



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A TRAVÉZ
DEL MÉTODO J MARTI**

TESIS

Que para obtener el grado de:
**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

ING. VÍCTOR MANUEL MORALES DE LA CRUZ

Asesores:

**DR. JUAN CARLOS ESCAMILLA SÁNCHEZ
M.I. GENARO CAMPOS CASTILLO
MC. ISMAEL ALBINO PADILLA**

Puebla, Pue.

Enero 2018



APROBACIÓN DE TEMA DE TESIS



Oficio No. 4500/2017

C. Víctor Manuel Morales de la Cruz
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Análisis de sobretensiones transitorias en líneas de transmisión a través del método J Marti**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Asesores al Dr. Juan Carlos Escamilla y M.I. Genaro Campos Castillo.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, diciembre 5 de 2017

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. Dr. Juan Carlos Escamilla y M.I. Genaro Campos Castillo, Asesores del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/GCC/sco*

ABH

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610



ACTA RESOLUTIVA DE IMPRESIÓN DE TESIS

ASUNTO: Autorización de impresión

M. I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
PRESENTE

El suscrito, **Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez, MC. Ismael Albino Padilla y M.I. Genaro Campos Castillo**, asesores del tema de Tesis denominado “**ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A TRAVÉS DEL MÉTODO J MARTI**”, presentado por el **C. VÍCTOR MANUEL MORALES DE LA CRUZ**, estudiante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, me permito informar a usted que después de haber revisado el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma. Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su examen profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

Atentamente

Puebla, Pue., 15 de Enero de 2018

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

MC. Ismael Albino Padilla
M.I. Genaro Campos Castillo

c.c.p.- Exámenes Profesionales
Interesado
Archivo
JCES, IAP



AGRADECIMIENTOS

A mis padres Juanita de la Cruz Hernández y Leobardo Morales Campos por su apoyo incondicional, sus consejos y su enorme amor. Dios los bendiga siempre.

A mis hermanos Deyanira y Holaguer por obsequiarme el ejemplo de disciplina y trabajo.

A mi asesor el Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez por su ayuda y paciencia brindada, para la elaboración de esta tesis.

A Mc. Ismael Albino Padilla por su apoyo y participación en la revisión de esta tesis.

A M.I. Genaro Campos Castillo por el apoyo brindado durante mi estancia en la BUAP.

A los catedráticos de la maestría por compartir sus conocimientos, consejos y experiencias.

A mis compañeros de la maestría y amigos: Felipe, Alex, Carlos, Luis gracias por brindarme su amistad y por respaldarme en el transcurso de la maestría.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por permitirme ser parte de esta prestigiosa institución y brindarme la oportunidad de ser mejor.



RESUMEN

En una red eléctrica se presentan perturbaciones debidas a descargas atmosféricas y/o maniobras para librar o energizar equipo, ocasionando problemas que dañan al equipo primario o aislamiento. Estos efectos generados por sobretensiones que se relacionan con el fenómeno de transitorios electromagnético, debido al cambio repentino en las condiciones de operación o configuración que inciden a lo largo de las líneas de transmisión.

En esta tesis, se realizó el estudio a una red eléctrica, específicamente se analizan las sobretensiones transitorias que presentan las líneas de transmisión a través del método propuesto por J. Martí en el dominio del tiempo, disponible en el código ATP/DRAW.

Se utilizará el software ATP/DRAW para simular las descargas atmosféricas (uso de apartarrayos), operación de disparo y cierre monopolar (DMR) y energización de líneas de transmisión.



ABSTRACT

In an electrical network there are disturbances produced by: atmospheric discharges and / or maneuvers to free or energize equipment, causing problems which damage the primary equipment or isolation. These affectations are produced by overvoltages that are related to the phenomenon of electromagnetic transients, due to the sudden change in the operating or configuration conditions that affect along the transmission lines.

In this thesis, the study was made to an electrical network where the transient overvoltages presented by the transmission lines were specifically analyzed through the method proposed by J. Martí in the time domain, available in the ATP / DRAW code.

The ATP / DRAW software will be used to simulate atmospheric discharges (use of lightning arresters), monopolar trip and closing operation (DMR) and energization of transmission lines.



Índice

Aprobación de tema de Tesis	ii
Acta resolutive de impresión de tesis	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	v
Asbtract	vi
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xi
Glosario de Términos	xii

CAPÍTULO 1 Introducción

1.1	Generalidades	1
1.2	Red eléctrica	5
1.2.1	Líneas de transmisión	5
1.2.2	Líneas de distribución	5
1.2.3.	Potencia natural de línea de transmisión	5
1.3	Componentes de una línea aérea	7
1.3.1	Conductores	7
1.3.2	Aisladores	9
1.3.2.1	Aisladores Fijos	10
1.3.2.2	Aisladores en cadena	10
1.4	Protección a líneas de transmisión	11
1.4.1	Protección por relevador de distancia 21	11
1.4.2	Protección por comparación de fase.	12
1.5	Estudio de transitorios Electromagnéticos	13
1.5.1	Parámetros primarios de líneas de transmisión	13
1.5.2	Ecuación de la línea de transmisión	14
1.6	Descripción del problema	15
1.7	Objetivos de la tesis	16



1.8	Justificación	16
1.9	Aportaciones	16

CAPÍTULO 2 Modelos de línea de transmisión

2.1	Generalidades	17
2.2	Modelos de línea de parámetros concentrados constantes.	17
2.2.1	Modelo Pi nominal	17
2.2.1.1	Diagrama fasorial para una línea media	18
2.2.1.2	Modelo de línea de circuitos pi en cascada	20
2.3	Modelo de Bergeron	21
2.4	Modelo Meyer y Dommel	21
2.5	Modelado de línea de transmisión en el dominio de fase	25
2.5.1	Síntesis de las funciones Y_c y A	27
2.6	Modelo de Laplace	28
2.6.1	Solución de las Ecuaciones del Telegrafista para Línea Monofásica	28
2.6.2	Admitancia e Impedancia Característica	29
2.6.3	Obtención de la Matriz de Transferencia y Matriz Cadena	30
2.6.4	Obtención del Modelo de Dos Puertos (Nodal o Y_{bus})	31
2.7	La transformada numérica de Laplace	32
2.7.1	Respuesta en Frecuencia en sistemas Lineales.	33

CAPÍTULO 3 Modelo J. Martí

3.1	Generalidades	35
3.2	Modelo J. Martí	41



3.2.1	Desarrollo matemático del modelo de Martí	42
3.2.2	Síntesis de la impedancia característica	44

CAPÍTULO 4 Simulación del Modelo de Línea de Transmisión Aplicando Método J. Martí

4.1	Simulaciones en el software ATP/Draw	46
4.2	Energización de una línea monofásica	46
4.3	Circuitos Trifásicos	51
4.3.1	Sistemas de 3 circuitos trifásicos	57
	Conclusiones	63
	Referencias	64

Índice de Figuras

		Paginas
Fig. 1.1	Áreas de control del SEN	2
Fig. 1.2	Cronología de un sistema de potencia	3
Fig. 1.3	Línea de transmisión con parámetros distribuidos	6
Fig. 1.4	Comportamiento del SIL.	7
Fig. 1.5	Aislador fijo	10
Fig. 1.6	Aisladores en cadena	10
Fig. 1.7	Zonas de protección de los relevadores de distancia.	11
Fig. 1.8.	Coordinación de protecciones de distancia.	12
Fig. 1.9	Relevador de comparación direccional	13
Fig. 2.1	Línea de transmisión de parámetros distribuidos	17
Fig. 2.2	Modelo equivalente del modelo pi nominal	18
Fig. 2.3	Diagrama fasorial del circuito pi	19
Fig. 2.4	Circuito pi nominal equivalente	20



Fig. 2.5	Modelo de Bergeron	21
Fig. 2.6 a	Modelo de línea simplificado, circuito de línea.	22
Fig. 2.6 b	Circuito equivalente visto desde ambas terminales de la línea Y.	22
Fig. 2.7	Funciones de peso en la formulación de Meyer y Dommel	24
Fig. 2.8	Modelo de línea dependiente de la frecuencia de Meyer y Dommel	24
Fig. 2.9	Circuito equivalente en el dominio del tiempo.	26
Fig. 2.10	Condiciones de frontera	31
Fig. 2.11	Modelo de dos puertos	32
Fig. 3.1	Sistema interconectado nacional	36
Fig. 3.2	Clasificación de los modelos de líneas de transmisión	38
Fig. 3.3	Circuito equivalente de la línea de transmisión por unidad de longitud	39
Fig. 3.4	Modelos de línea dependientes de la frecuencia	44
Fig. 3.5	1° realización de Foster para $Z_c(\omega)$	44
Fig. 4.1	Circuito de una línea monofásica	46
Fig. 4.2	Energización en vacío de la línea de transmisión	47
Fig. 4.3	Cierre y apertura secuencial	48
Fig. 4.4	Energización cercana al cruce por cero	49
Fig. 4.5	Línea con una carga de 600 ohm	50
Fig. 4.6	Línea con una carga de 1000 ohm	50
Fig. 4.7	Especificaciones geométricas	51
Fig. 4.8	Parámetros de simulación	51
Fig. 4.9	Sistema de 2 circuitos trifásicos	52
Fig. 4.10	Cierre secuencial del circuito energizado	52



Fig. 4.11	Sobretensiones inducidas en el circuito 2	53
Fig. 4.12	Sobretensiones inducidas en el circuito 2	54
Fig. 4.13	Energización con carga de 1000ohms	54
Fig. 4.14	Sobretensiones inducidas en el circuito 2	55
Fig. 4.15	Sobretensiones inducidas en el circuito 2	55
Fig. 4.16	Energización de la línea de transmisión	56
Fig. 4.17	Sobretensiones inducidas en el circuito 2	56
Fig. 4.18	Sobretensiones inducidas en el circuito 2	57
Fig. 4.19	Fase A del circuito 1 energizada sin apartarrayos.	58
Fig. 4.20	Fase A del circuito 1 energizada con apartarrayos.	58
Fig. 4.21	Parámetros de los 3 Circuitos Trifásicos.	59
Fig. 4.22	Parámetros de Simulación	59
Fig. 4.23	Sobretensiones en la Fase A del Circuito 1 sin apartarrayos.	60
Fig. 4.24	Sobretensiones en la Fase A del Circuito 1 con apartarrayos	60
Fig. 4.25	Sistema de transmisión monofásico	61
Fig. 4.26	Resultado de Simulación a 100km y 200 Km.	62

Índice de Tablas

Tabla 1.1	Clasificación de rangos de frecuencia	4
Tabla 1.2	Materiales usados en líneas de transmisión	8



GLOSARIO DE TÉRMINOS

δ	Ángulo de desfaseamiento de la corriente respecto al voltaje
q	Número de pulsos del circuito
l_i	Longitud de la línea.
h	Armónica característica de un convertidor
R_p	Resistencia paralelo
R_s	Resistencia serie
P_t	Magnitud de la potencia real total en rms
P_c	Valor de pérdidas en el cobre
Q	Potencia reactiva
L	Inductancia
C	Capacitancia
G	Conductancia
B	Subceptancia
Y_h	Admitancia equivalente de la línea
Z_h	Impedancia equivalente de la línea
CD	Corriente directa
CA	Corriente alterna
P	Potencia Real
Q	Potencia Reactiva
C_c	Capacitancia de un conductor
C_m	Capacitancia mutua entre devanados
$i(t)$	Corriente del Canal de descarga
I_F	Fuentes de Corriente Distribuida a lo largo de la línea



L_c	Inductancia del conductor
L_g	Inductancia geométrica
L_m	Inductancia Mutua entre devanados
R_c	Resistencia del Conductor
s	Variable de Laplace
t	Tiempo
G_c	Carga del conductor
E_x	Campo eléctrico incidente en la dirección x
E_y	Campo eléctrico incidente en la dirección y
C_w	Constante de amortiguamiento
I_1	Corriente fluyendo en Z_1
I_2	Corriente fluyendo en Z_2
I_L	Corriente en el extremo del receptor
K_o	Coefficiente de acoplamiento
R	Resistencia
SEP	Sistema eléctrico de potencia
DMR	Disparo de cierre monopolar
SEN	Sistema Eléctrico Nacional



CAPÍTULO 1 Introducción

1.1 Generalidades

La capacidad de conversión de la energía eléctrica a energía mecánica, calorífica, luminosa, etc.; para toda clase de usos industriales y domésticos en forma limpia y eficaz, se ha convertido en un factor determinante en el desarrollo de cualquier país. Este desarrollo está creando necesidades nuevas en un mundo cada vez más dependiente de la energía eléctrica, a través del tiempo se ha transformado en una espiral formada por: *necesidad-desarrollo-satisfacción-sustentabilidad-calidad-economía*. Para que esta forma de energía pueda ser usada en los lugares que se requiera, es necesario contar con: unidades generadoras, líneas de transmisión, y sistemas de distribución, así como equipo primario de control; añadiendo nuevos elementos, éstos al irse instalando e interconectando a los ya existentes, refuerzan la capacidad de transmisión de energía; a este conjunto de elementos y equipos que forman parte de esta interconexión se le conoce como **sistema eléctrico de potencia** [1].

Para transportarla, se establece la red eléctrica, cuyo objetivo fundamental es generar, transmitir y suministrar la energía eléctrica a diferentes consumidores. El sistema eléctrico de potencia está constituido por centrales generadoras (maquinas síncronas y asíncronas), líneas de transmisión, subestaciones eléctricas (transformadores y autotransformadores), así como mecanismos de control, medición protección y distribución.

El sistema eléctrico ofrece un servicio continuo, estable y de calidad, además está integrado por redes de distribución. En México, la infraestructura es propiedad de Comisión Federal de Electricidad (CFE), se muestra la red troncal del sistema eléctrico nacional en la Fig. 1.1 [2].

El Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) es el organismo encargado de la operación y control de la infraestructura eléctrica mexicana.

Este organismo es independiente de la CFE y realiza las funciones de planeación, dirección, control y supervisión de la operación del SEN.

El CENACE está dividido en Áreas de Control, las cuales se muestran a continuación y cuyas oficinas centrales se encuentran ubicadas en las ciudades indicadas en el mapa siguiente:



Fig.1.1. Áreas de control del SEN [2]

La energía eléctrica usualmente es generada en lugares lejanos a las áreas de consumo, por esto las líneas de transmisión forman una parte importante de los sistemas de potencia como se muestra en la Fig.1.2

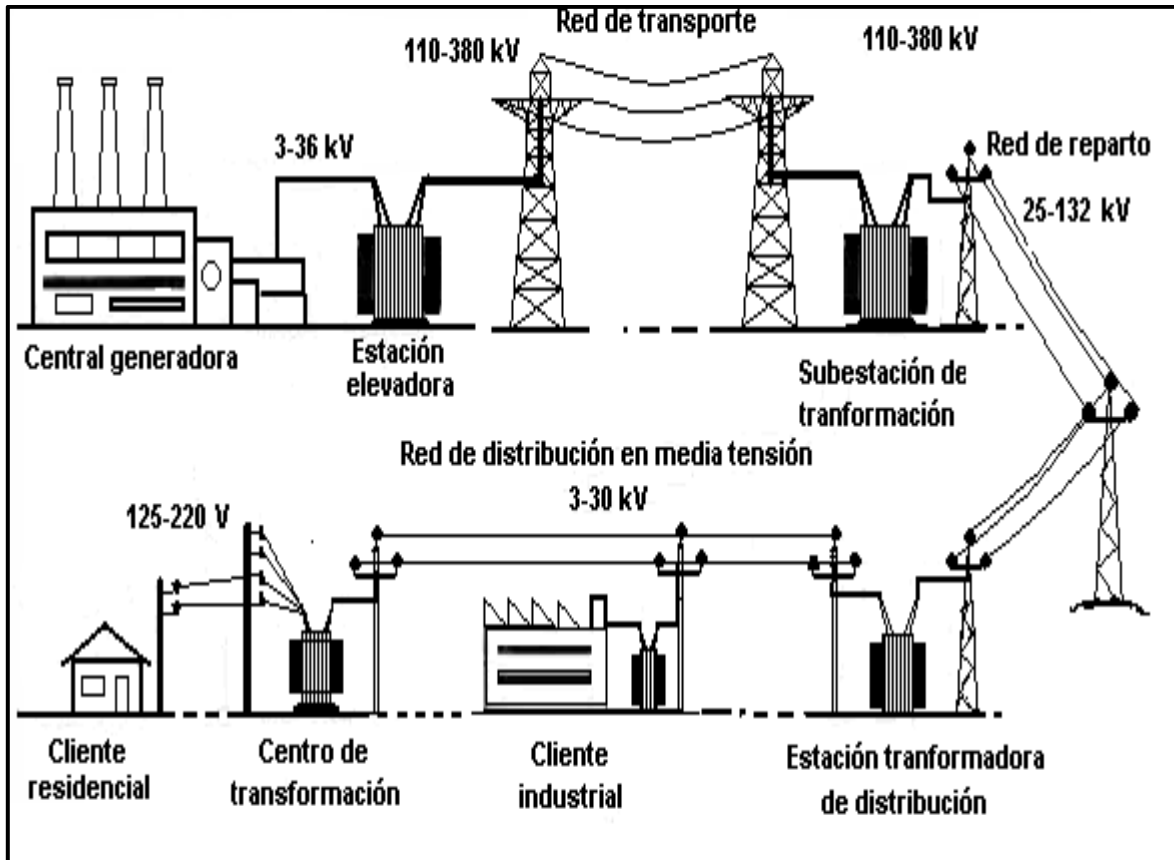


Fig. 1.2. Cronología de un sistema de potencia [3]

Éstos son los elementos que conforman las redes eléctricas, dependiendo del diseño y nivel de tensión se clasifican en: transmisión, subtransmisión y distribución; se han visto sometidos a perturbaciones que altera su estado estable de operación, provocando al sistema la modificación de valores fuera de lo normal, conocidos como transitorios electromagnéticos generando así sobretensiones, sobre corrientes y variación de potencia.

Los transitorios electromagnéticos tienen una duración mínima (milisegundos), que pueden inducir daños severos al sistema, por tal motivo su análisis es de gran importancia, para el diseño de los equipos y coordinación de aislamiento.

Para conocer los daños producidos por los transitorios se emplea un procedimiento dinámico, que se basa en la respuesta del tiempo del elemento del sistema donde ocurrió el incidente.

De acuerdo con las causas que originan los transitorios electromagnéticos y el rango de frecuencia relacionado a lo mismo, éste se clasifica de origen interno (maniobras de interruptores) y de origen externo (descargas atmosféricas) En este caso podemos clasificarlas en grupos de frecuencia como lo muestra la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación de rangos de frecuencia [4]

Grupo	Intervalo de Frecuencia	Características del fenómeno	Tipo de transitorio
I	0.1 Hz a 3kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Temporales: <ul style="list-style-type: none">➤ Energización de transformadores➤ Ferroresonancia➤ Rechazo de carga
II	50/60 Hz a 20kHz	Onda de frente lento	Maniobra: <ul style="list-style-type: none">➤ Energización de líneas➤ Inicio y liberación de fallas➤ Cierre de línea
III	10 kHz a 3MHz	Onda de frente rápido	<ul style="list-style-type: none">➤ Descarga atmosférica➤ Fallas en subestaciones
IV	100kHz a 50MHz	Ondas de frente muy rápido	<ul style="list-style-type: none">➤ Maniobras➤ Fallas en subestaciones aisladas en gas



1.2 Red Eléctrica

Una red eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, está constituida por: conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y cables de guarda (usados en líneas de alta tensión, para protegerlas de descargas atmosféricas). Es importante el estudio de las características eléctricas en los conductores de las líneas, estas abarcan los parámetros impedancia y admitancia, la primera está conformada por la resistencia y la inductancia uniformemente distribuidas a lo largo de la línea y se representa como un elemento en serie. La segunda está integrada por la susceptancia y la conductancia y en este caso se representa como un elemento en paralelo.

1.2.1 Líneas de transmisión

Son aquellas que se utilizan para transportar la energía eléctrica a grandes distancias, a niveles de voltajes superiores a los 85 KV. Estas constituyen el eslabón de unión entre las centrales generadoras y las redes de distribución. Para la construcción de estas líneas se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se obtienen mediante cableado de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central (acero).

1.2.2 Líneas de distribución

Son aquellas que van desde las subestaciones hasta los centros de consumo como son las industrias, domicilios y alumbrado público, los niveles de tensión utilizados son por debajo de los 85 KV. Los conductores en media tensión siguen siendo desnudos, pero en baja tensión se usan conductores aislados, para mayor seguridad en zonas urbanas. [6]

1.2.3 Potencia natural de línea de transmisión.

En los sistemas de potencia es importante conocer la capacidad de los equipos que se tiene instalados en toda la red, con el fin de conocer a detalles los posibles recursos de transmisión con que se cuentan, esto les permite tomar decisiones más

acertadas sobre la redistribución de flujos de potencia y medidas operativas adecuadas en caso de una falla en el sistema.

