



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

"SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**ANÁLISIS DE MODELOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DE
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

ANDRÉS RAMIRO TIRADO TRUJILLO
andres.tirado88@gmail.com

DIRECTOR: Ing. LUIS RUALES CORRALES
luis.ruales@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2013

DECLARACIÓN

Yo, Andrés Ramiro Tirado Trujillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Andrés Ramiro Tirado Trujillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Ramiro Tirado Trujillo, bajo mi supervisión.

Luis Ruales Corrales

Luis Dután Amay

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la EPN por permitirme ser parte de esta prestigiosa institución, al Ing. Luis Ruales por su ayuda y colaboración como profesor y director de tesis, también agradezco enormemente al Ing. Luis Dután por su invaluable ayuda en la guía y desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi Dios por nunca abandonarme y siempre darme la fuerza de seguir adelante, a mi familia que siempre estuvo ahí en especial a mis padres y a todas esas personas especiales que de una u otra forma me han ayudado y acompañado en mi carrera universitaria ya fuese al principio en el camino o al final de esta etapa de mi vida. ATT.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
CONTENIDO.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	ix
INDICE DE TABLAS.....	xii
GLOSARIO DE TERMINOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
PRESENTACIÓN.....	xv
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2 ALCANCE.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	3
1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	3
CAPÍTULO 2.....	5
2. CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	5
2.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.....	5
2.2 SISTEMA INTERCONECTADO.....	5
2.3 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	6
2.4 PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	7
2.5 MÉTODO DE LAS IMÁGENES PARA CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MULTIFASE.....	10
2.5.1 MATRIZ DE IMPEDANCIA SERIE.....	12
2.5.2 MATRIZ DE CAPACITANCIA EN PARALELO.....	17
2.6 PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA UN CONDUCTOR EQUIVALENTE DE FASE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MULTIFASE.....	19
2.6.1 ELIMINACIÓN DEL CABLE DE GUARDA.....	19
2.6.2 CONDUCTOR EQUIVALENTE DE UN HAZ DE CONDUCTORES.....	21
2.6.3 REDUCCIÓN DE MATRICES DE IMPEDANCIA SERIE Y CAPACITANCIA EN PARALELO DEBIDO A UN CONDUCTOR EQUIVALENTE DE FASE.....	24

2.7 PARÁMETROS DE SECUENCIA POSITIVA Y CERO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BALANCEADAS.....	25
2.7.1 PARÁMETROS DE SECUENCIA POSITIVA Y CERO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN TRIFÁSICAS DE CIRCUITO SIMPLE.....	26
2.8 PARÁMETROS MODAL.....	29
2.9 ONDAS VIAJERAS.....	32
2.9.1 REFLEXIONES Y REFRACCIONES DE ONDAS VIAJERA EN LÍNEAS ABIERTAS.....	32
2.9.2 DIAGRAMA DE LATTICE.....	32
2.10 SOBREVOLTAJES Y TRANSITORIOS.....	34
2.10.1 SOBREVOLTAJES DE BAJA FRECUENCIA:.....	34
2.10.2 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS:.....	35
2.10.3 RANGO DE FRECUENCIAS DE SOBREVOLTAJES.....	37
2.11 MODELOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	39
2.11.1 SOLUCIONES EN ESTADO ESTABLE.....	40
2.11.2 SOLUCIONES EN ESTADO TRANSITORIO.....	43
CAPÍTULO 3.....	57
3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ATP.....	57
3.1 SOFTWARE ATP.....	57
3.1.1 MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ATP.....	59
3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA DE IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	59
3.2 SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN DE 500 KV.....	60
3.2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN DE 500 KV A SIMULARSE.....	60
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS TORRES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 500 KV.	63
3.2.3 COMPOSICIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 KV SIMULADO.....	64
CAPÍTULO 4.....	65
4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN. 65	
4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	65
4.1.1 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.....	66
4.1.2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	69
4.1.3 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CABLE DE GUARDA EN ENERGIZACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS CONSTANTES EN FUNCIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.....	71
4.1.4 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CABLE DE GUARDA EN ENERGIZACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA EN FUNCIÓN RESISTIVIDAD DEL SUELO Y SU LONGITUD.....	72
4.1.5 RESPUESTA TRANSITORIA PARA LA ENERGIZACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS CONSTANTES Y PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA.....	73

4.1.6 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Y CERO PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON DIFERENTES NÚMEROS DE CONDUCTORES POR FASE.	74
4.1.7 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA PARA LOS MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y SU LONGITUD.	77
4.1.8 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO PARA LOS MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y SU LONGITUD.	82
4.2 SIMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO EN ATP.	87
4.2.1 CASOS DE ESTUDIO	87
4.2.2 RESULTADOS DE SIMULACIONES DE CASOS DE ESTUDIO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ESTUDIOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.	89
CAPÍTULO 5.....	105
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
5.1 CONCLUSIONES	105
5.2 RECOMENDACIONES.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXO A.....	112
MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL SOFTWARE ATP	112
ANEXO B.....	114
SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 KV.....	114
ANEXO C	115
CASOS DE SIMULACIÓN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 KV.....	115

INDICE DE FIGURAS

Figura2.1 Líneas de transmisión doble circuito multifase.	6
Figura2.2 Infinitesimal de línea de transmisión monofásica [4].	7
Figura 2.3 Infinitesimal de una línea de transmisión trifásica.	9
Figura2.4 Línea de Transmisión Trifásica doble circuito con haces de conductores y cable de guarda [5].	10
Figura2.5 Perfil del conductor entre torres [5].	11
Figura2.6 Configuración de la geometría de la torre para aplicación de método de las imágenes [6]. ..	12
Figura2.7 Circulación de corriente en el cable de guarda [5].	20
Figura2.8 Inclusión de resistencia de torre a torre [5].	20
Figura2.9 Configuración "T" en intervalos segmentados y segmentación interna Δ Aislada [5].	21
Figura2.10 Haz simétrico de conductores con N subconductores individuales [5].	22
Figura2.11 Línea de transmisión dc de alto voltaje.	25
Figura2.12 Línea de transmisión circuito simple trifásica transpuesta [5].	26
Figura 2.13 Diagrama de Lattice para onda viajera en varios medios con sucesivas reflexiones [8]. ..	33
Figura2.14 Forma de onda de sobrevoltaje de frente lento.	36
Figura2.15 Forma de onda de sobrevoltaje de frente rápido.	36
Figura2.16 Forma de onda de sobrevoltaje de frente extra rápido.	37
Figura2.17 Esquema de modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión.	39
Figura2.18 Modelo Circuito π - Nominal Trifásico [5].	41
Figura 2.19 Circuito equivalente del circuito PI nominal [10].	42
Figura2.20 Representación del circuito π -cascada [10].	42
Figura 2.21 Circuito π - Equivalente para soluciones de líneas de transmisión [5].	44
Figura2.22 Resistencia e Inductancia de secuencia positiva y cero de la línea trifásica en función de la frecuencia [5].	45
Figura2.23 Representación de la línea con resistencias agrupadas [5].	45
Figura2.24 Esquema de transformación entre características de fase y modal para líneas trifásicas [5].	47
Figura2.25 Energización de una línea monofásica sin pérdidas [5].	47
Figura 2.26 Circuito representativo del modelo de Bergeron.	48
Figura2.27 Circuito representativo del modelo de Bergeron.	49
Figura2.28 Fuente de voltaje conectada en m a través de una impedancia [5].	52
Figura2.29 Circuito equivalente visto desde el nodo de llegada k.	53
Figura2.30 Aproximación asintótica de la magnitud de $Z_c(\omega)$ [5].	55
Figura3.1 Estructura de 500 kV [11].	63
Figura3.2 Sistema de 500 kV simulado en ATP.	64

Figura4.1 Esquema de línea de transmisión de 345 kV.	65
Figura4.2 Respuesta de impedancia de secuencia positiva en función de la altura de las torres.	66
Figura4.3 Respuesta de Impedancia de secuencia cero en función de la altura de las torres.	67
Figura4.4 Respuesta de Impedancia de secuencia positiva en función de la Frecuencia y Resistividad del suelo.	69
Figura4.5 Respuesta de Impedancia de secuencia cero en función de la Frecuencia y Resistividad del suelo.	70
Figura4.6 Energización de Línea de Transmisión con parámetros constantes en función de la resistividad del suelo y efecto de cable de guarda.....	71
Figura4.7 Energización de Línea de Transmisión con parámetros dependientes de la frecuencia en función de la resistividad del suelo y efecto de cable de guarda.	72
Figura4.8 Energización de Línea de Transmisión con parámetros constantes en función de la resistividad del suelo y efecto de cable de guarda.....	73
Figura 4.9 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para varios conductores por fase	75
Figura 4.10 Respuesta de impedancia de secuencia cero para varios conductores por fase.	76
Figura 4.11 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 10 km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	78
Figura4.12 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 50km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	79
Figura4.13 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 200km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	80
Figura4.14 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 500km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	81
Figura4.15 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 10km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	82
Figura4.16 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 50km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	83
Figura4.17 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 200km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	84
Figura4.18 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 500km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.	85
Figura4.19 Respuesta de simulación en Estado Estable de la onda de voltaje del SNT de 500 kV medida en Subestación Chorrillos	89
Figura4.20 Respuesta de simulación en Estado Estable de la onda de voltaje del SNT de 500 kV con línea de transmisión de 350km medida en Subestación Chorrillos.	90
Figura 4.21 a. Respuesta de simulación en energización de la primera Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair- El Inga del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.	91

Figura 4.21 b. Zoom de la respuesta de simulación en energización de la primera Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair- El Inga del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.....	92
Figura4.22 Respuesta de simulación en energización de la Segunda Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.	93
Figura4.23 Respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Tisaleo del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación Tisaleo.	94
Figura4.24 Respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión Tisaleo-Chorrillos del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.	95
Figura4.25 Respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Chorrillos del SNT de 500 kV con línea de transmisión de 350km, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.....	96
Figura4.26 Respuesta de apertura de la Línea de Transmisión Tisaleo – Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación Tisaleo.	97
Figura4.27 Respuesta de apertura de línea de transmisión EL Inga-Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.	98
Figura4.28 Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.....	99
Figura4.29 Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.....	100
Figura4.30 Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado y líneas de transmisión de 350km, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.....	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valores de permeabilidad relativa de materiales	15
Tabla 2.2 Valores de conductividad eléctrica	16
Tabla 2.3 Clasificación de gama de frecuencias de voltajes [7].	37
Tabla 2.4 Procesos transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia.	38
Tabla 2.5 Clases, formas de onda y tiempos característicos de sobretensiones [7].	38
Tabla 3.1 Líneas de Transmisión para el Sistema de 500 kV [12].	60
Tabla 3.2 Bancos de reactores de extremos de línea.	61
Tabla 3.3 Características del conductor ACAR 750 para línea de transmisión de 500 kV [12].	61
Tabla 3.4 Características del cable de guarda de acero galvanizado [12].	62
Tabla 3.5 Tabla características del cable de guarda tipo OPWG [12].	62
Tabla 4.1 Valores de Impedancia de Cortocircuito y Circuito Abierto	77
Tabla 4.2 Casos de Estudio para Sistema de 500 kV simulado.	88
Tabla 4.3 Resultados y variación porcentual de valores de simulaciones de casos de estudio.	102
Tabla 4.4 Directrices para modelar líneas de transmisión.	104

GLOSARIO DE TERMINOS

ATP: Alternative Transients Program

EMTP: ElectroMagnetic Transients Program.

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineer

GIS: Gas Insolated Substation

OPGW: Optical Ground Wire

RMG: Radio Medio Geométrico

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia

SNT: Sistema Nacional de Transmisión

RESUMEN

Este proyecto se ha desarrollado para elaborar un documento práctico que permita la selección de modelos de cálculos de parámetros de líneas de transmisión para estudios en estado estable y transitorio, mediante un análisis teórico del cálculo de los parámetros fundamentales y su aplicación en modelaciones de la línea de transmisión en el dominio del tiempo y frecuencia.

Los modelos de líneas de transmisión se simulan en el software ATP (Alternative Transients Program) aplicado al futuro Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, en el cual se obtiene la respuesta de impedancia en función de la frecuencia para cada uno de los modelos. Además, se desarrolla simulaciones en estado estable, cierre y apertura de líneas de transmisión sin carga.

El análisis lleva a determinar que los modelos basados en parámetros constantes en el dominio del tiempo son los más idóneos para estudios en estado estable ya sea que utilicen parámetros concentrados o distribuidos. Para estudios de estado transitorio los modelos de parámetros distribuidos son adecuados y la selección del tipo, es decir, parámetros constantes o dependientes de la frecuencia va a depender directamente del rango de frecuencia del fenómeno a analizar, así para transitorios de frente de onda corta como son cierre y apertura de líneas de transmisión sin carga el modelo de parámetros distribuidos en función del tiempo es suficientemente exacto.

PRESENTACIÓN

El estudio de sistemas eléctricos de potencia implica un amplio conocimiento de cada uno de los componentes que lo conforman, la selección del modelo de cada componente repercute directamente en la veracidad de los resultados, como estudios donde intervienen directamente líneas de transmisión sea en estado estable o transitorio, la selección del modelo idóneo se vuelve la base de un buen estudio, por lo que tener una guía que encamine la selección del modelo a usar se vuelve necesario. El presente trabajo busca determinar un documento que brinde las directrices suficientes que oriente aquellos que empiezan en el estudio de líneas de transmisión.

Este objetivo se cristaliza mediante una investigación que se plasma en 5 capítulos. En los que se busca determinar los modelos y los criterios necesarios en la correcta selección de un modelo de línea de transmisión a través de un análisis teórico.

Los estudios realizados se lo hace a través de un software del tipo EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) aplicado al futuro Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, determinándose efectivamente los criterios necesarios en la selección del modelo de cálculo de parámetros de líneas de transmisión para estudios de sistemas eléctricos en estado estable y transitorio.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de la demanda eléctrica en el país ha determinado la necesaria ampliación del sector eléctrico motivando la construcción de grandes, medianas y pequeñas centrales de generación que satisfagan la demanda; de igual forma la construcción de líneas de transmisión a todo nivel de voltaje, ya sea para distribución o transmisión. Esto conlleva a adecuar el sistema de transmisión para permitir transportar y llegar con la energía requerida a los centros de consumo, diseño que se sustenta en estudios eléctricos, razón por la cual es de vital importancia la correcta modelación del sistema de transmisión en toda etapa sea en diseño, construcción u operación del sistema, convirtiendo la adecuada modelación en la base de un estudio veraz.

La modelación del sistema de transmisión va a permitir dimensionar correctamente los equipos de corte y protección mediante el cálculo de sobrevoltajes y sobrecorrientes en los diferentes escenarios que se puedan producir; de la misma forma, en operación una buena modelación permitirá calibrar las protecciones periódicamente ante el aumento de la demanda de operación y las fallas que se presenten en la línea de transmisión. Razón por la cual una guía básica pero con los suficientes criterios de ingeniería que permita seleccionar correctamente el modelo de línea de transmisión para cada escenario de estudio es necesario para aquellos que se inicien en estudios de sistemas eléctricos de potencia, por tal motivo, este trabajo brinda las directrices que encaminan la adecuada selección del modelo de línea de transmisión a usarse en los diferentes estudios, lo cual se cristaliza en 5 capítulos en los que se realiza una descripción teórico-matemática de los modelos de líneas de transmisión, indicando sus principales características, las diferencias entre ellas y comprobando esta teoría mediante la simulación del caso de estudio, el futuro Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV en un software del tipo EMTP.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo entre los diferentes modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión para determinar una guía idónea en la selección del modelo correcto a usarse en los diferentes estudios de sistemas eléctricos de potencia donde intervienen líneas de transmisión.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis teórico de las líneas de transmisión en el cual se describan los modelos de cálculo de parámetros y obtener las diferencias fundamentales entre los modelos que las representan.
- Realizar un análisis de la sensibilidad de la línea de transmisión ante la variación de parámetros como geometría de la torre, resistividad del suelo, efecto del cable de guarda y respuesta de impedancia en función de la frecuencia en los modelos que las representan.
- Constatar la teoría de los modelos de línea de transmisión en base a la simulación a través del programa EMTP, usando el caso de estudio del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos de las simulaciones de los diferentes modelos de cálculo de parámetros aplicados a líneas de transmisión y validar la teoría.

1.2 ALCANCE

Desarrollar una guía básica en la selección de los modelos de cálculo de parámetros de línea de transmisión, mediante la descripción teórica-matemática de dichos modelos y aplicarlos al caso de estudio, el Sistema Nacional de Transmisión de 500

kV, en el tramo comprendido entre la Central Coca Codo Sinclair y la Subestación Chorrillos, en Guayaquil.

Analizar el comportamiento de los parámetros de la línea de transmisión y determinar la respuesta del caso de estudio en estado estable, apertura y cierre de líneas de transmisión sin carga mediante el software ATP.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El desarrollo eléctrico en el país como la instalación de nuevas centrales de generación exigen sistemas de transmisión de energía más confiables a todos los distintos niveles de voltaje; con la capacidad de transportar la energía desde los centros de generación o subestaciones hasta los de centros de consumo, por lo que es de vital importancia tener un sistema de transmisión correctamente modelado, razón por la cual se vuelve necesario tener una guía básica y sencilla, pero a la vez con los suficientes criterios de ingeniería que permita seleccionar el modelo de línea de transmisión adecuado para los diferentes casos de estudio, sea en estado estable o transitorio, por lo cual este proyecto se enfoca en dar las pautas necesarias para una adecuada selección del modelo de cálculo de parámetros de líneas de transmisión ante los diferentes escenarios que pueden presentarse en un sistema eléctrico de potencia.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El Capítulo I, presenta la introducción, objetivos, alcance y justificación del presente proyecto.

El Capítulo II, presenta un análisis descriptivo de las líneas de transmisión, los parámetros fundamentales que la definen como el método de cálculo y sus diversas representaciones. Realiza la descripción de los tipos de transitorios según la Norma IEC 60071-4 y brinda una explicación del fenómeno de Ondas Viajeras. De igual

forma describe de manera teórica-matemática a los modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión que definen a la línea en su totalidad como también la técnica de solución de cada uno.

El Capítulo III, indica la descripción del software ATP y la representación de los elementos que se utilizan para la modelación del sistema considerado en el proyecto, también hace una descripción del caso de estudio, es decir, el Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

El Capítulo IV, presenta un análisis de sensibilidad de la línea de transmisión mediante simulaciones ante variación de agentes internos y externos como la geometría de la torre, la resistividad del suelo, efecto del cable de guarda y respuesta de impedancia en función de la frecuencia para los diferentes modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión. También se realiza la simulación del caso de estudio en estado estable, cierre y apertura de líneas sin carga, determinándose los sobrevoltajes producidos por los transitorios y realizándose un análisis comparativo entre los diferentes modelos.

El Capítulo V, presenta las conclusiones que se obtienen de este trabajo y recomendaciones que sirvan para futuros proyectos que vayan en la misma línea de investigación.

CAPÍTULO 2.

2. CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

2.1 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Establecer una definición única de un sistema eléctrico de potencia, es difícil por ello, internacionalmente existen conceptos aceptados por instituciones de gran importancia como el “*Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE)*” que define un sistema eléctrico de potencia como: “*una red formada por unidades generadoras eléctricas, cargas y/o líneas de transmisión de potencia, incluyendo el equipo asociado, conectado eléctricamente o mecánicamente a la red*” [1].

Otra definición del sistema eléctrico de potencia es “*red de potencia que se encarga de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica hasta los consumidores en forma eficaz segura y con calidad*” [2].

2.2 SISTEMA INTERCONECTADO

Debido a que la energía eléctrica es producida en las pequeñas y grandes centrales de generación, en la gran mayoría de casos alejados de los centros de consumo¹, el sistema interconectado es el eslabón que enlaza las centrales generadoras con los centros de consumo y también mediante interconexiones se enlaza a otros sistemas eléctricos de potencia. Así el sistema de interconectado está conformado por un conjunto de líneas de transmisión y subestaciones.

¹Centro de consumo: Lugares que presentan una gran demanda de energía eléctrica, sea para consumo industrial o residencial

2.3 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión es el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica. Por lo general, están conformadas por conductores desnudos apoyados en torres y sujetos por medio de aisladores. El aislamiento o dieléctrico entre conductores es proporcionado por el aire, entre conductores y tierra por medio de una cadena de aisladores, como se observa en la Figura 2.1.

La misión de las líneas de transmisión es la de transportar grandes bloques de energía eléctrica a grandes distancias, por ello son los elementos físicamente más extensos del sistema eléctrico.

La línea de transmisión está formada por conductores eléctricos con una disposición geométrica establecida, la cual determina las características de propagación de la energía eléctrica [3].



Figura2.1 Líneas de transmisión doble circuito multifase.

2.4 PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión tiene cuatro parámetros fundamentales que afectan su capacidad para cumplir su función como parte del sistema eléctrico de potencia: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia.

La línea de transmisión monofásica queda modelada usando los cuatro parámetros fundamentales, como indica la Figura 2.2:

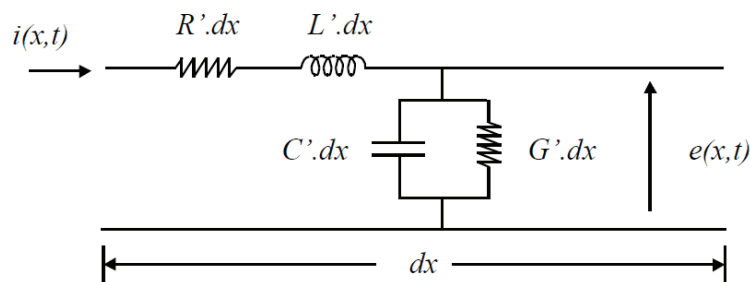


Figura2.2 Infinitesimal de línea de transmisión monofásica [4].

Dónde:

– R' : Resistencia en serie por unidad de longitud, expresada en Ω/km ;

– L' : Inductancia en serie por unidad de longitud, en H/km ;

– C' : Capacitancia en paralelo por unidad de longitud, en F/km ;

– G' : Conductancia en paralelo por unidad de longitud, en Ω^{-1}/km .

La resistencia(R)en general se define como la oposición al paso de la corriente eléctrica², en líneas de transmisión esta depende de la resistividad de los conductores, es decir, material, sección y la frecuencia³ de transmisión. En altas

² Corriente eléctrica: un flujo o desplazamiento de electrones; se mide en amperios (A).

³ Frecuencia de transmisión (f): Periodos o ciclos por segundo de una onda transmitida. La unidad es el hercio (Hz).

frecuencias, la resistencia aumenta debido al efecto piel⁴, ya que la corriente penetra sólo una pequeña capa cercana a la superficie del conductor.

La inductancia(L)“*La variación de la corriente en los conductores origina un cambio en el número de líneas de flujo magnético que enlazan el circuito. Cualquier cambio en los enlaces de flujo de un circuito induce un voltaje que es proporcional a la razón de cambio de flujo. La inductancia del circuito relaciona el voltaje inducido por el flujo variable con la razón de cambio de la corriente.*” [5]

Existe una inductancia interna generada por el propio conductor y una mutua inducida por los otros conductores que componen la línea de transmisión formando estas dos la inductancia total.

La suma del valor de resistencia e inductancia para una línea monofásica como la indicada en la Figura 2.2 dan como resultado la impedancia serie del conductor (Z').

