjunto con la Transformada de Laplace ya que son muy utilizadas para dicho estudio. Con la transformada de Laplace lo que se hará es un cambio del dominio en el tiempo al dominio de la frecuencia para una mejor modelación. Finalmente se presenta un caso de estudio en particular para poder analizar estos efectos de manera digital.

**Palabras Clave:** Líneas de Transmisión, Modelo Dependiente de la Frecuencia, Transformada de Laplace, ATP-EMTP.

## Abstract

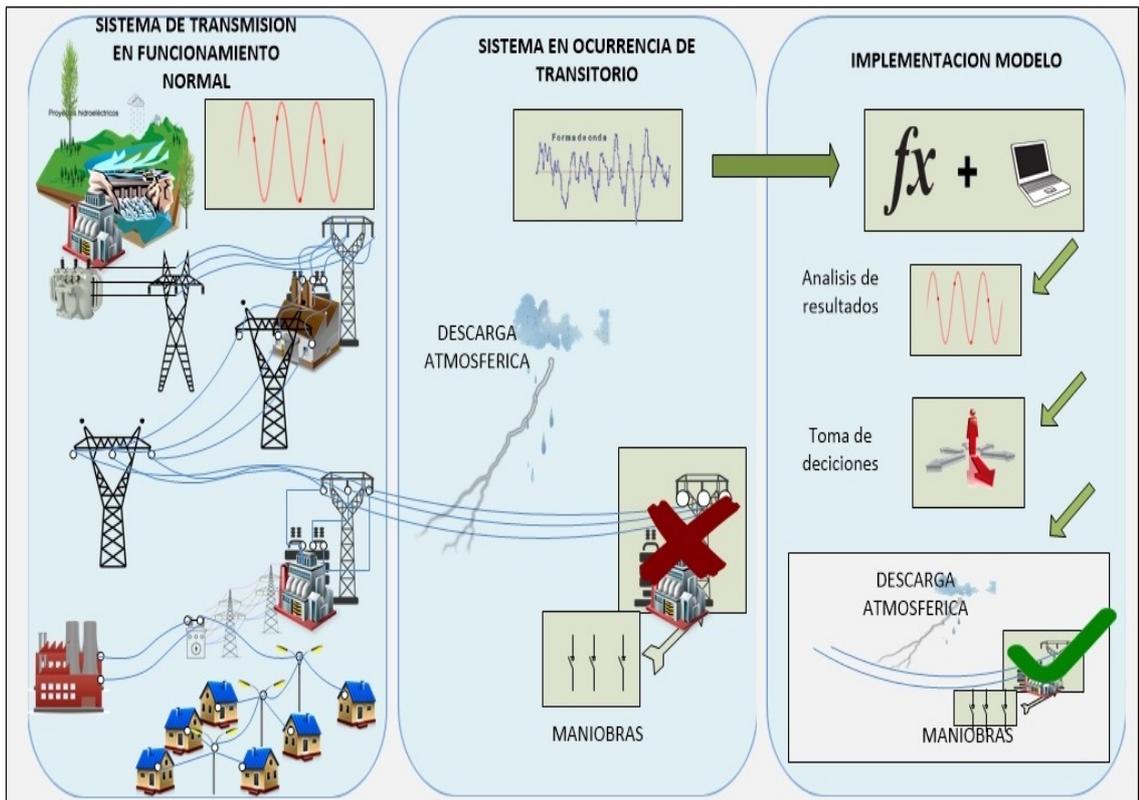
This paper presents a problem that deals with the modeling of transmission lines, which has the purpose of analyzing the behavior of these elements during the transient events. The development of this model by its nature involves mathematical methods that have a nonlinear nature. This is why the present work will use the Model of J. Martí also called Frequency Dependent Line Model, which has a great application within the Analysis of electromagnetic transients in electrical transmission systems, due to its complexity to be analyzed in the time domain, for its development will be used computational tools in conjunction with the Laplace Transform since they are widely used for this study. With the Laplace transform what will be done is a change of the domain in time to the domain of the frequency for a better modeling. Finally, a case study is presented in order to analyze these effects in a digital way.

**Keywords:** Transmission Lines, Frequency Dependent Model, Laplace Transform, ATP-EMTP.

## 1. Introducción.

En los sistemas eléctricos de potencia, en general en las líneas de transmisión debido a su expansión, son componentes críticos a nivel electromagnético señalado en [1]. Dónde se presentan fenómenos, cuyos tiempos de duración son muy cortos pero pueden producir daños de elevada consideración en los componentes que ayudan a la medición, protección y control del sistema como se menciona en [1],[4]. En [5], se señala que dentro del análisis de transitorios electromagnéticos existen elementos no lineales, que tienen un gran impacto en el inicio y durante la propagación de estos fenómenos. Es por ello que el modelamiento adecuado con un análisis preciso de su comportamiento son un pilar clave que nos ayudará a realizar un reforzamiento de nuestro sistema consiguiendo elevar su estabilidad. Por lo señalado anteriormente es importante entender el comportamiento de éstos fenómenos como se menciona en [2]. Dentro del estudio de estos fenómenos existen modelos que tienen gran exactitud cuya utilización se las da en simulaciones de estado estacionario de líneas cortas llamados también modelos de línea de parámetros concentrados constantes señalado en [6]. Por otra parte tenemos modelos que nos ayudan a realizar el análisis con parámetros distribuidos. En [7], se menciona que puede hacerse un análisis basado en la propagación de las ondas en una línea sin pérdidas con parámetros de inductancia y capacitancia constantes distribuidos de la línea de transmisión. Para el estudio de los fenómenos transitorios dependientes de la frecuencia cuya naturaleza se ve afectada por la misma, es decir su comportamiento será en función de la