Las líneas de transmisión pueden ser modeladas por un circuito sencillo cuando su longitud no es demasiado larga y su comportamiento es estable, para lo cual es suficiente conocer R , L y C como parámetros concentrados logrando suficiente exactitud en el modelo. Sin embargo, para líneas con una longitud considerable, requieren de cálculos en términos de constantes distribuidas para lograr un alto grado de exactitud.

Para una mejor representación de una línea de transmisión, es necesario tomar en cuenta que los parámetros de la línea están distribuidos uniformemente en toda su longitud. Una forma comúnmente utilizada es la suposición de que la línea está compuesta por “ n ” circuitos π equivalentes conectados en cascada como se muestra en la Fig. 1.3.

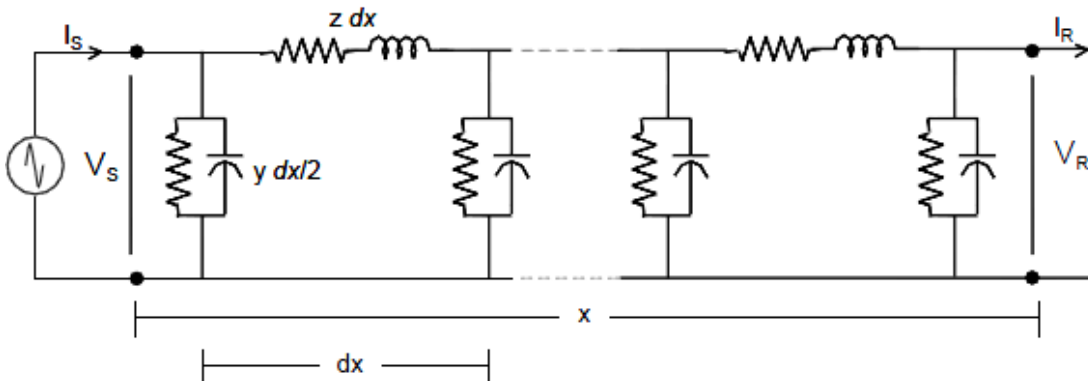


Fig.1.3 Línea de transmisión con parámetros distribuidos [3]

Un concepto importante en sistemas de transmisión es la **potencia natural** de la línea. En la Fig. 1.4. se observa que, para ángulos de potencia pequeños, esto es, cuando no se transmite grandes cantidades de energía, la línea genera más potencia reactiva que la que consume. Al aumentar el ángulo de potencia se llega a un punto de equilibrio en el que la línea, observada desde sus extremos, no genera ni consume reactivos.

La potencia activa que se transmite en esta condición se le conoce como potencia natural de la línea **SIL** la cual está en función del voltaje de transmisión y de la impedancia característica como se define en la siguiente ecuación.

$$SIL = \frac{V^2}{Z_c} \quad (1.1)$$

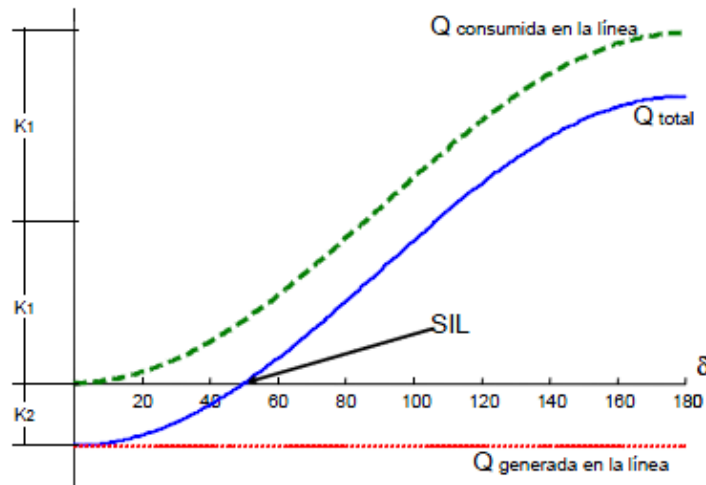


Fig.1.4 Comportamiento del SIL. [3]

1.3 Componentes de una línea aérea

Las líneas aéreas están constituidas tanto por el elemento conductor, usualmente cables de cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión, y los aisladores.

1.3.1 Conductores

En la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, se utilizan casi exclusivamente conductores trenzados, los cuales son cables formados por alambres, en capas alternadas, enrolladas en sentidos opuestos. Esta disposición alternada de las capas evita el desenrollado y hace que el radio externo de una capa coincida con el interior de la siguiente. El trenzado proporciona flexibilidad con grandes secciones transversales

El conductor trenzado puede realizarse con hilos del mismo metal, o de distintos metales, según cuales sean las características mecánicas y eléctricas deseadas. Si los hilos son del mismo diámetro, la formación obedece a la siguiente ley:

$$nh = 3c^2 + 3c + 1 \quad (1.2)$$

siendo: nh = número de hilos; c = número de capas, por lo tanto, es común encontrar formaciones de 7, 19, 37, 61, 91 hilos, respectivamente 1 a 5 capas. Los metales utilizados en la construcción de líneas aéreas deben poseer tres características principales: baja resistencia eléctrica, elevada resistencia mecánica, de manera de ofrecer resistencia a los esfuerzos permanentes o accidentales y bajo costo.

Tabla 1.2. Materiales usados en líneas de transmisión.

Material	Densidad Gr/cm ³	Temp. de fusión °C	Coef. de dilatación X10 ⁴ °C	Temp. Ideal R=0 ohm	Resistividad eléctrica 20°C omhsmm ² /km	Coef. térmico de resistividad 20 °C	Conductividad Eléctrica en % con el cobre suave
Acero	7.90	1400	13	208.5	575.115	0.0016-0.0032	3-5
Aluminio	2.70	660	24	228	28.264	0.00403	61
Cobre duro	8.89	1083	17	241	17.992	0.00383	96.2
Cobre suave	8.89	1083	17	234.5	17.241	0.00383	100
Plomo	11.38	327	29	-	221	0.0040	7.8
Zinc	7.14	420	29	-	61.1	0.004	28.2
Estaño	7.28	231.9	0.2270	269.42	120	.0046	-



Los metales que satisfacen estas condiciones son relativamente escasos, los cuales son: cobre, aluminio, aleación de aluminio y combinación de metales (aluminio acero). Conviene para cada caso particular investigar el metal más ventajoso, teniendo en cuenta sus propiedades y la aplicación.

1.3.2 Aisladores

Las primeras redes eléctricas eran tecnológicamente muy rudimentarias y estaban a merced de las condiciones atmosféricas tales como:

- **Viento.** - Hacia variar las distancias entre los conductores, provocando arcos eléctricos.
- **Lluvia.** - Favorecía las corrientes de fuga hacia tierra.

Los problemas anteriores dieron origen a soluciones tales como la determinación de las distancias de aislamiento y el diseño de dispositivos y equipos de protección contra estos factores. Teniendo como finalidad principal la de permitir una distribución segura y optimizada de la energía eléctrica.

Para lograr esta optimización es necesario comprender y buscar la mejor relación económica entre los diferentes parámetros que dependen de esta coordinación.

- Costo del aislamiento.
- Costo de la protección empleada.
- Costo de los daños que provocaría la no utilización de una protección contra sobretensiones (operación y reparación del equipo).

Dentro de la coordinación de aislamiento dos de los conceptos básicos, del estudio de las sobretensiones son:

Distancia en aire. - Es el camino más corto entre dos partes conductoras.

Distancia de fuga. - Es el camino más corto entre dos conductores, pero siguiendo la superficie exterior de un aislante sólido.

1.3.2.1 Aisladores Fijos

El soporte esta soportado por un herraje fijo y no pueden, por consiguiente, cambiar normalmente de posición después de su montaje.



Fig. 1.5 Aislador fijo [2]

1.3.2.2 Aisladores en cadena

Constituidos por un número variable de elementos según la tensión de servicio; formando una cadena móvil alrededor de su punto de unión al soporte. Éste es el tipo de aislador más empleado en media y en alta tensión.

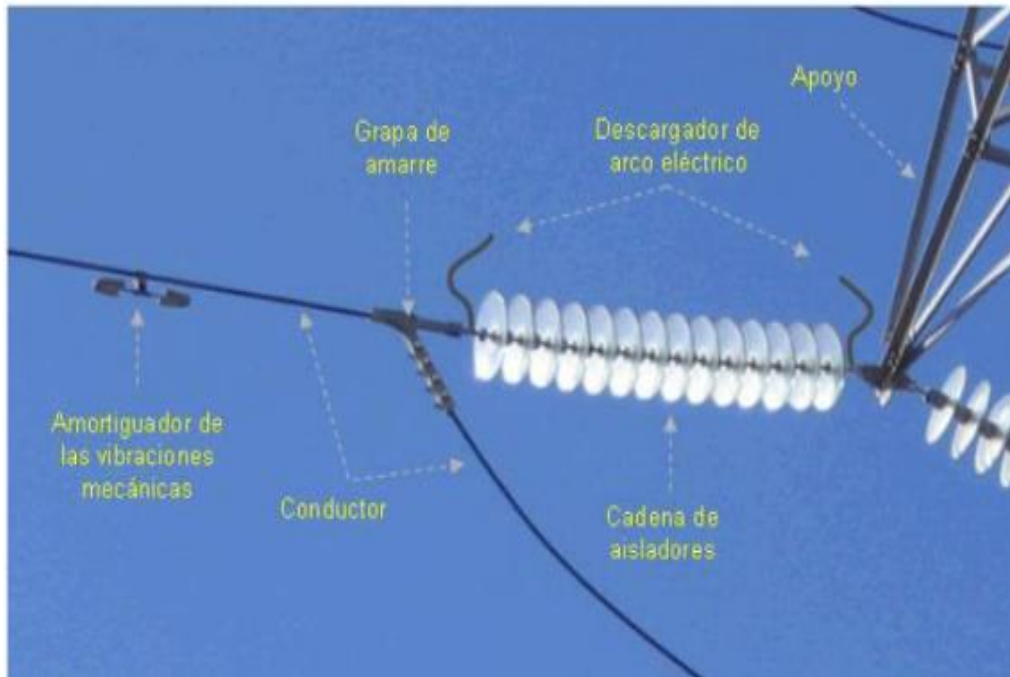


Fig. 1.6 Aisladores en cadena [2]

1.4 Protección a líneas de transmisión

Es de suma importancia conocer las características y capacidad de operación de los equipos instalados en los sistemas de potencia, para tener un margen tolerable de maniobra, y así tomar la decisión de seguir operando el sistema sin riesgo alguno o liberar la línea para proteger al sistema.

1.4.1 Protección por relevador de distancia 21

Los relevadores de distancia se emplean como protecciones primarias y de respaldo en líneas de transmisión y subtransmisión. Miden el vector impedancia entre la localización del relevador y la falla.

Los relevadores de distancia generalmente cuentan con tres zonas de protección, cada una de ellas independiente en característica y tiempo de operación. A continuación, se muestra una línea de transmisión con las zonas de protección por relevadores de distancia.

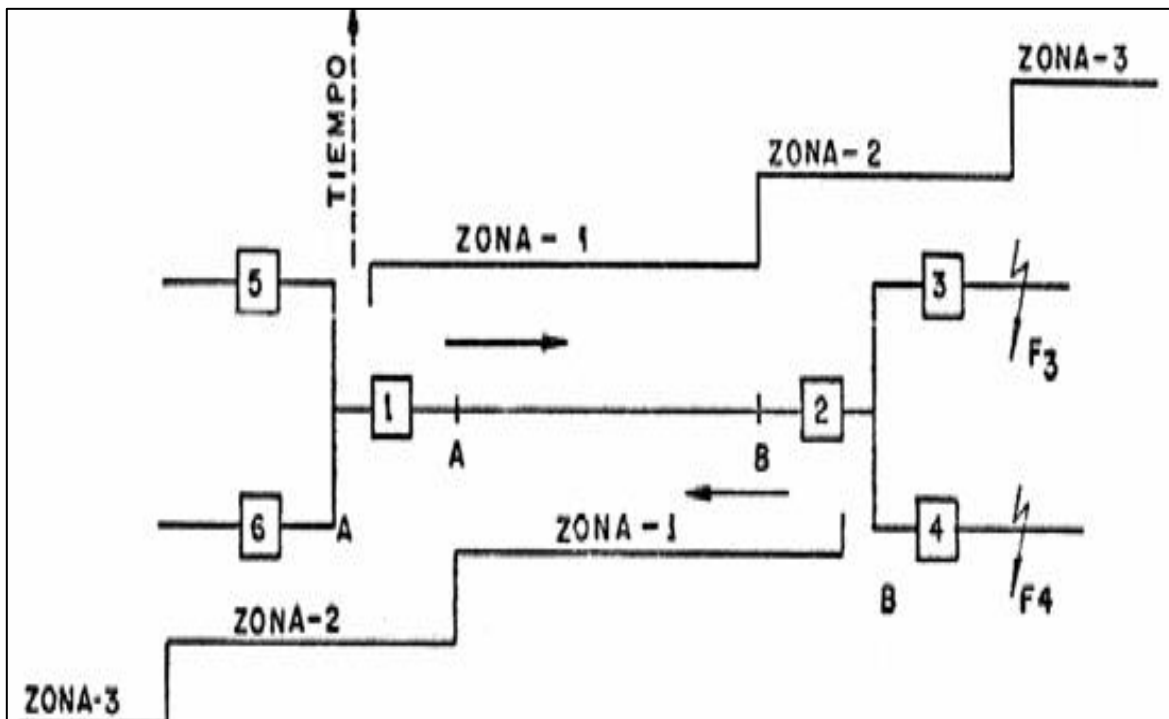


Fig. 1.7 Zonas de protección de los relevadores de distancia. [2]

El ajuste de las zonas de protección se realiza siguiendo los siguientes criterios:

- a) **Zona 1.** Ajustada para proteger el 80% de la línea de transmisión.
- b) **Zona 2.** Ajustada al 120 % de la línea de transmisión.
- c) **Zona 3.** Ajustada para cubrir más allá del alcance de la protección de zona 2.

La Fig. 1.8 muestra la coordinación de las protecciones de distancia en líneas adyacentes.

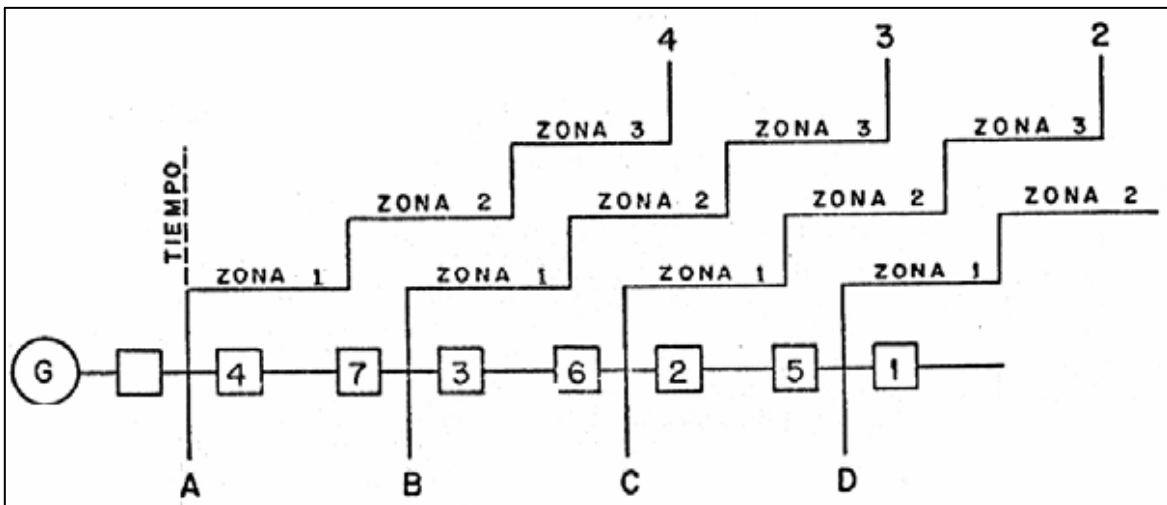


Fig. 1.8. Coordinación de protecciones de distancia. [2]

1.4.2 Protección por comparación de fase.

Este tipo de protección es normalmente aplicado sobre un Carrier de tipo bloqueo, aunque puede ser usado sobre una línea de transmisión que cuente con un canal de comunicación dedicado. Cada terminal de este esquema consta de un transmisor y un receptor a la misma frecuencia acoplados a la línea de potencia mediante trampas de onda, o mediante comunicación por microondas o fibra óptica.

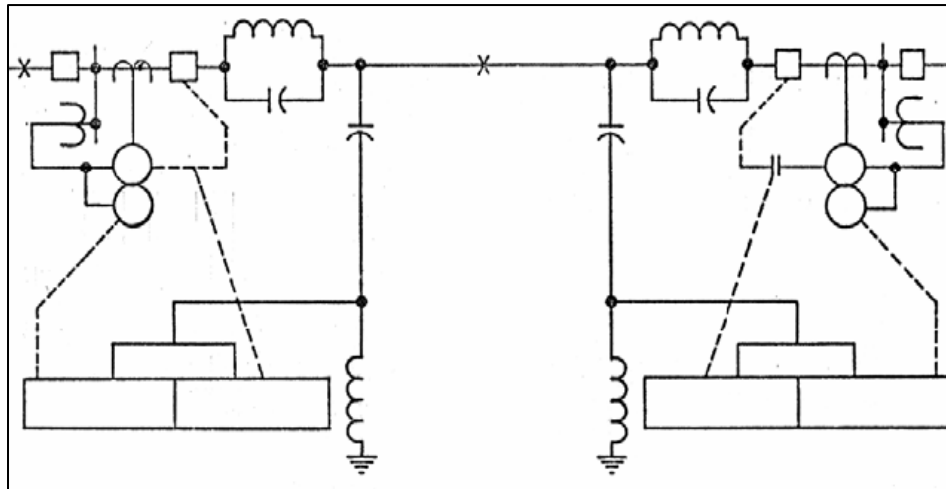


Fig. 1.9 Relevador de comparación direccional [2]

1.5 Estudio de transitorios Electromagnéticos

Para conocer el comportamiento de los sobre voltajes que surgen en las líneas de transmisión y realizar un estudio completo es de suma importancia conocer matemáticamente la representación y modelos de las líneas de transmisión para su análisis [8], manejando modelos que se caracterizan por el uso de sus parámetros principales.

Para el análisis de las líneas de transmisión se requiere de la solución de las ecuaciones del campo electromagnético, sujetas a condiciones de frontera impuestas por la geometría de la línea, por lo general los circuitos de las líneas utiliza los parámetros: resistencia, inductancia, capacidad y conductancia.

1.5.1 Parámetros primarios de líneas de transmisión

Definimos como parámetros primarios los siguientes:

- Resistencia en serie por unidad de longitud, R , expresada en Ω/m .
- Inductancia en serie por unidad de longitud en L , H/m .
- Capacidad en paralelo por unidad de longitud, C , en F/m .
- Conductancia en paralelo por unidad de longitud, G , en S/m .



1.5.2 Ecuación de la línea de transmisión

Supongamos una línea con parámetros primarios R , L , C y G . Para una línea de transmisión sin pérdidas y con parámetros ideales distribuidos, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\delta v(y,t)}{\delta y} = L \frac{\delta i(y,t)}{\delta t} \quad (1.3)$$

$$\frac{\delta i(y,t)}{\delta y} = C \frac{\delta v(y,t)}{\delta t} \quad (1.4)$$

En este caso se asume que la resistencia y la conductancia son cero, L y C son constantes. Derivando la primera respecto a y y la segunda a t se tiene que la magnitud LC es el inverso del cuadrado de la velocidad, es decir:

$$LC = \frac{1}{c^2} \quad (1.5)$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.6)$$

Donde C es la velocidad en metros por segundo. Ahora reemplazando en la ecuación y suponiendo los valores de v_1 y v_2 constantes tenemos que la solución general se representa como:

$$v(y,t) = v_1 f_1(y + ct) + v_2 f_2(y - ct) \quad (1.7)$$

La solución final de las dos ecuaciones nombradas al principio está dada por:

$$v(y,t) = v_1 f_1^n(y + ct) + v_2 f_2^n(y - ct) \quad (1.8)$$

$$i(y, t) = \frac{v_1}{Z_0} f^n_1(y + ct) + \frac{v_2}{Z_0} f^n_2(y - ct) \quad (1.9)$$

La velocidad de propagación lo largo de la línea depende de la geometría de la línea y de las propiedades electromagnéticas del espacio circundante, que a su vez determinan la inductancia y la capacitancia. Dicha onda ve una resistencia de dispersión muy alta y por lo tanto la impedancia al impulso viene dada por:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{j\omega L}}{\sqrt{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.10)$$

El modelo de una línea de transmisión sin pérdidas no refleja la realidad, porque factores como la resistencia, la proximidad con la tierra y el efecto corona cambian el comportamiento de las ondas en su viaje a través de la línea, produciendo distorsiones en la forma de onda de un impulso o de la onda conforme ésta avanza.