La capacitancia(C)de la línea de transmisión se produce porque está formada por dos o más conductores separados por un aislante o dieléctrico, lo cual constituye un condensador, el mismo que almacena energía cuya capacidad depende de la geometría de los conductores, la distancia y la constante dieléctrica del material que los separa, en este caso aire. La capacitancia está distribuida a lo largo de la línea, por ello, el valor se incrementa cuanta más longitud presente y el voltaje aplicado sea mayor.

La conductancia(G)se presenta entre conductores o entre conductores y tierra, toma en cuenta las corrientes de fuga⁵ en los aisladores de las líneas de transmisión y a través del aislamiento de los cables. Generalmente, no se considera la conductancia entre conductores de una línea de transmisión porque la fuga entre los aisladores llega ser despreciable.

⁴ Efecto Piel: Aumento no uniforme de la distribución de la corriente eléctrica generalmente desde el interior al exterior debido al aumento de la frecuencia.

⁵ Corrientes de fuga: corriente que circula hacia tierra directamente, o a través de elementos conductores, en un circuito eléctricamente sano.

El análisis de la línea de transmisión requiere la solución de las ecuaciones del campo electromagnético⁶, sujetas a las condiciones de frontera impuestas por la geometría de la torre de la línea y, en general, no puede aplicarse la teoría de circuitos, ya que ésta ocupa parámetros concentrados, en tanto que en una línea de transmisión los parámetros generalmente son distribuidos.

Para una línea de transmisión trifásica los parámetros fundamentales quedan modelados a través del siguiente circuito equivalente, como se indica en la Figura 2.3 en la cual se observa los acoples entre fases.

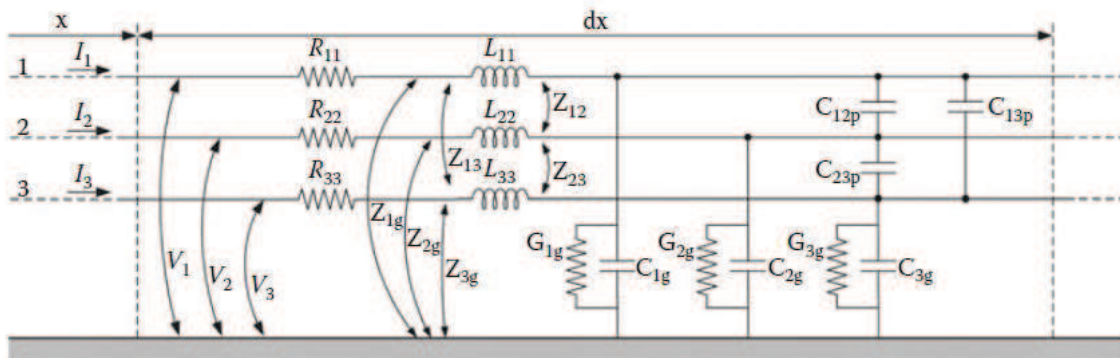


Figura 2.3 Infinitesimal de una línea de transmisión trifásica.

⁶ Campo electromagnético: es un campo físico, de tipo tensorial, producido por aquellos elementos cargados eléctricamente, que afecta a partículas con carga eléctrica.,

2.5 MÉTODO DE LAS IMÁGENES PARA CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MULTIFASE.

Una línea de transmisión multifase es aquella que está conformada por varios conductores y transporta la energía a través de varios circuitos, como se muestra en la Figura 2.4, en la cual se tiene una línea de transmisión doble circuito con dos conductores por fase y cable de guarda.

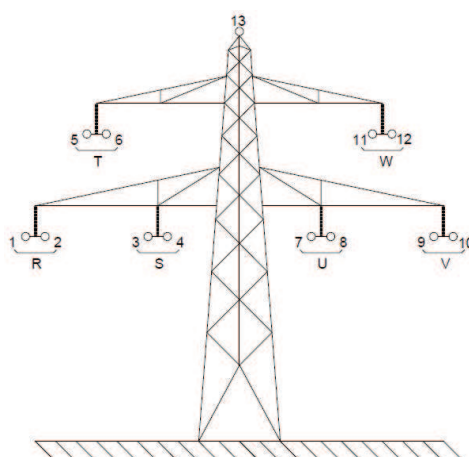


Figura 2.4 Línea de Transmisión Trifásica doble circuito con haces de conductores y cable de guarda [5].

En estudios de sistemas eléctricos de potencia surge la necesidad de determinar los valores de los parámetros fundamentales para representar correctamente la línea de transmisión dentro del SEP, el problema nace en que el cálculo de los parámetros fundamentales implica la resolución de las ecuaciones del electromagnetismo, de forma directa mediante la ecuación de Poisson o Laplace, pero, también las condiciones sobre las superficies limitadoras de estos problemas pueden establecerse mediante cargas imagen adecuadas, pudiendo entonces determinar distribuciones de potencial de forma bastante sencilla. El método de las imágenes es un procedimiento que implica la conversión de un campo eléctrico en otro equivalente más fácil de calcular, mediante la sustitución de un conductor por cargas puntuales, de modo que las superficies conductoras se sustituyen por superficies equipotenciales, es decir, al mismo nivel de voltaje.

El método de resolución para líneas de transmisión considera una tierra homogénea⁷, normalmente usada para estudios de sistemas eléctricos de potencia, además los perfiles de los conductores entre torres como muestra la Figura 2.5, tienen las siguientes características:

- a) El espaciamiento entre torres < 500 m,
- b) La catenaria(longitud del conductor entre torres)< 2000 m,

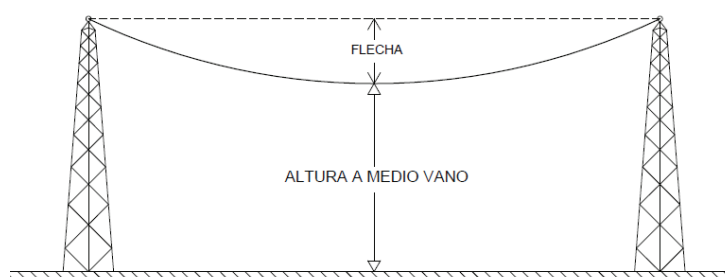


Figura2.5 Perfil del conductor entre torres [5].

La forma que toma es semejante a una parábola, por lo que la altura promedio a tierra está definida por la ecuación:

$$h = \text{altura a medio vano} + \frac{1}{3} \text{flecha} (2.1)$$

La teoría de las imágenes establece que una configuración de carga dada sobre un plano conductor perfecto e infinito conectado a tierra puede reemplazarse por la propia configuración de carga, su imagen y una superficie equipotencial en sustitución del plano conductor, como se indica en la Figura 2.6.

⁷ Tierra homogénea: Se denomina a la tierra ideal, en el que existe una sola densidad de masa.

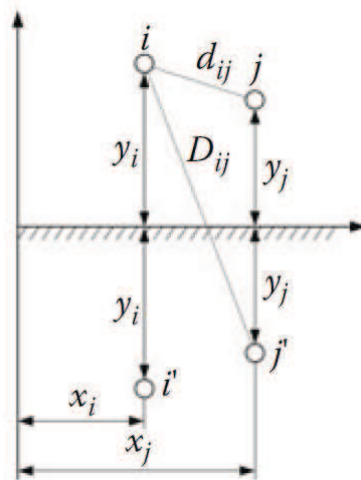


Figura 2.6 Configuración de la geometría de la torre para aplicación de método de las imágenes [6].

Mediante el método de las imágenes se determina la matriz de impedancia serie y la matriz de capacitancia en paralelo que definen los parámetros fundamentales de la línea de transmisión.

2.5.1 MATRIZ DE IMPEDANCIA SERIE

La matriz de impedancia serie describe las caídas de voltaje a lo largo de la línea de transmisión. Para un conductor individual en condiciones normales de operación primer sistema de ecuaciones diferenciales queda determinado a través de la ecuación:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = R' i + L' \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.1)$$

Mientras para una línea de transmisión multifase de n conductores, como el de la Figura 2.4, se expresa de la siguiente forma:

$$-\begin{bmatrix} \frac{dV_1}{dx} \\ \vdots \\ \frac{dV_n}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & \cdots & Z'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_{n1} & \cdots & Z'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Dónde:

$[V] =$ Matriz de voltajes en los conductores.

$[I] =$ Matriz de corrientes en los conductores

La matriz de impedancia serie $[Z']$ queda definida:

$$\begin{bmatrix} Z'_{11} & \cdots & Z'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_{n1} & \cdots & Z'_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_{11} & \cdots & R'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R'_{n1} & \cdots & R'_{nn} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L'_{11} & \cdots & L'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_{n1} & \cdots & L'_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La matriz de impedancia serie $[Z']$ es determinada a partir de la geometría de la torre y las características eléctricas de las líneas de transmisión. En general puede ser descompuesto en dos términos:

$$[Z'] = [Z'_{ext}] + [Z'_{int}] \quad (2.4)$$

Dónde:

$[Z'_{ext}] =$ matriz de impedancia externa: Representa impedancia debido a la sumatoria de los campos magnéticos exteriores, como se muestra en la figura 2.3.

$[Z'_{int}] =$ matriz de impedancia interna: Representa la impedancia debido a la resistencia interna del conductor, así como a la inductancia propia.

Considerando la configuración de n conductores arbitrarios a tierra sobre un perfecto conductor de tierra y usando el método de las imágenes la impedancia externa queda definida:

$$Z_{ext} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \begin{bmatrix} \ln \frac{D'_{11}}{r_1} & \cdots & \ln \frac{D'_{1n}}{d_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D'_{n1}}{d_{n1}} & \cdots & \ln \frac{D'_{nn}}{r_n} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dónde:

$$r_i = \text{Radio del conductor } i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

De la Figura 2.5 se tiene:

$$D'_{ij} = \sqrt{(y_i + y_j + 2p)^2 + (x_i + y_j)^2} \quad (2.6)$$

La componente compleja de la profundidad de penetración en el conductor p es definida:

$$p = \sqrt{\frac{1}{j\omega\mu_e\sigma_e}} \quad (2.7)$$

La matriz de impedancia interna se debe a que no se tiene un conductor perfecto, por lo cual se genera un campo en el interior del conductor, lo cual se transforma en una impedancia interna definida:

$$Z_{int} = \sqrt{R_{dc}^2 + Z_{HF}^2} \quad (2.8)$$

Dónde:

$$R_{dc} = \frac{1}{\pi r_c^2 \sigma_c} \quad (2.9)$$

$$Z_{HF} \approx \frac{1}{2\pi r_c \rho_c \sigma_c} \quad (2.10)$$

$$p_c = \sqrt{\frac{1}{j\omega\mu_c\sigma_c}} \quad (2.7 \text{ b})$$

Con:

$r_c = \text{radiodelconductor}$

$\mu_c = \text{permeabilidaddelconductor}^8 (\text{H/m})$

⁸ La permeabilidad μ_c se denomina a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.

$$\sigma_c = \text{conductividad del conductor}^9 (\text{S/m})$$

La Tabla 2.1 presenta valores de permeabilidad eléctrica para diferentes materiales:

Tabla 2.1 Valores de permeabilidad relativa de materiales

DIAMAGNÉTICOS	Permeabilidad Relativa (μ_r)
Bismuto	0.99983
Plata	0.99998
Plomo	0.999983
Cobre	0.999991
Agua	0.999991
PARAMAGNÉTICAS	Permeabilidad Relativa (μ_r)
Aire	1.00000036
Aluminio	1.000021
Plata	1.00002
FERROMAGNÉTICAS	Permeabilidad Relativa (μ_r)
Cobalto	250
Níquel	600
Ferroxcube 3	1500
Acero dulce	2000
Hierro con impurezas	5000
Hierro silicio utilizados en transformadores	7000 o menor
Permalloy	100 000
Hierro purificado	200 000

⁹ La conductividad eléctrica σ_c , es la medida de la capacidad de un material que deja pasar la corriente eléctrica, su aptitud para dejar circular libremente las cargas eléctricas.

La Tabla 2.2 presenta valores de conductividad eléctrica para diferentes materiales:

Tabla 2.2 Valores de conductividad eléctrica

Metal	Conductividad Eléctrica	Temperatura(°C)
	(S m⁻¹)	
Plata	6.3 x 10 ⁷	20
Cobre	5.96 x 10 ⁷	20
Cobre recocido	5.80 x 10 ⁷	20
Oro	4.5 x 10 ⁷	20-25
Aluminio	3.78 x 10 ⁷	20
Wolframio	1.82 x 10 ⁷	
Hierro	1.53 x 10 ⁷	
Semiconductores	Conductividad Eléctrica	Temperatura(°C)
	(S m⁻¹)	
Carbono	2.80 x 10 ⁴	
Germanio	2.20 x 10 ⁻²	
Silicio	1.60x 10 ⁻⁵	
Aislantes	Conductividad Eléctrica	Temperatura(°C)
	(S m⁻¹)	
Vidrio	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹⁴	
Lucita	10 ⁻¹³	
Mica	10 ⁻¹¹ a 10 ⁻¹⁵	
Teflón	10 ⁻¹³	
Cuarzo	1.33 x 10 ⁻¹⁸	
Parafina	3.37 x 10 ⁻¹⁷	
Líquidos	Conductividad Eléctrica	Temperatura(°C)
	(Sm⁻¹)	
Agua de mar	5	23
Agua Potable	0.0005 a 0.05	
Agua desionizada	5.5 x 10 ⁻⁶	

2.5.2 MATRIZ DE CAPACITANCIA EN PARALELO.

La matriz de capacitancia en paralelo casi en su totalidad es función de la geometría física de los conductores, considerando de igual forma la configuración de n conductores arbitrarios a tierra sobre un perfecto conductor de tierra. [7]

El voltaje de cada conductor a tierra es función de la carga que lleva en su línea, lo cual es expresado:

$$[V] = [P'] [q] \quad (2.11)$$

Dónde:

$[q]$ = Matriz de cargas por unidad de longitud de c /conductor i

$[P']$ = Matriz de coeficientes de potencial de Maxwell

$$[P'] = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \begin{bmatrix} \ln \frac{D_{11}}{r_1} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{r_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{r_{n1}} & \dots & \ln \frac{D_{nn}}{r_n} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dónde:

ϵ_o = permitividad¹⁰ a espacio abierto.

r_i = radio del conductor i de la figura 2.4

La relación inversa de la Matriz de coeficientes de potencial de Maxwell¹¹ da como resultado la matriz de capacitancia en paralelo $[C']$.

$$[C'] = [P']^{-1} \quad (2.13)$$

¹⁰ La permitividad (o impropriamente constante dieléctrica) es una constante física que describe como un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio. La permitividad del vacío 8.85418×10^{-12} F/m.

¹¹ Las ecuaciones de Maxwell permiten describir cualquier problema electromagnético, el análisis muestra las características fundamentales de los fenómenos y diseño en la ingeniería. Por ello, se introducen, cuando es posible, modelos que llevan a simplificar el tratamiento matemático.

Para condiciones en estado estable, el vector de cargas se relaciona con la expresión diferencial de la corriente $[-dI/dx]$ a través de la siguiente expresión:

$$[Q] = -\frac{1}{j\omega} \left[\frac{dI}{dx} \right] \quad (2.14)$$

Por lo que el segundo sistema de ecuaciones diferenciales para un conductor individual es:

$$-\frac{di}{dx} = G'v + C' \frac{dv}{dt} \quad (2.15a)$$

En general para una línea de transmisión de n conductores la ecuación queda definida:

$$-\begin{bmatrix} \frac{dI_1}{dx} \\ \vdots \\ \frac{dI_n}{dx} \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} C'_{11} & \cdots & C'_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C'_{n1} & \cdots & C'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.15b)$$

La conductancia en paralelo G' ha sido ignorada en la Ec. 2.15b, debido a que su influencia es despreciable en líneas de transmisión. Al considerarla la ecuación matricial completa es:

$$-\left[\frac{dI}{dx} \right] = [Y'] [V] \quad (2.16)$$

Dónde:

$$[Y'] = [G'] + j\omega [C'] \quad (2.17)$$

2.6 PARÁMETROS FUNDAMENTALES PARA UN CONDUCTOR EQUIVALENTE DE FASE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN MULTIFASE

El determinar los parámetros fundamentales a través de un conductor equivalente de fase y la eliminación del cable de guarda en líneas de transmisión multifase permite reducir el orden de las matrices en las ecuaciones diferenciales que la definen.

2.6.1 ELIMINACIÓN DEL CABLE DE GUARDA.

El cable de guarda es un cable ubicado en la parte superior de las torres de transmisión formando un punto en común con la torre y la tierra, suelen ser de acero de alta o extra alta resistencia mecánica, con sección transversal mucho menor que la de las fases. El número de los hilos de guarda se selecciona de modo que casi todas las caídas de rayos terminen sobre ellos en lugar sobre los conductores de fase, es decir, su función principalmente es la de proteger a las fases de la línea de descargas atmosféricas.

La eliminación del cable de guarda se lo realiza como parte del procedimiento de reducción del orden de las matrices de impedancia serie y capacitancia en paralelo.

2.6.1.1 Cable de guarda continuo

El cable de guarda es continuo cuando se conecta a cada torre, formando un punto en común con estas y tierra. Este elemento puede ser usado para determinar el voltaje inducido longitudinalmente en el conductor de guarda; debido a que las impedancias de cada conductor a tierra nunca son iguales, va existir una corriente inducida circulando por el cable de guarda, las torres y tierra, como lo indica la Figura 2.7. El efecto de la corriente circulante en el cable de guarda en condiciones normales de operación se ve reflejado en el aumento de la impedancia de secuencia positiva.

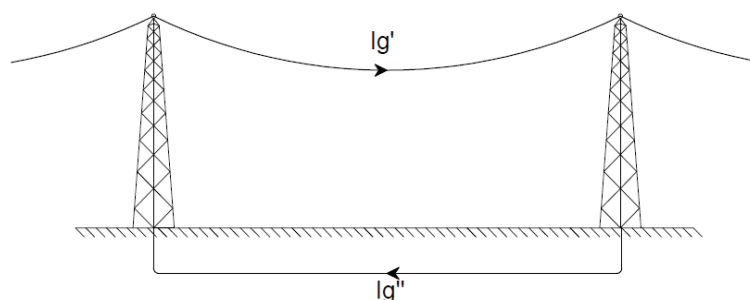


Figura2.7 Circulación de corriente en el cable de guarda [5].

Dónde:

I_g' = es la corriente inducida que circula de torre a torre.

I_g'' = es parte de la corriente I_g' que circula por tierra entre torre y torre.

Al considerar la resistencia de torre a torre, como lo indica la Figura 2.8, implica que las caídas de voltaje son iguales por la existencia de la corriente circulante en cada tramo, excepto para el inicio y llegada de la línea de transmisión ya que en esos puntos se conecta directamente a las barras de la subestación.

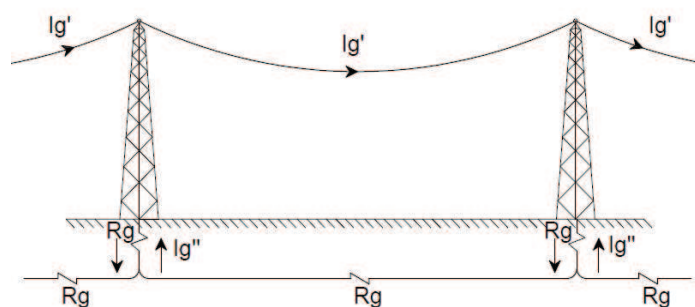


Figura2.8 Inclusión de resistencia de torre a torre [5].

2.6.1.2 Cable de guarda segmentado

Es utilizado para evitar las pérdidas relacionadas con el cable de guarda, se caracteriza por estar conectado a grupos de torres y aisladas del próximo intervalo,

con la particularidad de ambas terminar en el mismo espacio de segmentación, como lo indica la Figura 2.9, con este tipo de segmentación se ignora el efecto del cable de guarda.

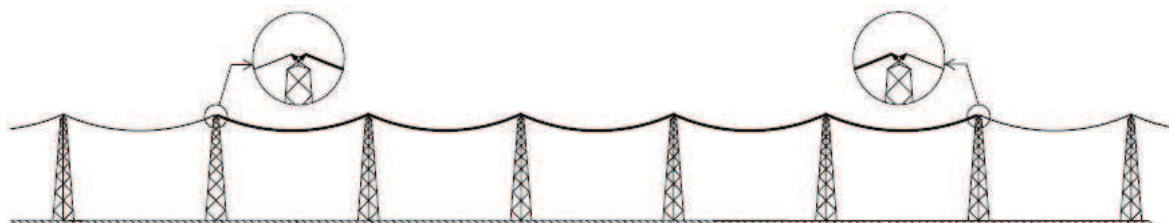


Figura2.9 Configuración “T” en intervalos segmentados y segmentación interna Δ Aislada [5].

2.6.1.3 Eliminación del cable de guarda de las matrices de impedancia serie y capacitancia en paralelo.

La reducción del orden de las matrices mediante la eliminación del cable de guarda se hace considerando el voltaje o potencial en el cable igual al de tierra, es decir, cero voltios. Para la Figura2.4 se tiene para el conductor número 13:

$$\frac{dV_g}{dx} = 0V_g = 0.$$

2.6.2 CONDUCTOR EQUIVALENTE DE UN HAZ DE CONDUCTORES

En transmisión, el uso del haz de conductores se lo realiza para no exceder la capacidad térmica de los conductores, satisfacer la demanda de potencia a transmitir de forma continua, sobrecargas de emergencia, corrientes de corto circuito y eliminar el efecto corona¹²; lo cual ayuda a disminuir las pérdidas indeseables de potencia, interferencia en las comunicaciones y el ruido audible. Cada fase consiste en dos o más subconductores que generalmente están en disposición simétrica, como se muestra en la Figura 2.10:

¹² Efecto Corona: Es el fenómeno que se produce alrededor de los cables y se manifiesta en forma de luminosidad y chispazos, debido a la ionización del aire por el alto voltaje de las líneas de transmisión. Depende del tamaño y estado de la superficie del conductor y de las condiciones atmosféricas.

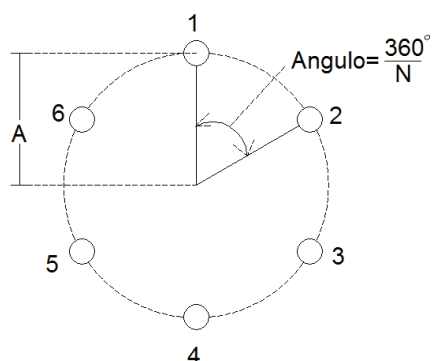


Figura2.10 Haz simétrico de conductores con N subconductores individuales [5].

Para la solución de líneas de transmisión con haces de conductores por fase, se determina un conductor equivalente por cada haz reduciéndose el orden de las matrices que la definen y simplificando el proceso de resolución.

Al determinar un conductor equivalente por el haz de conductores se considera que todos los subconductores transportan la misma cantidad de corriente y están a un mismo nivel de potencial:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_R, \quad \frac{dV_1}{dx} = \frac{dV_2}{dx} = \frac{dV_n}{dx} = \frac{dV_R}{dx}$$

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = q_R, \quad v_1 = v_2 = v_n = v_R$$

Dónde:

$1, 2, \dots, n$ = número de conductores del haz

Para determinar los parámetros fundamentales de la línea de transmisión mediante el método de las imágenes se realiza el reemplazo del haz de conductores por conductores equivalentes a través de la utilización del radio medio geométrico equivalente (RMG_{equiv}), para lo cual primero se determina el valor del radio medio geométrico (RMG):

El campo magnético interno del conductor se lo considera al reemplazar el radio r de los conductores por el RMG , el cual es incluido en tablas del fabricante.