frecuencia de operación, para su respectivo entendimiento se tienen modelos que trabajan tanto en el dominio modal mencionado en [8], como en el dominio de fase como se menciona [9]–[14]. En [8], el autor señala que para el estudio de un sistema completo en el cual intervienen operaciones de conmutación, elementos no-lineales y otros fenómenos las soluciones en el dominio del tiempo es más general y flexible, mientras que para una modelación de las líneas de transmisión es mucho más fácil cuando cuya solución se la formula en el dominio de la frecuencia. Por lo mencionado anteriormente siguiente artículo estará centrado en el modelamiento y análisis de los fenómenos producidos por los transitorios electromagnéticos dentro del sistema de transmisión, en base del modelo de línea dependiente de la frecuencia más conocido como el modelo de J. Martí, el cual es ampliamente usado en la mayoría de programas de transitorios electromagnéticos señalado en [7],[15]. Puesto que el modelo dependiente de la frecuencia (FD) ha sido una gran contribución para las simulaciones de transitorios electromagnéticos dentro del sistema de potencia, es una formulación de la cual se parte para hacer diversos estudios de transitorios con diferentes variaciones y configuraciones los cuales son implementados con diferentes modelos matemáticos y en software informáticos como es el ATP-EMTP que nos permitirán llevar a cabo la simulación de estos fenómenos transitorios como se menciona en [15],[8],[10]. De acuerdo a lo mencionado anteriormente es importante tener una precisión entre el modelamiento y la simulación por lo



**Figura 1.** Modelación de transitorios electromagnéticos en sistemas de transmisión por Medio del Modelo J. Martí.

que es importante el uso de herramientas informáticas precisas y formulaciones matemáticas adecuadas trabajen en conjunto siempre teniendo todos los parámetros de trabajo [16]–[18].

En adelante este artículo se organizará de la siguiente manera. En la sección 2 se enunciará sobre el origen de los transitorios y también se introduce el modelo de línea dependiente de la frecuencia conocido como (modelo de J. Martí). En la sección 3 se describe el planteamiento del problema y su formulación del modelamiento. En la sección 4 se analiza los resultados del modelamiento del algoritmo de J. Martí. Finalmente se concluye con este artículo en la sección 5 donde se despliegan las conclusiones.

## 2. Origen de los Transitorios Electromagnéticos.

Los transitorios electromagnéticos son manifestaciones de leyes físicas, sobre las cuales no existe control humano y se originan debido a cambios repentinos en la configuración de un sistema energizado, los cuales generalmente ocasionan sobrevoltajes de grandes magnitudes por corta duración, y pese a su corta duración pueden ocasionar daños y ser peligrosos para el sistema, debido a que producen una elevación de las amplitudes lo que puede ocasionar una ruptura o deterioro del aislamiento, y por ende causar daños a los demás elementos que componen y pertenecen al sistema de transmisión como se menciona en [1], [19]–[21]. En [2],[10], se indica que estos transitorios electromagnéticos pueden ser originados por tres maneras: sobrevoltajes causados por descargas atmosféricas, sobrevoltajes temporales y sobrevoltajes por maniobras, los cuales provocan una variación en la operación del sistema afectando el estado de propagación de la onda viajera.

### 2.1 Revisión de Modelos de Línea.

Las líneas de transmisión de múltiples conductores recorren distancias de tiempo

sumamente largas, lo suficiente para que su modelado de parámetros agrupados sea inexacto como se menciona en [22],[16]. En las referencias [21],[15], se indica que los modelos aproximados que pueden alterar la naturaleza distribuida de los parámetros de la línea se pueden obtener usando varios modelos de la sección pi del parámetro de carga en cascada. Un modelo más preciso el cual se conoce como como modelo de línea de parámetro constante (Modelo CP), puede obtenerse a través del agrupamiento de resistencias como se cita en [23], mientras que el modelado de la parte sobrante sin pérdidas, se lo hará mediante el modelo de Bergeron, éste modelo integra retrasos de onda de desplazamiento mediante un circuito equivalente simple que contiene una fuente de corriente y una resistencia constante ( impedancia característica de la línea) en cada extremo de la línea como se indica en [7], [17], [24], [25]. Las fuentes de corriente dependen de los valores de voltaje y corriente de los extremos de la línea nodo k y nodo m, con un cierto retardo de tiempo que está determinado por la velocidad de la onda de desplazamiento y la longitud de la línea como se alude en [21], [26]. Este modelo se muestra en la figura 2.