Descripción del problema

Debido a la ampliación de la topología de la red, y como principal medio de transporte de la energía eléctrica son las líneas de transmisión, se estudiará los transitorios electromagnéticos en el dominio del tiempo a través del ATP/Draw.

Actualmente, los esfuerzos por generar simuladores de transitorios en tiempo real han provocado nuevos desafíos. Uno de estos es la carga computacional que representan la simulación de las líneas de transmisión con parámetros eléctricos dependientes de la frecuencia.



1.6 Objetivos de la tesis

- ❖ Plantear los impactos de la sobretensión transitoria en las líneas de transmisión ante diferentes escenarios
- ❖ Describir el efecto de las sobretensiones que se presentan en la operación del disparo y cierre mono polar (DRM), descargas atmosféricas y en líneas no uniformes.
- ❖ Conocer y aplicar el método de J. Martí para obtener parámetros y así implementar un control más riguroso en coordinación del aislamiento.

1.7 Justificación

El sistema interconectado nacional se enlaza a través de líneas de transmisión y subestaciones de potencia, las cuales sirven para transportar la energía eléctrica de un punto a otro; por ello, es el elemento que más fallas presenta debido a su longitud, pues se encuentran expuestas a fenómenos de la naturaleza (descarga atmosférica) en distintos ambientes y regiones.

Debido a que no existen programas en tiempo real donde se realicen los estudios de transitorios electromagnéticos, es necesario este tipo de estudios para las nuevas incorporaciones o cambios que presenta la topología de la red. Es preciso sugerir este tipo de estudios para reconocer el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones como los que se mencionan en las simulaciones que se realizaran para tener un margen de maniobra en caso de una contingencia.

1.8 Aportaciones

Generar estudios de un sistema ante diferentes condiciones y sentar las bases necesarias para ajustar casos de simulación estables para poder generalizar así los criterios necesarios que se requieren para la simulación de sistemas más complejos y extensos.

CAPÍTULO 2 Modelos de línea de transmisión

2.1 Generalidades

Las líneas de transmisión forman parte de los sistemas de potencia, ya que son las encargadas del transporte directo de energía en condiciones meteorológicas variables por lo que se encuentran expuestas a fallas internas y externas, normalmente las líneas funcionan con cargas trifásicas equilibradas, aunque la disposición de los conductores no sea simétrica o tengan transposición. La línea de transmisión se considera como circuito de constantes distribuidas, tiene resistencias, inductancias capacitancias y conductancias, que se encuentran distribuidas a lo largo de toda su longitud como se muestra en la Fig. 2.1.

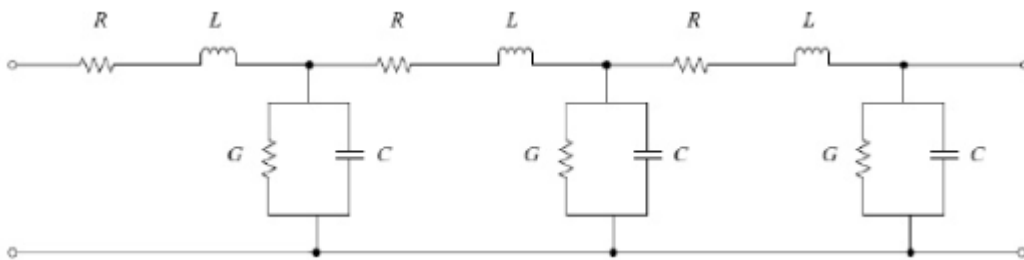


Fig. 2.1 Línea de transmisión de parámetros distribuidos

2.2 Modelos de línea de parámetros concentrados constantes.

Esta representación de líneas es usada para calcular los voltajes, corrientes y flujos de potencia de sistemas en estado estable o líneas cortas.

2.2.1 Modelo Pi nominal

Está definida por sus variables eléctricas como lo son la resistencia en serie o en corriente continua, su inductancia serie y capacitancia y conductancia en paralelo. El modelo de línea de transmisión a utilizar depende principalmente del estudio que

se quiera realizar y la longitud de la misma, para estado estacionario el modelo más utilizado es el modelo de línea de transmisión PI de parámetros concentrados.

Las siguientes ecuaciones relacionan el voltaje y las corrientes en los extremos de la línea a través de una representación PI como se muestra en la Fig. 2.2.

$$V_k = \left[\frac{2Y}{2} + 1 \right] v_m + Zi_m \quad (2.1)$$

$$V_k = \left[1 + \frac{ZY}{4} \right] v_m + \left(\frac{ZY}{2} \right) + 1 \quad (2.2)$$

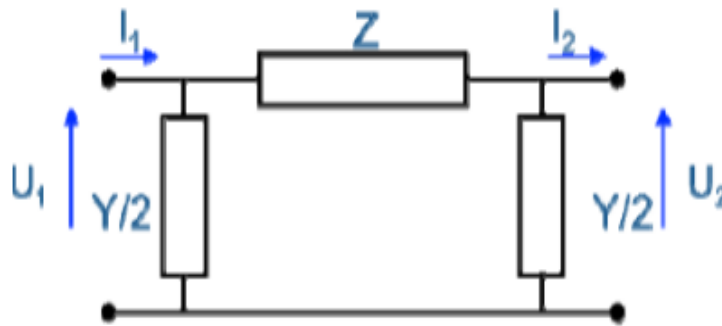


Fig. 2.2. Modelo equivalente del modelo pi nominal

2.2.1.1 Diagrama fasorial para una línea media.

En el siguiente diagrama fasorial la corriente I_{Yr} adelanta al voltaje de recepción V_r , en 90° y la corriente I_{Ye} adelanta al voltaje de emisión V_c en 90° . La corriente I_z es el vector suma de las corrientes I_r y I_{Yr} , mientras la corriente es el vector suma de las corrientes I_z y I_{Yc} .

La corriente en la admitancia está definida por:

$$I_{Ye} = \frac{Y}{2} V_e \quad (2.8)$$

$$I_{Ye} = \left[\left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_e + Z I_r \right] \frac{Y}{2} \quad (2.9)$$

Finalmente se tiene que la corriente de emisión se expresa como:

$$I_e = I_z + I_{Ye} \quad (2.10)$$

$$I_e = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) V_r + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) I_r \quad (2.11)$$

2.2.1.2 Modelo de línea de circuitos pi en cascada

Fue el primer modelo utilizado para soluciones transitorias en líneas de transmisión, la cual es una aproximación discreta a los parámetros distribuidos constantes. La representación de este modelo se presenta de la siguiente manera, donde se observa n circuitos Pi nominales en cascada.

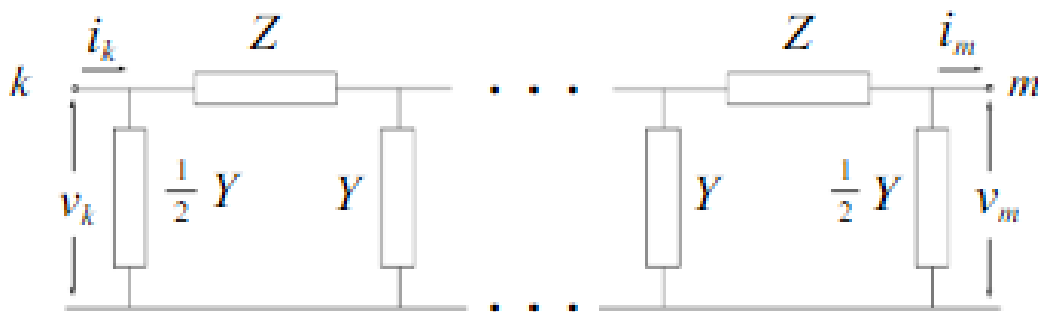


Fig. 2.4. Circuito pi nominal equivalente

2.3 Modelo de Bergeron

Este modelo se sustenta en la propagación de las ondas de voltaje y corriente en una línea de transmisión sin pérdidas y con parámetros distribuidos constantes. En la Fig. 2.5 es expresado el modelo de Bergerón.

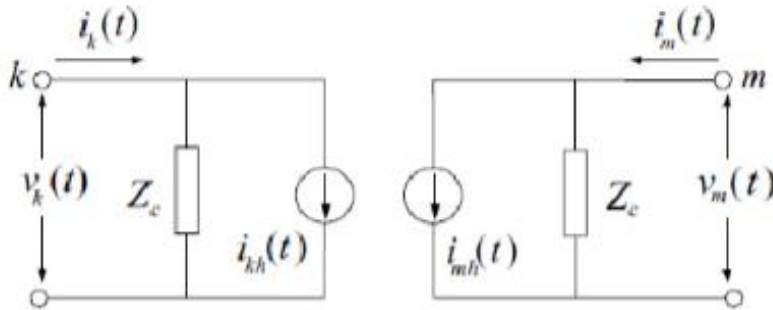


Fig. 2.5 Modelo de bergeron

Su desventaja radica en que no considera el efecto skin y el efecto de retorno por tierra, así como las pérdidas en la línea de transmisión.

2.4 Modelo Meyer y Dommel

En el trabajo básico de Dommel se asume que la línea tiene parámetros constantes y sin pérdidas. Bajo estas suposiciones las ecuaciones de línea se resuelven directamente en el dominio del tiempo. Para considerar las pérdidas Dommel dividió la resistencia total de la línea en tres partes iguales, localizadas en la mitad y en cada extremo de la línea. De la solución de D'Alembert de las ecuaciones de onda simplificadas y del concepto de Bergeron de la relación constante entre las ondas viajeras de voltaje y corriente a lo largo de la línea, Dommel obtuvo el circuito equivalente mostrado en la Fig. 2.6. En este modelo R_c es la impedancia característica de la línea, $i_{kh}(t)$ es la fuente de corriente cuyo valor en cada paso de tiempo t se obtiene de los valores de historia conocidos de la corriente y voltaje en el nodo m e $i_{mh}(t)$ es la fuente de corriente cuyo valor en cada paso de tiempo se obtiene de los valores de historia conocidos de la corriente y voltaje en el nodo k . Cuando se toma en cuenta la dependencia frecuencial de los parámetros y la

naturaleza distribuida de las pérdidas se vuelve muy complicado obtener la solución de las ecuaciones de la línea de transmisión directamente en el dominio del tiempo de una manera práctica. En el dominio de la frecuencia la solución para los voltajes en los extremos de la línea es:

$$V_k(\omega) = \cosh[\gamma(\omega)l] V_m(\omega) - Z_c(\omega) \sinh [\gamma(\omega)l] I_m(\omega) \quad (2.12)$$

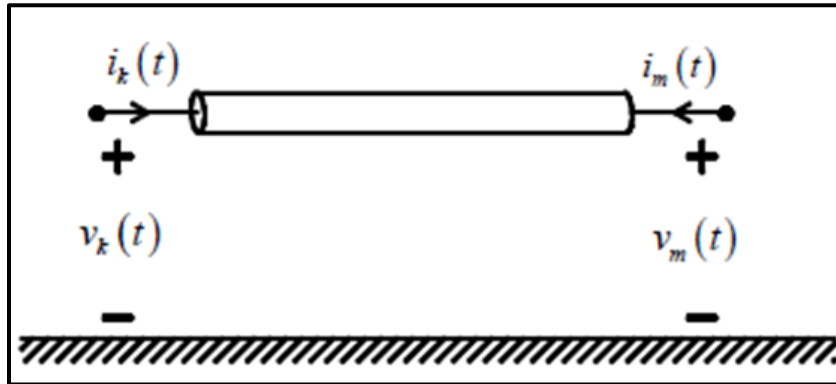


Fig. 2.6 a) Modelo de línea simplificado, Circuito de línea.

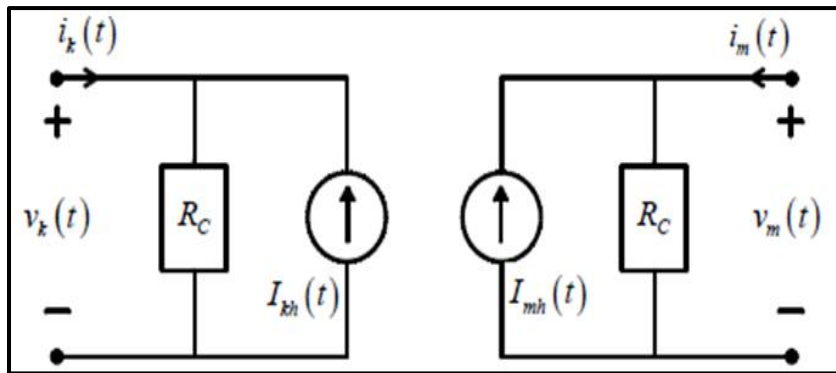


Fig. 2.6 b) Circuito equivalente visto desde ambas terminales de la línea Y.

$$I_k(\omega) = \frac{1}{Z_c(\omega)} \sinh[\gamma(\omega)l] V_m(\omega) - \cosh[\gamma(\omega)l] I_m(\omega) \quad (2.13)$$

donde:

$$Z_c(\omega) = \sqrt{Z'(\omega)Y'(\omega)} \quad \text{Impedancia Característica} \quad (2.14)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{\frac{Z'(\omega)}{Y'(\omega)}} \quad \text{Constante de Propagación} \quad (2.15)$$

$$(\omega) = R'(\omega) + j\omega L', Y'(\omega) + j\omega C' \quad (2.16)$$

Para desarrollar un modelo en el dominio del tiempo (2.5) y (2.6) tienen que ser transformadas. Esta operación de cambio de dominio origina la aparición de convoluciones que envuelven a funciones irracionales. Uno de los primeros modelos para líneas de transmisión dependientes de la frecuencia para la simulación de transitorios en el dominio del tiempo fue propuesto por Budner, en él se utilizó el concepto de funciones de peso en un modelo de línea de admitancias. Las funciones de peso en este modelo son muy oscilatorias y difíciles de evaluar con precisión.

En un esfuerzo para mejorar el método de las funciones de peso propuesto por Budner, [15] introdujo un cambio de variables para relacionar corrientes y voltajes en el dominio del tiempo que en cierto sentido es análogo a la interpretación de Bergerón de las ecuaciones de onda simplificadas. Las nuevas variables fueron definidas de la siguiente manera:

$$f_k(t) = V_k(t) + R_l i_k(t) \quad (2.17)$$

$$f_m(t) = V_m(t) + R_l i_m(t) \quad (2.18)$$

$$b_k(t) = V_k(t) - R_l i_k(t) \quad (2.19)$$

$$b_m(t) = V_m(t) - R_l i_m(t) \quad (2.20)$$

Donde $f_k(t)$ y $f_m(t)$ son las funciones de onda viajera hacia adelante, $b_k(t)$ y $b_m(t)$ son las funciones de onda viajera hacia atrás y R_l es una constante real definida.

Las ecuaciones (2.10) a la (2.13) fueron transformadas al dominio de la frecuencia y comparadas con la solución de línea dadas por las ecuaciones (2.15 y 2.16). Esta idea fue desarrollada aún más por Meyer y Dommel [20] de la cual resultaron las funciones de peso $a_1(t)$ y $a_2(t)$ mostradas en la Fig.2.8. La representación equivalente de línea se muestra en la Fig. 2.9, en este circuito las funciones de onda viajera hacia atrás $b_k(t)$ y $b_m(t)$, se obtienen de las funciones de peso de historia de

voltajes y corrientes en ambas terminales de la línea y están dadas por las integrales de convolución.

$$b_k(t) = \int_0^{\infty} \{f_m(t-u) \alpha_1(u) + f_k(t-u) \alpha_2(u)\} du \quad (2.21)$$

$$b_m(t) = \int_0^{\infty} \{f_k(t-u) \alpha_1(u) + f_m(t-u) \alpha_2(u)\} du \quad (2.22)$$

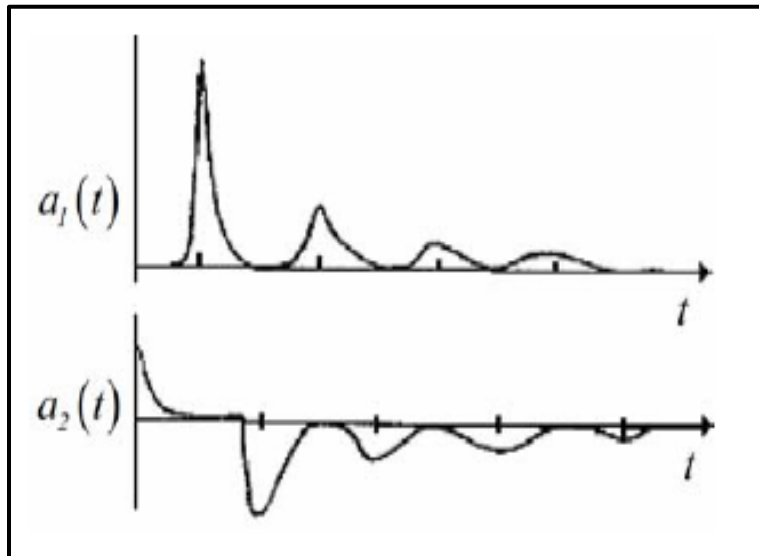


Fig. 2.7 Funciones de peso en la formulación de Meyer y Dommel

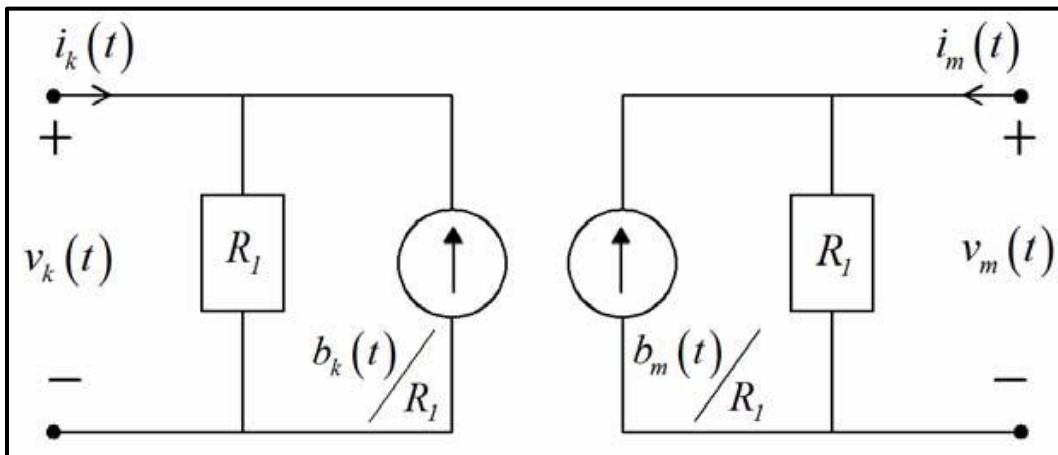


Fig. 2.8 Modelo de línea dependiente de la frecuencia de Meyer y Dommel [4]

Uno de los principales problemas encontrados en este método está relacionado con la exactitud en frecuencias bajas, incluyendo la frecuencia de operación del sistema (60 Hz). Este problema parece estar relacionado con la evaluación de la parte final de las funciones de peso. También, un análisis del error parecería indicar que la función $a_2(t)$ es más difícil de evaluar con suficiente exactitud que la función $a_1(t)$.

2.5 Modelado de línea de transmisión en el dominio de fase

Para una línea de transmisión de n fases con una longitud l , los voltajes y las corrientes en las terminales de envío y recepción, k y m respectivamente, se pueden expresar en el dominio de la frecuencia como

$$I_k = Y_c V_k - A(Y_c V_m + I_m) \quad (2.23)$$

$$I_k = Y_c V_k - A(Y_c V_m + I_m) \quad (2.24)$$

donde

$$Y_c = \sqrt{(YZ)^{-1}Y} \quad (2.25)$$

$$A = e^{\sqrt{YZ}} \quad (2.26)$$

Y_c es la matriz de admitancia característica; A es la matriz de propagación de onda; V e I son los vectores de voltaje y corriente; Y y Z son las matrices de admitancia en paralelo e impedancia en serie por unidad de longitud, respectivamente.

Para cada frecuencia, las expresiones (2.23) y (2.24) pueden evaluarse por medio del análisis modal

$$T_1^{-1}YZT_1 = \lambda \quad (2.27)$$

donde T_1 es la matriz de transformación de corrientes y λ es la matriz diagonal de e_{ig} en valores. Entonces, de la teoría de e_{ig} en valores se tiene [17, 18].

$$Y_c = T_1 Y_{cmode} T_1 \quad (2.28)$$

$$A = T_1 A_{cmode} T_1^{-1} \quad (2.29)$$

Como la matriz de la admitancia característica modal Y_{Cmode} y la matriz de propagación A_{mode} son diagonales, Y_{Cmode} se puede evaluar de acuerdo con lo descrito en [18], considerando que los elementos de A_{mode} son obtenidos de los n valores de la ecuación:

$$A_{mode} e^{-i} = e^{-\sqrt{\lambda}i} \quad (2.30)$$

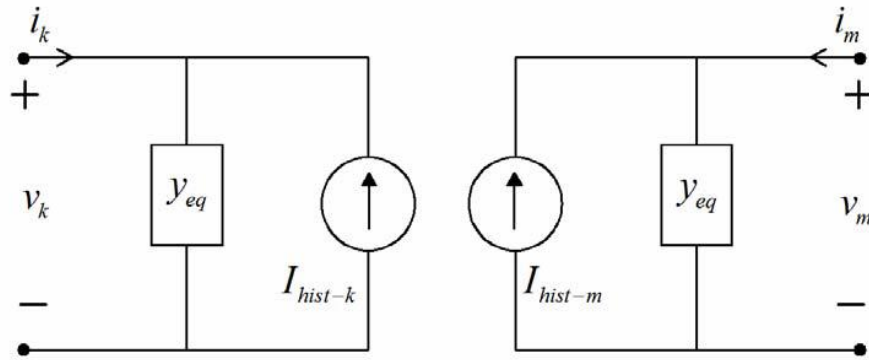


Fig. 2.9 Circuito equivalente en el dominio del tiempo.