Considerando únicamente la geometría de la torre, para un conductor sólido no magnético a bajas frecuencias, se tiene la relación:

$$\frac{RMG}{r} = e^{-\frac{1}{4}} \quad (2.18a)$$

Mientras que si el conductor es hecho de material magnético con permeabilidad μ_r :

$$\frac{RMG}{r} = e^{-\frac{\mu_r}{4}} \quad (2.18b)$$

Por lo que el radio medio geométrico equivalente (RMG_{equiv}) queda definido:

$$RMG_{equiv} = \sqrt[N]{N * RMG * A^{N-1}} \quad (2.19)$$

Dónde:

$A = \text{radio del haz}$

$N = \text{número de conductores del haz}$

2.6.3 REDUCCIÓN DE MATRICES DE IMPEDANCIA SERIE Y CAPACITANCIA EN PARALELO DEBIDO A UN CONDUCTOR EQUIVALENTE DE FASE

Al eliminar el cable de guarda y determinar los conductores equivalentes de fase la matriz de impedancia serie para la línea de transmisión de la Figura 2.4 toma el orden 6x6, y queda expresado según la Ec. 2.2:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \\ V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{RR} & Z'_{RS} & Z'_{RT} & Z'_{RU} & Z'_{RV} & Z'_{RW} \\ Z'_{SR} & Z'_{SS} & Z'_{ST} & Z'_{SU} & Z'_{SV} & Z'_{SW} \\ Z'_{TR} & Z'_{TS} & Z'_{TT} & Z'_{TU} & Z'_{TV} & Z'_{TW} \\ Z'_{UR} & Z'_{US} & Z'_{UT} & Z'_{UU} & Z'_{UV} & Z'_{UW} \\ Z'_{VR} & Z'_{VS} & Z'_{VT} & Z'_{VU} & Z'_{VV} & Z'_{VW} \\ Z'_{WR} & Z'_{WS} & Z'_{WT} & Z'_{WU} & Z'_{WV} & Z'_{WW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \\ I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix}$$

En forma general para cualquier línea de transmisión las ecuaciones diferenciales de voltaje y corriente quedan expresadas:

$$-\left[\frac{dV_{fase}}{dx} \right] = [Z'_{fase}][I_{fase}] \quad (2.2a)$$

$$-\left[\frac{dI_{fase}}{dx} \right] = j\omega[C'_{fase}][V_{fase}] \quad (2.15a)$$

Por lo tanto, para líneas de transmisión trifásicas de circuito simple compuesto por las fases A, B, C la Ec. 2.2a toma la forma:

$$-\begin{bmatrix} \frac{dV_A}{dx} \\ \frac{dV_B}{dx} \\ \frac{dV_C}{dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{AA} & Z'_{AB} & Z'_{AC} \\ Z'_{BA} & Z'_{BB} & Z'_{BC} \\ Z'_{CA} & Z'_{CB} & Z'_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2.2b)$$

Dónde:

$$Z'_{kk} = Z'_{AA} = Z'_{BB} = Z'_{CC}$$

Los elementos de la diagonal Z'_{kk} en la Ec. 2.2b corresponde a la impedancia serie propia de la fase k , para el lazo formado por la fase k con respecto a tierra; los elementos fuera de la diagonal denominados Z'_{ik} , corresponden al lazo entre las fases k e i , es decir entre dos fases de la línea.

2.7 PARÁMETROS DE SECUENCIA POSITIVA Y CERO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BALANCEADAS

Una línea de transmisión balanceada se define como aquella línea en la cual todos los elementos de la diagonal de la matriz de impedancia serie $[Z']$ y capacitancia en paralelo $[C']$ son iguales entre sí y los elementos fuera de la diagonal también lo son. La única línea que es totalmente balanceada es la simétrica bipolar *dc*. La Figura 2.11 muestra una línea de transmisión *dc* de alto voltaje:



Figura 2.11 Línea de transmisión *dc* de alto voltaje.

Por lo cual la matriz de impedancia serie queda definida de la forma:

$$[Z'] = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} \\ Z'_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix}$$

Dónde:

$$Z'_{11} = Z'_{22} = Z'_s \qquad Z'_{12} = Z'_{21} = Z'_m.$$

En líneas de transmisión balanceadas el valor de todos los elementos de la diagonal de la matriz impedancia serie es Z'_s y el valor de los elementos fuera de la diagonal Z'_m .

En la realidad, las líneas de transmisión trifásicas de circuito simple llegan a ser en medida balanceadas si la línea es transpuesta, es decir, se alternan las posiciones

de cada fase en el trayecto de la línea de transmisión, como muestra la Figura 2.12, en la cual se hallan tres secciones que pueden ser de distinta longitud. En el proceso de simulación la transposición implica que se está trabajando con líneas completamente balanceadas. La longitud de la sección puede ser mucho menor que la longitud de la onda transmitida a cierta frecuencia, es por ello, que una línea de transmisión puede ser balanceada para frecuencia de operación (60 Hz) pero no para estado transitorio.

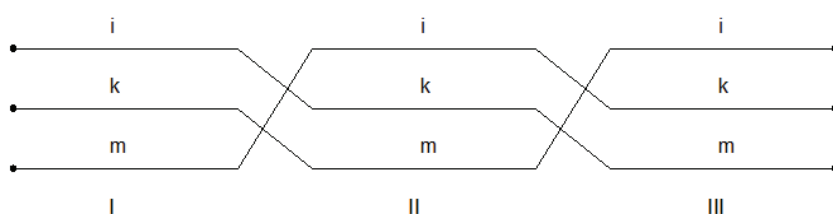


Figura2.12 Línea de transmisión circuito simple trifásica transpuesta [5].

Para líneas transpuestas el valor de los elementos Z'_s y Z'_m son el promedio de las matrices de impedancia serie de cada sección transpuesta y de forma similar los valores de la matriz de capacitancia en paralelo C'_s y C'_m son el promedio de las matrices de capacitancia en paralelo de cada sección.

2.7.1 PARÁMETROS DE SECUENCIA POSITIVA Y CERO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN TRIFÁSICAS DE CIRCUITO SIMPLE.

Los componentes simétricos $\alpha, \beta, 0$ son un método de resolución de redes polifásicas, para soluciones analíticas o analizadores de redes, sirve para cualquier sistema polifásico en el cual n ecuaciones relacionadas entre sí pueden descomponerse en n ecuaciones de vectores equilibrados e independientes.

La línea de transmisión trifásica de circuito simple balanceado se puede analizar a través de componentes simétricas con mayor facilidad, debido a que originalmente

las ecuaciones en el dominio de fase son acopladas, como se muestra en la Figura 2.3, lo cual queda expresado a través de la ecuación:

$$\left[\frac{dV_{fase}}{dx} \right] = \begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{bmatrix} [I_{fase}] \quad (2.2c)$$

Mientras que al utilizar componentes simétricas se obtiene ecuaciones desacopladas:

$$\begin{aligned} -\frac{dV_{cero}}{dx} &= Z'_{cero} I_{cero} \\ -\frac{dV_{neg}}{dx} &= Z'_{pos} I_{neg} \\ -\frac{dV_{pos}}{dx} &= Z'_{pos} I_{pos} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Para componentes $\alpha, \beta, 0$:

$$\begin{aligned} -\frac{dV_0}{dx} &= Z'_{cero} I_0 \\ -\frac{dV_\beta}{dx} &= Z'_{pos} I_\beta \\ -\frac{dV_\alpha}{dx} &= Z'_{pos} I_\alpha \end{aligned} \quad (2.21)$$

La transformación de características de fase a componentes simétricas de los voltajes y corrientes se realiza a través de la siguiente relación:

$$[V_{fase}] = [T][v_{0\alpha\beta}] \quad [v_{0\alpha\beta}] = [T]^{-1}[V_{fase}] \quad (2.22a)$$

$$[i_{fase}] = [T][i_{0\alpha\beta}] \quad [i_{0\alpha\beta}] = [T]^{-1}[i_{fase}] \quad (2.22b)$$

Dónde:

$$[v_{0\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad [i_{0\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

$$[T] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad [T]^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Las columnas en $[T]$ y $[T]^{-1}$ son normalizados, $[T]$ es ortogonal, es decir:

$$[T]^{-1} = [T]^t \quad (2.23)$$

Aplicando la transformación de características de fase en la Ec. 2.2ca componentes simétricas se obtiene:

$$-\begin{bmatrix} dV_0/dx \\ dV_\alpha/dx \\ dV_\beta/dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{s+} + 2Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z'_s - Z'_m & 0 \\ 0 & 0 & Z'_s - Z'_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Al relacionar con la Ec. 2.21, se tiene:

$$Z'_{cero} = Z'_{s+} + 2Z'_m \quad (2.25a)$$

$$Z'_{pos} = Z'_s - Z'_m \quad (2.25b)$$

Para la matriz de capacitancia en paralelo en líneas de transmisión trifásicas balanceadas se diagonaliza en componentes $\alpha, \beta, 0$, obteniéndose:

$$C'_{cero} = C'_{s+} + 2C'_m \quad (2.26a)$$

$$C'_{pos} = C'_s - C'_m \quad (2.26b)$$

2.8 PARÁMETROS MODAL

Los parámetros modal son otro método de resolución, el cual permite tener ecuaciones desacopladas a partir de ecuaciones acopladas y trabajar con estas como si se tratasen de líneas monofásicas, sin importar si son líneas balanceadas o desbalanceadas, es decir líneas transpuestas o sin transposición. La transformación a parámetros modal se deriva de la teoría de eigenvectores y eigenvalores¹³.

El significado físico de modal se deduce de las matrices $[T_i]$ y $[T_v]$, por ejemplificar si la columna 2 de $[T_i]$ es $(-0,6 \quad 1,0 \quad -0,4)$ se tiene que el flujo de corriente en la fase B tiene una dirección, con 60% de retorno por la fase A y 40% de retorno por la fase C.

Para el análisis de parámetros en características modal se utiliza el subíndice "fase" a los valores hasta ahora descritos para diferenciarlos de los parámetros "modal". El desarrollo empieza a partir de las Ec. 2.2 y 2.16.

$$-\left[\frac{dV_{fase}}{dx}\right] = [Z'_{fase}][I_{fase}] \quad (2.2)$$

$$-\left[\frac{dI_{fase}}{dx}\right] = [Y'_{fase}][V_{fase}] \quad (2.16)$$

Dónde:

$$[Y'_{fase}] = j\omega[C'_{fase}], \text{ si la conductancia en paralelo es ignorada.}$$

Mediante el reemplazo de la primera ecuación respecto a x en la segunda ecuación, se obtiene una ecuación de segundo orden respecto al voltaje:

$$\left[\frac{d^2V_{fase}}{dx^2}\right] = [Z'_{fase}][Y'_{fase}][V_{fase}] \quad (2.27)$$

De forma similar para la corriente:

¹³Eigenvectores y eigenvalores: La palabra "eigen" es la palabra alemana para "propio", por ello son también llamados vectores propios y valores propios pertenecientes a la algebra lineal, los cuales son usados para resolver problemas de ingeniería

Teoría de eigenvectores y eigenvalores: Se tiene una matriz A de $n * n$ componentes reales, el número λ (real o complejo) se llama eigenvalor de A si existe un vector diferente de cero e que satisface la ecuación:

$$Ae = \lambda e$$

$$\left[\frac{d^2 I_{fase}}{dx^2}\right] = [Y'_{fase}][Z'_{fase}][I_{fase}] \quad (2.28)$$

Al aplicar la teoría de los eigenvalores y eigenvectores se obtiene ecuaciones desacopladas, para voltajes:

$$\left[\frac{d^2 V_{modal}}{dx^2}\right] = [\Lambda][V_{modal}] \quad (2.29)$$

Dónde:

$[\Lambda]$ es la matriz diagonal.

Para obtener ecuaciones en características modal se transforma las ecuaciones acopladas 2.2 y 2.16 de parámetros en características de fase a características modal a través de la siguiente relación:

$$[V_{fase}] = [T_v][V_{modal}] \quad (2.30a)$$

$$[V_{modal}] = [T_v]^{-1}[V_{fase}] \quad (2.30b)$$

El remplazo en la Ec. 2.27 llega a determinar la siguiente expresión:

$$\left[\frac{d^2 V_{modal}}{dx^2}\right] = [T_v]^{-1}[Z'_{fase}][Y'_{fase}][T_v][V_{modal}] \quad (2.31)$$

Al igualarla con la Ec.2.29, el valor de la matriz diagonal queda definido:

$$[\Lambda] = [T_v]^{-1}[Z'_{fase}][Y'_{fase}][T_v] \quad (2.32)$$

Para la transformación de las matrices de corriente de características de fase a modal se tiene la siguiente relación:

$$[I_{fase}] = [T_i][I_{modal}] \quad (2.34a)$$

$$[I_{modal}] = [T_i]^{-1}[I_{fase}] \quad (2.34b)$$

Por lo que la ecuación de segundo orden en características modal para la corriente queda definida:

$$\left[\frac{d^2 I_{modal}}{dx^2}\right] = [\Lambda][I_{modal}] \quad (2.35)$$

De igual forma la impedancia serie en características modal queda definida por la siguiente ecuación:

$$[Z'_{modal}] = [T_v]^{-1}[Z'_{fase}][T_i] \quad (2.36a)$$

$$[Z'_{modal}] = [T_i^t][Z'_{fase}][T_i] \quad (2.36b)$$

Y la admitancia modal en paralelo queda definida:

$$[Y'_{modal}] = [T_i]^{-1}[Y'_{fase}][T_v] \quad (2.37a)$$

$$[Y'_{modal}] = [T_v^t][Y'_{fase}][T_v] \quad (2.37b)$$

2.9 ONDAS VIAJERAS

El efecto de un cambio súbito en el sistema en un determinado punto de la línea de transmisión no ocurre en el mismo instante en otra localización de la misma línea, un tiempo finito ocurre para que el disturbio sea transmitido de un punto donde se inició para cualquier otro punto. Consecuentemente, si ocurre cualquier variación de voltaje o corriente en cierto punto de la línea de transmisión, se origina lo que se conoce como ondas viajeras [8].

2.9.1 REFLEXIONES Y REFRACCIONES DE ONDAS VIAJERA EN LÍNEAS ABIERTAS

En el momento que una onda viajera incidente se encuentra en su medio de transmisión y sufre un cambio brusco en la impedancia se genera una descomposición de la misma, formándose una onda superpuesta a la inicial en sentido contrario denominada onda reflejada y otra que sigue adelante llamada onda refractada. El cambio brusco puede ser producido por un terminal abierto o cortocircuitado, la unión con líneas con distinta impedancia característica o con transformadores, etc.

En líneas abiertas las ondas incidentes son completamente reflejadas, la onda de voltaje con la misma dirección y la onda de corriente con signo contrario; como la corriente no puede seguir avanzando, el valor de la onda de corriente se hace cero, el efecto producido es como si la onda viajera se encontrase con otra de la misma magnitud, avanzando en sentido opuesto y se terminasen anulando entre ellas.

2.9.2 DIAGRAMA DE LATTICE

Es una técnica gráfica desarrollada por Bewley para simplificar la complejidad del estudio de reflexiones sucesivas, muestra la oposición y dirección de cada onda viajera en el tiempo. El objetivo del diagrama de Lattice es proporcionar un medio

grafico que indique las relaciones tiempo-espacio de ondas en una red con múltiples impedancias características. Este diagrama tiempo-espacio para una onda de voltaje se usa en sistemas por unidad (p.u.), además el tiempo en cruzar la onda viajera es constante. El aumento del voltaje en cualquier punto a lo largo de la línea de transmisión puede ser estimado mediante una suma algebraica de las ondas de voltaje de cada refracción de la onda.

El efecto de la reflexión de ondas causadas por maniobras en líneas de transmisión puede ser analizado con la teoría de Ondas Viajeras y Diagrama de Lattice, así por ejemplificar se muestra en la Figura 2.13 donde se tiene una línea de transmisión con impedancias características diferentes.

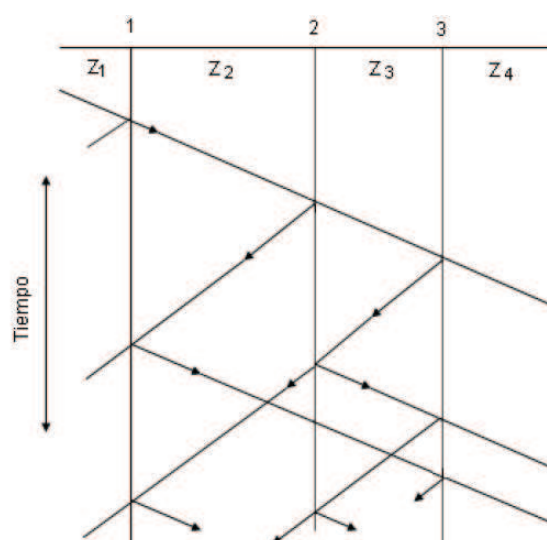


Figura 2.13 Diagrama de Lattice para onda viajera en varios medios con sucesivas reflexiones [8].

2.10 SOBREVOLTAJES Y TRANSITORIOS

Un sobrevoltaje es un voltaje anormal existente entre fase y tierra o entre fases, cuyo valor pico es superior al valor pico del máximo voltaje de operación normal. Según la Norma IEC 60071-4[9] los sobrevoltajes se clasifican de acuerdo a su forma y duración en sobrevoltajes de baja frecuencia y transitorios.

2.10.1 SOBREVOLTAJES DE BAJA FRECUENCIA:

Los sobrevoltajes de baja frecuencia se producen debido a operaciones ordinarias en el sistema. Y estos a su vez se clasifican por sobrevoltajes permanentes y transitorios.

2.10.1.1 SOBREVOLTAJES PERMANENTES.

Estos sobrevoltajes se generan en estado estable, con frecuencia igual o cercana a la del sistema, son sostenidos por largo tiempo. Estos se producen por ejemplo durante la puesta en servicio de una carga, en especial, cuando la red comprende líneas de gran longitud debido al efecto capacitivo de estas, es decir, al efecto Ferranti¹⁴; también se incluyen los sobrevoltajes provocados por fallas a tierra¹⁵.

2.10.1.2 SOBREVOLTAJE TEMPORALES

Son tensiones que se originan bajo condiciones normales de operación, por lo tanto, su frecuencia es igual o próxima a la frecuencia de operación del sistema (60 Hz) y al ser tensiones permanentes su duración puede corresponder al tiempo de vida del equipo que produce el sobrevoltaje.

¹⁴ Efecto Ferranti: Es una sobretensión producida en una línea de transmisión larga sin carga o poca, se denota en el incremento del voltaje al final de la línea de transmisión con relación al voltaje de partida, debido a la capacitancia que adquiere la línea en su recorrido.

¹⁵ Falla a tierra: Contacto de una o dos fases de la línea de transmisión a tierra.

El sobrevoltaje temporal es un sobrevoltaje de duración relativamente larga, superior a decenas milisegundos, débilmente amortiguado o no amortiguado.

Causados por:

- Maniobras de rechazo de carga.
- Fallas, ejemplo corto circuito monofásico
- Efecto Ferranti
- Resonancia y ferresonancia

2.10.2 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS:

Sobrevoltajes de corta duración de unos milisegundos o menos, oscilatorio o no oscilatorio, generalmente muy amortiguado [9]. Producidos por una maniobra en la red, como interrupción de circuitos capacitivos e inductivos, o bien por las condiciones atmosféricas, como caída de un rayo directa en una instalación o en sus proximidades [8], estos se clasifican en sobrevoltajes de frente lento, de frente rápido y de frente muy rápido.

2.10.2.1 Sobrevoltajes de frente lento

Se originan ante la operación de equipos de maniobra o modificaciones en la topología de la red eléctrica, tales como energización y recierre de una línea, inicio y despeje de fallas, rechazos de carga y establecimiento o interrupción de corrientes capacitivas e inductivas.

Las perturbaciones son de corta duración y están fuertemente amortiguadas. Se producen principalmente por acción de maniobra de interruptores y pueden simularse con impulsos de maniobra normalizados cuyo tiempo de cresta o subida (T_p) oscila entre 20 μ s a 5000 μ s y tiene un valor medio de cola (T_2) menor a 20 ms.

En la Figura 2.14 se muestra la forma de onda típica de una sobrevoltaje de frente lento.

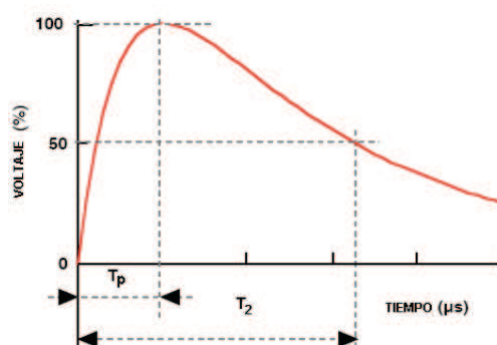


Figura 2.14 Forma de onda de sobrevoltaje de frente lento.

2.10.2.2 Sobrevoltajes de frente rápido

Son sobrevoltajes transitorios, generalmente unidireccionales, con un tiempo de subida hasta el valor de cresta, T_p comprendido entre $0,1 \mu s$ y $20 \mu s$, y tiempos de cola, T_2 igual o inferior a $200 \mu s$. Estos sobrevoltajes son esencialmente producidos por descargas atmosféricas y operaciones de maniobra, aunque estas no son tan importantes ya que su amplitud es mucho menor en niveles de extra alto voltaje.

La Figura 2.15 muestra la forma típica de un sobrevoltaje de frente rápido.

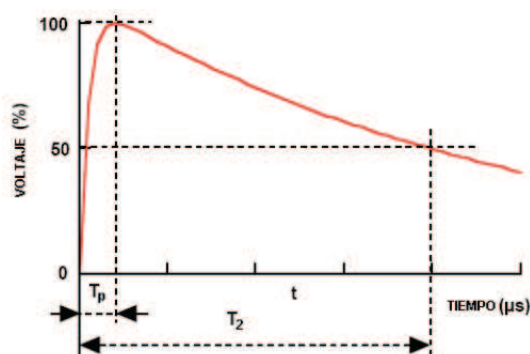


Figura 2.15 Forma de onda de sobrevoltaje de frente rápido.

2.10.2.3 Sobrevoltajes de frente muy rápido

Sobrevoltajes generalmente oscilatorios muy rápidos con tiempo a la cresta, T_p menor a $0,1 \mu\text{s}$, con una duración total inferior a 3 ms , y con oscilaciones de frecuencia comprendidas entre 30 kHz y 60 MHz . La Figura 2.16 muestra la forma de onda característica de una sobretensión de frente extra rápido.

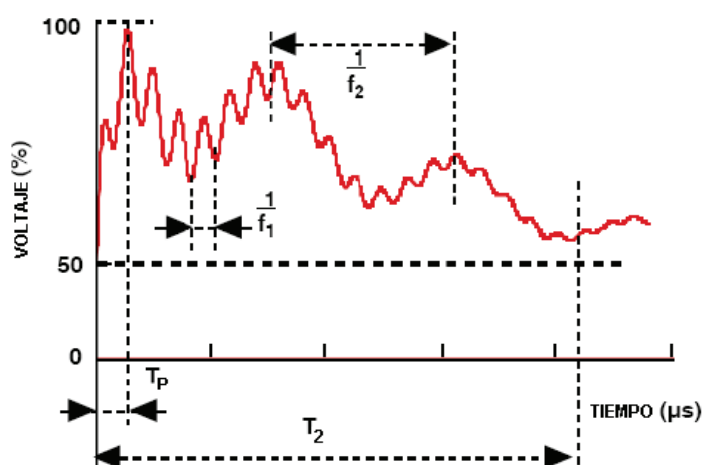


Figura 2.16 Forma de onda de sobretensión de frente extra rápido.