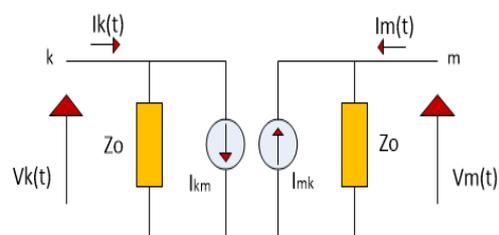


Figura 2. Modelo CP de una línea sin pérdidas.

### 2.2 Modelo de J. Martí.

El modelo matemático de línea dependiente de la frecuencia conocido también por su nombre característico en inglés (J. Martí Model), es un modelo el cual aproxima la impedancia característica y la constante de propagación por medio de funciones racionales utilizando una matriz de transformación constante para

realizar la conversión de valores que están en el dominio modal al dominio de las fases, cuya influencia para líneas aéreas es poco notable pero para cables es de suma importancia como se menciona en [27],[8]. Por lo dicho anteriormente es uno de los modelos más utilizados por su eficiencia y precisión en la mayoría de casos de modelación y simulación de fenómenos transitorios, además es una herramienta ampliamente utilizada en los programas de transitorios (EMTP) dando resultados satisfactorios como se menciona en [8], [15], [21], [28]. Cuando se hace uso del modelo de línea de parámetros concentrados las variaciones de R, L y C en función de la frecuencia simplemente se la ignora y no son tomadas en cuenta, es por eso que con el afán de enfrentar esta imperfección, el modelo dependiente de la frecuencia en esencia utiliza el mismo circuito equivalente que el modelo de CP mostrado en la figura 2 salvo por el hecho de que la impedancia característica  $Z_0$ , en cada uno de los extremos de la línea, es sustituida por equivalentes de red apropiados que tienen aproximadamente el mismo espectro de frecuencia que el de la  $Z_0$ , como se menciona en [21],[8]. Además los valores de la fuente actual ya no son funciones sencillas de retardo temporal de las variables de fin de líneas remotas, ya que implican operaciones más complicadas como se menciona en [8]. Siempre que se obtenga la exactitud deseada de las funciones de ajuste, que se aproximan a la respuesta de la frecuencia de  $Z_0$  y de la función de propagación el modelo de Línea Dependiente de la Frecuencia se puede emplear en la simulación transitoria de líneas de fase única de manera satisfactoria. Mientras que cuando se tiene conductores multifásicos, existe una carga adicional la cual se la encuentra al descomponer las ecuaciones lineales a través de una matriz de transformación modal como se menciona en [8], [15], [21]. Por otro parte la metodología planteada por J. Martí resulta de gran utilidad ya que evita problemas numéricos de estabilidad,

y es adecuado para un amplio rango de frecuencias, de 0 Hz a 106 Hz y para líneas medias y largas, se muestra su clasificación en la Tabla 1. Debido a la naturaleza distribuida de las pérdidas y a la dependencia de la frecuencia de los parámetros, es más conveniente desarrollar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia como se menciona en [8], [19].

Tabla 1: Clasificación de líneas de acuerdo a su longitud.

Longitud (Km)	Distinction
80	Líneas cortas
80-240	Líneas medianas
>240	Líneas largas

El modelo de línea dependiente de la frecuencia (modelo de J. Martí) utiliza matrices de transformación constantes reales para la de descomposición Fase-Modo es por ello que presenta inconvenientes de exactitud en su aplicación en líneas desbalanceadas, así también se verá afectada su exactitud en frecuencias bajas y para secciones de líneas las cuales son muy cortas, debido que éstos presentan poca exactitud y no pueden ser usados para cálculos de análisis en el dominio del tiempo [2], [8].

### 2.3 Desarrollo Matemático del Modelo.

Cuando se incluyen pérdidas en el circuito como es el caso del modelo de J. Martí es muy complicado escribir de manera práctica la solución de las ecuaciones en el dominio del tiempo, es por ello que esta relación puede darse fácilmente en el dominio de la frecuencia tanto para los voltajes y corrientes de cada nodo como se menciona en [27], [29].

$$V_k(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)l)V_m(\omega) - Z_c(\omega) \sinh(\gamma(\omega)l)I_m(\omega) \quad (1)$$

$$V_m(\omega) = \cosh(\gamma(\omega)l)V_k(\omega) - Z_c(\omega) \sinh(\gamma(\omega)l)I_k(\omega) \quad (2)$$

$$I_k(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l) V_m(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l) I_m(\omega) \quad (3)$$

$$I_m(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l) V_k(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l) I_k(\omega) \quad (4)$$

Dónde:

La impedancia característica  $Z_c$  y la constante de propagación  $\gamma$  de las ecuaciones anteriores, se muestran en las ecuaciones (5) y (6).

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}} \quad (5)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))(G'(\omega) + j\omega C'(\omega))} \quad (6)$$

Para representar matemáticamente el modelo, esto se puede hacer mediante la separación en dos componentes las cuales son conocidas como: funciones de onda viajera que van hacia adelante y funciones de onda viajera que van hacia atrás como se menciona en [8], [21], [27], [29], [30] las cuales se representan de la siguiente manera.