Transformando al dominio del tiempo, las ecuaciones (2.23) y (2.24) resulta:

$$I_k(t) = Y_c(t) * V_k(t) - a(t) * f_m(t) \quad (2.31)$$

$$I_m(t) = Y_c(t) * V_m(t) - a(t) * f_k(t) \quad (2.32)$$

donde

$$f_m(t) = Y_c(t) * V_m(t) + i_m(t) \quad (2.33)$$

$$f_k(t) = Y_c(t) * V_k(t) + i_k(t) \quad (2.34)$$

el símbolo * denota convolución a través de una operación matriz-vector.

Si los elementos de las matrices Y y A son sintetizados utilizando aproximaciones de funciones racionales, entonces las funciones correspondientes en el dominio del tiempo $\mathbf{y}_c(t)$ y $\mathbf{a}(t)$ se convierten en matrices cuyos elementos contienen sumatorias simples de funciones exponenciales [18], [19]. Las convoluciones en las ecuaciones (2.35) y (2.36) pueden ser evaluadas utilizando métodos recursivo rápidos [19], [20], [21]. Las ecuaciones nodales en ambas terminales de la línea de transmisión se pueden expresar en una forma más conveniente como

$$I_k(t) = Y_{eq}(t) * V_k(t) - i_{hist-k}(t) \quad (2.35)$$

$$I_m(t) = Y_{eq}(t) * V_m(t) - i_{hist-m}(t) \quad (2.36)$$

donde \mathbf{y}_{eq} es una matriz simétrica constante real. El segundo término del lado derecho de las ecuaciones (2.3) y (2.39) es la fuente de corriente de historia evaluada con los valores ya conocidos de las variables en los pasos de tiempo previos. Estas ecuaciones están representadas por medio del circuito equivalente de la Fig. 2.11, las cuales pueden ser fácilmente incorporadas en el EMTP.

2.5.1 Síntesis de las funciones Y_c y A

La rutina de ajuste usada para sintetizar estas funciones es una versión ligeramente modificada de la versión descrita en [19] [20]. La modificación principal se ha descrito en [21]. La técnica de diagonalización de [21] se usa para evaluar las matrices Y_c y A en función de la frecuencia.

2.6 Modelo de Laplace

2.6.1 Solución de las Ecuaciones del Telegrafista para Línea Monofásica

Las ecuaciones del telegrafista expresadas en el dominio de la frecuencia están definidas por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-\frac{dV(z,s)}{dz} = ZI(z,s) \quad (2.37a)$$

$$-\frac{dI(z,s)}{dz} = YV(z,s) \quad (2.37b)$$

En donde $V(z, s)$ e $I(z, s)$ son las tensiones y corrientes en el dominio de Laplace en el punto (z) de la línea, mientras que Z y Y , representan la impedancia serie y la admitancia en derivación por unidad de longitud, respectivamente. Combinando las ecuaciones (2.40a) y (2.40b) se obtiene un arreglo matricial desacoplado de segundo orden:

$$\frac{d^2}{dz^2} \begin{bmatrix} V(z,s) \\ I(z,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ZY & 0 \\ 0 & YZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(z,s) \\ I(z,s) \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Las soluciones generales de tensión y corriente para la ecuación (2.41) son

$$V(z,s) = C_1 e^{-\gamma z} + C_2 e^{\gamma z} \quad (2.39)$$

$$I(z,s) = C_3 e^{-\gamma z} + C_4 e^{\gamma z} \quad (2.40)$$

En donde C_1 , C_2 , C_3 y C_4 son las constantes de integración y γ es la constante de propagación, definida por:

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad (2.41a)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + sL)(sC)} \quad (2.41b)$$

2.6.2 Admitancia e Impedancia Característica

Para encontrar una solución que relacione las ecuaciones (2.42) y (2.43) se hace uso del concepto de admitancia característica de la línea. Para ello, se sustituye la ecuación (2.44a) en la ecuación (2.47a) y se resuelve:

$$I(z, s) = -Z^{-1} \frac{d(C_1 e^{-\gamma z} + C_2 e^{\gamma z})}{dz} \quad (2.42)$$

$$I(z, s) = Z^{-1} \gamma (C_1 e^{-\gamma z} - C_2 e^{\gamma z}) \quad (2.43)$$

La admitancia característica se obtiene a partir del término $Z^{-1} \gamma$ de (2.43):

$$Y_0 = Z^{-1} \gamma \quad (2.44a)$$

$$Y_0 = \sqrt{\frac{Y}{Z}} \quad (2.44b)$$

La impedancia característica se define como el inverso de la admitancia característica Y_0 definida por

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.45a)$$

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \sqrt{\frac{R + sL}{sC}} \quad (2.45b)$$

Sustituyendo la ecuación (2.48b) en la ecuación (2.43) se tiene:

$$I(z, s) = Y_0 (C_1 e^{-\gamma z} - C_2 e^{\gamma z}) \quad (2.46)$$

2.6.3 Obtención de la Matriz de Transferencia y Matriz Cadena

Para obtener la matriz de transferencia se aplican las condiciones de frontera, mostradas en la Figura 2.4, a las soluciones generales de tensión y de corriente proporcionadas por las ecuaciones (2.12) y (2.16), teniéndose finalmente:

$$\begin{bmatrix} V_\ell \\ I_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

En donde:

$$A = \cosh(\gamma \ell) \quad (2.47a)$$

$$B = -Z_0 \sinh(\gamma \ell) \quad (2.47b)$$

$$C = Y_0 \sinh(\gamma \ell) \quad (2.47c)$$

$$D = -\cosh(\gamma \ell) \quad (2.47d)$$

V_0 , I_0 , V_ℓ e I_ℓ son las tensiones y corrientes en el extremo emisor y receptor de la línea respectivamente y ℓ representa la longitud total de la línea. La ecuación (2.47) es conocida como matriz de transferencia.

A partir de esta ecuación puede definirse la matriz cadena al cambiar el sentido de la corriente (I_L) del lado derecho de la Fig. 2.12, teniéndose simplemente la ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_\ell \\ I_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ -C & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

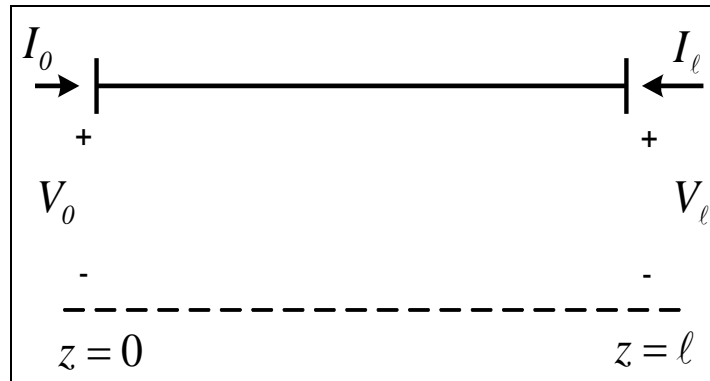


Figura 2.10 Condiciones de frontera.

2.6.4 Obtención del Modelo de Dos Puertos (Nodal o Ybus)

A partir de la matriz de transferencia se describe el modelo de dos puertos (nodal o de matriz de admitancias), el cual relaciona las tensiones nodales en los extremos de la línea con las corrientes inyectadas en dichos extremos. Manipulando algebraicamente (2.52) se tiene:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SS} & -Y_{SR} \\ -Y_{RS} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\ell \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

donde:

$$Y_{SS} = Y_{RR} = Y_0 \coth(\gamma \ell) \quad (2.50a)$$

$$Y_{RS} = Y_{SR} = Y_0 \operatorname{csch}(\gamma \ell) \quad (2.50b)$$

Y_{SS} , Y_{RR} , Y_{SR} y Y_{RS} son los elementos correspondientes a la matriz del modelo de dos puertos. En la Fig. 2.13 se muestra el modelo de dos puertos que representa a la línea de transmisión uniforme en estado transitorio en el dominio de la frecuencia.

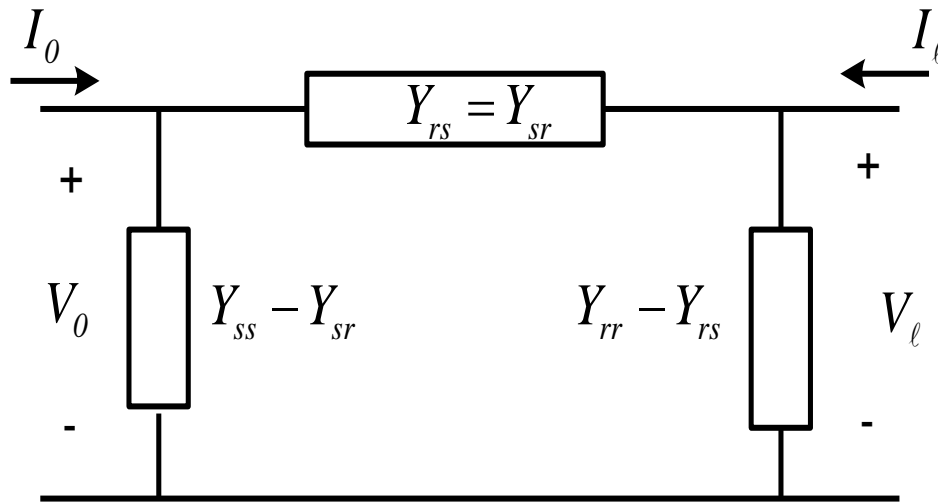


Fig. 2.11 Modelo de dos puertos (forma nodal)

2.7 La transformada numérica de Laplace

Debido a que los resultados que se obtienen están en el dominio de Laplace se requiere de transformadas que permitan obtener los resultados en el dominio del tiempo, en la siguiente sección se explica la transformada numérica de Laplace que permite dicha conversión.

En el caso de la transformada de Laplace se utilizan tradicionalmente, para este propósito, tablas de transformación y propiedades. Desafortunadamente, no siempre es posible encontrar la inversa en tablas ni analíticamente, debido a que la función original puede ser demasiado compleja o puede no estar definida de manera analítica, sino por medio de gráficas, mediciones experimentales, por secciones o en forma discreta. Estas circunstancias pueden superarse mediante la aplicación de algoritmos numéricos [19, 20, 21].

2.7.1 Respuesta en Frecuencia en sistemas Lineales.

En un sistema lineal de parámetros concentrados, la relación entre la función de excitación y la función de respuesta puede describirse por medio de ecuaciones diferenciales de coeficientes constantes de la forma:

$$b_n \frac{d^n f(t)}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} f(t)}{dt^{n-1}} + \dots + b_0 f(t) = g(t) \quad (2.51)$$

Expresando la ecuación (53) en forma operacional se tiene:

$$T(D)f(t) = g(t) \quad (2.52)$$

donde:

$g(t)$ = función de excitación,

$f(t)$ = función de respuesta, y

$$T(D, t) * f(t) = g(t) \quad (2.53)$$

donde:

$$T(D, t) = b_n(t) * \frac{d^n}{dt^n} + b_{n-1}(t) * \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + b_0 \quad (2.54)$$

La solución de (55) se encuentra aplicando la transformada de Laplace, la cual se define como:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.55)$$

y su inversa:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds \quad (2.56)$$

Sustituyendo $s=c+j\omega$ en (2.57) y (2.58):

$$F(c + j\omega) = \int_0^{\infty} [f(t)e^{-ct}]e^{-j\omega t} dt \quad (2.57)$$

$$f(t) = \frac{e^{ct}}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} F(c + j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2.58)$$



donde ω es la frecuencia angular y c es una constante de amortiguamiento. Puede observarse que, si c es igual a cero, (2.59) y (2.60) corresponden a las transformadas de Fourier para $f(t)$ causal:

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.59)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2.60)$$

Transformando la ecuación al dominio de Laplace se tiene en forma general:

$$T(s)F(s) = G(s) \quad (2.61)$$

De (2.63), la respuesta del sistema a la excitación $G(s)$ es:

$$F(s) = T(s)^{-1}G(s) \quad (2.62)$$

La respuesta en el dominio del tiempo se obtiene aplicando a la transformada inversa de Laplace dada por:

$$f(t) = \frac{e^{ct}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} T(s)^{-1}G(s)e^{j\omega t} dt \quad (2.63)$$

La solución de la ecuación en forma analítica puede ser muy difícil o imposible para sistemas cuyos parámetros dependen en forma no lineal de la frecuencia, como es el caso de las líneas de transmisión. La forma de superar este obstáculo es evaluando numéricamente. Sin embargo, esto ocasiona errores por la desratización y el truncamiento del espectro de frecuencia [20].



CAPÍTULO 3 Modelo J. Martí

3.1 Generalidades

Las líneas de transmisión son las encargadas de transportar la energía generada desde lugares remotos hasta los grandes centros de consumo, por medio de ellas se transportan grandes bloques de energía el cual al disparar por falla interna o externa pone en riesgo al sistema, por sobre carga a líneas adyacentes o bancos de transformación, el operar en óptimas condiciones depende de los estudios y análisis que se realicen y que estos nos representen las características más reales posibles del sistema bajo estudio. En la Fig. 3.1 se muestra el sistema eléctrico de potencia del interconectado nacional, en la cual se puede observar la conectividad y uso de las líneas de transmisión a lo largo del país, es importante notar que cualquier salida de la línea de transmisión puede accionar disturbios en las líneas adyacentes.

Para el estudio de los diferentes equipos del sistema eléctrico en estado transitorio se requiere de modelos matemáticos dependientes del tiempo y de la longitud de la línea de transmisión para tener una mayor precisión en su representación. Las afectaciones que se pueden tener por efecto de un transitorio electromagnético pueden ser, desde operaciones incorrectas de equipos de comunicaciones por interferencia electromagnética, hasta la explosión de equipo eléctrico primario como pueden ser aparta rayos, interruptores etc., en ambos casos nos llevan una salida incorrecta de línea.

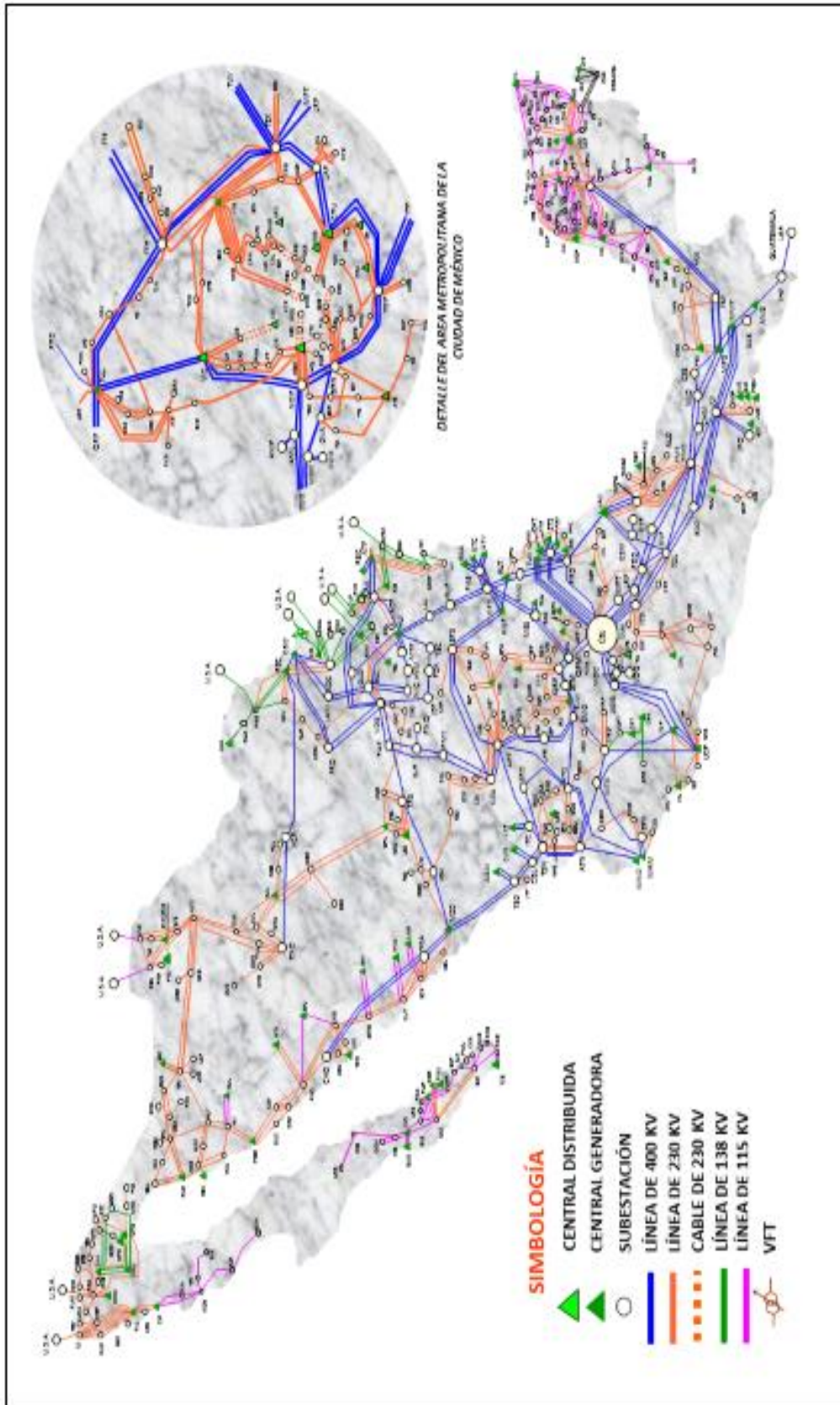


Fig. 3.1 Sistema interconectado nacional [3]



Las afectaciones económicas por fallas en el suministro de energía eléctrica pueden ser considerables para la empresa de transmisión, el nuevo sistema de mercado de energía demandará índices más estrechos a los disparos de línea, tiempos de interrupción por usuarios, el proceso de transmisión tendrá la responsabilidad de brindar confiabilidad y disponibilidad de las líneas del sistema eléctrico nacional, por lo tanto el contar con herramientas que le permitan conocer el comportamiento de sus líneas en estado dinámico lo hace de vital importancia incluso después de un disturbio mayor, en el que una parte o la totalidad del sistema eléctrico de potencia se ha separado o colapsado, la estrategia general para restablecimiento del mismo, debe basarse en lo siguiente:

- Estabilización de islas eléctricas “sobrevivientes”.
- Recuperación de la generación del sistema.
- Energización de la red de transmisión.
- Restablecimiento de la carga del sistema.
- Sincronización de islas entre sí, y con el resto de la interconexión.

Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta al momento de restablecer el Sistema Interconectado Nacional (SIN) son tensiones transitorias que son de gran magnitud y que en muchas ocasiones producen un daño severo a los equipos generando un retraso de tiempo importante al momento del restablecimiento.

El modelo de la línea de transmisión utilizado para estudios de transitorios electromagnéticos puede ser de parámetros concentrados o de parámetros distribuidos; sin embargo, se prefiere en general el segundo, debido a que toma en cuenta el fenómeno de propagación de ondas viajeras a lo largo de la línea, fundamental para reproducir de manera adecuada el comportamiento transitorio de elementos eléctricamente largos. En general la clasificación de los modelos se muestra en la Fig. 3.2.