A continuación se indica la Tabla 2.3 la cual contiene un resumen de los sobrevoltajes, sus formas de onda y características principales.

2.10.3 Rango de frecuencias de sobrevoltajes

Cada tipo de sobrevoltaje está dentro de una gama de frecuencias determinada la cual lo caracteriza, como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Clasificación de gama de frecuencias de voltajes [7].

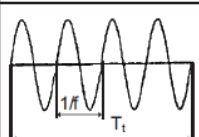
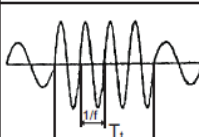
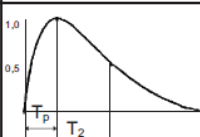
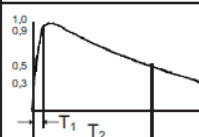
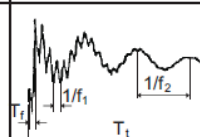
Grupo	Gama de frecuencias	Designación	Representación principalmente para
I	0,1 Hz - 3 kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobrevoltajes temporales
II	50 Hz - 20 kHz	Ondas de frente lento	Sobrevoltajes por maniobra
III	10 kHz - 3 MHz	Ondas de frente rápido	Sobrevoltajes por rayos
IV	100 kHz - 50 MHz	Ondas de frente muy rápido	Sobrevoltajes por recibidos en GIS

Además en cada fenómeno eléctrico genera un transitorio en un rango de frecuencia, como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Procesos transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Origen	Gama de frecuencias
Conexión de transformadores	0.1 Hz - 1 kHz
Ferroresonancia	0.1 Hz - 1 kHz
Pérdida brusca de carga	10 Hz - 3 kHz
Eliminación de fallas	50 Hz - 3 kHz
Aparición de fallas	50 Hz - 20 kHz
Conexión de líneas	50 Hz - 20 kHz
Reconexión de líneas	50 Hz - 20 kHz
Tensión transitoria de restablecimiento	
Fallas terminales	50 Hz - 20 kHz
Fallas kilométricas	50 Hz - 100 kHz
Descargas multiples de interruptores	10 kHz - 1 MHz
Ondas producidas por rayos	10 kHz - 3 MHz
Fallas en subestaciones	10 kHz - 3 MHz
Maniobras en seccionadores y fallas en subestaciones tipo GIS	100 kHz - 50 MHz

Tabla 2.5 Clases, formas de onda y tiempos característicos de sobretensiones [7].

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f=50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_1 \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} \leq T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ ms}$	$3 \text{ ns} < T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Parámetros de voltaje estandarizado	$f=50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ T_1 (*)	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	(*)
Ensayo de voltaje tolerado normalizado	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	(*)

(*) a especificar por el comité del producto considerado

2.11 MODELOS DE CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Los modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión son métodos de representación de la línea en su totalidad, mediante la canalización de la información de los valores de los parámetros fundamentales por unidad de longitud; cada modelo viene acompañado por una técnica de solución en particular.

La representación de la línea de transmisión en su totalidad se la puede hacer considerando parámetros concentrados constantes o parámetros distribuidos a lo largo de la longitud, que pueden ser constantes o dependientes de la frecuencia, como lo muestra el esquema de la Figura2.17.

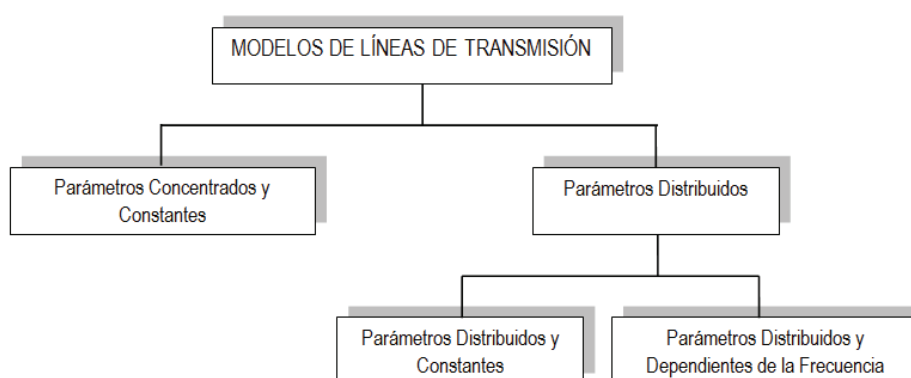


Figura2.17 Esquema de modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión.

Para cada tipo de estudio de líneas de transmisión se requiere la selección idónea del modelo como calidad de la energía, protecciones, estudios de arco secundario, pero la correcta selección de un adecuado y exacto modelo es crucial en cálculos de sobrevoltajes. En diseño de líneas de transmisión deben ser considerados dos o más sobrevoltajes por ejemplo los generados en cierre-apertura de líneas y rayos [7]. De esta manera existen técnicas de solución tanto para estado estable como para estado transitorio.

2.11.1 SOLUCIONES EN ESTADO ESTABLE

Las soluciones en estado estable¹⁶ para líneas de transmisión con multiconductores se lo hace a través de modelos, los cuales a medida que aumentan su exactitud también lo hace su complejidad, así una línea puede quedar completamente representada de forma aproximada mediante el modelo π -nominal, mientras si se desea que la representación sea más exacta se debe utilizar modelos más desarrollados como el modelo π -cascada y el modelo π -equivalente.

2.11.1.1 Modelo π -nominal

Es una representación del sistema de transmisión de parámetros concentrados a través de la agrupación de los elementos R, L y C los cuales fueron calculados a una frecuencia cualquiera. Este modelo teóricamente es adecuado para cálculos en estado estable, aunque también puede ser usado para realizar simulaciones en estado transitorio, en la cual los parámetros fundamentales de la línea de transmisión son previamente determinados en las cercanías de la frecuencia predominante del transitorio [7].

El modelo π -nominal es una representación bastante precisa de la línea de transmisión eléctricamente corta¹⁷, es decir, cuando presenta pequeñas pérdidas, como lo indica la Figura 2.18, la cual se representa a través de una matriz de impedancia serie y dos matrices idénticas de susceptancia en paralelo, cuyas ecuaciones son:

$$[R] + j\omega[L] = \mathcal{L}[Z'_{fase}] \quad (2.38)$$

$$\frac{1}{2}j\omega[C] = \frac{1}{2}j\omega\mathcal{L}[C'_{fase}] \quad (2.39)$$

Dónde:

¹⁶ Estado Estable: Condiciones normales de funcionamiento, en la cual la frecuencia se mantiene constante a 60Hz.

¹⁷ La línea de transmisión se la denomina eléctricamente corta cuando presenta poca impedancia, la cual no está relacionada con su longitud física necesariamente.

\mathcal{L} es la longitud de la línea.

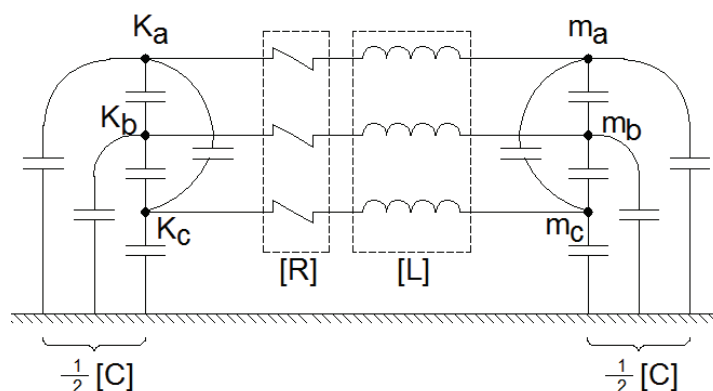


Figura 2.18 Modelo Circuito π - Nominal Trifásico [5].

Para utilizar el circuito π -nominal trifásico en líneas sin transposición, es decir, desbalanceadas se utiliza la matriz sin transposición y mediante el cálculo del promedio de los elementos de la diagonal, como de los elementos fuera de esta, se obtiene una matriz balanceada como la que se indica en la sección 2.7.1.

2.11.1.2 Modelo π -cascada

El modelo π -cascada tiene como base al modelo π -nominal, y es una aproximación discreta de los modelos de parámetros distribuidos constantes, se lo utiliza en casos donde se desea realizar estudios de complicados escenarios de transposición a frecuencia de operación.

En la conexión en cascada la distribución uniforme de los parámetros de la línea de transmisión están razonablemente bien hasta cierta frecuencia, debido a que no toma en cuenta la dependencia de la frecuencia de los valores de resistencias e inductancias.

Si a la línea de transmisión se la representa a través de n secciones de idéntica longitud la línea queda representada como indica la Figura 2.19.

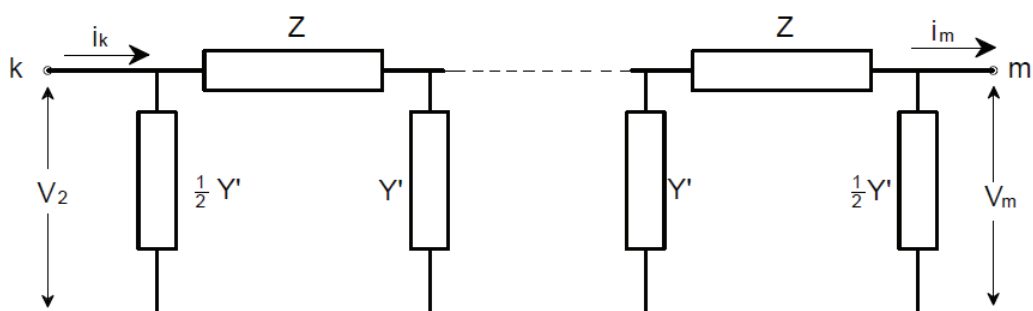


Figura 2.19 Circuito equivalente del circuito PI nominal [10].

Dónde:

Y' = Admitancia en paralelo de cada sección π -cascada representada.

Las variables de entrada con respecto a las variables de salida en el sistema, se los representa a través de una red de parámetros de dos puertos como lo indica la Figura 2.20

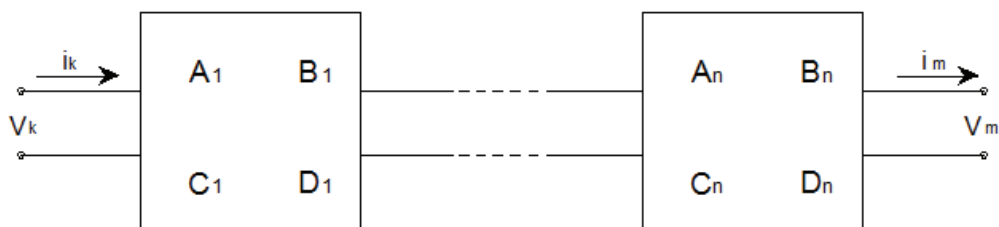


Figura 2.20 Representación del circuito π -cascada [10].

Lo que queda expresado a través de la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} v_k \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} v_m \\ i_m \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

La cantidad de secciones π -nominales en cascada a utilizar para que la línea de transmisión quede correctamente representada depende de la frecuencia del fenómeno a analizar. Por ello, para un fenómeno de frecuencia máxima f_{max} la

longitud máxima de cada una de las secciones S_{max} representadas por un circuito π -nominal debe ser:

$$S_{max} \leq \frac{a}{5f_{max}} \quad (2.41)$$

Dónde:

a es la velocidad de propagación de la onda viajera

$$a = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (2.42)$$

2.11.2 SOLUCIONES EN ESTADO TRANSITORIO

Las soluciones transitorias involucran modelos que permiten analizar el fenómeno transitorio y sobrevoltajes que se dan en las líneas de transmisión. Para determinar las soluciones en estado transitorio existen modelos tanto con parámetros fundamentales constantes como también dependientes de la frecuencia, para el caso de los parámetros fundamentales constantes se cuenta con los modelos basados en el modelo π y Bergeron, mientras que para los dependientes de la frecuencia el modelo J. Marti.

2.11.2.1 Modelos con Parámetros Constantes

2.11.2.1.1 Modelo π -equivalente

Los modelos basados en el modelo π -nominal presentan buenos resultados en las soluciones en estado estable a frecuencia de operación, pero para estado transitorio se debe aplicar modelos más elaborados como el modelo π -equivalente, el cual permite empatar un escenario en estado estable con un subsiguiente en estado transitorio.

En líneas monofásicas el modelo π -equivalente se aplica para soluciones en estado estable, además puede reemplazar a líneas con parámetros distribuidos, como también a líneas de transmisión con parámetros dependientes de la frecuencia. El modelo exacto π -equivalente representado en la Figura 2.21, queda definido a través de las siguientes ecuaciones:

$$Y_{serie} = \frac{1}{Z_{serie}} \quad (2.43)$$

Y la ecuación:

$$\frac{1}{2} Y_{paralelo} = \frac{\mathcal{L}}{2} (G' + j\omega C') \frac{\tanh\left(\frac{\gamma \mathcal{L}}{2}\right)}{\frac{\gamma \mathcal{L}}{2}} \quad (2.44)$$

Dónde:

$$Z_{serie} = \mathcal{L} (R' + j\omega L') \frac{\sinh(\gamma \mathcal{L})}{\gamma \mathcal{L}} \quad (2.45)$$

γ la constante de propagación definida:

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (2.46)$$

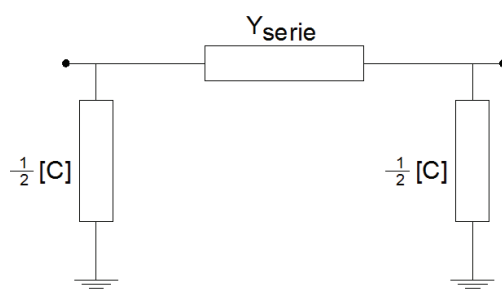


Figura 2.21 Circuito π - Equivalente para soluciones de líneas de transmisión [5].

Los modelos de líneas de transmisión con parámetros constantes resultan muy aproximados para algunas aplicaciones, ya que el comportamiento de los parámetros

fundamentales como la resistencia e inductancia de secuencia positiva no presenta grandes variaciones hasta alrededor de 1KHz, como muestra la Figura 2.22

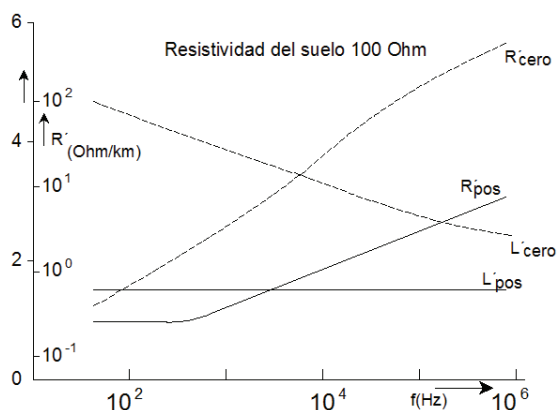


Figura2.22 Resistencia e Inductancia de secuencia positiva y cero de la línea trifásica en función de la frecuencia [5].

Pero, aún con la utilización de parámetros constantes, la solución para transitorios puede tornarse muy compleja, sin embargo una razonable precisión puede ser obtenida si L' y C' son distribuidos y si se cumple con la siguiente equivalencia:

$$R = R'\mathcal{L} \quad (2.47)$$

El valor de la resistencia es agrupado en pocos sectores, en el centro el valor $R/2$ y $R/4$ a cada extremo de la línea sin pérdidas, como muestra la Figura 2.23.

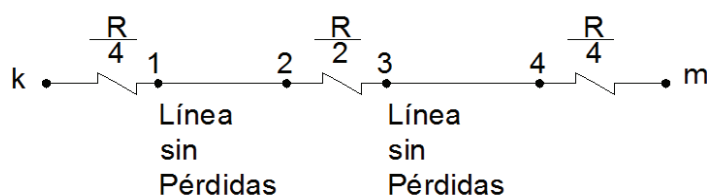


Figura2.23 Representación de la línea con resistencias agrupadas [5].

En líneas de transmisión trifásicas para obtener el circuito π -equivalente las características de fase son primero transformadas a características modal, luego el

circuito π -equivalente de línea monofásica es encontrado para cada modo, estos circuitos π monofásicos tienen cada uno una admitancia en serie $Y_{serie-modal}$ y dos admitancias iguales en paralelo $1/2Y_{paralelo-modal}$ como indica la Figura 2.21.

2.11.2.1.2 Modelo Bergeron

El Modelo Bergeron¹⁸ se basa en la propagación de ondas viajeras en una línea de transmisión sin pérdidas y con parámetros L y C constantes distribuidos a través de toda su longitud. El modelo Bergeron se caracteriza por la distribución de los parámetros fundamentales de forma constante a lo largo de la línea, en las cuales las soluciones con ondas viajeras son mucho más rápidas que las soluciones mediante circuitos π en cascada.

Debido a que los parámetros fundamentales no son constantes, al igual que en el modelo π , el determinar estos a la frecuencia predominante del fenómeno a analizar mejora los resultados que se desea obtener en estudios transitorios.

Las soluciones para ondas viajeras surgen con la necesidad de tener mejores soluciones para estudios que involucran rayos, en el que el modelo de línea de transmisión monofásica sin pérdidas no tiene la exactitud necesaria.

El modelo de línea de transmisión sin pérdidas con L' y C' constantes tanto para líneas monofásicas como para líneas trifásicas se basan en el mismo procedimiento de resolución: la línea de transmisión monofásica sin pérdidas. En general los datos de las líneas de transmisión trifásicas están en característica de fase, los cuales se transforman a característica modal obteniendo tres ecuaciones independientes, luego se resuelven como si se trataran de líneas de transmisión monofásicas, finalmente se lleva las soluciones a características de fase como lo indica el esquema de la Figura 2.24.

¹⁸ El modelo Bergeron fue desarrollado por Hermann W. Dommel, uno de los creadores de un programa de ordenador para la resolución de transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. Actualmente es profesor emérito de la University of British Columbia en Vancouver, Canadá.

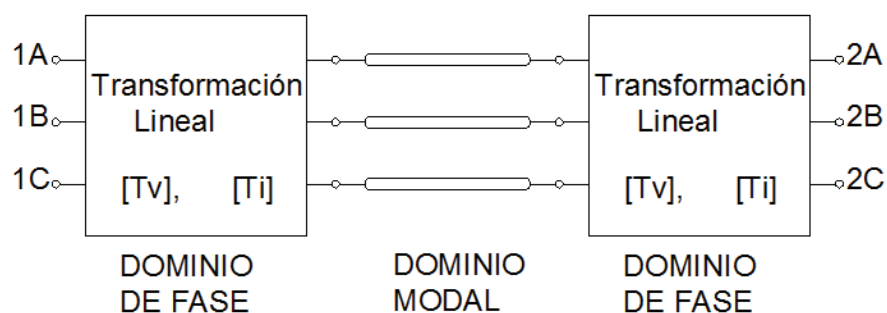


Figura2.24 Esquema de transformación entre características de fase y modal para líneas trifásicas [5].

La Figura 2.25 representa una línea monofásica, donde se tiene los voltajes en dos puntos de la línea en el tiempo τ .

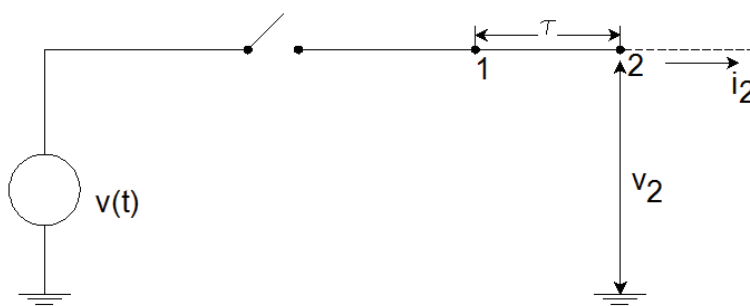


Figura2.25 Energización de una línea monofásica sin pérdidas [5].

La corriente en cualquier punto de la línea definida por la ley de ohm:

$$i = \frac{1}{Z} v$$

El voltaje entre el punto 1 y 2 separados por τ es:

$$v_2(t + \tau) = v_1(t)$$

En el dominio del tiempo y mediante interpolación lineal se tiene la corriente definida:

$$\frac{1}{Z} v_k(t) - i_{km}(t) = \frac{1}{Z} v_m(t - \tau) + i_{mk}(t - \tau) \quad (2.48)$$

Dónde:

k, m : puntos distintos de la línea de transmisión.

Estas ecuaciones consideran que los fasores de voltaje y corriente V_m e I_{mk} en el nodo m son conocidos y se desea encontrar $I = \frac{V_k}{Z} - I_{km}$ en el nodo k . Los valores inicial es para los términos históricos son obtenidos en condiciones en estado estable a frecuencia de operación. La representación del circuito equivalente del modelo Bergeron se muestra en la Figura 2.26

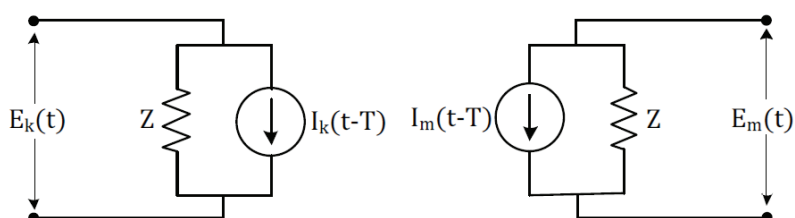


Figura 2.26 Circuito representativo del modelo de Bergeron.

El método incluye una herramienta de solución denominado término histórico (*hist*), el cual seguirá almacenando los resultados que se sigan obteniendo para determinar el próximo, este se define como:

$$hist_{1-2}(t - \tau) = i_{1-2}(t) - \frac{1}{Z} v_1(t) \quad (2.49a)$$

Para una línea trifásica de transmisión se tiene las siguientes ecuaciones:

$$i_{1a-2a}(t) = \frac{1}{Z_a} v_{1a}(t) + hist_{1a-2a}(t - \tau_a)$$

$$i_{1b-2b}(t) = \frac{1}{Z_b} v_{1b}(t) + hist_{1b-2b}(t - \tau_b) \quad (2.49b)$$

$$i_{1c-2c}(t) = \frac{1}{Z_c} v_{1c}(t) + hist_{1c-2c}(t - \tau_c)$$

Para la solución por términos históricos, el término histórico se almacena como:

$$hist_{1a-2a}(t - \tau_a) = -\frac{1}{Z_a} v_{2a}(t - \tau_a) - i_{2a-1a}(t - \tau_a) \quad (2.49c)$$

De forma similar para las fases b y c. Los términos históricos son calculados para los extremos de la línea de transmisión en el tiempo, la solución obtenida en el instante t es ingresada en tablas y usada para el siguiente paso del tiempo. Los términos históricos podrían ser ubicados en tres tablas, y la longitud de cada tabla es independiente de la otra ya que están en características modal, como lo indica el esquema de la Figura 2.27.