Funciones de onda viajera que van hacia adelante.

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (7)$$

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (8)$$

Funciones de onda viajera que van hacia atrás.

$$B_k(\omega) = V_k(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (9)$$

$$B_m(\omega) = V_m(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (10)$$

Donde  $Z_{eq}$  es la impedancia de la red y es aproximadamente la impedancia de la línea  $Z_c$ .

Comparando las ecuaciones (7) a (10) con las ecuaciones básicas de la línea en frecuencia (1) a (4) se obtiene lo siguiente.

$$B_k(\omega) = A_1(\omega) F_m(\omega) \quad (11)$$

$$B_m(\omega) = A_1(\omega) F_k(\omega) \quad (12)$$

Dónde:

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{1}{\cosh(\gamma(\omega)l) + \sinh(\gamma(\omega)l)} \quad (13)$$

De las formulaciones dadas anteriormente las relaciones de tensión y corriente que caracterizan el modelo de línea dependiente de la frecuencia (J. Martí) tanto en el nodo emisor como en el nodo receptor se muestran en las ecuaciones (14) y (15) respectivamente.

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega) I_k(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad (14)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega) I_m(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad (15)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} E_{mh} &= A(\omega) F_{pk} \\ &= [V_k(\omega) \\ &\quad + Z_c(\omega) I_k(\omega)] e^{-\gamma(\omega)l} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} E_{kh} &= A(\omega) F_{pm} \\ &= [V_m(\omega) \\ &\quad + Z_c(\omega) I_m(\omega)] e^{-\gamma(\omega)l} \end{aligned} \quad (17)$$

Son las fuentes historiales de voltaje en los nodos  $k$  y  $m$ .

El circuito equivalente obtenido de las ecuaciones (14) y (15) en el dominio de la frecuencia, se ilustra en la figura 3.

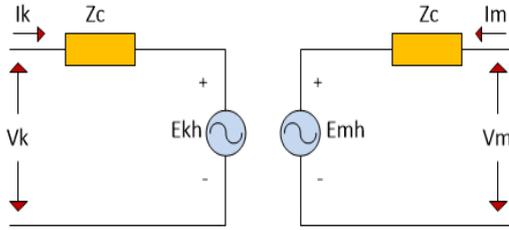


Figura 3. Circuito equivalente del modelo de J. Martí

Dónde los términos utilizados en el modelo se muestran en la tabla 2:

Tabla 2: Términos utilizados en el modelo.

Termino	Distincion
$V_k$	Voltaje en el nodo k
$V_m$	Voltaje en el nodo m
$I_k$	Corriente en el nodo k
$I_m$	Corriente en el nodo m
$\omega$	Frecuencia angular del sistema en radianes por segundo ( $\omega = 2\pi f$ )
$Z_c$	Impedancia característica
$\gamma$	Constante de propagación
$l$	Longitud de la línea
$R'$	Resistencia serie por unidad de longitud.
$L'$	Inductancia serie por unidad de longitud.
$G'$	Conductancia de derivación por unidad de longitud.
$C'$	Capacitancia de derivación por unidad de longitud.

Transformando las ecuaciones (14) y (15) al dominio del tiempo, tenemos las ecuaciones (18) y (19):

$$V_k(t) = Z_c * i_k(t) + [V_m(t) + Z_c * i_m(t)] * a(t) \quad (18)$$

$$V_m(t) = Z_c * i_m(t) + [V_k(t) + Z_c * i_k(t)] * a(t) \quad (19)$$

### 3. Planteamiento del Problema.

Cuando una línea de transmisión se encuentra sometida, a alguno de los

fenómenos transitorios, la forma de onda de operación normal de la línea ya sea esta de voltaje o de corriente sufren alteraciones, las cuales afectan su comportamiento normal y pueden dañar al sistema es por eso que, el análisis de la línea de transmisión frente a estos fenómenos es de gran importancia en el momento de su diseño. Para poder analizar dichas alteraciones necesitamos de herramientas tanto matemáticas como herramientas computacionales que nos permitan determinar con precisión como se ve afectado el sistema. Para el análisis de transitorios en sistemas de transmisión se ha realizado un modelado basado en el modelo característico de J. Martí el cual es muy utilizado en los programas de simulación de transitorios ATP-EMTP (Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program), usando MATLAB, lo cual se detalla a continuación.

#### 3.1 Modelo de Análisis de Transitorios.

Para el análisis del comportamiento transitorio en líneas de transmisión, se utilizó como caso de prueba para simular las respuestas transitorias de voltajes obtenidos con el programa desarrollado en Matlab y el programa comercial ATP-EMTP cuyo esquema es mostrado en la figura 4. La línea está compuesta por las siguientes características, resistencia  $R_1=3\text{ohmios}$ , una inductancia  $L_1=350$  milihenrios, un capacitor  $C_1=100$  microfaradios, con una longitud de 198 km debido a que el modelo de J. Martí se lo utiliza en estudios de líneas medias y largas, la misma que está conectada a una fuente trifásica de voltaje de 1 V como caso de prueba a una frecuencia de 60 Hz. Donde la línea de transmisión es representada con el modelo de J. Martí. Los datos físicos y eléctricos de la línea de transmisión se muestran en la figura 5. Adicionalmente se tiene un interruptor normalmente abierto conectado a tierra

simular una falla de línea a tierra y poder ver el comportamiento transitorio, del sistema.