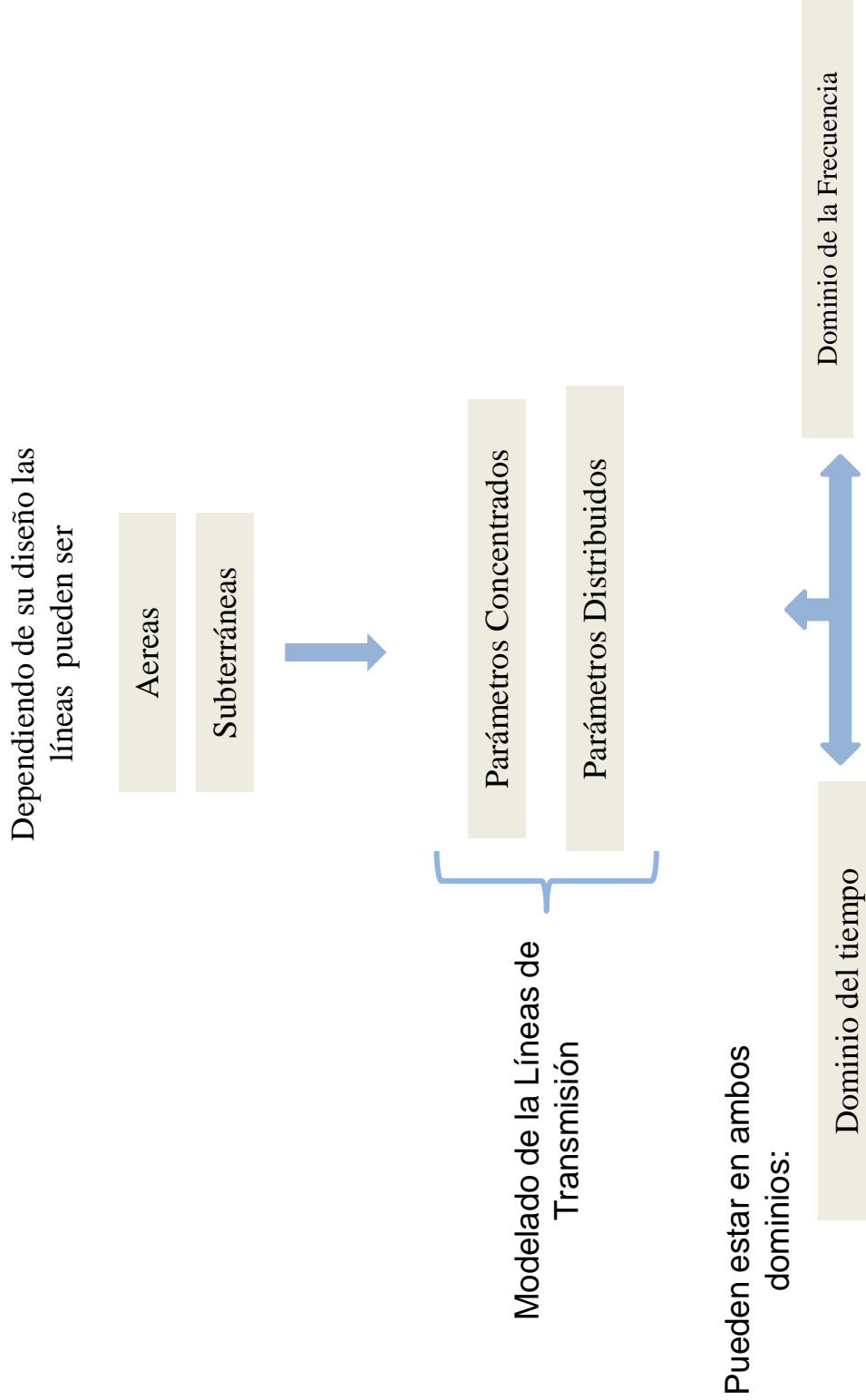


Fig. 3.2 Clasificación de los modelos de líneas de transmisión [3]

Considerando una línea de transmisión monofásica uniforme, el circuito equivalente por unidad de longitud, base del modelado de parámetros distribuidos se muestra en la Fig. 3.3. A partir de esta representación circuital se pueden obtener las ecuaciones del telegrafista las cuales serán usadas en este trabajo para el análisis de la línea en estado transitorio, estas ecuaciones dependen tanto del tiempo como de la distancia, lo cual permite obtener la propagación de ondas viajeras de las variables eléctricas de tensión y corriente.

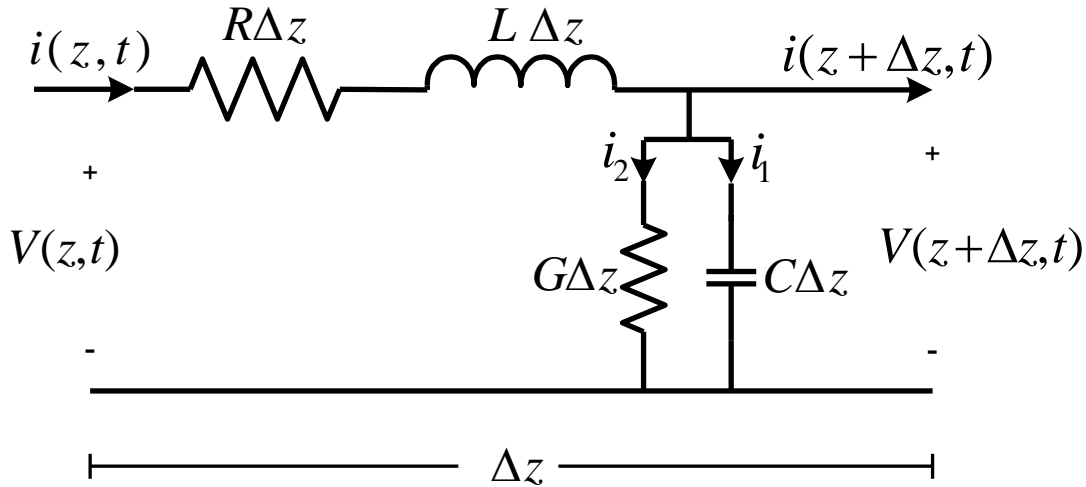


Fig. 3.3 Circuito equivalente de la línea de transmisión por unidad de longitud

A partir de la caída de tensión a lo largo de la malla del circuito de la Fig. 3.3 se obtiene la siguiente expresión:

$$V(\zeta + \Delta\zeta, t) - V(\zeta, t) = -R\Delta\zeta i(\zeta, t) - L\Delta\zeta \frac{\partial i(\zeta, t)}{\partial t} \quad (3.1)$$

Dividiendo entre $\Delta\zeta$ y considerando que el límite cuando $\Delta\zeta$ tiende a cero (3.1) se expresa como:

$$\lim_{\Delta\zeta \rightarrow 0} \frac{V(\zeta + \Delta\zeta, t) - V(\zeta, t)}{\Delta\zeta} = -R i(\zeta, t) - L \frac{\partial i(\zeta, t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

A partir de esta consideración se puede obtener la primera ecuación del telegrafista, expresada por la siguiente ecuación:

$$-\frac{\partial V(\zeta, t)}{\partial \zeta} = R i(\zeta, t) + L \frac{\partial i(\zeta, t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

Para obtener la segunda ecuación del telegrafista se aplica análisis nodal al circuito de la Fig. 3.3 obteniendo lo siguiente:

$$i(\zeta, t) - i(\zeta + \Delta\zeta, t) = G \Delta\zeta V(\zeta, t) + C \Delta\zeta \frac{\partial V(\zeta, t)}{\partial t} \quad (3.4)$$

Dividiendo entre $\Delta\zeta$ y considerando que el límite cuando $\Delta\zeta$ tiende a cero (3.4) se expresa como:

$$\lim_{\Delta\zeta \rightarrow 0} -\frac{i(\zeta + \Delta\zeta, t) - i(\zeta, t)}{\Delta\zeta} = G V(\zeta, t) + c \frac{\partial V(\zeta, t)}{\partial t} \quad (3.5)$$

A partir de esta consideración se puede obtener la segunda ecuación del telegrafista, expresada por:

$$-\frac{\partial i(\zeta, t)}{\partial \zeta} = G V(\zeta, t) + c \frac{\partial V(\zeta, t)}{\partial t} \quad (3.6)$$

Desde hace varias décadas, los programas tipo EMTP se han consolidado como la herramienta más usada y aceptada a nivel mundial para simular transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia [5]. Una característica importante de estos programas es que utilizan un método de integración en el dominio del tiempo para las ecuaciones de la línea con parámetros dependientes de la frecuencia, por lo que para soluciones prácticas se requieren técnicas de aproximación numéricas de paso único (por ejemplo, las reglas de integración



trapezoidal y Euler) para resolver las ecuaciones diferenciales de los componentes del sistema.

En el EMTP, las líneas de transmisión primeramente son desacopladas a través de las matrices de transformación modal, para que después cada modo pueda estudiarse separadamente como un circuito de una sola fase. Para estas descomposiciones se asumen matrices de transformación independientes de la frecuencia. Este procedimiento es exacto para el caso de configuraciones de líneas balanceadas y aún más preciso para el caso de líneas transpuestas. Para el caso más general, sin embargo, de circuitos con líneas desbalanceadas, líneas no transpuestas, las matrices de transformación son dependientes de la frecuencia. Cuando se toma en cuenta la dependencia frecuencial de los parámetros y la naturaleza distribuida de las pérdidas se vuelve muy complicado obtener la solución de las ecuaciones de la línea de transmisión directamente en el dominio del tiempo de una manera práctica.

3.2 Modelo J. Martí

En 1982 J. Martí desarrolló un modelo de línea aérea para análisis transitorios en el dominio del tiempo. Este modelo se representa por su impedancia característica, la cual se determina para un extenso rango de frecuencias, así como por una función de propagación. Tanto la impedancia característica como la función de propagación se sintetiza mediante funciones racionales utilizando una técnica basada en diagramas de Bode. En este modelo se considera que la matriz de transformación modal es real y constante. La metodología de J. Martí evita problemas numéricos de estabilidad, es más conveniente desarrollar las ecuaciones en el dominio de la frecuencia para posteriormente terminar su solución en el tiempo y así obtener el modelo resultante [3].

3.2.1 Desarrollo matemático del modelo de Martí

Al remplazar la resistencia $R1$ por la impedancia característica de la línea Z_{eq} con el fin de generar las nuevas funciones de peso, las funciones para las ondas viajeras hacia adelante y atrás (ecuaciones (2.17) a (2.20) del modelo de Meyer y Dommel) se pueden definir en el dominio de la frecuencia de la siguiente manera:

$$F_m(\omega) = V_m(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (3.7)$$

$$B_k(\omega) = V_k(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (3.8)$$

$$F_k(\omega) = V_k(\omega) + Z_{eq}(\omega) I_k(\omega) \quad (3.9)$$

$$B_m(\omega) = V_m(\omega) - Z_{eq}(\omega) I_m(\omega) \quad (3.10)$$

Donde $Z_{eq}(\omega)$ es la impedancia de la red lineal que aproxima a $Z_c(\omega)$.

Comparando las ecuaciones (3.9) a la (3.12) con la solución general en el dominio de la frecuencia representada por las ecuaciones (2.12) y 2.13) del modelo de Meyer y Dommel, resulta

$$B_k(\omega) = A_i(\omega)F_m(\omega) \quad (3.11)$$

Y

$$B_m(\omega) = A_i(\omega)F_k(\omega) \quad (3.12)$$

Donde

$$A_i(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{1}{\cosh[\gamma(\omega)l] + \sinh[\gamma(\omega)l]} \quad (3.13)$$

La forma en el dominio del tiempo de $A1(w)$ es la función del peso $a1(t)$ mostrada en la Fig. 3.6. La forma en el dominio del tiempo de las ecuaciones (3.13) y (3.14) está dada por las integrales de la convolución

$$B_k(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_m(\tau - u) a_1(u) du \quad (3.14)$$

Y

$$B_m(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_k(\tau - u) a_1(u) du \quad (3.15)$$

El límite inferior de estas integrales es τ debido a que como se puede ver la Fig. 3.6, la función de peso $a_1(t)=0$ para $t < \tau$. El tiempo de retardo τ representa el tiempo de viaje de la componente de frecuencia mas rápida del impulso aplicado.

En las ecuaciones (3.16) y (3.17) se puede observar que los valores de b_k y b_m en el paso del tiempo τ se define completamente de los valores de la historia de las funciones f_m y f_k siempre que el paso de integración Δt de la solución de la red sea más pequeño que τ . Con b_k y b_m conocidos, la forma en el dominio del tiempo de las ecuaciones (3.11) y (3.12) lleva directamente a los circuitos equivalentes deseados en las terminales de la línea de transmisión, esto es

$$b_k(t) = E_{kh} \text{ termino de historia}$$

$$b_m(t) = E_{mh} \text{ termino de historia}$$

Entonces las ecuaciones (3.13) y (3.14) se tiene

$$V_k(t) = e_k(t) + E_{kh} \quad (3.16)$$

$$V_m(t) = e_m(t) + E_{mh} \quad (3.17)$$

Donde $e_k(t)$ y $e_m(t)$ son los voltajes a través de la red Z_{eq} mostrados en la Fig. 3.4.

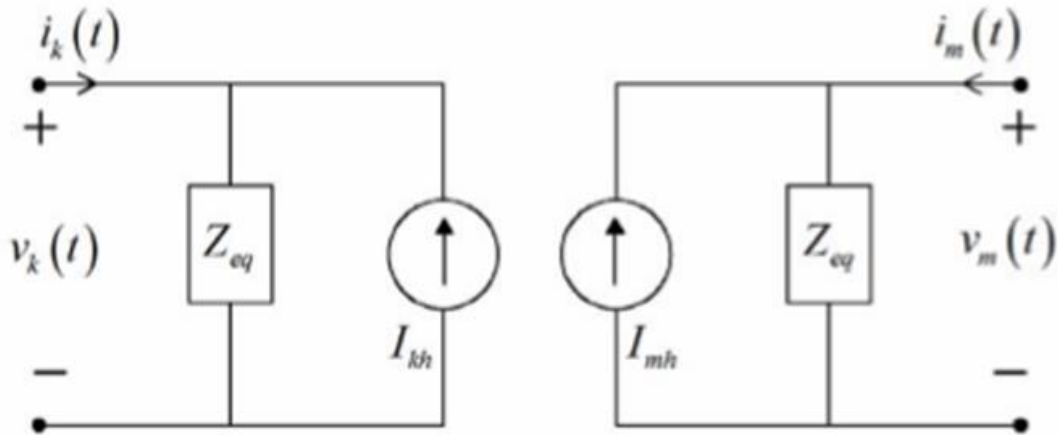


Fig. 3.4 Modelos de línea dependientes de la frecuencia

3.2.2 Síntesis de la impedancia característica

La red Z_{eq} que representa a la impedancia característica de la línea $Z_c(\omega)$ se simula por bloques de resistencias y capacitores (R-C) en paralelo (red de la 1° realización Foster), como se muestra en la Fig. 3.5.



Fig. 3.5 1° realización de Foster para $Z_c(\omega)$

El número de bloques R-C se determina automáticamente por una rutina de aproximación, la cual depende en particular de la línea y del modo que se esté simulando. Para la síntesis de Z_{eq} la función a tabular $Z_c(\omega)$ se aproxima por una función racional de la forma:

$$Z_{eq}(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = H \frac{(s+Z_1)(s+Z_2)\dots(s+Z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (3.18)$$



Los ceros y polos Z_i y p_i respectivamente de esta función son reales, positivos y simples. Los valores de los parámetros de la red equivalente R - C se obtienen expandiendo la ecuación (3.20) en una serie de fracciones parciales

$$Z_{eq}(s) = k_0 + \frac{k_1}{s+p_1} + \frac{k_2}{s+p_2} + \dots + \frac{k_n}{s+p_n} \quad (3.19)$$

De donde, $R_0 = k_0$, $R_i = \frac{k_i}{p_i}$, $C_i = \frac{1}{k_i}$, para $i = 1, 2, \dots, n$

CAPÍTULO 4 Simulación del Modelo de Línea de Transmisión Aplicando el Método J. Martí

4.1 Simulaciones en el software ATP/Draw

Se realizaron las simulaciones para diferentes configuraciones de líneas de transmisión que no representan algún caso real, a causa de la confidencialidad de datos por parte de CFE, si bien el objetivo es cuantificar el comportamiento de las sobretensiones que se presentan y ajustar casos estables para poder generalizarlos en cualquier línea o sistema que pueda ser aplicable a configuraciones particulares.

4.2 Energización de una línea monofásica

Para el modelado de energización de una línea monofásica con cierre en un tiempo diferente de cero, se utilizó una fuente cosenoidal unitaria a una frecuencia de 60 Hz, además se considera la línea en vacío. Se realizó una apertura y cierre secuencial. Para cuantificar su comportamiento.

Las especificaciones geométricas correspondientes a la simulación de una línea de transmisión monofásica en vacío, Fig. 4.1. Aplicando el modelo J Martí en el dominio del tiempo para modelado de líneas de transmisión. Consideramos el efecto piel para una longitud de 100 Km. Un valor de $1E-6$ s. para Δt y finalmente tomamos 0.1 s. como duración máxima para esta simulación.

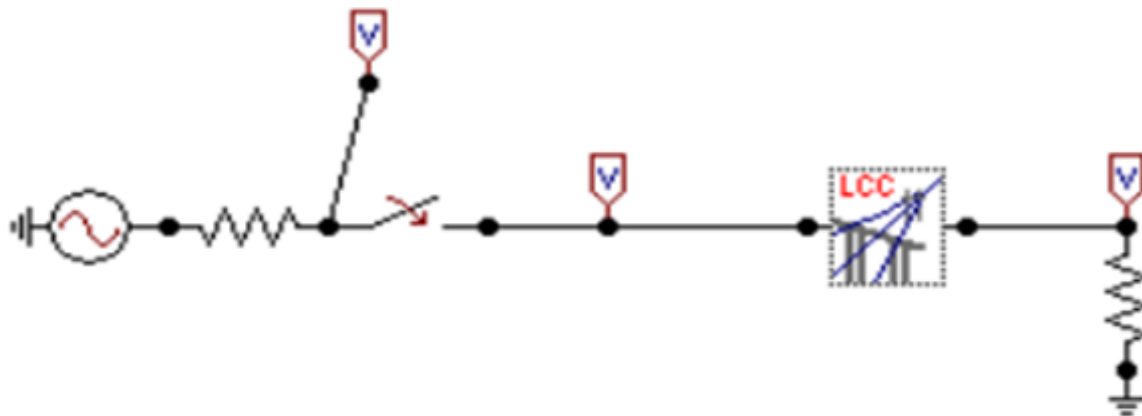


Fig. 4.1 Circuito de una Línea Monofásica

En la simulación de energización de la línea de transmisión en vacío (Fig. 4.2), se colocó una resistencia muy grande para representar la línea abierta.

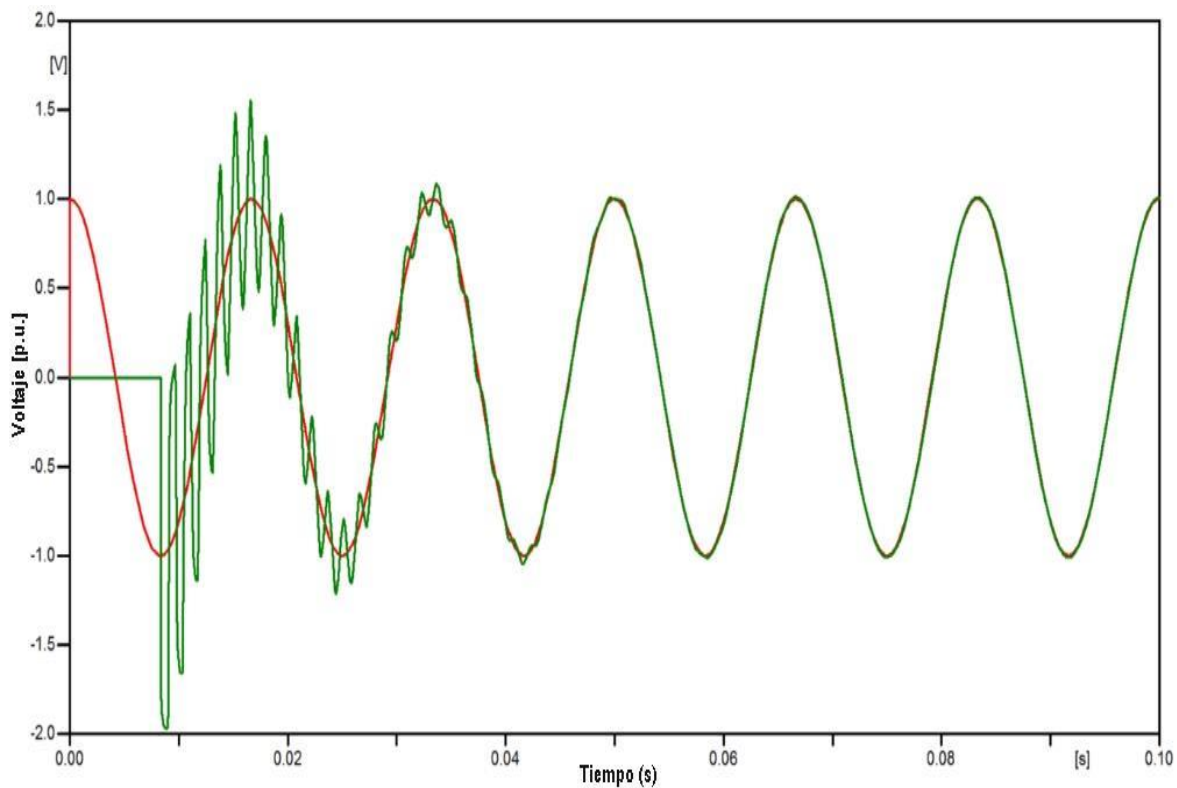


Fig. 4.2 Energización en vacío de la línea de transmisión.