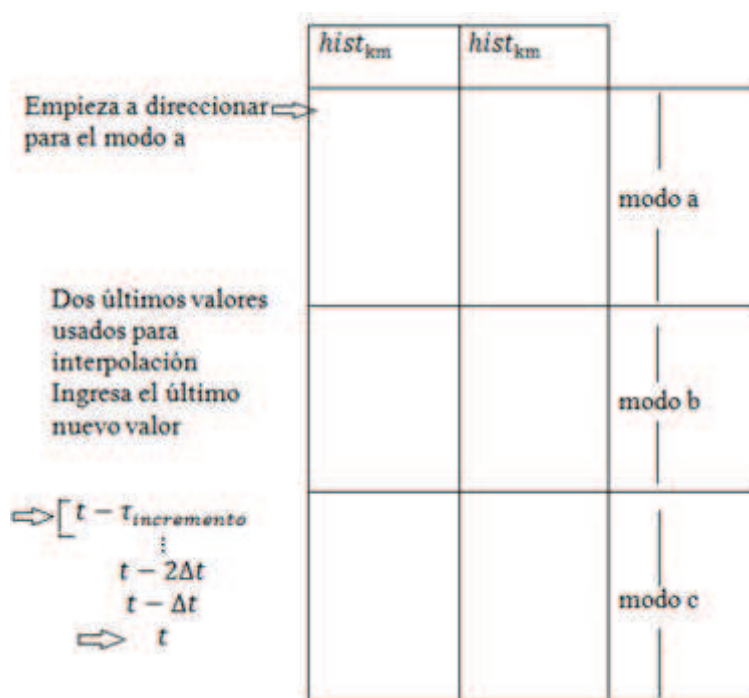


Figura 2.27 Circuito representativo del modelo de Bergeron.

La solución de cada paso de tiempo se ingresa en la tabla desplazando un lugar al último valor $t - \tau_{incremento}$, luego ingresa el nuevo valor calculado del término histórico en el tiempo t .

Las Ec. 2.49 son vínculos para la transformación de características modal a características de fase a través de la Ec. 2.34a

$$[i_{1-2}^{fase}] = [Y_{sobrevoltaje}][v_1^{fase}] + [hist_{1-2}^{fase}] \quad (2.50)$$

Donde la matriz de admitancia de sobrevoltaje en características de fase se define de forma semejante a la Ec. 2.37, por lo que se obtiene:

$$[Y_{sobrevoltaje}] = [T_i] \begin{bmatrix} Z_a^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_b^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_c^{-1} \end{bmatrix} [T_i]^t \quad (2.51a)$$

De igual forma los términos históricos en características de fase se definen:

$$[hist_{1-2}^{fase}] = [T_i] \begin{bmatrix} hist_{1a-2a} \\ hist_{2a-2b} \\ hist_{1c-2c} \end{bmatrix} [T_i]^t \quad (2.51b)$$

2.11.2.2 Modelo con parámetros dependientes de la frecuencia J. Marti.

El modelo J. Marti¹⁹ se caracteriza por utilizar parámetros dependientes de la frecuencia, las soluciones de las matrices de transformación para la descomposición modal son constantes y reales, las ecuaciones que se desarrollan están descritas en función de la frecuencia.

El procedimiento utilizado para la resolución de las ecuaciones de líneas de transmisión con parámetros dependientes de la frecuencia en el dominio del tiempo encierra en cada paso de tiempo los siguientes aspectos:

- Transformación del terminal del voltaje de características de fase a características modal.
- Solución de la ecuación lineal usando características modal y cálculo de los términos históricos, es decir calcularlas fuentes de corriente.
- Transformación de las fuentes de corriente a características de fase [7].

¹⁹ J. Martí: Ph.D University of British Columbia, líder mundial en el desarrollo de modelos y técnicas de solución de circuitos de transitorios de grandes sistemas eléctricos de potencia; en particular en relación con el programa EMTP. Actualmente es profesor en University of British Columbia en el departamento de Energía Eléctrica.

Para la determinación de los parámetros fundamentales en función de la frecuencia se debe determinar dos parámetros importantes para la propagación de las ondas, la constante de propagación γ definido en la Ec. 2.46 y la impedancia característica Z_c :

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad (2.46)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (2.52)$$

Ambos parámetros están expresados en función de la frecuencia. Si G fuese ignorado Z_c sería infinito a $\omega = 0$ en la Ec. 2.52, por lo que el modelo J. Marti da un valor de $G = 0,33 \mu S/km$.

El modelo J. Marti considera la propagación por el nodo de tierra, ya que considera la conductancia G' , lo cual ayuda al cálculo de transitorios donde exista buen contenido de secuencia cero²⁰, como la falla de línea a tierra.

El desarrollo de los parámetros fundamentales dependientes de la frecuencia inicia tomando la expresión usada por el modelo Bergeron:

$$\frac{1}{Z} v_k(t) - i_{km}(t) = \frac{1}{Z} v_m(t - \tau) + i_{mk}(t - \tau) \quad (2.48)$$

La cual llevada al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier²¹ resulta:

$$I = \frac{V_k}{Z} - I_{km} = \left(\frac{1}{Z} V_m + I_{mk} \right) * e^{-j\omega\tau} \quad (2.53)$$

En el modelo J. Marti la Ec.2.53 cambia los términos Z y $e^{-j\omega\tau}$ por los términos dependientes de la frecuencia Z_c y $e^{-\gamma L}$ y toma la forma:

²⁰ Secuencia Cero: Corrientes que se generan y van hacia tierra, sea por corrientes de fuga a través de los aisladores o por contacto de las fases a tierra.

²¹ Transformada de Fourier: es un método matemático que permite traspasar las señales en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y si se traspasa del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo se conoce como transformada inversa de Fourier.

$$I = \frac{V_k}{Z_c} - I_{km} = \left(\frac{1}{Z_c} V_m + I_{mk} \right) * e^{-\gamma L} \quad (2.53a)$$

O reescrita:

$$I_{km} = \frac{V_k}{Z_c} - \left(\frac{V_m}{Z_c} + I_{mk} \right) * e^{-\gamma L} \quad (2.53b)$$

Dónde el término:

$e^{-\gamma L}$ es el factor de propagación $A(\omega)$

Debido a la aplicación del método de transformación de Fourier para llevar las ecuaciones del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, existirá un desplazamiento de fase de $e^{-j\omega\tau}$ en el dominio la frecuencia, lo cual llegará a ser un retraso τ en el dominio del tiempo. La ecuación del método J. Marti en el dominio del tiempo toma la forma:

$$v_k(t) - Z_c i_{km}(t) = v_m(t - \tau) + Z_c i_{mk}(t - \tau) \quad (2.54)$$

El factor de propagación $A(\omega)$ manifiesta la relación entre el voltaje de salida respecto al voltaje de entrada como lo indica la Figura 2.28.

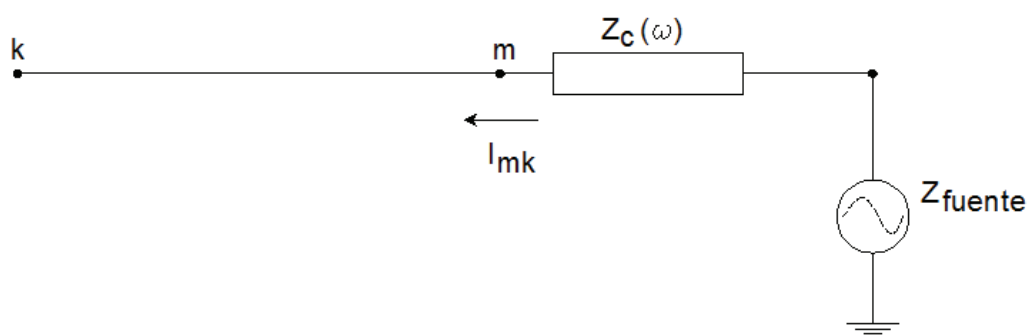


Figura2.28 Fuente de voltaje conectada en m a través de una impedancia [5].

La relación entre el voltaje de salida respecto al voltaje de entrada está definido por:

$$V_k = V_{sobrevoltaje} * A(\omega) \quad (2.55a)$$

Reescrito:

$$A(\omega) = V_k/V_{sobrevoltaje} \quad (2.55b)$$

La determinación de la ponderación de cada valor obtenido se la hace a través de la siguiente función:

$$a(t) = \text{transformada inversa de Fourier de } A(\omega)$$

El circuito equivalente visto desde el nodo k es una red R-C en paralelo con una fuente de corriente histórica de propagación, como lo indica la Figura 2.29.

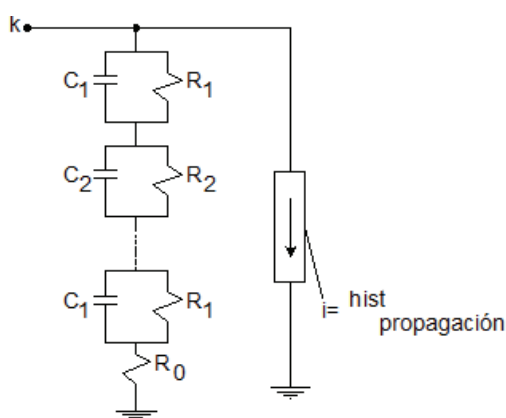


Figura 2.29 Circuito equivalente visto desde el nodo de llegada k .

Para representar los resultados del circuito anterior se convierten los parámetros fundamentales de la línea de transmisión a una función de ponderación $a(t)$ y se lleva a la red R-C a una aproximación de la impedancia característica Z_c .

La función de ponderación $a(t)$ puede también ser escrita como una suma de exponenciales, sin necesidad de una transformada inversa de Fourier de $A(\omega)$, para lo cual se determina el valor aproximado de la función $A(\omega)$.

$$A_{aprox}(s) = e^{-s\tau_{min}} \frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_m)} \quad (2.56)$$

Dónde:

$$s = j\omega \quad y \quad n < m.$$

El factor $e^{-j\omega\tau_{min}}$ es incluido para evitar errores exponenciales en el tiempo comprendido en el intervalo de $0 \leq t \leq \tau_{min}$, donde $A_{aprox}(s) = 0$, ya que al trabajar con ondas viajeras τ_{min} determina el tiempo de llegada de las ondas más rápidas, valor que se obtiene en la función $a(t) =$ transformada inversa de Fourier $A(\omega)$.

Todos los polos p_i y ceros z_i en la Ec. 2.56 son negativos, reales y simples, con $n < m$, parte de la función racional puede ser expresada en funciones parciales:

$$k \frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_m)} = \frac{k_1}{s+p_1} + \frac{k_2}{s+p_2} + \dots + \frac{k_m}{s+p_m} \quad (2.57)$$

Por lo que la correspondiente forma en dominio del tiempo de la Ec.2.56 llega a ser:

$$a_{aprox}(t) = [k_1 e^{-p_1(t-\tau_{min})} + k_2 e^{-p_2(t-\tau_{min})} \dots + k_m e^{-p_m(t-\tau_{min})}] \text{ para } t \geq \tau_{min}$$

$$a_{aprox}(t) = 0 \quad \text{para } t < \tau_{min} \quad (2.58)$$

Esta función de ponderación $a_{aprox}(t)$ es usada para calcular los términos $hist_{propagación}$ en cada paso de tiempo.

De igual forma la impedancia característica $Z_c(\omega)$ es obtenida aproximadamente a través de una función racional:

$$Z_{c-aprox}(s) = k \frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (2.59a)$$

Todos los polos y ceros son reales, negativos pero ahora el número de polos es igual al número de ceros, es decir $n = m$:

$$Z_{c-aprox}(s) = k_0 + \frac{k_1}{s+p_1} + \frac{k_2}{s+p_2} + \dots + \frac{k_n}{s+p_n} \quad (2.59b)$$

Valores que determinan a la red R-C de la Figura 2.28 de la siguiente manera:

$$R_0 = k_0$$

$$R_i = \frac{k_i}{p_i}, \quad C_i = \frac{1}{k_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

El éxito de las aproximaciones va a estar determinado por la calidad de las funciones de aproximación para $A(\omega)$ y $Z_c(\omega)$, el modelo J. Marti usa el diagrama de Bode²², el cual representa gráficamente como una función del logaritmo de la frecuencia, las magnitudes de la impedancia características en decibeles (dB)²³, como se muestra la Figura 2.30.

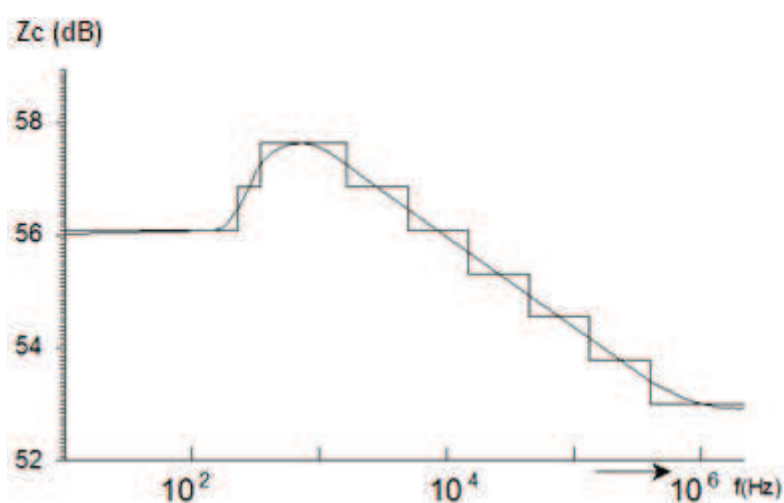


Figura 2.30 Aproximación asintótica de la magnitud de $Z_c(\omega)$ [5].

El principio básico es la aproximación de la curva dada por segmentos de línea recta horizontales y una pendiente que es un múltiplo de 20 decibeles/década. Los puntos donde las pendientes cambian de dirección definen los polos y ceros de la función racional. Aplicando logaritmo en la Ec. 2.59, y multiplicando por 20 para la convención de trabajar con decibeles, se tiene:

$$20 \log |Z_{c-approx}(s)| = 20 \log k + 20 \log |s - z_1| \dots 20 \log |s - z_n| \\ - 20 \log |s - p_1| \dots 20 \log |s - p_n| \quad (2.60)$$

²² Diagrama de Bode: es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema.

²³ Decibel: unidad de referencia para medir la potencia de una señal o la intensidad de un sonido.

Cada uno de los términos en esta expresión forma una línea recta paralela con respecto al eje de la frecuencia, la curva es construida paso a paso cada vez que un término cero esquinero es adherido la pendiente asintótica incrementa en 20 dB y cada vez que un término polo esquinero se añade disminuye en 20 dB, los segmentos de línea recta son solo trazos asintóticos, pero la función real se convierte en una línea suave.

Existen errores debido a la aproximación de $A(\omega)$ y $Z_c(\omega)$, pero en el desarrollo de este modelo presta muy buenos resultados mediante una aproximación de 5 polos y 5 ceros.

CAPÍTULO 3

3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ATP.

En este capítulo se realiza una breve explicación del software ATP, el cual permite realizar la simulación de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética, electromecánica y de sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia.

También se hace una descripción del futuro Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV a instalarse en el país, del sistema a modelarse y simularse en los diferentes modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión que dispone la biblioteca del software.

3.1 SOFTWARE ATP

Alternative Transients Program (ATP) es una herramienta diseñada para analizar, tanto en individualidad como en su conjunto, los diferentes elementos que componen el sistema eléctrico, así como los sistemas de control asociados a los equipos eléctricos.

El programa ATP es un software que permite llevar a cabo la simulación digital en el dominio del tiempo y de la frecuencia de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica con fines de diseño, especificaciones de equipos o definición de parámetros eléctricos fundamentales. Mediante el programa es posible plantear y resolver la mayor parte de situaciones que se puedan dar en las diferentes instalaciones eléctricas.

Los estudios que se pueden realizar con el software ATP pueden ser clasificados en diseño en el cual se incluye el dimensionamiento de los equipos, coordinación de aislamiento, nivel de tensión, diseño de los elementos de protección y control,

también en la solución de los problemas de operación, estos suelen ser fallas en las líneas, análisis de sobretensiones y análisis de transitorios.

A continuación se presenta una lista con los casos más típicos de estudio:

- Transitorio de maniobra
 - Determinísticos
 - Probabilísticos
 - Maniobra de reactores
 - Maniobra de capacitores
 - Maniobra de interruptores
 - Re-cierres rápidos
 - Transitorios de maniobra en cables
- Impulsos atmosféricos
 - Contorneos inversos
 - Impulsos inducidos
 - Ingresos de impulsos atmosféricos a subestaciones
- Coordinación de aislamiento
 - Líneas aéreas
 - Subestaciones
 - Subestaciones blindadas en SF₆ (GIS)
 - Descargadores
- Solicitaciones torsiones de ejes
 - Resonancia sub- sincrónica
 - Rechazo de carga
- Sistema de alta tensión en corriente continua (HVDC)
 - Control
 - Transitorios eléctricos
 - Armónicas
- Compensadores estáticos
 - Control

- Sobretensiones
- Armónicos
- Ferroresonancia
- Análisis armónico
- Sistemas de control
- Arranque de motores
- Análisis de sistemas desbalanceados

3.1.1 MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ATP.

La librería estándar que posee el software ATP, para modelos de líneas de transmisión cuenta con modelaciones tanto dependientes del tiempo como de la frecuencia, los modelos usados para las simulaciones son: el modelo con parámetros constantes concentrados PI, el modelo de parámetro constantes distribuidos Bergeron y el modelo con parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia J. Marti. El procedimiento para utilizar dichos modelos se lo detalla en el Anexo A.

3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA DE IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

La línea de transmisión contiene parámetros fundamentales R, L, C y G es por ello que el valor de impedancia depende a más de la configuración geométrica de la torre del valor de la frecuencia la cual determina el valor de sus parámetros, por lo cual existe una correlación entre el valor de impedancia y la frecuencia. Los resultados de esta correlación llega a ser más o menos aproximado dependiendo en gran medida del modelo de cálculo de parámetros de línea de transmisión que se esté utilizando, es así que mediante el software ATP es posible obtenerla respuesta de impedancia en función de la frecuencia, tanto para secuencia positiva como para secuencia cero, en escala logarítmica y en comparación con el modelo exacto π -equivalente.

3.2 SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN DE 500 kV.

El futuro sistema nacional de transmisión a nivel de 500 kV el cual se indica en el Anexo B, se ha planificado principalmente según El Plan de Expansión de CELEC EP-TRANSELECTRIC para evacuar la energía generada en la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair hasta los dos principales centros de carga del país Quito y Guayaquil, a través del sistema de transmisión de 500 kV.

3.2.1 COMPONENTES DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN DE 500 kV A SIMULARSE.

Para el análisis de los modelos de cálculo de parámetros de líneas de transmisión se utilizará un tramo del futuro sistema de transmisión de 500 kV comprendido entre la central Coca Codo Sinclair y la subestación Chorrillos.

El sistema de transmisión que será implementado en el país estará constituido por las siguientes líneas de transmisión indicada en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Líneas de Transmisión para el Sistema de 500 kV [12].

<i>Nombre de la L/T</i>	<i>Recorrido</i>		<i>Voltaje</i>	<i>Longitud</i>	<i>Líneas</i>	<i>Tipo de Conductor</i>
Coca Codo Sinclair – El Inga	Coca Codo Sinclair	Quito	500 kV	125 km	2	4x750 ACAR
El Inga - Tisaleo	Quito	Tisaleo	500 kV	150 km	1	4x750 ACAR
Tisaleo – Chorrillos	Quito	Guayaquil	500 kV	200 km	1	4x750 ACAR

De la misma manera, como resultado de los estudios preliminares del sistema de 500 kV se llegó a determinar la necesidad de instalar compensación inductiva en cada extremo de las líneas de transmisión, como se detalla en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Bancos de reactores de extremos de línea.

<i>Nombre de la L/T</i>	<i>MVAR en extremo I</i>	<i>MVAR en extremo II</i>	<i>Total de MVAR</i>
Coca Codo Sinclair – El Inga I	30	30	60
Coca Codo Sinclair – El Inga II	30	30	60
El Inga – Tisaleo	90	30	120
Tisaleo – Chorrillos	30	120	150

3.2.1.1 Características de los conductores de las Líneas de Transmisión de 500 kV.

Los parámetros del tipo de conductor utilizado para las líneas de 500 kV corresponden al ACAR 750 kcmil con características indicadas en la Tabla 3.3 y para los dos conductores de guarda empleados: el uno corresponde al acero galvanizado de 3/8" y el otro al de fibra óptica llamado OPGW²⁴ cuyas características se indican en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5 correspondientemente.

Tabla 3.3 Características del conductor ACAR 750 para línea de transmisión de 500 kV [12].

Tipo			Unidad	Valor
Calibre			mcm	750
Sección transversal			mm ²	380.08
Construcción	N° Hilos	Aluminio 1350 - H19	c/u	30
		Aluminio 6201 - t81	c/u	17
Diámetro Aluminio 1350 - H19			mm	3.616
Diámetro Aleación de Aluminio 6201 - t81			mm	3.616
Diámetro interior del conductor			mm	10.851
Diámetro exterior del conductor			mm	25.31
Peso total aproximado del conductor			kg/km	1047.28
Carga a la rotura			kg/km	7075
Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C			ohm/km	0.0777
Capacidad de corriente			Amp	840

²⁴ OPGW: Optical Ground Wire es un tipo de conductor que tiene fibra óptica en su interior, el cual es usado en la construcción de líneas de transmisión y distribución

Tabla 3.4 Características del cable de guarda de acero galvanizado [12].

Tipo	Unidad	Valor
Calibre	pulg	3/8"
Sección transversal	mm ²	51.14
Número de alambres de acero galvanizado de alta resistencia	c/u	7
Diámetro nominal	mm	9.52
Peso unitario del conductor	kg/m	0.497
Resistencia mínima a la rotura	kgf	4900
Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C	ohm/km	0.05

Tabla 3.5 Tabla características del cable de guarda tipo OPWG [12].

Tipo	Unidad	Valor
N° de fibras ópticas	c/u	24
Diámetro exterior del conductor	mm	17
Sección total	mm ²	140
Sección aluminio	mm ²	105
Sección acero	mm ²	35
Resistencia eléctrica máxima DC a 20°C	ohm/km	0.29
Atenuación máx. 1310 nm, 20°C	dB/km	0.4
Atenuación máx. 1550 nm, 20°C	dB/km	0.25

Además cada fase del sistema está distribuido en un haz de 4 conductores, debido a que en líneas de Extra Alta Tensión (EHV) el número de conductores del haz por fase se determina de tal forma que controle el gradiente de tensión en las superficies del conductor, reduciendo de esta manera el efecto corona y sus efectos explicados en la Sección 2.6.2; de igual forma en la disminución de la reactancia en serie de la líneas. La separación entre cada conductor del haz es de 45,7 cm; la flecha utilizada para los conductores de fase es de 15m y para los hilos de guarda es 14m.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS TORRES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 500 kV.

Las torres de 500 kV a ser implementadas van a tener la configuración que lo indica la Figura 3.1.