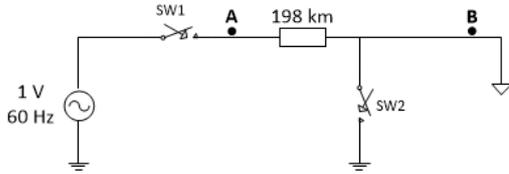


Figura 4. Esquema de prueba.

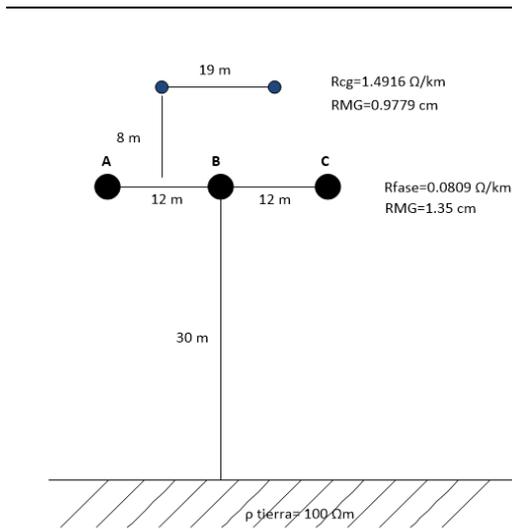


Figura 5. Datos de línea de transmisión.

Finalmente con los datos dados anteriormente se procede a realizar la implementación del sistemas propuesto en el ATP-EMTP, cuyos resultados obtenidos fueron analizados con el modelo implementado en el programa desarrollado en Matlab, para poder ver cuál es el comportamiento de la líneas de transmisión, el procedimiento se muestra en Algoritmo 1.

**Algoritmo 1. Análisis de transitorios por medio del modelo J. Martí**

**Paso 1:** Ingreso de Voltajes, Corrientes,

Resistencias, inductancias, Capacitancias y parametros de línea.

**Paso 2:** Cambio de parámetros en el dominio del tiempo ( $t$ ) al dominio de la frecuencia ( $\omega$ ).

**Paso 3:** Aplicación de Laplace.

$$f(\omega) = \mathcal{L}\{f(t)\}$$

**Paso 4:** Implementación de ecuaciones del modelo de J. Martí en el dominio de la frecuencia.

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega)I_k(\omega) + E_{mh}(\omega)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega)I_m(\omega) + E_{kh}(\omega)$$

$$I_k(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l)V_m(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l)I_m(\omega)$$

$$I_m(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh(\gamma(\omega)l)V_k(\omega) - \cosh(\gamma(\omega)l)I_k(\omega)$$

Dónde:

$$E_{mh} = A(\omega)F_{pk} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l}$$

$$E_{kh} = A(\omega)F_{pm} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l}$$

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}}$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))(G'(\omega) + j\omega C'(\omega))}$$

**Terminar**

## 4. Análisis de resultados.

Para el análisis de resultados se analizó el sistema bajo 4 casos de prueba, y así poder analizar el comportamiento de nuestro sistema bajo estos parámetros, los mismos que se presentan en la Tabla 3.

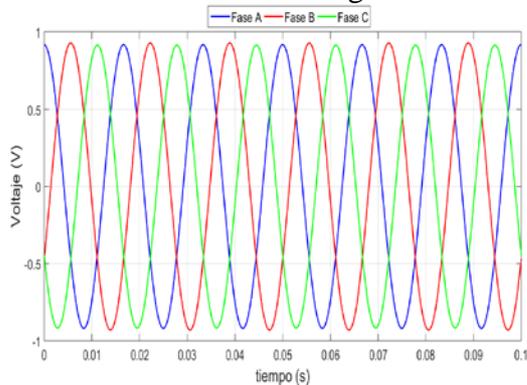
Tabla 3: Casos de prueba.

Caso	Descripción
1	Análisis en estado estable.
2	Análisis en cierre de línea.
3	Análisis en apertura de línea.
4	Análisis en falla del sistema.

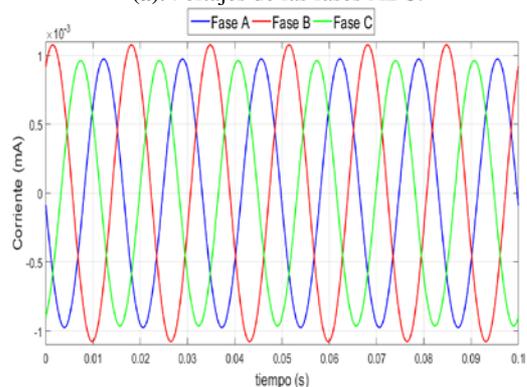
### 4.1 Sistema en estado estable.