La simulación muestra tras energizar la línea monofásica (Fig. 4.1) presencia de transitorios, que producen sobretensiones moderadas que se minimizan respecto del tiempo, estimamos que dicho efecto tiene una duración no menor a 0.04 s. para esta simulación.

Simulación para cierre y apertura secuencial de un interruptor en una línea monofásica (Fig. 4.3) manteniendo las mismas especificaciones geométricas que la simulación anterior.

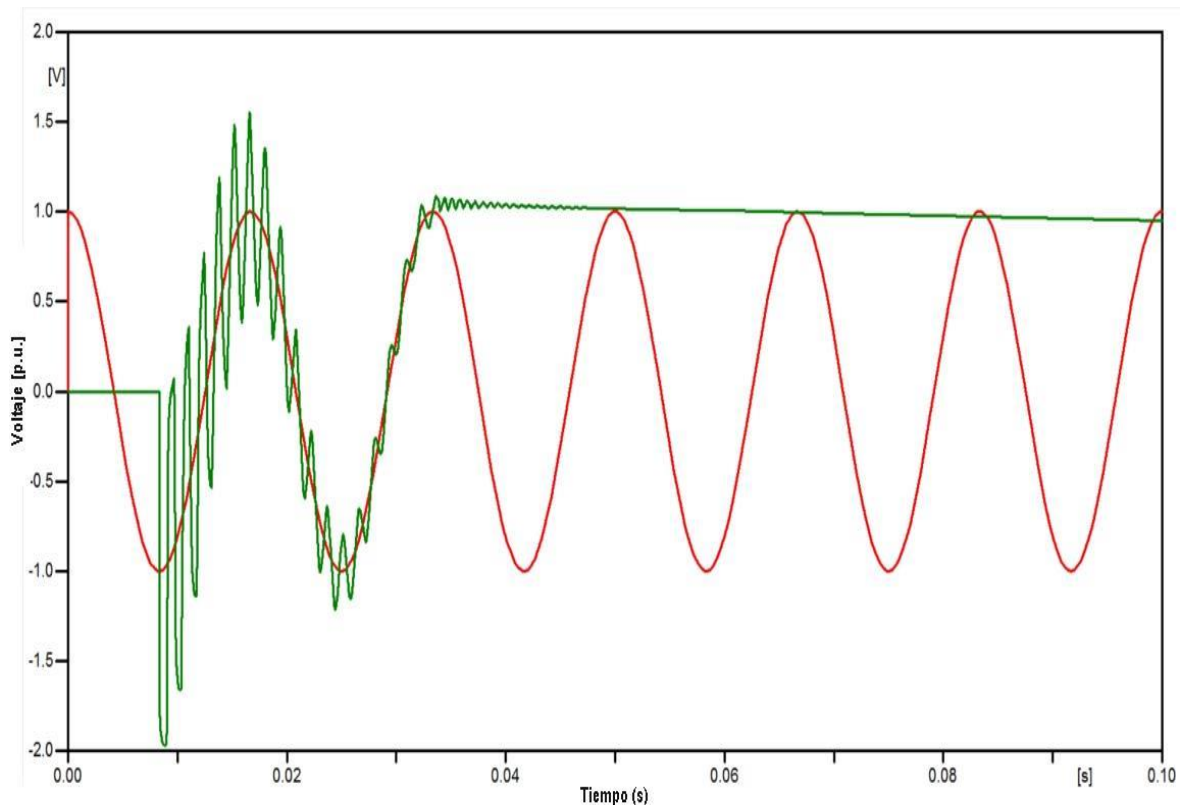


Fig. 4.3 Cierre y apertura secuencial

La simulación tras el cierre del circuito mostró los mismos efectos debidos a los transitorios dados en la simulación previa; tras la abertura de circuito mostró la presencia de tensión en la línea monofásica que además superaba el valor máximo para el circuito, disminuyendo gradualmente respecto al tiempo. Se recomienda no superar los valores máximos de tensión, debido a que afectaría físicamente al aislamiento de la línea de transmisión.

Simulación de la energización de una línea monofásica muy cercana al cruce por cero (que la energización se realice lo más aproximado a un valor de tensión igual a cero) Fig. 4.4. manteniendo las mismas especificaciones geométricas que las simulaciones previas.

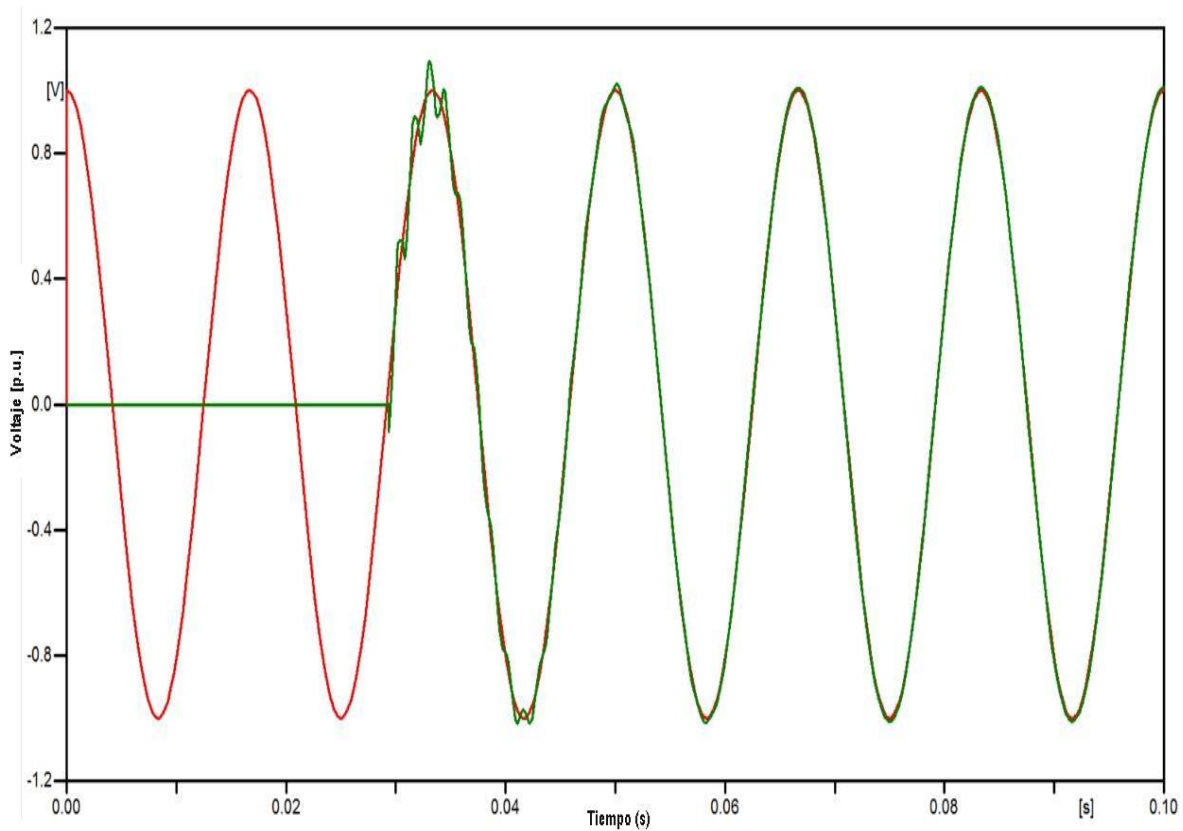


Fig. 4.4 Energización cercana al cruce por cero.

La simulación mostró que se consigue disminuir el efecto de los transitorios, además se observa cómo se amortigua la señal con esta consideración.

Otra forma de disminuir el efecto transitorio es conectar en el extremo receptor de la línea una impedancia equivalente al valor de la impedancia característica de la línea, este comportamiento se muestra en la Fig. 4.5 y Fig. 4.6 ante valores cercanos a dicha impedancia característica.

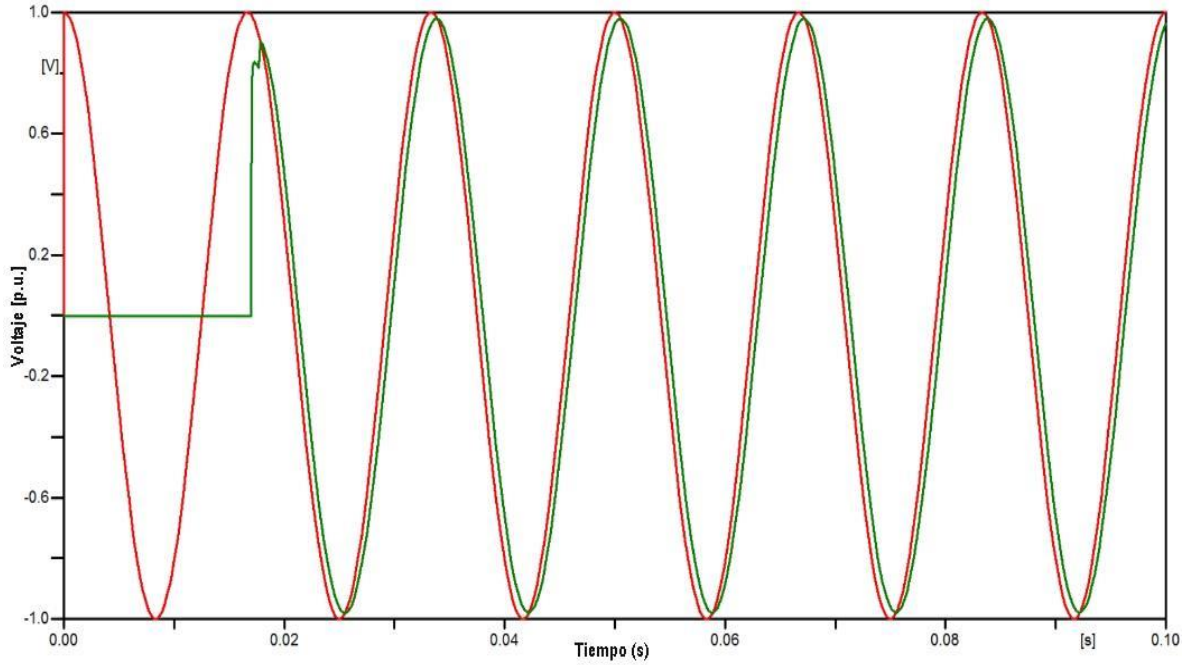


Fig. 4.5 Línea con una carga de 600 ohm.

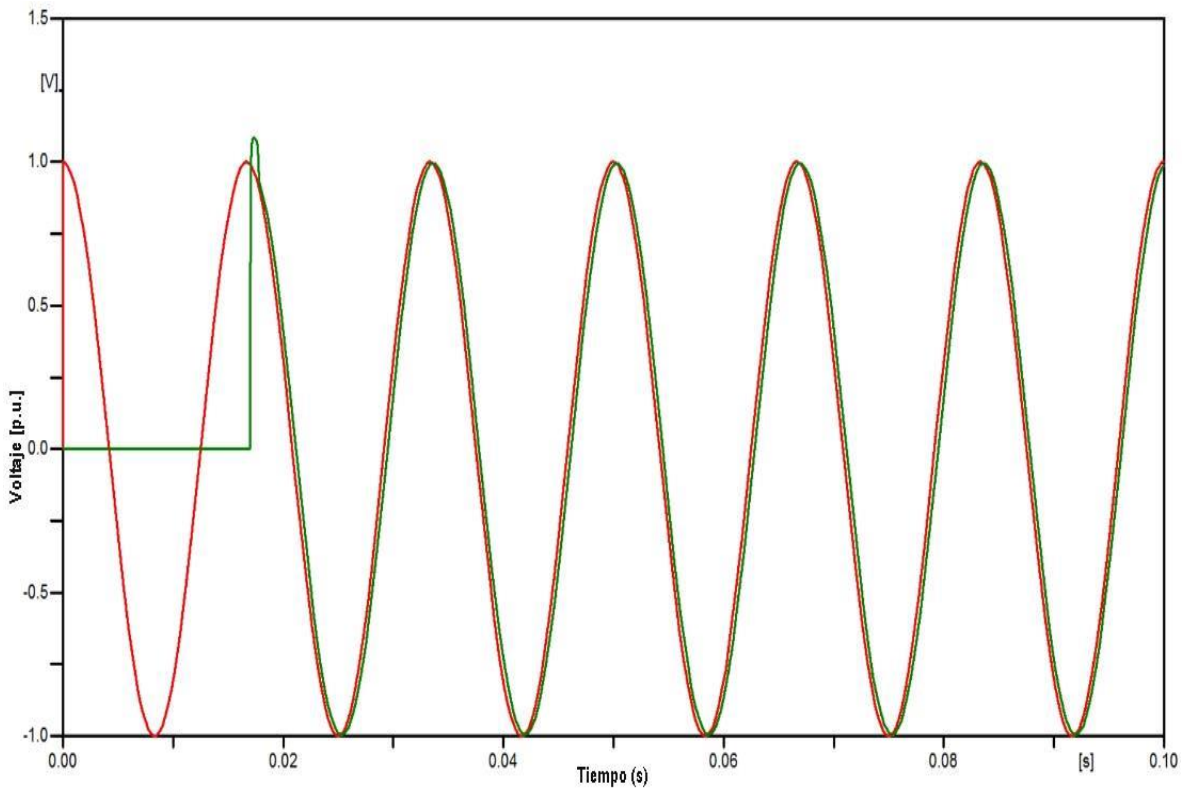


Fig. 4.6 Línea con una carga de 1000 ohm.

4.3 Circuitos Trifásicos

Las simulaciones siguientes corresponden a un sistema de dos circuitos trifásicos separados a 20 m. con sus alturas respectivas mostradas en la Fig. 4.7, los datos de simulación se muestran en la Fig. 4.8.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	1	2	0.0216	0	15	15
2	2	1	2	0.0216	3	15	15
3	3	1	2	0.0216	6	15	15
4	4	1	2	0.0216	26	20	20
5	5	1	2	0.0216	29	20	20
6	6	1	2	0.0216	32	20	20

Fig. 4.7 Especificaciones geométricas

ATP Settings

Simulation Output Format Switch/UM Load flow Variables

delta T: 1E-6

I_max: 0.3

X_opt: 0

C_opt: 0

Simulation type

Time domain

Frequency scan

Harmonic (HFS)

Power Frequency

OK Help

Fig. 4.8 Parámetros de simulación.

El circuito que se implementó en ATP/Draw utilizando el modelo de J. Martí es el que se muestra en la Fig. 4.9, se utilizó una fuente cosenoidal unitaria con una frecuencia de 60 Hz, las resistencias conectadas en los extremos receptores de ambos circuitos son lineales con magnitudes grandes para representar líneas abiertas, solo un circuito trifásico fue energizado, la separación entre circuitos es de 20 m. Las simulaciones se realizaron a través de un cierre secuencial y no secuencial de la línea de transmisión.

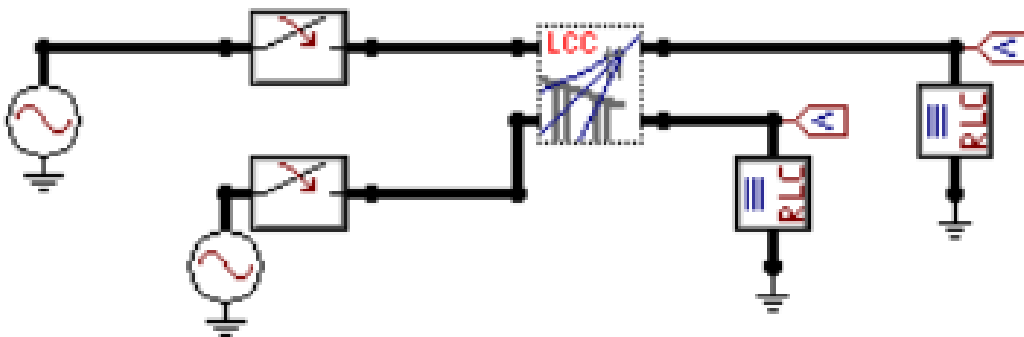


Fig. 4.9 Sistema de 2 circuitos trifásicos.

La simulación de Energización del Circuito Trifásico 1 con cierre secuencial se muestra en la Fig. 4.10

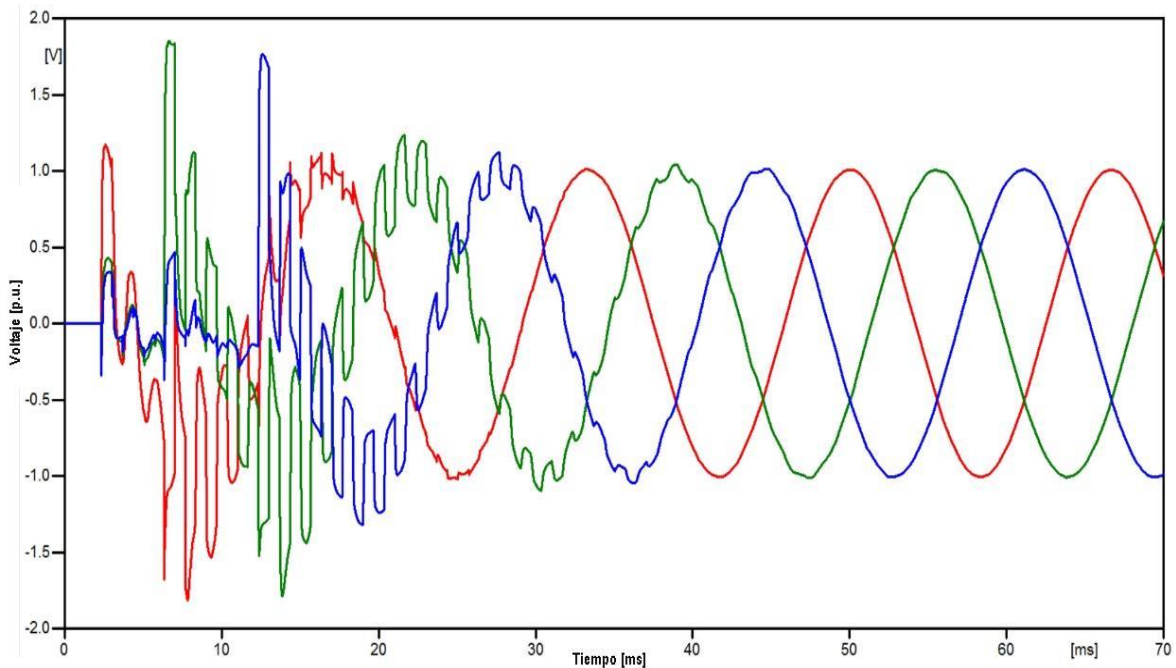


Fig. 4.10 Cierre secuencial del circuito energizado.

La simulación muestra que al cerrar secuencialmente el circuito 1, en el primer momento cuando energiza la Fase 1(en rojo), esta induce sobretensiones en las otras 2 fases; en el siguiente momento cuando se energiza la Fase 2(en verde), muestra una sobretensión que se superpone en la Fase 3(en azul); cuando se energiza la Fase 3 ésta también muestra una sobretensión que se superpone a las inducidas de las otras fases previamente energizadas. Las sobretensiones ocasionadas por el acoplamiento electromagnético pueden generar mayores sobretensiones transitorias.

La Fig. 4.11 y Fig.4.12 muestran las sobretensiones inducidas al circuito 2 el cual no se encuentra energizado, estas tensiones inducidas se mantienen estables todo el tiempo en que el circuito 1 este energizado. La simulación muestra que al momento de energizar el circuito 1 secuencialmente, éste genera sobretensiones inducidas en cada una de las fases del circuito 2; en cada momento de cierre de las fases del circuito 1, se presenta un incremento en las sobretensiones inducidas.