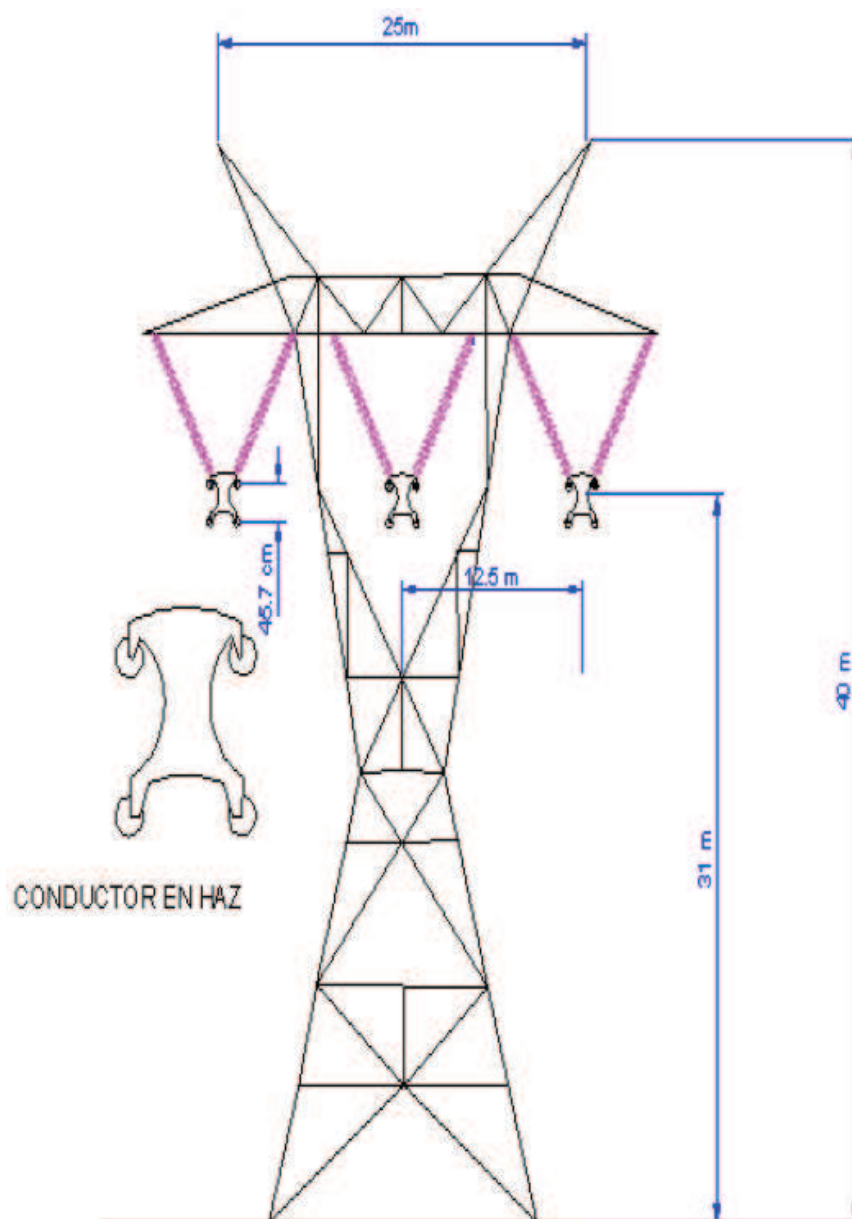


Figura3.1 Estructura de 500 kV [11].

3.2.3 COMPOSICIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV SIMULADO

El sistema simulado es parte del proyectado para el 2014, ver Figura 3.2, el cual va a constar de los siguientes elementos:

Equivalente Thevenin de la Central Coca Codo Sinclair (equivalente considerando dos unidades de generación en funcionamiento).

- 2 Líneas de Transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga de 125km c/u a 500 kV.
- Línea de Transmisión El Inga-Tisaleo de 150km a 500 kV.
- Línea de Transmisión Tisaleo-Chorrillos de 200km a 500 kV.
- Compensación inductiva en cada L/T Coca Codo Sinclair-El Inga de 30 MVAR a cada extremo.
- Compensación inductiva en la barra de la S/E El Inga de 30 MVAR.
- Compensación inductiva en la L/T El Inga-Tisaleo de 90 MVAR y 30 MVAR a cada extremo.
- Compensación inductiva en la L/T Tisaleo-Chorrillos de 30 MVAR y 120 MVAR a cada extremo.

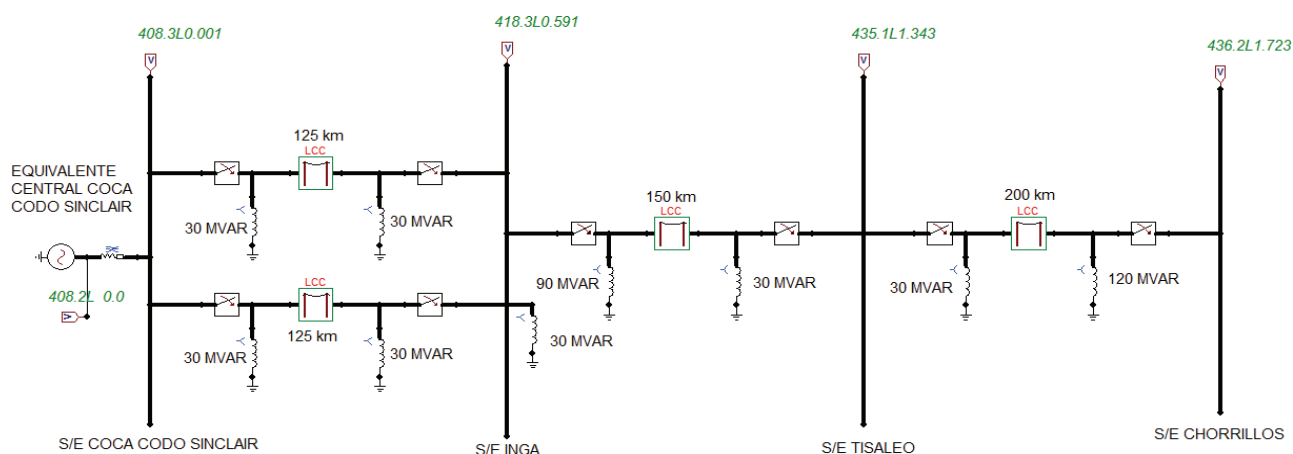


Figura3.2 Sistema de 500 kV simulado en ATP.

CAPÍTULO 4

4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

En este capítulo se realiza las simulaciones de la línea de transmisión como un elemento independiente y como parte del sistema eléctrico de potencia, en el primer caso se realiza un análisis de la sensibilidad de los parámetros de la línea de transmisión ante agentes externos e internos, como parte del sistema eléctrico de potencia se analizan los modelos de líneas de transmisión en condiciones normales de operación, también en transitorios de frente de onda corta producidos por la apertura y cierre de líneas de transmisión.

4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

La sensibilidad de los parámetros de líneas de transmisión con respecto a agentes externos e internos como son la frecuencia, la geometría de la torre, la resistividad del suelo e influencia de los parámetros constantes y dependientes de la frecuencia se estudian en diferentes escenarios de simulación. Los primeros análisis se realizan para el caso de líneas de transmisión de circuito simple de 345kV, con una disposición como indica la Figura 4.1.

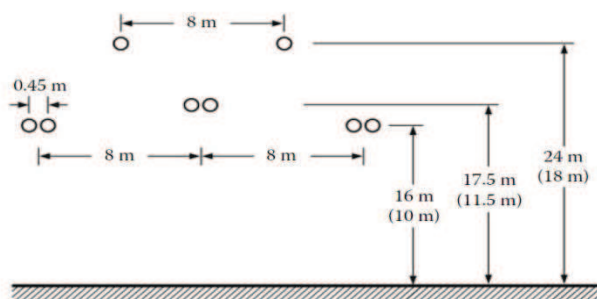


Figura4.1 Esquema de línea de transmisión de 345 kV.

4.1.1 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y GEOMETRÍA DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

El análisis de la respuesta de la impedancia en función de la frecuencia para diferentes alturas del conductor más bajo de la línea de transmisión sobre la tierra, se realiza considerando una resistividad de tierra de $100\Omega m$ y determinando una altura promedio (h) como lo indica la Ec. 2.1. El análisis se realiza para secuencia positiva y secuencia cero.

4.1.1.1 Respuesta de impedancia de secuencia positiva en función de la altura de las torres.

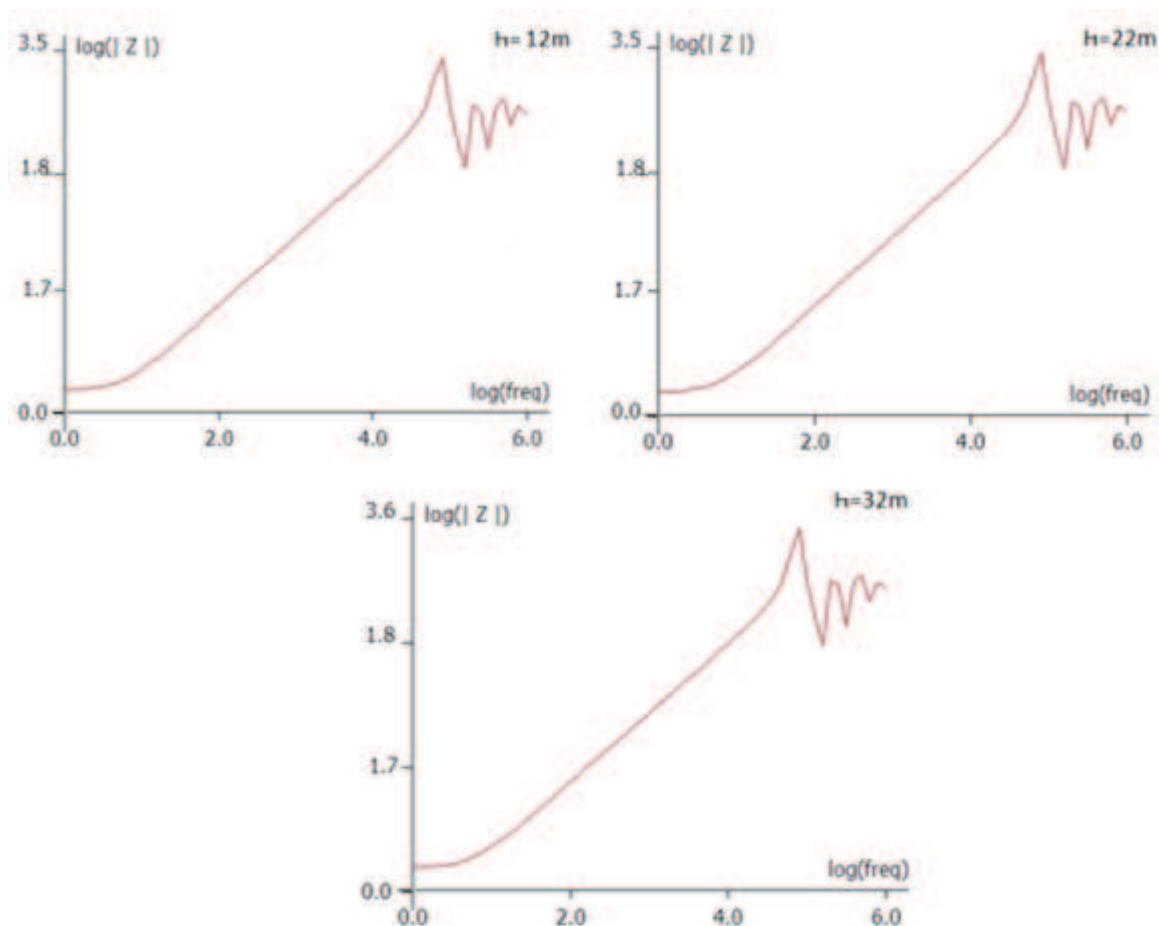


Figura4.2 Respuesta de impedancia de secuencia positiva en función de la altura de las torres.

La Figura 4.2 muestra que tanto para alturas de 12, 22 y 32 metros no se produce grandes variaciones en el valor de impedancia de secuencia positiva, aunque existan grandes variaciones en la altura de la línea de transmisión, por lo cual no se requiere una aproximación exacta de la geometría, en el estudio de líneas de transmisión.

4.1.1.2 Respuesta de impedancia de secuencia cero en función de la altura de las torres.

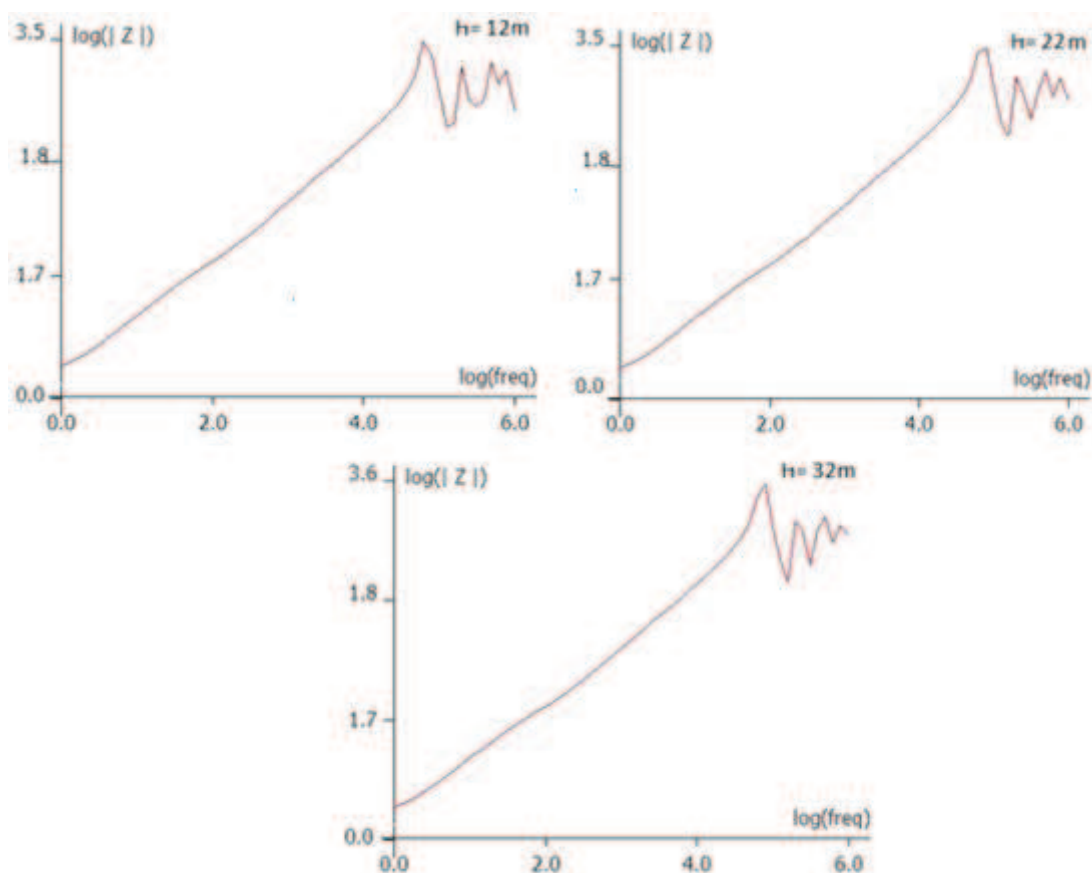


Figura4.3 Respuesta de Impedancia de secuencia cero en función de la altura de las torres.

En la Figura 4.3 se denota que aunque la afectación en el comportamiento de la secuencia cero es mayor a la de secuencia positiva, la variación es pequeña, por ello no es necesaria mayor exactitud al especificar la geometría y altura de las torres,

tomando en cuenta las pequeñas variaciones de parámetros ante grandes variaciones de distancias entre conductores y alturas sobre la tierra.

De los resultados obtenidos se determina como la variación de la impedancia tanto para secuencia positiva como para cero es muy pequeña en relación a la variación de las alturas de las fases sobre tierra.

4.1.2 ANÁLISIS DE PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y RESISTIVIDAD DEL SUELO.

Variación de la Impedancia en función de la Frecuencia y Resistividad del Suelo.

4.1.2.1 Impedancia de Secuencia Positiva:

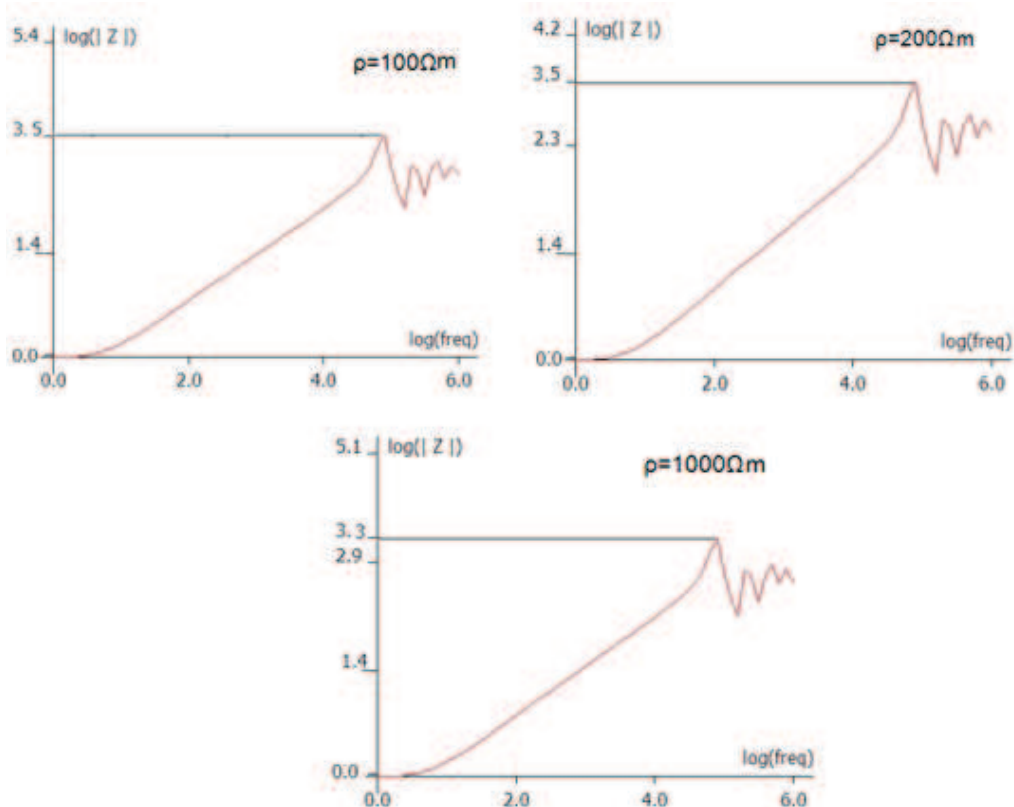


Figura 4.4 Respuesta de Impedancia de secuencia positiva en función de la Frecuencia y Resistividad del suelo.

La Figura 4.4 muestra que para la resistividad del suelo de 100, 200 y 1000 Ωm no se produce grandes variaciones en el valor de impedancia de secuencia positiva, sin embargo se denota una disminución en la impedancia, existiendo una relación inversamente proporcional entre la resistividad del suelo y la impedancia de secuencia positiva, confirmando la teoría expresada en la sección 2.6.1.3, por lo cual no se requiere una aproximación exacta de la resistividad, en estudio de líneas de

transmisión en el que intervenga principalmente impedancia de secuencia positiva como estudios en condiciones normales de operación.

4.1.2.2 Impedancia de Secuencia Cero

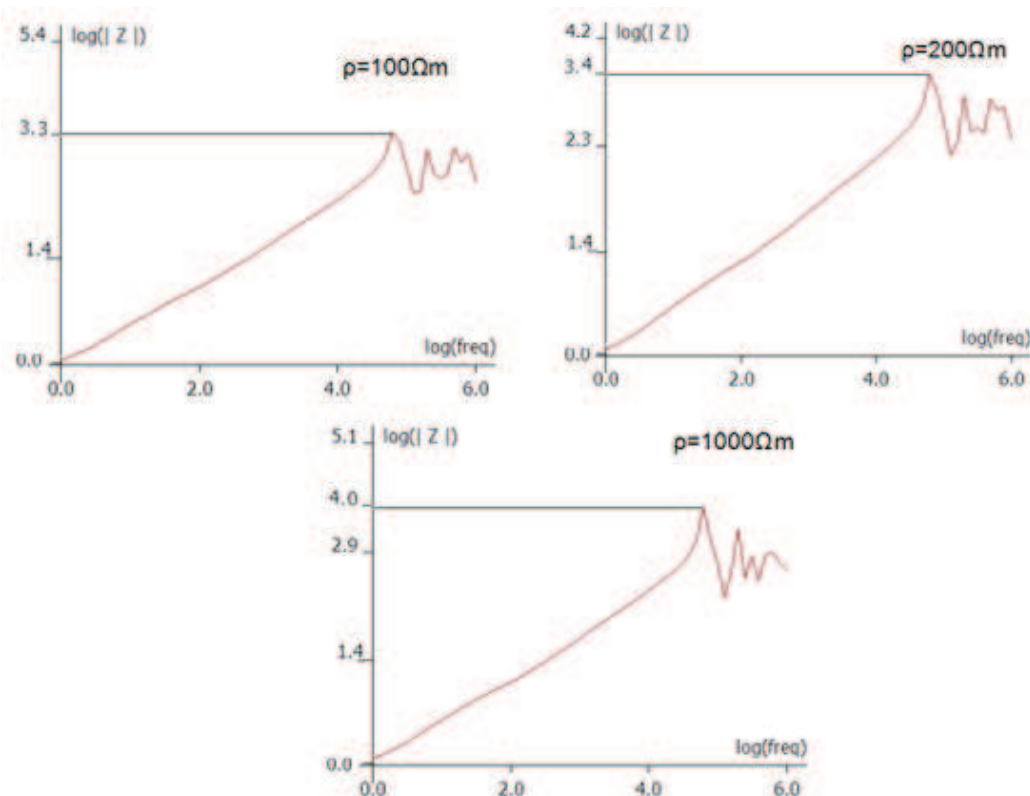


Figura4.5 Respuesta de Impedancia de secuencia cero en función de la Frecuencia y Resistividad del suelo.

En la Figura 4.5 se muestra la respuesta de impedancia de secuencia cero para resistividad del suelo de 100, 200 y 1000 Ωm , en el cual consta el aumento en el valor de impedancia, existiendo una relación proporcional entre la resistividad del suelo y la impedancia de secuencia cero, razón por lo cual, se requiere una aproximación adecuada de la resistividad del suelo en estudios que contengan corrientes de secuencia cero, como fallas fase a tierra. La dependencia de la resistencia con

respecto a la frecuencia puede ser significativo, esto particularmente para la impedancia de secuencia cero a altas frecuencias.

4.1.3 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CABLE DE GUARDA EN ENERGIZACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS CONSTANTES EN FUNCIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

Para el posterior análisis se considera una línea de transmisión de 80km de longitud con parámetros constantes distribuidos, con una disposición geométrica como la indicada en la figura 4.1, la cual es usada para ilustrar los efectos del cable de guarda al momento de energizar la línea de transmisión e indicar la variación de los resultados ante diferentes valores de resistividad del suelo, como se indica en la Figura 4.6.