Para el análisis de nuestro sistema en estado estable lo que se hizo es observar el comportamiento del sistema, de manera que no haya interruptores de maniobra y

tampoco ocurrencia de falla lo que provocaría en un efecto transitorio, su resultado se muestra en la figura 6.



(a). Voltajes de las fases ABC.



(b). Corrientes de las fases ABC.

**Figura 6.** Voltajes y corrientes de las tres fases en estado estable.

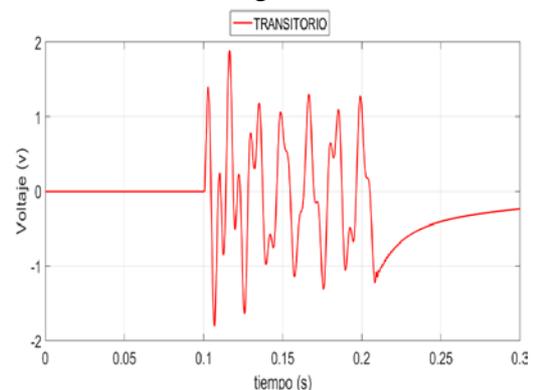
En la figura 6(a) se muestra el resultado obtenido de los voltajes de las tres fases del sistema en estado normal, el cual nos muestra que cuando el sistema se encuentra en un estado sin ningún tipo de alteración, las señales de respuesta, no representan variación de ningún sentido lo que nos indica que nuestro sistema está funcionando de manera normal. En la figura 6(b) de igual manera se puede visualizar el estado de las corrientes en estado normal no tienen ninguna alteración, los resultados se muestran en la tabla 4:

Tabla 4: Resultados análisis sistema en estado estable.

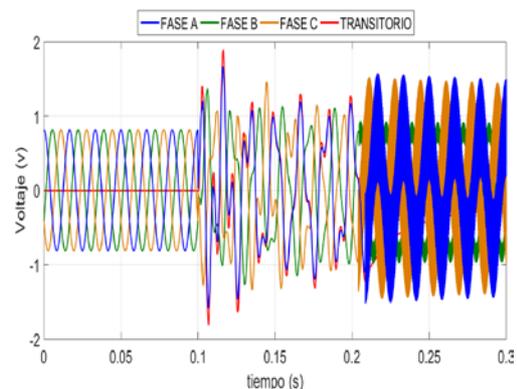
Fases	Voltajes (V)	Corrientes (mA)
A	0.93	1.07
B	0.93	0.96
C	0.93	0.97

## 4.2 Cierre de línea.

Se analizó comportamiento del sistema. Donde la línea de transmisión es conectada mediante un dispositivo de control en un lapso de tiempo de 0.1 a 0.2 segundos como caso de prueba, para lo cual este cierre se lo hizo en la fase A del sistema para así poder observar cómo se comporta el sistema en general frente a este evento transitorio sus resultados se muestran a continuación en la figura 7.



(a). Fenómeno transitorio originado.



(b). Comportamiento del sistema.

**Figura 7.** Comportamiento del sistema en cierre de línea.

En el caso de prueba número 2, se pudo ver que al realizar el cierre de la línea A en un tiempo de 0.1 a 0.2 segundos, se produjo un efecto transitorio como se observa en la figura 7(a), los valores están muy por arriba de los parámetros de estado estable los cuales producen fluctuaciones muy graves que pueden dañar al sistema y sacarlo de un buen funcionamiento además se puede observar que el efecto transitorio no solo afecta a la fase A si no que afecta a todo el sistema en general, también se puede apreciar que una vez que la maniobra termina el efecto transitorio no

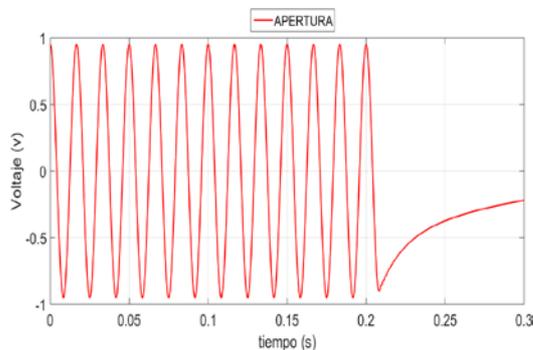
se elimina de forma rápida, y además que pese a que el transitorio ya ha pasado el sistema no se estabiliza ya que tiene una fluctuación demasiado elevada, como se muestra en la figura 7(b). Su resultado se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados análisis caso cierre de línea.

fases	Voltajes (V)	Corrientes (mA)
A	1.7	3
B	1.65	2.7
C	1.63	2.8

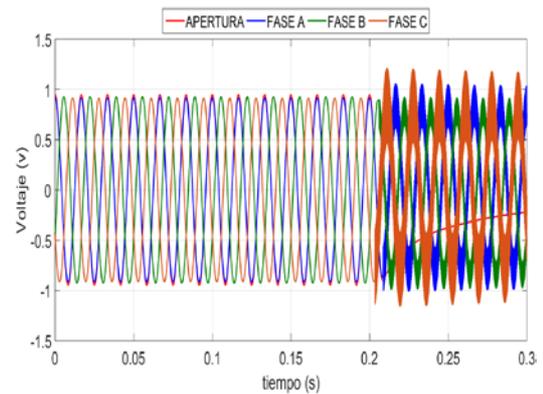
### 4.3 Apertura de línea.