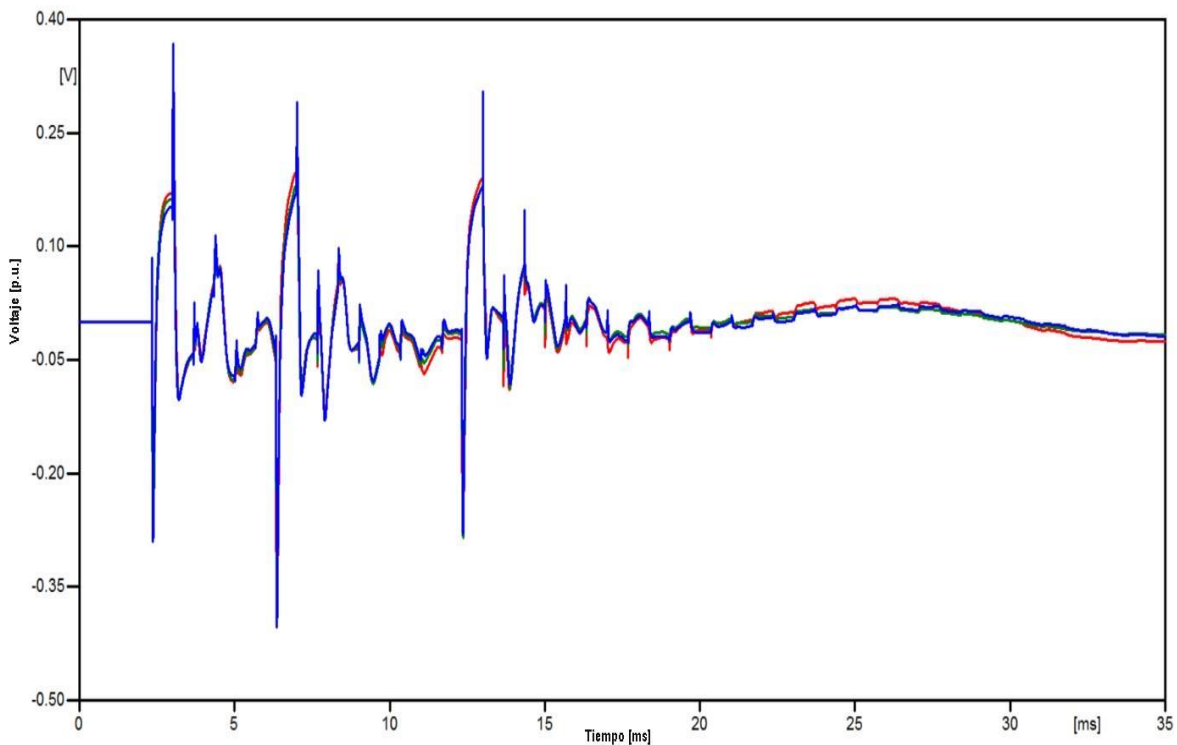


Fig. 4.11 Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

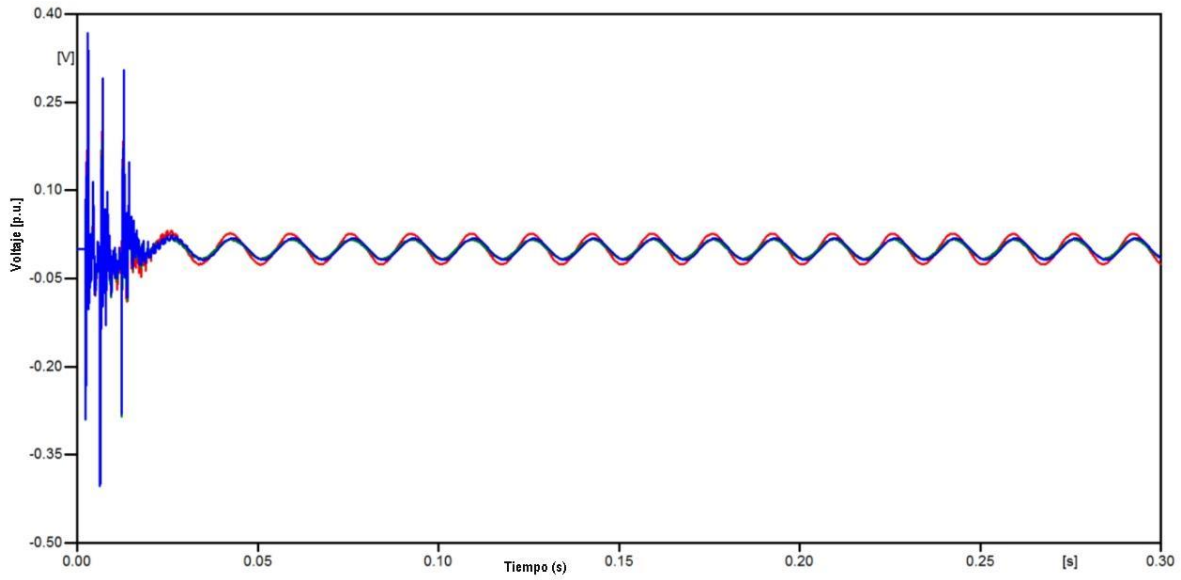


Fig. 4.12 Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

La simulación de energización del circuito 1 con cierre secuencial conectando en el extremo receptor de cada una de sus fases valores de resistencia de 1000 ohms, hace que se amortigüen las sobretensiones transitorias, la Fig. 4.13 muestra los resultados obtenidos.

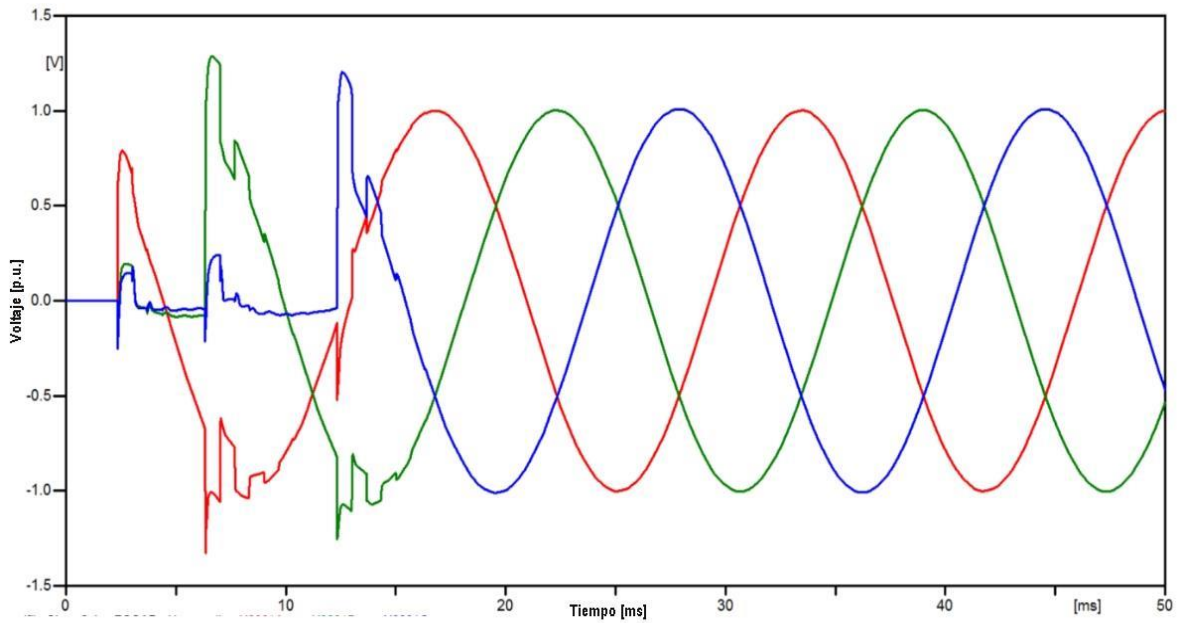


Fig. 4.13 Energización con carga de 1000 ohms.

La simulación muestra una reducción de las sobretensiones para cada una de las fases, además se redujo el tiempo de estos de manera muy significativa. Las sobretensiones inducidas al circuito 2 se muestran en la Fig. 4.14 y Fig. 4.15, las cuales han disminuido comparadas con las que se presentan en las Fig. 4.11 y Fig. 4.12.

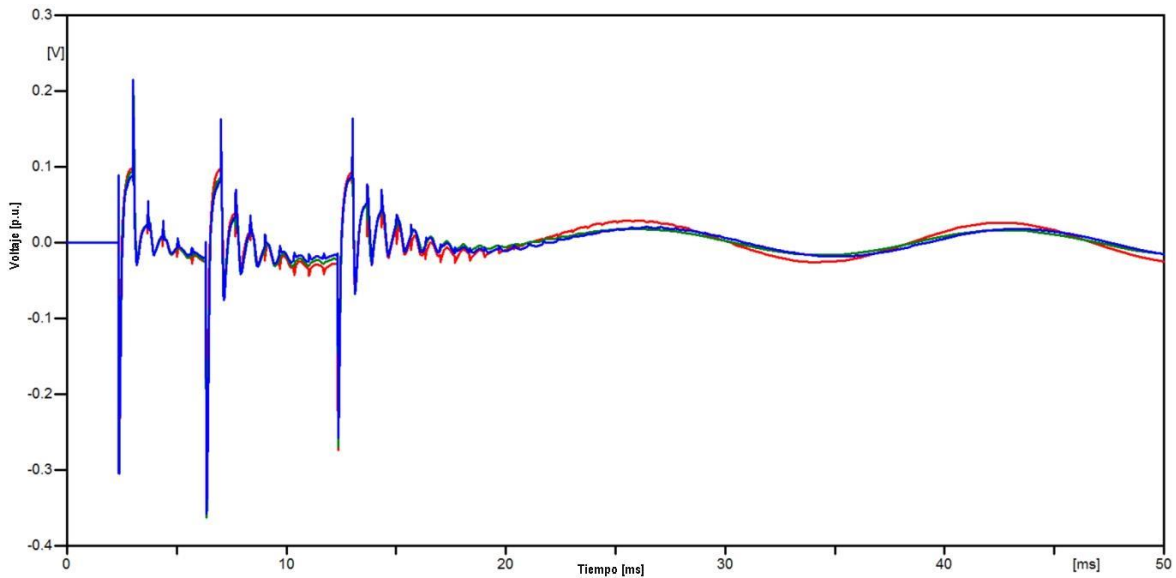


Fig. 4.14 Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

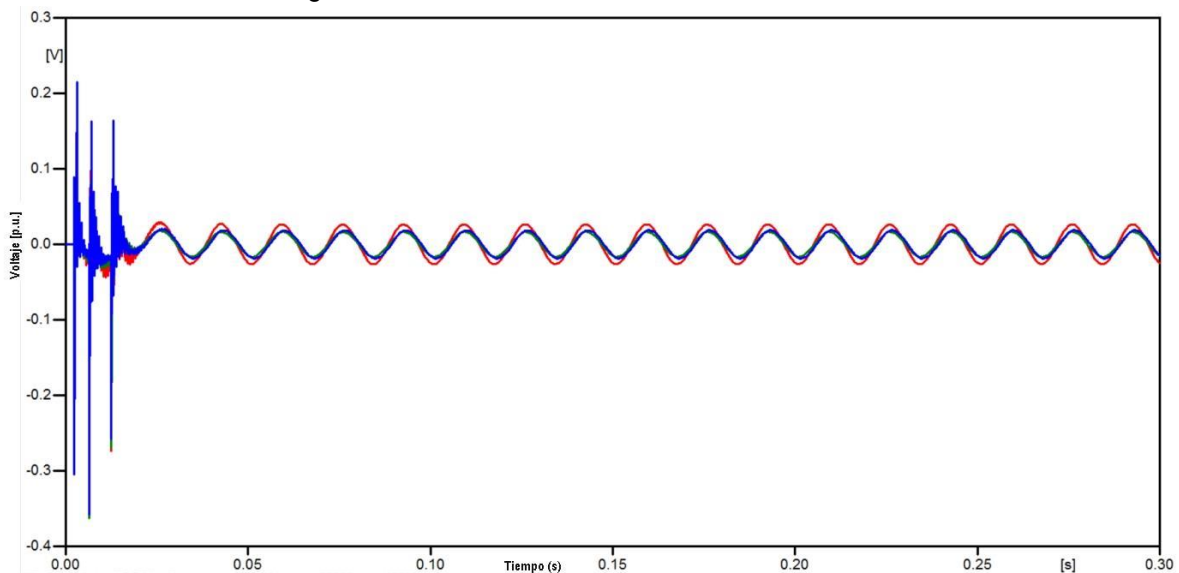


Fig. 4.15 Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

La Fig. 4.16 muestra las sobretensiones transitorias debido a una energización completa en el mismo instante de tiempo para las tres fases del circuito 1, se puede notar que comparadas con las obtenidas en el caso del cierre secuencial presentan menores oscilaciones y magnitudes entre ellas, así como en las inducidas en el circuito 2. Las Fig. 4.17 y Fig. 4.18 muestran las sobretensiones inducidas en el circuito 2 en cada una de sus fases.

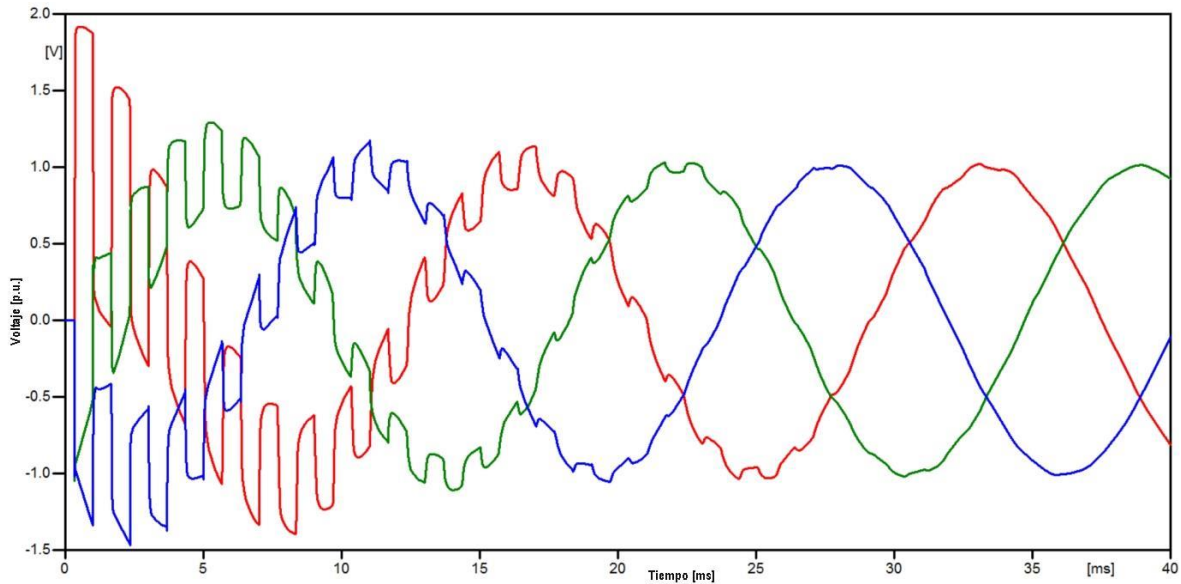


Fig. 4.16 Energización de la línea de transmisión

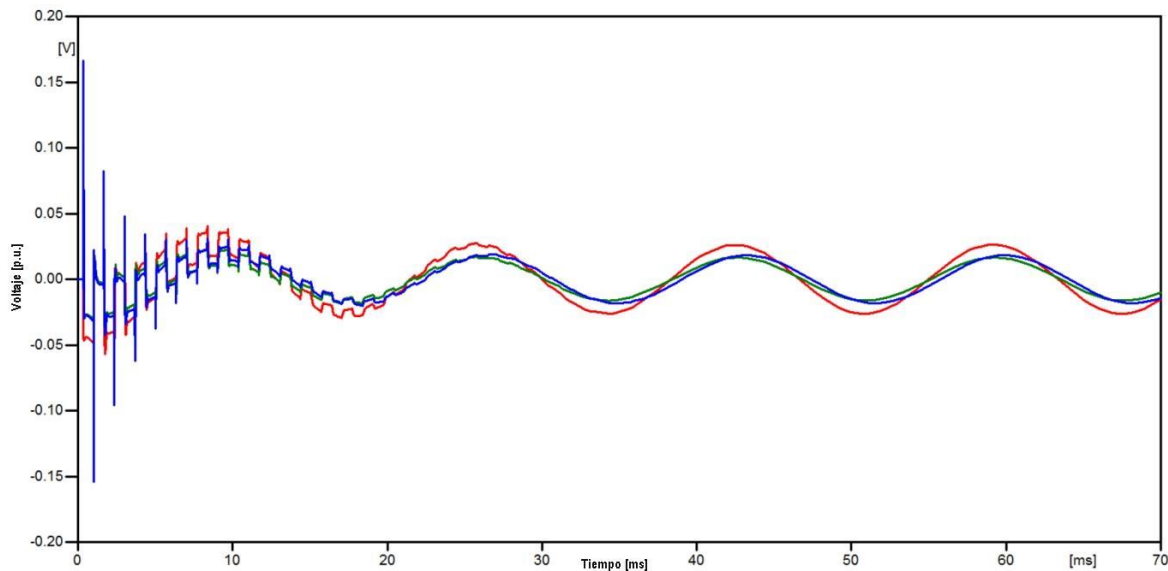


Fig. 4.17 Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

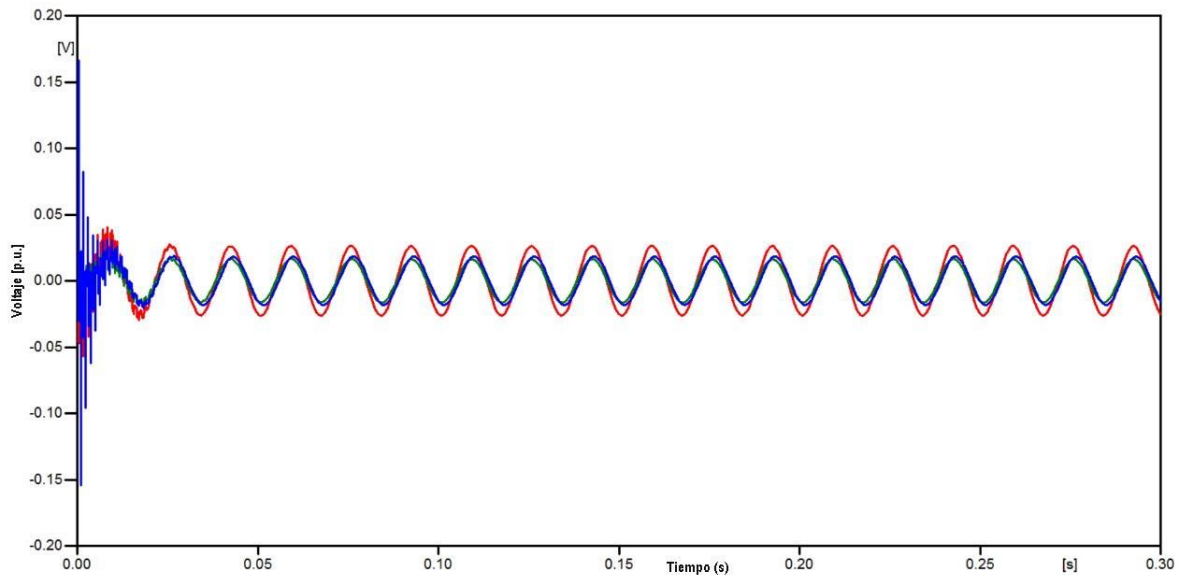


Fig. 4.18 Sobretensiones inducidas en el circuito 2.

4.3.1 Sistema de 3 Circuitos Trifásicos

Esta simulación modela un sistema de 3 circuitos trifásicos energizados, con la presencia de una descarga atmosférica que impacta en la fase A del circuito 1, las demás fases del sistema se encuentran desenergizadas con el objetivo de únicamente ver la sobretensión transitoria ocasionada por la descarga atmosférica. Se consideran puros elementos resistivos al final de cada fase representando el sistema en vacío. Como primer caso se modela el sistema sin apartarrayos en la fase A, como segundo caso el apartarrayos es incluido. La Fig. 4.19 y Fig. 4.20 muestran la topología implementada. La Fig. 4.21 y Fig. 4.22 muestran la configuración eléctrica y los datos de simulación utilizados.