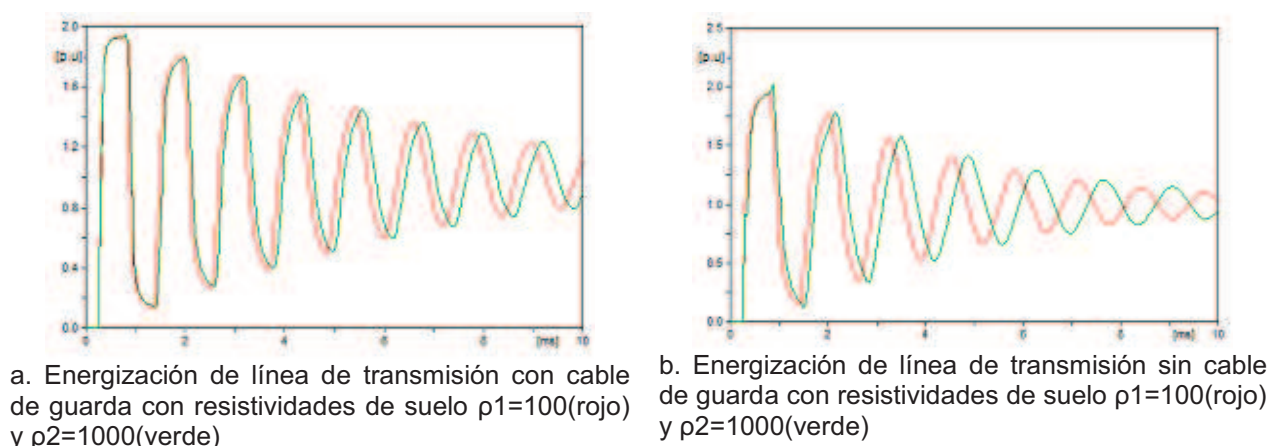


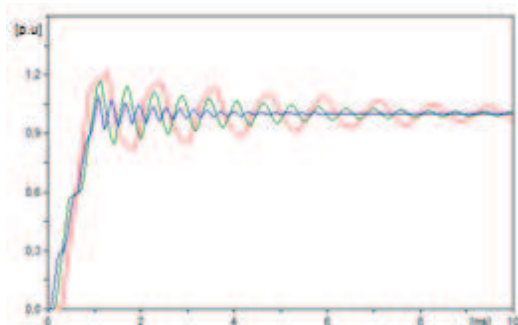
Figura 4.6 Energización de Línea de Transmisión con parámetros constantes en función de la resistividad del suelo y efecto de cable de guarda.

La Figura 4.6 muestra que no existen variaciones en los sobrevoltajes generados. Además se denota que existe una relación inversamente proporcional entre la resistividad del suelo y la velocidad de propagación de las ondas generadas al energizar la línea de transmisión. Por ello, el considerar el cable de guarda favorece a obtener resultados más exactos en los sobrevoltajes producidos en la energización.

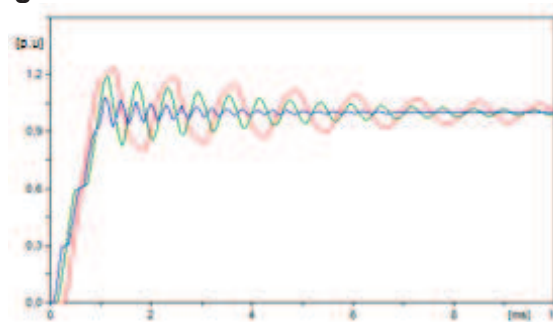
4.1.4 ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CABLE DE GUARDA EN ENERGIZACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA EN FUNCIÓN RESISTIVIDAD DEL SUELO Y SU LONGITUD.

Se considera una línea de transmisión como el de la Figura 4.1 con varias longitudes y parámetros dependientes de la frecuencia, las cuales son usadas para ilustrar los efectos de la longitud de la línea de transmisión e indicar la variación de los resultados ante diferentes valores de resistividad del suelo.

Con cable de guarda

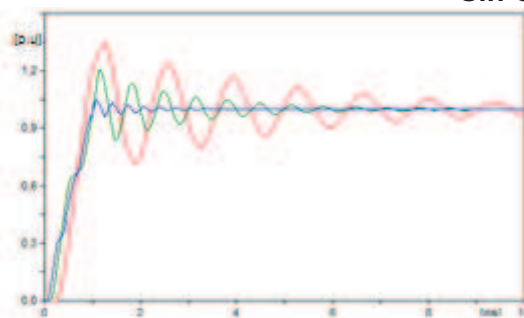


a. Energización de L/T con parámetros dependientes de la frecuencia con longitudes 20km(azul), 40km(verde), 80 km(rojo) con $\rho=100 \Omega m$

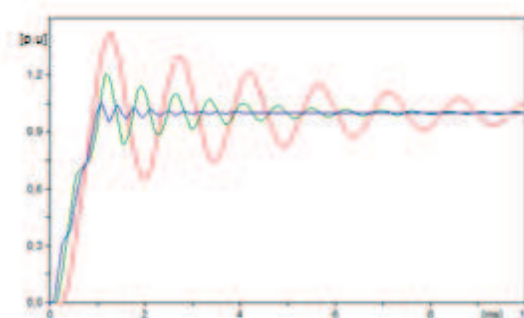


b. Energización de L/T con parámetros dependientes de la frecuencia con longitudes 20km(azul), 40km(verde), 80 km(rojo) con $\rho=1000 \Omega m$

Sin Cable de guarda



c. Energización de L/T con parámetros dependientes de la frecuencia con longitudes 20km(azul), 40km(verde), 80 km(rojo) con $\rho=100 \Omega m$



d. Energización de L/T con parámetros dependientes de la frecuencia con longitudes 20km(azul), 40km(verde), 80 km(rojo) con $\rho=1000 \Omega m$

Figura4.7 Energización de Línea de Transmisión con parámetros dependientes de la frecuencia en función de la resistividad del suelo y efecto de cable de guarda.

La Figura 4.7 indica que a medida que incrementa la longitud de la línea de transmisión en todos los escenarios aumenta el pico de voltaje generado en la energización debido a la mayor capacitancia. Los resultados obtenidos muestran un menor sobrevoltaje generado al tener cable de guarda debido al aumento de impedancia de secuencia positiva.

4.1.5 RESPUESTA TRANSITORIA PARA LA ENERGIZACIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS CONSTANTES Y PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA.

Para el análisis se considera una línea de transmisión de 20km de longitud con parámetros constantes distribuidos y dependientes de la frecuencia, la cual es usada para ilustrar los efectos del cable de guarda al momento de energizar la línea de transmisión e indicar la variación de los resultados ante diferentes valores de resistividad del suelo.

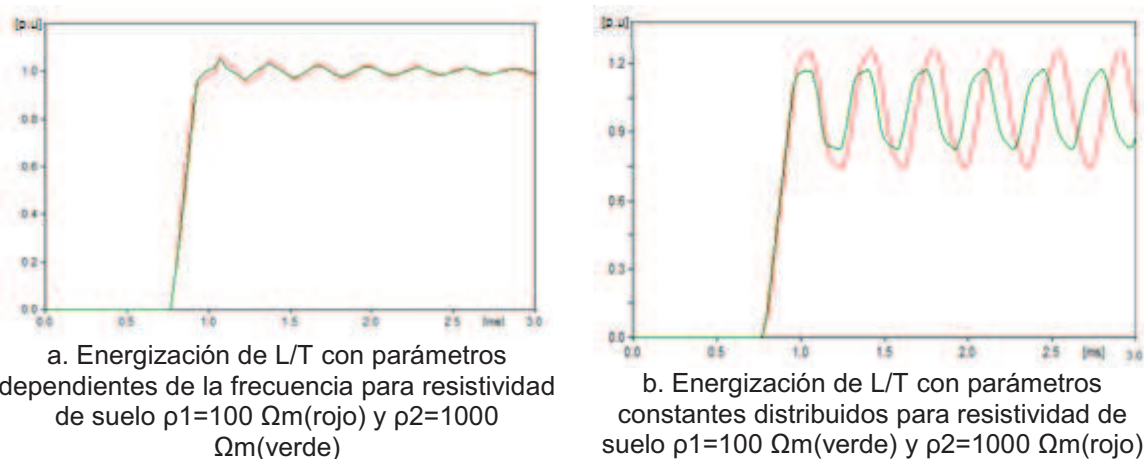


Figura 4.8 Energización de Línea de Transmisión con parámetros constantes en función de la resistividad del suelo y efecto de cable de guarda.

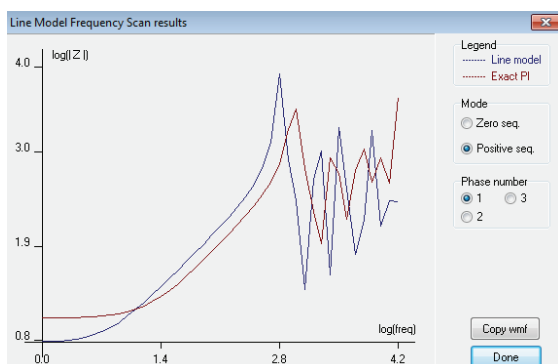
La Figura 4.8 indica que al utilizar parámetros dependientes de la frecuencia, los picos de voltaje generados por la energización son menores, este efecto se debe a que al utilizar parámetros dependientes de la frecuencia el valor de la resistencia

aumenta por el efecto piel atenuando rápidamente a la onda, aún para distancias cortas y en general el valor de impedancia aumenta con la frecuencia, como lo muestran las simulaciones de la sección 4.1.2. Existe un desplazamiento con relación al tiempo 0, el cual es el tiempo de llegada de las ondas más rápidas al extremo receptor de la línea, debido a que se trata de parámetros distribuidos los cuales utilizan el método de solución de ondas viajeras.

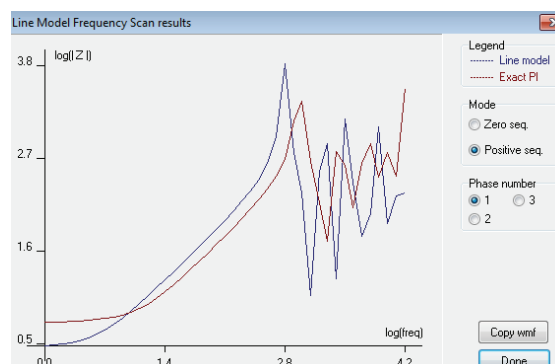
4.1.6 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA Y CERO PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON DIFERENTES NÚMEROS DE CONDUCTORES POR FASE.

Se considera la línea de transmisión de la Figura 4.1 con 1, 2 y 4 conductores por fase con una separación de 45 cm entre conductores, longitud de 80 km y parámetros dependientes de la frecuencia, en la cual se determina la respuesta de impedancia de secuencia positiva y cero en el rango de frecuencia de 0 a 15 kHz.

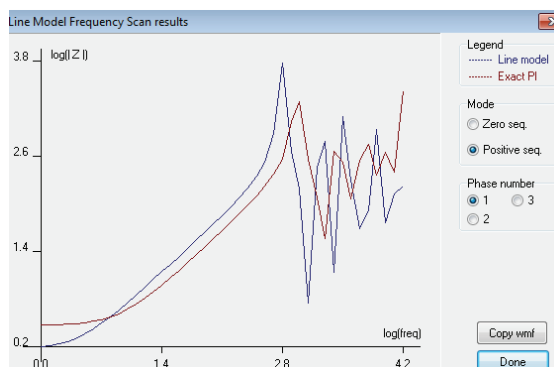
4.1.6.1 Respuesta de impedancia de secuencia positiva en función del número de conductores por fase.



a. Respuesta de impedancia de secuencia positiva para línea de transmisión de un conductor por fase.



b. Respuesta de impedancia de secuencia positiva para línea de transmisión de dos conductores por fase.

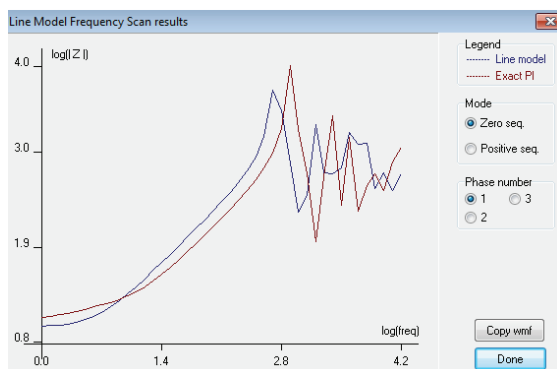


c. Respuesta de impedancia de secuencia positiva para línea de transmisión de cuatro conductores por fase.

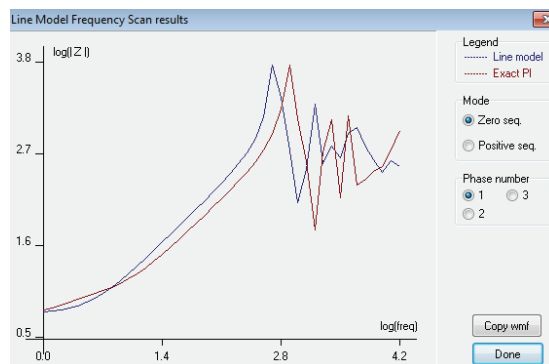
Figura 4.9 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para varios conductores por fase

La Figura 4.9 muestra la respuesta de impedancia de secuencia positiva para líneas de transmisión con diferentes números de conductores por fase, en la que se identifica dos aspectos: el primero el comportamiento semejante de la respuesta de impedancia entre los tres casos debido a que todas tienen la misma geometría de la torre y el segundo la disminución del valor de la impedancia la cual se puede verificar en el valor máximo de impedancia del eje de las ordenadas; al trabajar con haz de conductores por fase la impedancia disminuye como se describe en la Sección 2.6.2

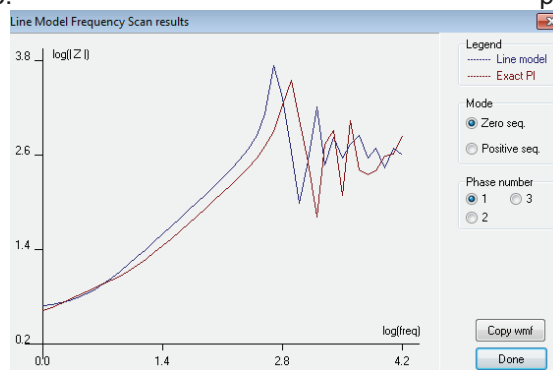
4.1.6.2 Respuesta de impedancia de secuencia cero en función del número de conductores por fase.



a. Respuesta de impedancia de secuencia cero para línea de transmisión de un conductor por fase.



b. Respuesta de impedancia de secuencia cero para línea de transmisión de dos conductores por fase.



c. Respuesta de impedancia de secuencia cero para línea de transmisión de dos conductores por fase.

Figura 4.10 Respuesta de impedancia de secuencia cero para varios conductores por fase.

La Figura 4.10 muestra la respuesta de impedancia de secuencia cero para líneas de transmisión con diferentes números de conductores por fase, se verifica de igual forma dos aspectos: el primero el comportamiento semejante de la respuesta de impedancia entre los tres casos debido a que todas tienen la misma geometría de la torre y el segundo la disminución del valor de la impedancia.

De ambas simulaciones se verifica que al utilizar haz de conductores por fase el valor de impedancia disminuye, lo cual se debe al aumento de su radio geométrico como se lo describe en la Sección 2.6.2. También cabe citar que el efecto no se hace tan

notorio en los casos de dos a cuatro conductores por fase ya que se está trabajando con el mismo radio exterior, ya que entre los conductores de fase existe la misma separación.

Debido a la importancia de la utilización de haz de conductores se determina los valores de impedancia de secuencia positiva y cero para frecuencia (60Hz) y voltaje de operación (345 kV), como se puede verificar en la Tabla 4.1 en condiciones normales de operación.

Tabla 4.1 Valores de Impedancia de Cortocircuito y Circuito Abierto

CONDUCTORES POR FASE	IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO A 60 Hz			IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA A 60 Hz		
	R0 [Ω]	X0 [Ω]	Q0 [Mvar]	R+ [Ω]	X+ [Ω]	Q+ [Mvar]
1	13,2	123,5	33,33	6,54	66,16	43,93
2	8,659	86,79	35,19	3,131	38,98	51,21
4	7,97	74,03	94,03	1,588	36,53	78,84

Los valores de la Tabla 4.1 muestran la disminución de los valores de impedancia de secuencia positiva y cero para 1, 2 y 4 conductores por fase con un espaciamiento de 45 cm, en la que se verifica como al aumentar el número de conductores por fase disminuye la impedancia positiva y cero, además se verifica el incremento de la capacidad de la potencia a transmitir. Se destaca que los valores disminuyen significativamente al tener dos conductores por fase lo cual se debe al decremento de la impedancia al aumentar el RMG, mientras que al aumentar a cuatro conductores por fase se determinó una mayor potencia a transmitir principalmente.

4.1.7 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA PARA LOS MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y SU LONGITUD.

Para el análisis se considera la geometría de la línea de transmisión para el sistema de 500 kV indicada en la Figura 3.1, en los modelos PI, Bergeron y J. Marti en los

cuales se obtiene la respuesta de impedancia de secuencia positiva en el rango de 1 a 15kHz, para la línea de transmisión de 500 kV y en comparación con el modelo π -equivalente, para longitudes de 10km, 50km, 200km y 500km. Los valores tanto de impedancia como de tiempo están en escala logarítmica, debido a las características propias del software ATP.

4.1.7.1 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 10km

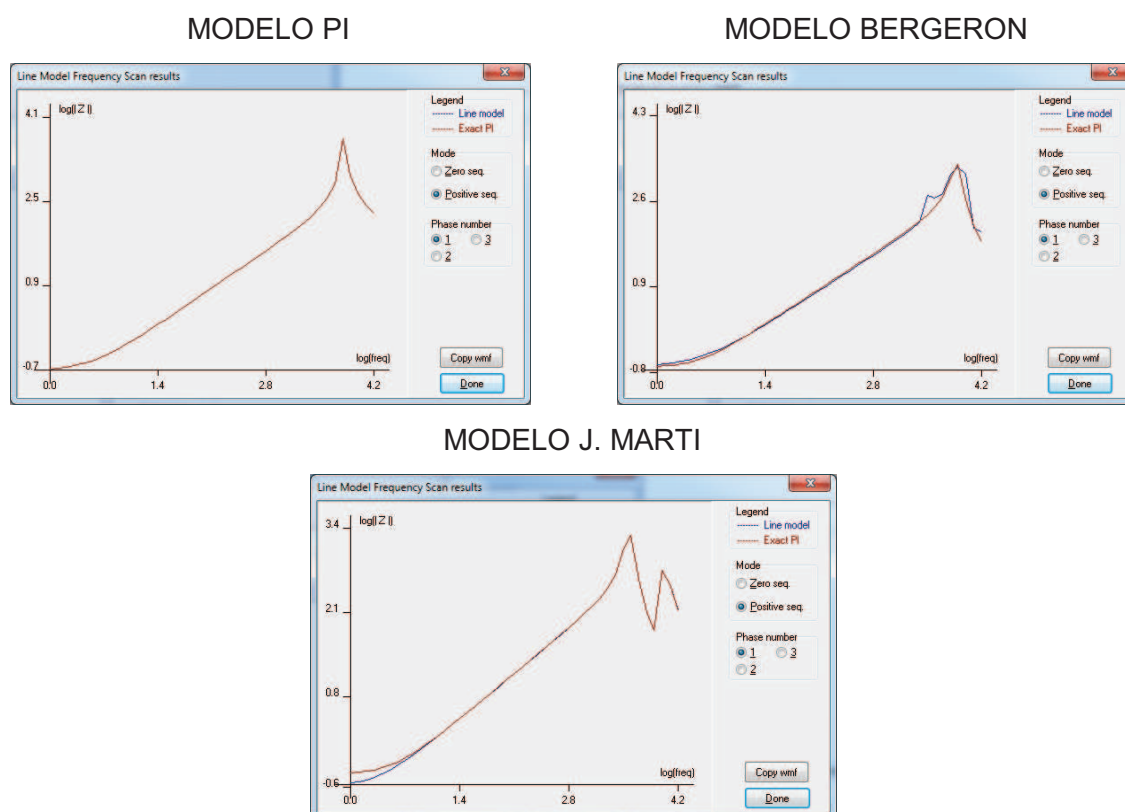


Figura 4.11 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 10 km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.11 muestra la respuesta de impedancia en función de la frecuencia para líneas de transmisión cortas de 10km, en la cual se tiene que para el rango de frecuencias analizado de 1 a 15kHz no existen variaciones significativas entre las respuestas obtenidas de los modelos Pi, Bergeron y J. Marti. Además se observa

que para los rangos de frecuencia cercanos al de operación los modelos PI y Bergeron tiene mejores resultados en la respuesta de impedancia, es decir, resultados más exactos al valor de impedancia Z real en ese rango de frecuencias; Además, tanto el modelo Bergeron como J. Marti son apropiados para estudios de transitorios de mediano rango de frecuencia en líneas de transmisión de corta longitud.

4.1.7.2 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 50km

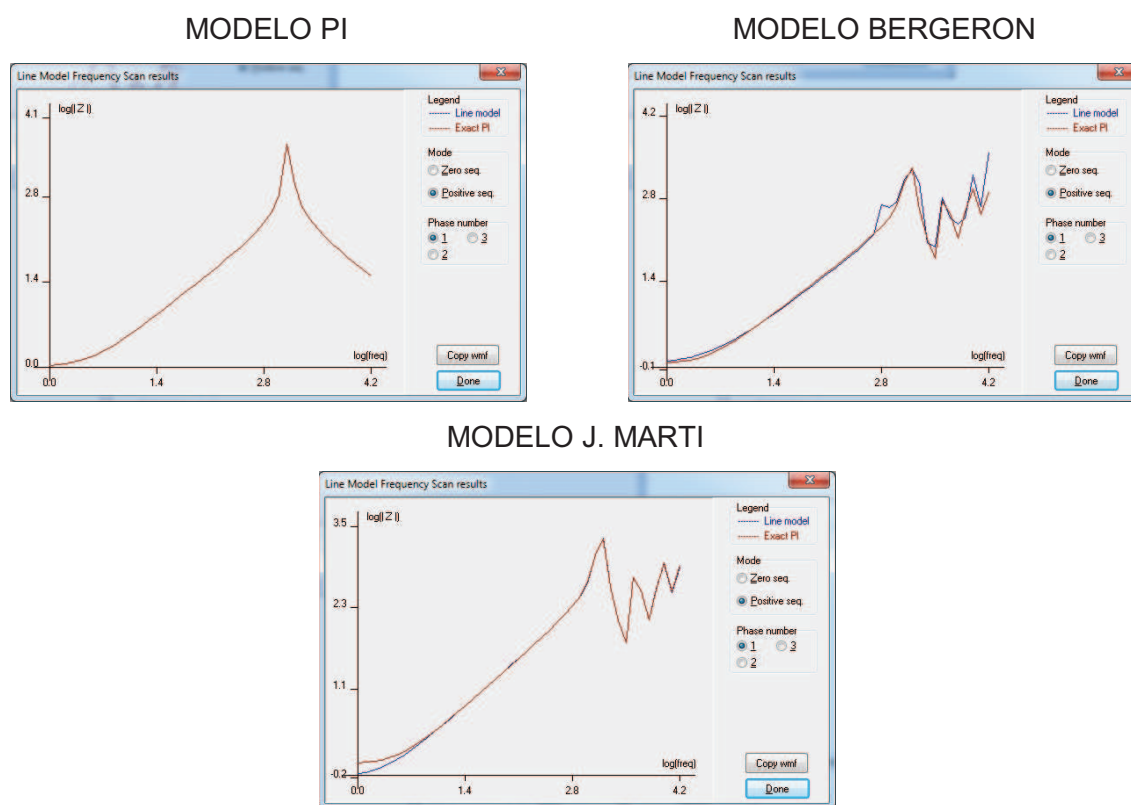


Figura 4.12 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 50km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.12 muestra la respuesta de impedancia en función de la frecuencia para líneas de transmisión de mediana longitud 50km, en la cual se tiene que para el rango de frecuencias de 1 a 15kHz no existen variaciones significativas en la

respuesta obtenida de los modelos Bergeron y J. Marti. El modelo Pi muestra una tendencia errónea a medida que al incrementarse la frecuencia, aunque para frecuencia de operación presenta resultados buenos. Además, se observa que el modelo Bergeron tiene mejores resultados en la respuesta de impedancia para los rangos cercanos a la frecuencia de operación y tanto el modelo Bergeron como J. Marti son apropiados para estudios de transitorios de mediano rango de frecuencia en líneas de transmisión de mediana longitud.