Para el caso número tres lo que se hizo fue analizar el sistema cuando la línea es desconectada en el tiempo 0.2 segundos, para ver como es el comportamiento del sistema, para ello se realizó la apertura de la fase A, como se muestra en la figura 8.



(a). Efecto de la apertura.

En el caso de prueba una vez realizado el análisis se pudo observar que el sistema funciona de forma normal, hasta el tiempo 0.2 segundos donde ocurre la maniobra de apertura como se muestra en la figura 8(a)



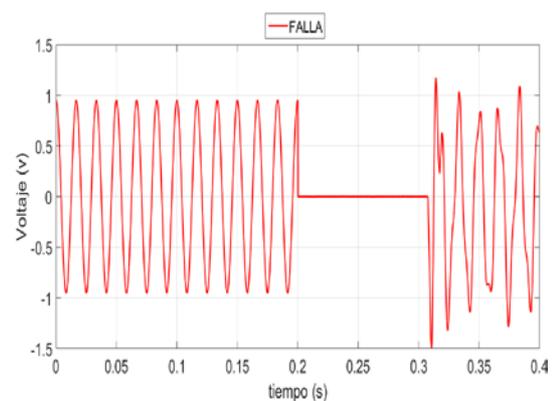
(b). Comportamiento transitorio.

Figura 8. Comportamiento del sistema en apertura de línea.

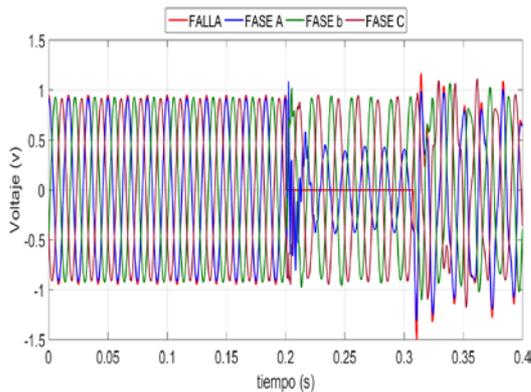
Esta maniobra de apertura provoca un efecto transitorio el cual causa inestabilidad en el sistema como se observa en la figura 8(b), el efecto transitorio a pesar que ocurre en una sola línea afecta a todo el sistema en general provocando que se den elevaciones de voltaje abruptas en el sistema.

### 4.4 Falla monofásica a tierra.

Lo que se hizo es comprobar cómo se comporta el sistema cuando existe una falla monofásica a tierra la que ocurre en un lapso de tiempo de 0.2 a 0.3 segundos, esta falla se situó en la fase A, como se muestra en la figura 9.



(a). Efecto de falla.



(b). Comportamiento transitorio.

Figura 9. Comportamiento del sistema en falla monofásica a tierra.

Como se muestra en la figura 9(a) la falla se produce en el tiempo establecido anteriormente, donde el voltaje cae de forma crítica en tiempo que se da la falla alterando al sistema en general, una vez que se ha corregido la falla el sistema no se estabiliza de manera rápida provocando un efecto transitorio el cual eleva el voltaje de manera abrupta como se muestra en la figura 9(b).

## 5. Conclusiones.

La transformada de Laplace es un método matemático que nos ayuda pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que es importante para realizar análisis en sistemas eléctricos de transmisión de una manera más fácil, cuando es difícil realizar estos análisis en el dominio del tiempo.

En los análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas de transmisión a veces resulta muy difícil analizarlos con los métodos convencionales en el dominio del tiempo, es por ello que un mejor y sencillo análisis resulta en el dominio de la frecuencia como lo hace el modelo de J. Martí.

Resulta de suma importancia al diseñar un sistema de transmisión, realizar el modelamiento y análisis de eventos transitorios para poder tomar buenas decisiones en la coordinación de aislamiento.

Como se pudo observar los casos de estudio planteados, los efectos transitorios pese a que tienen cortos lapsos de tiempo de duración, afectan en gran magnitud y consideración a la estabilidad del sistema provocando sobrevoltajes y sobreintensidades que dañan a los componentes del sistema.

## 6. Referencias.

- [1] P. Taheri, S. Member, B. Kordi, and A. M. Gole, "Parametric Study of Transient Electromagnetic Fields Due Overhead Transmission Lines and Buried Cables in the Vicinity of Lossy Ground," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 26, no. 4, pp. 2287–2298, 2011.
- [2] L. H-restrepo, G. Caicedo, and F. Castro-aranda, "Transmission line models for electromagnetic transients in power systems," *Rev. Energía y Comput.*, vol. 16, no. 1, pp. 21–32, 2008.
- [3] D. Charnock, "Electromagnetic Interference Coupling Between Power Cables and Sensitive Circuits," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 668–673, 2005.
- [4] J. Liu and V. Dinavahi, "Detailed Magnetic Equivalent Circuit Based Real-Time Nonlinear Power Transformer Model on FPGA for Electromagnetic Transient Studies," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 1191–1202, 2016.
- [5] Yuan Chen; Venkata Dinavahi, "An Iterative Real-Time Nonlinear Electromagnetic Transient Solver on FPGA," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 6, pp. 2547–2555, 2011.
- [6] H.W.Dommel, *Electromagnetic Transients Program EMTP theory book*. 1995.
- [7] H. W. Dommel, "Digital Computer

- Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, 1969.
- [8] J. R. Marti and M. Ieee, “Accurate Modelling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. I, pp. 147–157, 1982.
- [9] T. Noda, N. Nagaoka, and A. Ametani, “Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 401–407, 1996.
- [10] F. Castellanos, “Full frequency-dependent phase-domain transmission line model,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 3, pp. 1331–1339, 1997.
- [11] F. Castellanos, J. R. Martí, and F. Marcano, “Phase-domain multiphase transmission line models,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 19, no. 4, pp. 241–248, 1997.
- [12] F. J. Marcano, “MODELLING OF TRANSMISSION LINES USING IDEMPOTENT DECOMPOSITION,” The Universty of British Columbia, 1996.
- [13] F. . Marcano and J. . Martí, “Idempotent Line Model: Case Studies,” *Int. Conf. Power Syst. Transients*, pp. 67–72, 1997.
- [14] H. V. Nguyen, H. W. Dommel, and J. R. Martí, “Direct phase-domain modelling of frequency-dependent overhead transmission lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 3, pp. 1335–1340, 1997.
- [15] A. Abur, O. Ozgun, and F. H. Magnago, “A Wavelet Transform-Based Method for Improved Modeling of Transmission Lines,” *IEEE Trans. POWER Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 1432–1438, 2003.
- [16] C. Dufour and H. Le-huy, “Highly Accurate Modeling of Frequency-Dependent Balanced Transmission Lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 2, pp. 610–615, 2000.
- [17] R. Iracheta, “Efficient Simulation of Electromagnetic Transients in Power Networks,” *IEEE THIRTY FIFTH Cent. Am. PANAMA Conv.*, no. Concapan Xxxv, 2015.
- [18] K. K. M. A. Kariyawasam, S. Fan, and A. M. Gole, “Accurate Validation of Electromagnetic Transient Models of Cascaded Power Transmission Systems,” *Power and Energy*, no. 2, 2016.
- [19] V. P. José, V. Merchancano, and L. Chancay, “MODELOS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA PARA ANÁLISIS DE ENERGIZACIÓN Y DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 500 KV ”, 2012.
- [20] Robert Uhl; Antonello Monti; Julian Lichtinghagen; Albert Moser, “Analysis of transient electromagnetic interference between medium voltage AC and DC overhead transmission lines and cables,” *IEEE Int.*, 2016.
- [21] A. Abur and F. H. Magnago, “Accurate Modeling and Simulation of Transmission Line Transients Using Frequency Dependent Modal Transformations,” *Power Eng. Soc.*, no. C, pp. 1443–1448, 2001.
- [22] Yuan Chen; Venkata Dinavahi, “Digital Hardware Emulation of Universal Machine and Universal Line Models for Real-Time Electromagnetic Transient Simulation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 1300–1309, 2012.
- [23] C. G. Kaloudas, “FDTD Analysis

- using Constant Parameter Modeling for the Calculation of Transient Responses and Voltage Profiles on Multiconductor Overhead Transmission Lines,” *Power Syst. Lab.*, pp. 1–6, 2014.
- [24] H. Dong, H. Weng, F. Han, H. Li, F. Xu, S. Liu, and Z. Xu, “Reduction and modelling method of large-scale alternating current / direct current power systems for electromagnetic transient simulation,” *Publ. IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. October 2013, pp. 1667–1676, 2014.
- [25] J. Ou and Z. Zhang, “The research of fault location of transmission line based on Bergeron model,” *ICACTE 2010 - 2010 3rd Int. Conf. Adv. Comput. Theory Eng. Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 300–304, 2010.
- [26] H. Shu, D. Si, and X. Chen, “A new electromagnetic transient simulation method for faults in complex power system,” *PowerCon 2002 - 2002 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc.*, vol. 4, pp. 2645–2651, 2002.
- [27] S. Joya and A. Pacheco, “Validacion de los Modelos de Lineas Empleados en la Simulacion de Sistemas de Distribucion de Energía Eléctrica,” Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [28] W. S. Meyer and H. W. Dommel, “Numerical Modelling of Frequency Dependent Transmission Line Parameters in an Electromagnetic Transients Program,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, pp. 1401–1409, 1974.
- [29] J. Vasconcellos and R. Vera, “Modelos Dependientes de la Frecuencia para Analisis de Energizacion y Descargas Atmosfericas en Lineas de Transmision de 500 KV,” Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2011.
- [30] L. Vanfretti, “Modelos Matemáticos Y Herramientas De Software Para La Simulación De Lineas de transmision en estado Dinamico,” *CONESCAPAN XXIII la IEEE Sección 9*, no. Conescapan Xxiii, 2004.