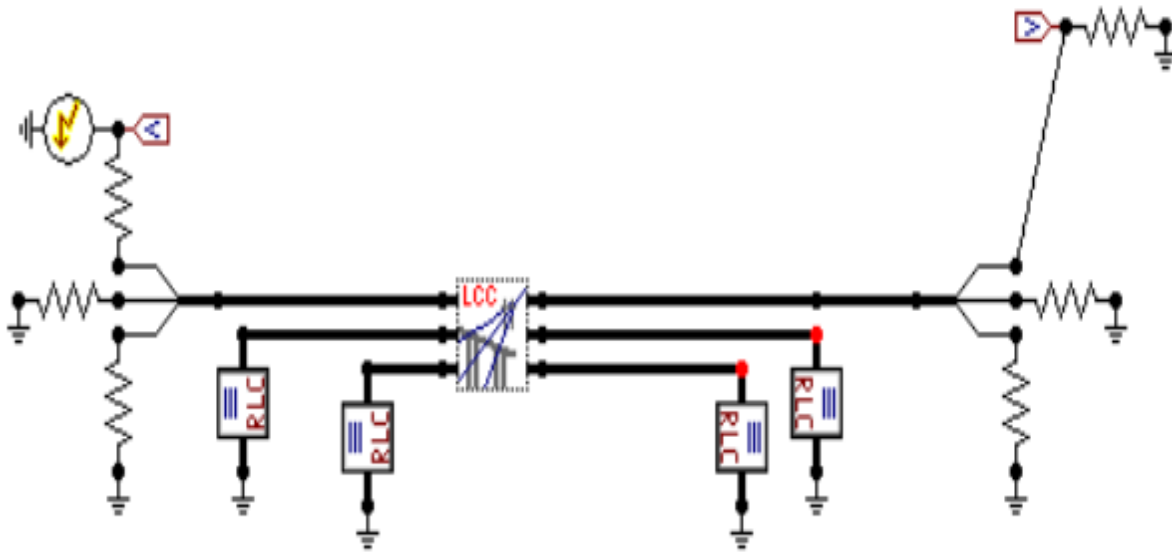


Fig. 4.19 Fase A del circuito 1 energizada sin apartarrayos

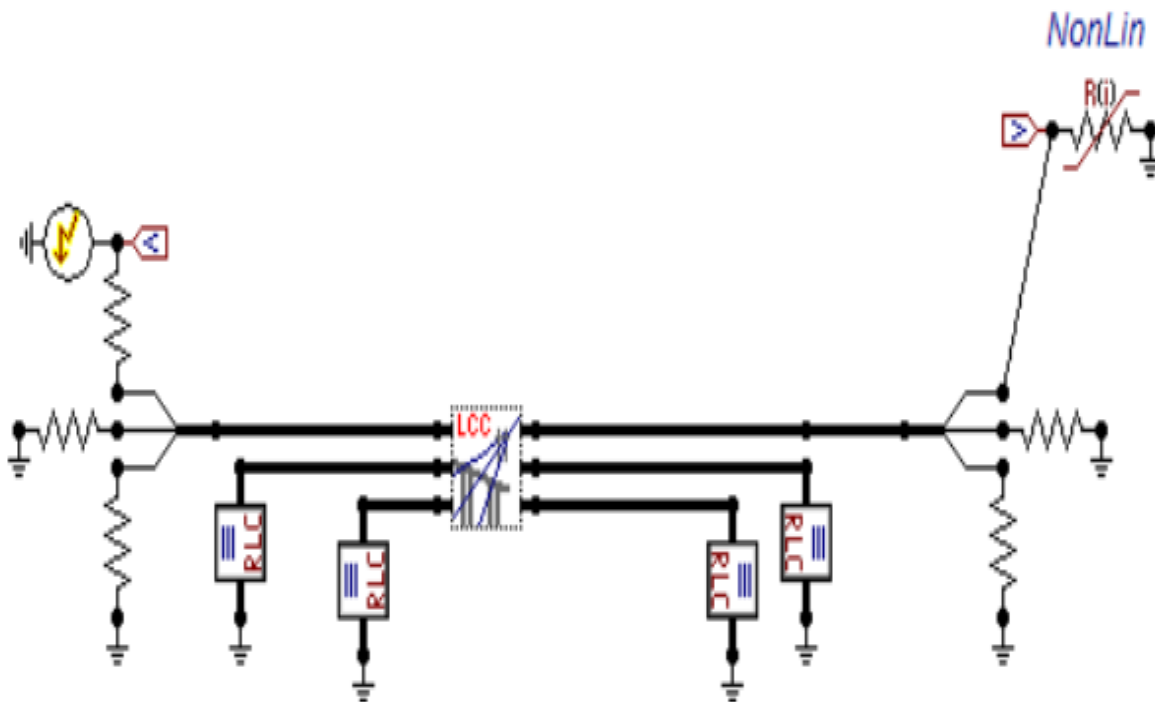


Fig. 4.20 Fase A del circuito 1 energizada con apartarrayos

Line/Cable Data: Descarga_9phss

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	1	2	0.0216	0	16	16
2	2	1	2	0.0216	6	26	26
3	3	1	2	0.0216	12	16	16
4	4	1	2	0.0216	33	27	27
5	5	1	2	0.0216	30	20	20
6	6	1	2	0.0216	33	13	13
7	7	1	2	0.0216	42	27	27
8	8	1	2	0.0216	45	20	20
9	9	1	2	0.0216	42	13	13

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Fig. 4.21 Parámetros de los 3 circuitos trifásicos.

ATP Settings

Simulation Output Format Switch/UM Load flow Variables

delta T: 1.2E-7

I_{max}: 0.0016

X_{opt}: 0

C_{opt}: 0

Simulation type

Time domain

Frequency scan

Harmonic (HFS)

Power Frequency

OK Help

Fig. 4.22 Parámetros de simulación

La Fig. 4.23 y Fig. 4.24 muestran el comportamiento de la sobretensión producida por el impacto de una descarga atmosférica en la fase A del circuito 1 con y sin apartarrayos, se puede ver la atenuación que presenta la señal, así como los cambios en su forma de onda.

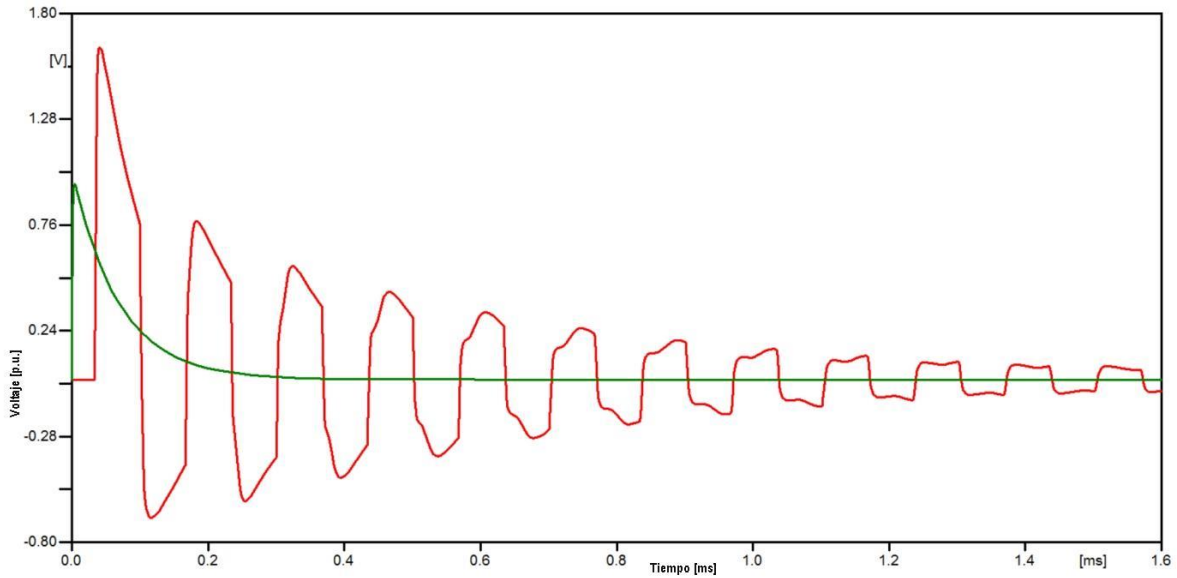


Fig. 4.23 Sobretensiones en la fase A del circuito 1 sin apartarrayos.

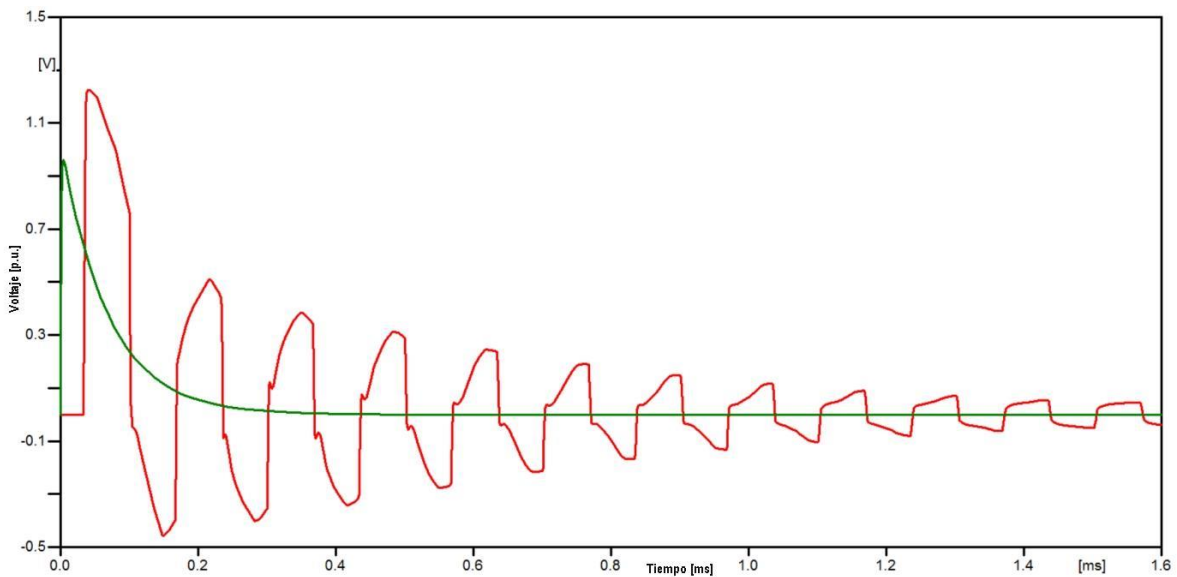


Fig. 4.24 Sobretensiones en la fase A del circuito 1 con apartarrayos.

La Fig. 4.25 muestra un sistema con 4 líneas de transmisión monofásicas involucradas de acuerdo a la topología mostrada

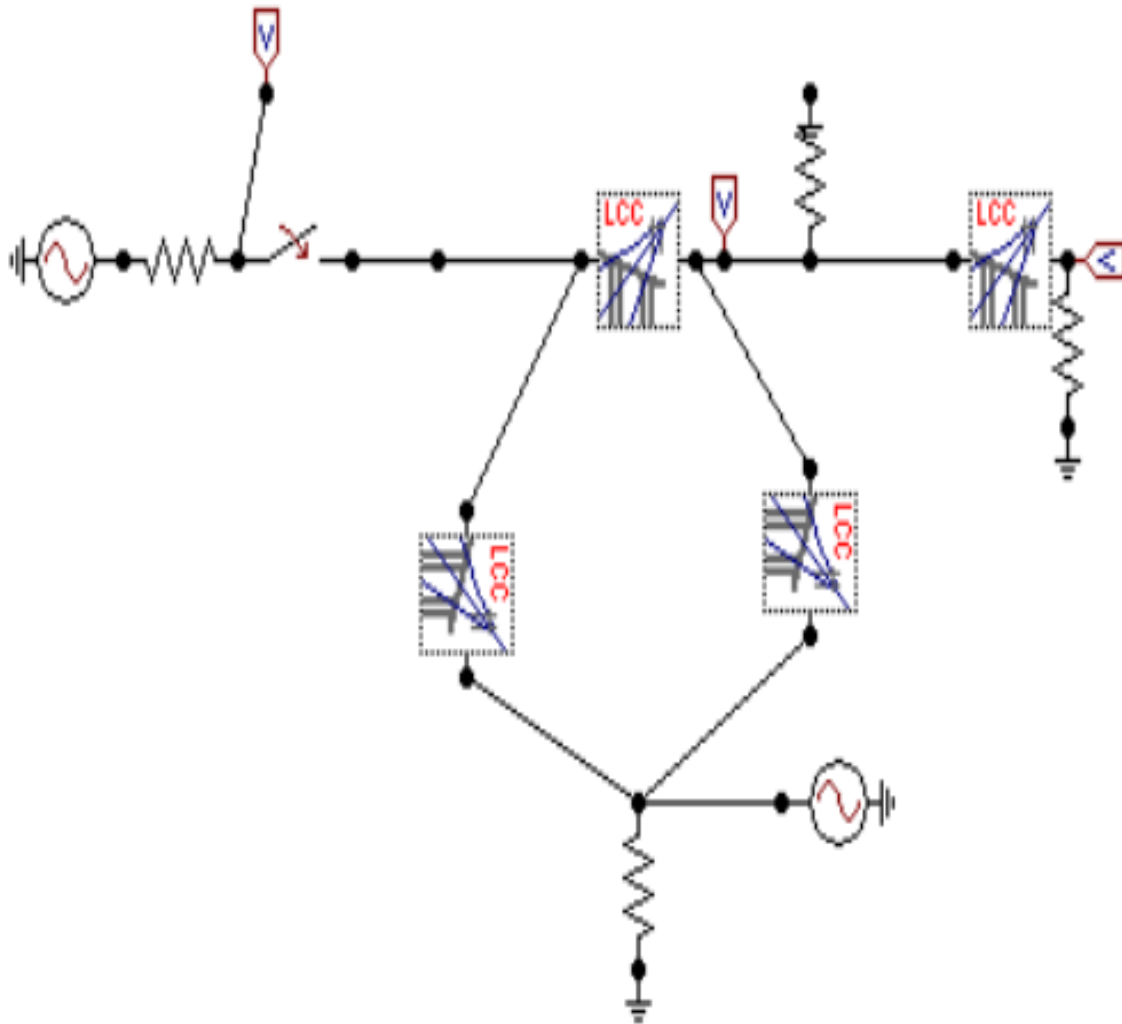


Fig. 4.25 Sistema de transmisión monofásico.

La Fig. 4.26 muestra los resultados obtenidos al inicio y final de la última línea de transmisión del sistema. Cada línea es de 100 km por lo que el extremo receptor final del circuito se encuentra a una distancia de 200 km. Se puede observar que las sobretensiones medidas a una distancia mayor son mayores en magnitud que a una distancia menor debido al efecto capacitivo que se presenta en las líneas.

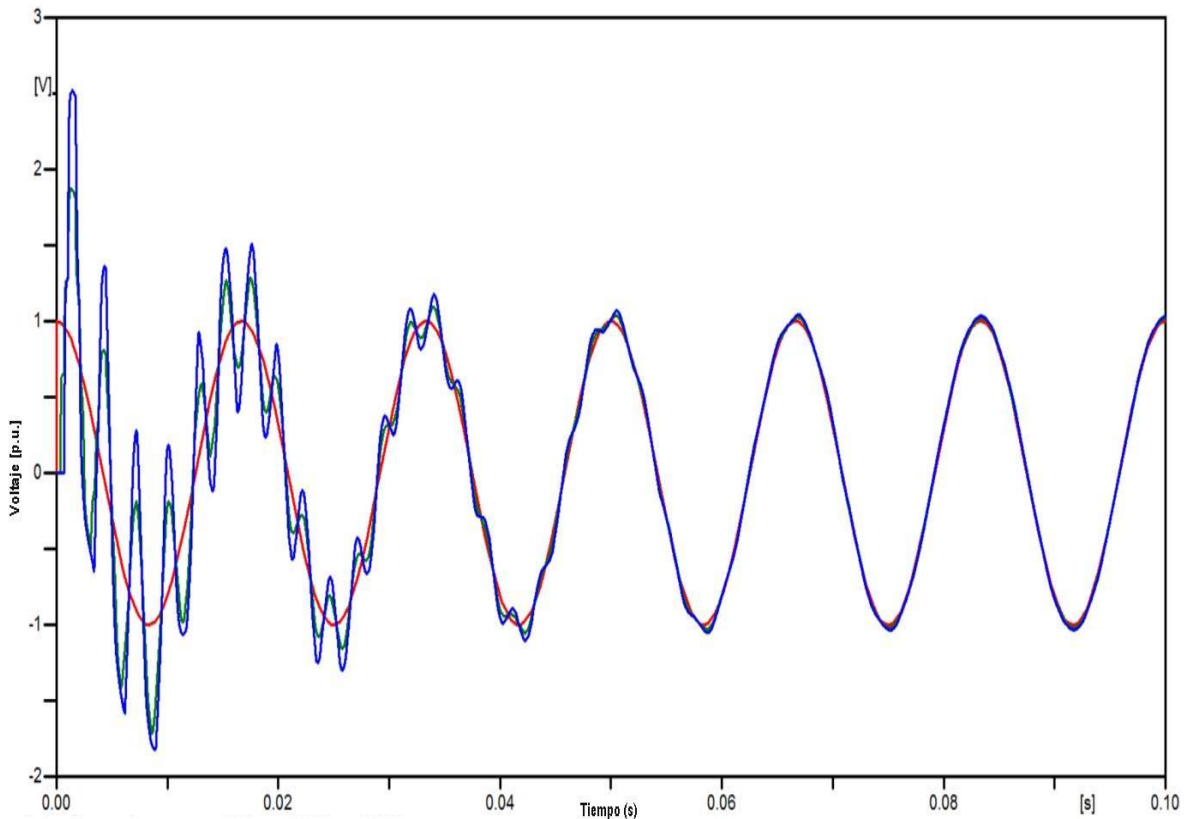


Fig. 4.26 Resultado de Simulación a 100 Km. y 200 Km.



Conclusiones

Los transitorios electromagnéticos en los sistemas de potencia continuamente se presentan debido a los cambios instantáneos en la topología o impacto de descargas atmosféricas, las modernizaciones en el sistema, así como el aumento de líneas o cualquier otro elemento del sistema deben ser considerados en los estudios respectivos para su cuantificación de la severidad de este fenómeno eléctrico, es de suma importancia el estudio y simulaciones de los transitorios con el fin de conocer el comportamiento que tienen los componentes del sistema de potencia, donde se implementan eficientemente los componentes para mitigar el efecto. Reduciendo así el severo daño al equipo y aumentando su vida útil en la red, así como su confiabilidad.

Los casos de estudio que se simularon fueron:

- Comportamiento transitorio de una línea de transmisión monofásica energizada en vacío.
- Cierre secuencial y desenergización de la línea en vacío y con carga.
- Simulación de descargas atmosféricas directa a una línea de transmisión con y sin apartarrayos dentro de un sistema de 3 circuitos trifásicos.
- Simulación y respuesta transitoria de un sistema monofásico anillado para ver el comportamiento y conocer qué punto es posible mitigar.

Obtenido así casos bases estables que se pueden aplicarse a casos con diferentes escenarios y configuraciones.



Referencias

- [1] Charles F. Scoot "Nikola Tesla's Achievements in the Electrical Art"
- [2] CFE "Manual de operaciones subestación de potencia pie de la cuesta subárea de transmisión guerrero" 2011
- [3] S. Olivos "Implementación de un modelo en el dominio de la frecuencia para el análisis de líneas de transmisión de estado transitorio. BUAP., 2017.
- [4] M. Arellano "Evaluación de sobretensiones por maniobras en la restauración de sistemas de transmisión aplicando un método en el dominio de la frecuencia" E.S.I.M.E. - I.P.N., 2006
- [5] J. R. Martí "Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations" IEEE Tran. on Power App. and System Vol. PAS-101 No, pp. 147-155, Jan, 1982.
- [6] A. Greenwood "Electrical Transients in Power Systems". Second edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [7] A. Semlyen and a. Dabuleanu, "Fast and Accurate Switching transient Calculations on Transmission Lines with Ground Return Using Recursive Convolutions" IEEE Trans Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94 Mqarch/April 1975.
- [8] ATPDRAW version for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista User Manual, November 2009.
- [9] L. H Restrepo, Modelos de Líneas de Transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. Trabajo de Grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle Cali-Colombia, 2008.
- [10] Electromagnetic Transient Program (EMPT-Theory Book)), Portland, USA. July 1995.
- [11] P. Moreno, P. Gómez and José L. Naredo and J, L Guardado " Frequency Domain Transient Analysis of Electrical Networks Including Non-Linear Conditions" Electrical Power and Energy Systems 27 (2005) 139-146.
- [12] P. Moreno, P. Gómez and José L. Naredo "Frequency Domain Transient Analysis Nonuniform Lines With Incident Field Excitation" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20 No 3, July 2005.



- [13] SHENKMAN, ArieH "Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook". Ed, Springer. Netherlands. 2005
- [14] VANDER SLUIS, Lou" Transients in Power Systems" Ed. John Willey and Sons. England. 2001
- [15] H. W. Dommel, "*Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single an Multiphase Networks*", IEEE 68 TP 657-PWR, Summer Power Meeting, Chicago, 1968. CAP.2
- [16] A. Budner, "*Introduction of Frequency Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program*", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, pp. 88-97, January 1970. cap. 17
- [17] J. K. Snelson, "*Propagation of Travelling Waves on Transmission Lines-Frequency Dependent Parameters*", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, pp. 85-91, January/February 1972. Cap. 2
- [18] J. R. Martí, "*Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations*", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147-157, January 1982.
- [19] J. L. Naredo, P. Moreno, A. Soudack and J. R. Martí, "*Frequency Independent Representation of Transmission Lines for Transient Analysis Through the Method of Characteristics*", Proc. of The Athens Power Tech. 1993, NTUA IEEE/PES Joint International Power Conference 1993, Athens, Greece, vol. 1, pp. 28-32, September 5-8 1993.
- [20] H. W. Dommel, "*Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks*", IEEE 68 TP 657-PWR, Summer Power Meeting, Chicago, 1968.
- [21] L. Martí, "*Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency-Dependent Modal Transformation Matrices*", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1099- 1110, July 1988.
- [22] F. Castellanos and J. R. Martí, "*Phase Domain Multiphase Transmission Line Models*", Proc. of the International Conference on Power Systems Transients, pp. 17-22, Lisbon, Portugal, September 1995.
- [23] J. W. Cooley, J. W. Tukey, "*An Algorithm for the Machine Computation of the Complex Fourier Series*", Mathematics of Computation, vol. 19, pp. 297-301, April 1965.



- [24] D. J. Wilcox, “*Numerical Laplace Transformation and Inversion*”, Int. J. Elect. Enging. Educ., vol. 15, pp. 247-265, 1978.
- [25] L. M. Wedepohl, “*Power System Transients: Errors Incurred in the Numerical Inversion of the Laplace Transform*”, Proc. of the 26th Midwest Symposium on Circuits and Systems, August 1983.