4.1.7.3 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 200km

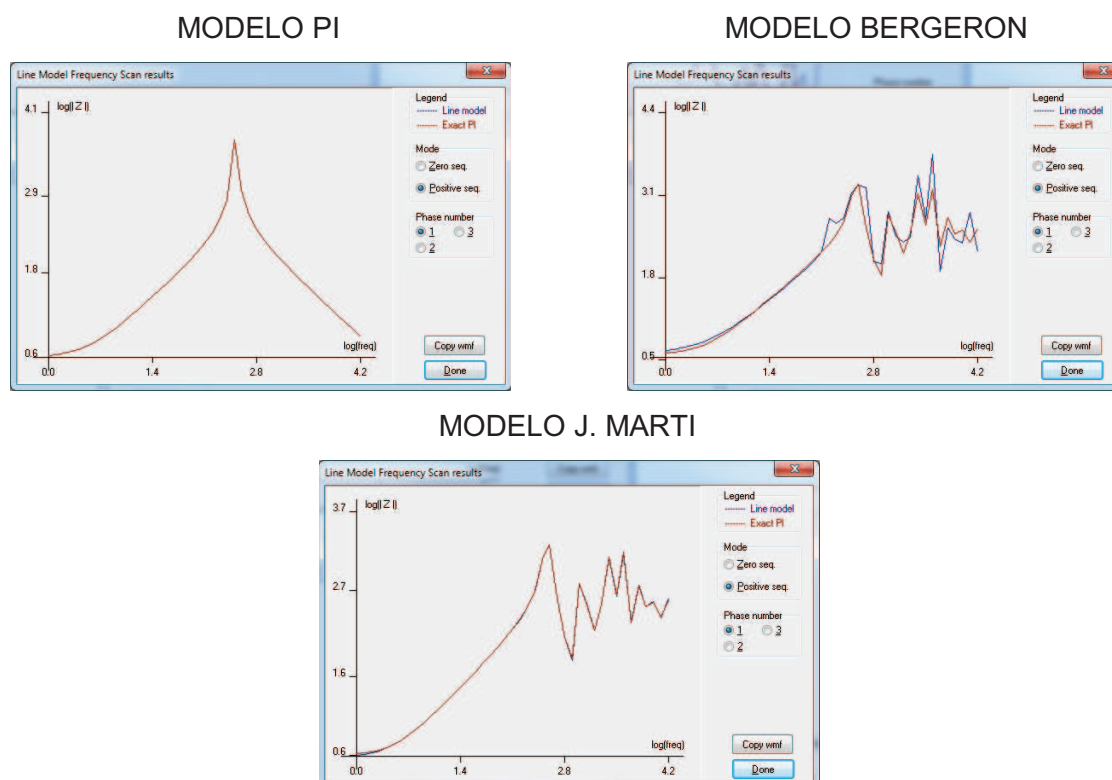


Figura 4.13 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 200km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.13 muestra la respuesta de impedancia en función de la frecuencia para líneas de transmisión de larga longitud 200km, en la cual se observa que para el rango de frecuencia de 1 a 15kHz se denotan pequeñas variaciones en la respuesta

de impedancia obtenida de los modelos Bergeron y J. Marti, siendo este último más exacto. El modelo PI presenta buenos resultados para a la frecuencia de operación, sin embargo muy malos para frecuencias mayores. Además se aprecia que tanto el modelo Bergeron como J. Marti son apropiados para estudios de transitorios de mediano rango de frecuencia en líneas de transmisión de larga longitud.

4.1.7.4 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 500km

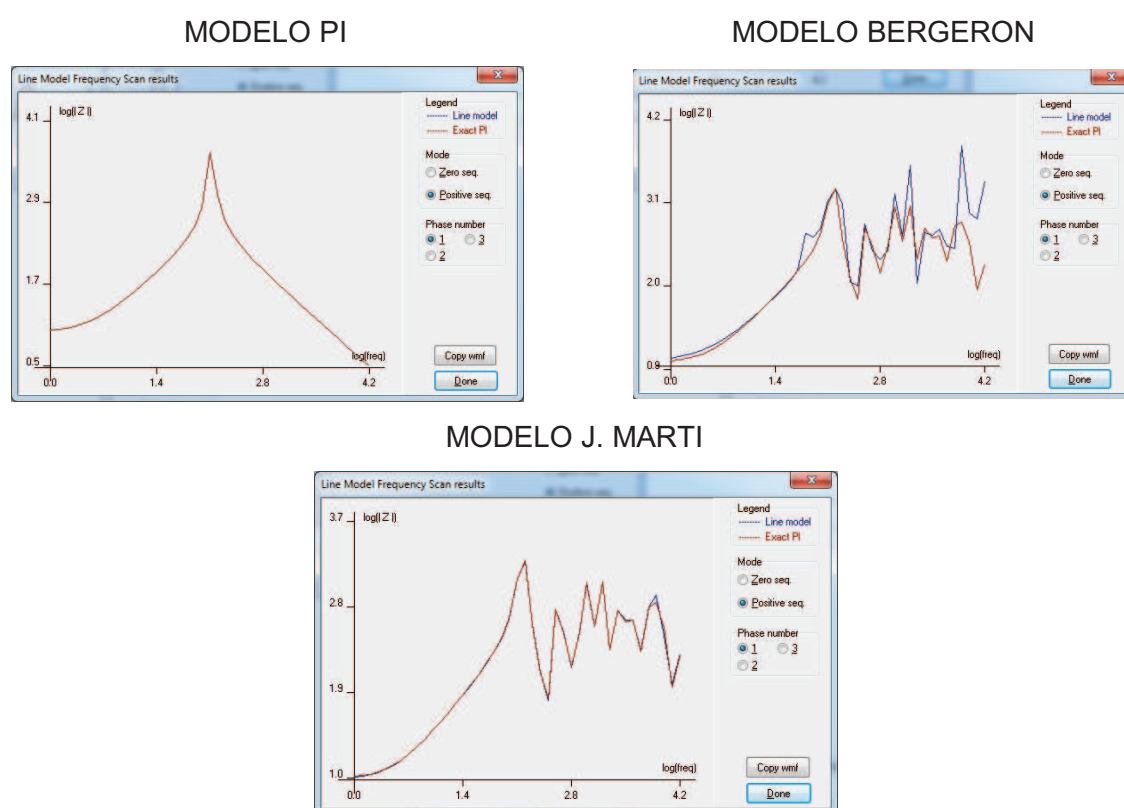


Figura 4.14 Respuesta de impedancia de secuencia positiva para 500km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.14 muestra la respuesta de impedancia en función de la frecuencia para líneas de transmisión de muy larga longitud 500km, en la cual se observa que para el rango de frecuencia de 1 a 15kHz se denotan amplias variaciones en la respuesta de impedancia obtenida de los modelos Bergeron y J. Marti, en especial para el rango de frecuencias más alto, siendo el modelo J. Marti el más exacto. Además se aprecia

que el modelo J. Marti es el apropiado para estudios de transitorios de mediano rango de frecuencia en líneas de transmisión de muy larga longitud.

4.1.8 ANÁLISIS DE RESPUESTA DE IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO PARA LOS MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y SU LONGITUD.

Para el análisis se considera la geometría de la línea de transmisión para el sistema de 500 kV, en los modelos PI, Bergeron y J. Marti en los cuales se obtiene la respuesta de impedancia de secuencia cero en el rango de 1 a 15kHz, en comparación con el modelo π -equivalente, para longitudes de 10km, 50km, 200km y 500km.

4.1.8.1 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 10km

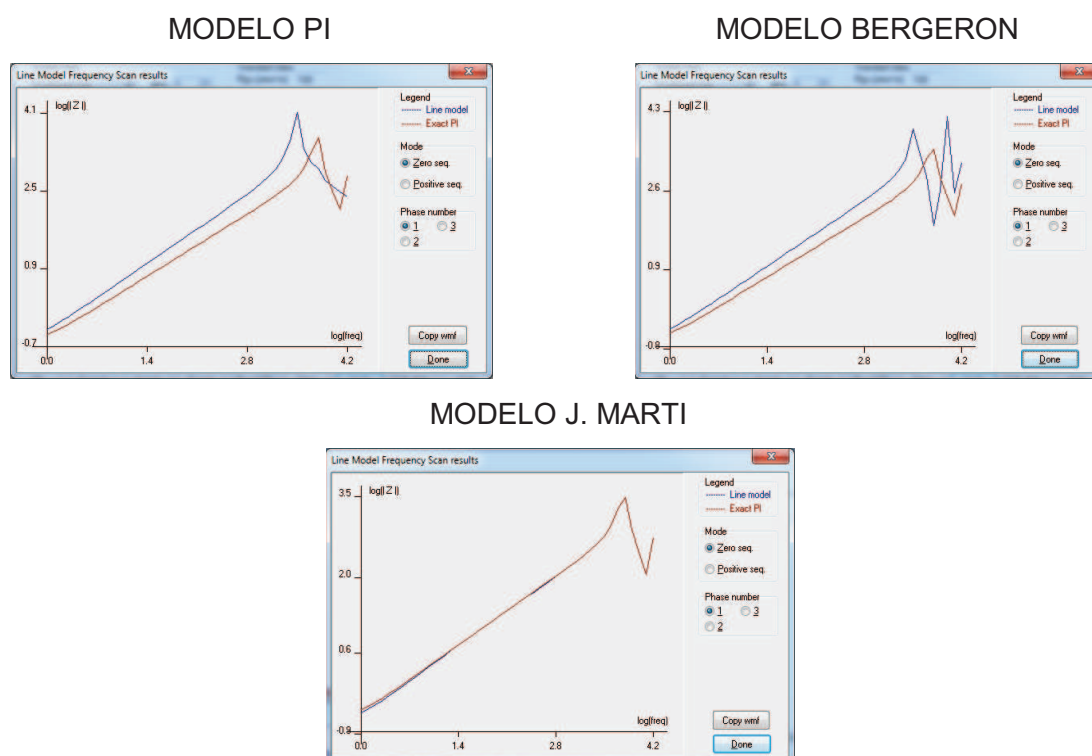


Figura4.15 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 10km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.15 muestra la respuesta de impedancia de secuencia cero en función de la frecuencia para líneas de transmisión de corta longitud 10km, en la cual se observa que en el rango de frecuencia de 1 a 15kHz existen pequeñas variaciones en la respuesta de impedancia de secuencia cero obtenida de los modelos Pi, Bergeron y J. Marti. Los resultados obtenidos con los modelos Pi y Bergeron son una buena aproximación, sin embargo el modelo Bergeron presenta un mejor resultado con pequeñas diferencias, el modelo J. Marti presenta el resultado más exacto, por lo cual es el más indicado para estudios de líneas de transmisión de corta longitud en el que intervenga la secuencia cero.

4.1.8.2 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 50km

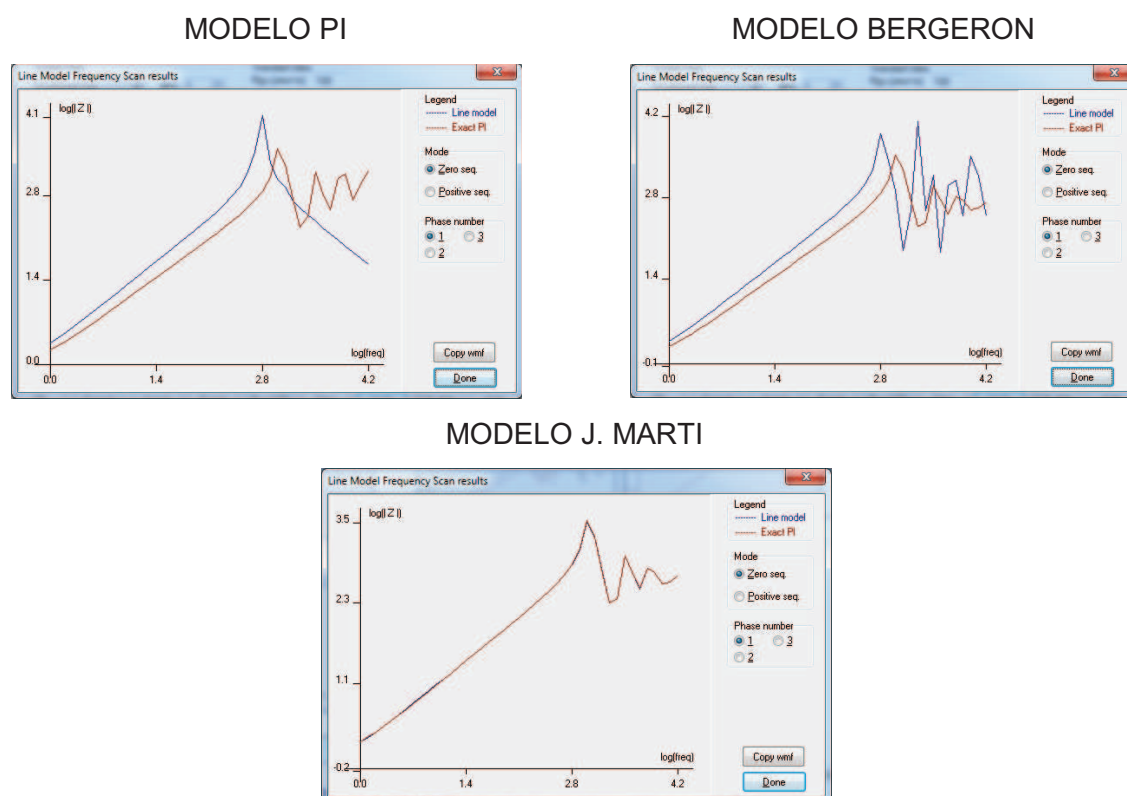


Figura 4.16 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 50km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.16 muestra la respuesta de impedancia de secuencia cero en función de la frecuencia para líneas de transmisión de mediana longitud 50km; en el rango de frecuencia de 1 a 15kHz se denota grandes variaciones en la respuesta de impedancia de secuencia cero obtenida de los modelos Pi, Bergeron y J. Marti. El modelo Pi entrega un resultado erróneo ya que la respuesta de impedancia cero es diferente de modelo π equivalente, el modelo Bergeron presenta un resultado aproximado, el modelo J. Marti presenta el resultado más exacto, por ello es el indicado para estudios de líneas de transmisión de mediana longitud en el que intervenga la secuencia cero, aunque los resultados obtenidos con el modelo Bergeron son una buena aproximación.

4.1.8.3 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 200km

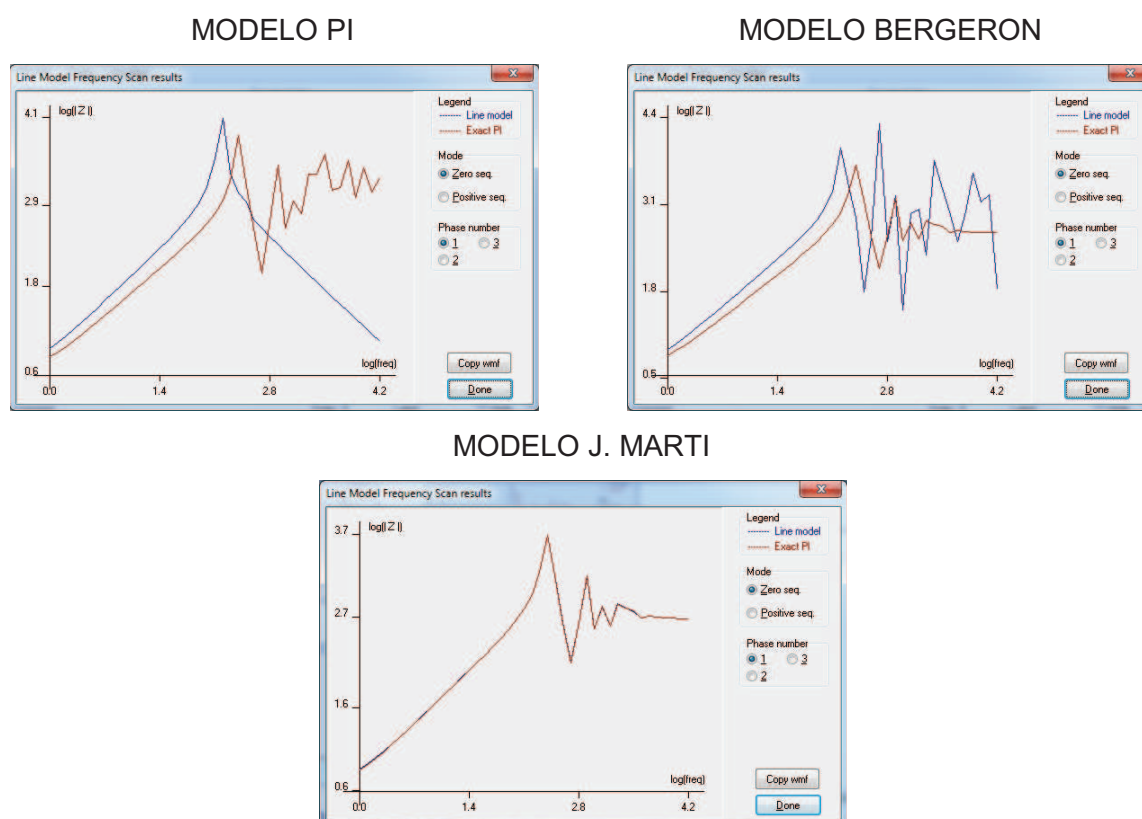


Figura4.17 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 200km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.17 muestra la respuesta de impedancia cero en función de la frecuencia para líneas de transmisión de larga longitud 200km; en la cual se observa que para el rango de frecuencia de 1 a 15kHz existen grandes variaciones en la respuesta de impedancia de secuencia cero obtenida de los modelos Pi, Bergeron y J. Marti. El modelo Pi muestra un resultado completamente erróneo, el modelo Bergeron presenta un resultado aproximado con diferencias significativas, el modelo J. Marti presenta el resultado más exacto, por ello es el indicado para estudios de líneas de transmisión de larga longitud en el que intervenga la secuencia cero.

4.1.8.4 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 500km

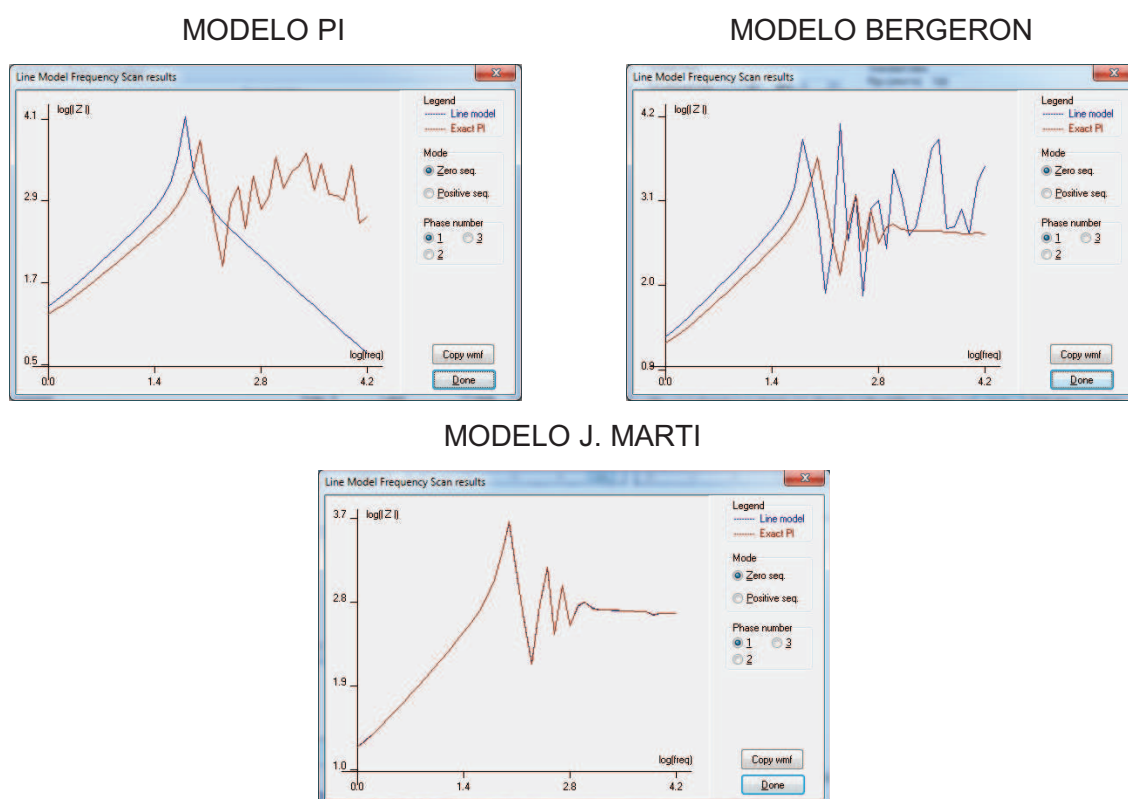


Figura 4.18 Respuesta de impedancia de secuencia cero para 500km para los modelos Pi, Bergeron, J. Marti.

La Figura 4.18 muestra la respuesta de impedancia de secuencia cero en función de la frecuencia para líneas de transmisión de muy larga longitud 500km, en la que se observa que para el rango de frecuencia de 1 a 15kHz existen grandes variaciones en la respuesta de impedancia de secuencia cero de los modelos Pi, Bergeron y J. Marti. El modelo Pi muestra un resultado completamente erróneo, el modelo Bergeron presenta un resultado aproximado con diferencias significativas, el modelo J. Marti presenta el resultado más exacto, por ello es el indicado para estudios de líneas de transmisión de muy larga longitud en el que intervenga la secuencia cero.

De todos los resultados obtenidos en las simulaciones de respuesta de impedancia en función de la frecuencia sin considerar los tiempos computacionales se puede verificar en general que el modelo J. Marti es el más óptimo en medianos y altos rangos de frecuencia, tanto para secuencia positiva y cero, aunque en el rango de frecuencia de operación (60 Hz) su respuesta no es la mejor para líneas de corta y mediana longitud.

El modelo PI presenta una respuesta de impedancia igual para secuencia positiva y cero; en secuencia positiva en el rango de frecuencia cercano al de operación presenta buenos resultados e incorrectos al aumentar la frecuencia y la longitud de la línea de transmisión. En secuencia cero los valores no son correctos en el rango de frecuencias analizado.

El modelo Bergeron entrega resultados muy aproximados en secuencia positiva para todo el rango de frecuencia analizado, aunque a medida que aumenta la longitud de la línea de transmisión la respuesta es menos exacta, en secuencia cero los valores obtenidos presentan un margen de error que es mayor a medida que aumenta la longitud de la línea y la frecuencia a la que se analiza.

4.2 SIMULACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO EN ATP.

El efecto de los modelos de líneas de transmisión se lo analiza a través de la simulación del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV descrito en la sección 3.2.3 principalmente, el cual se ha seleccionado debido a que en este nivel de voltaje la variación de los resultados son más significativos entre los modelos antes descritos.

Se simula en diferentes casos de estudio de sistemas eléctricos de potencia donde intervienen los modelos de líneas de transmisión Pi, Bergeron y J. Marti, para posterior análisis comparativo.

La simulación se realiza en un periodo comprendido entre 0 a 0.1 segundos en pasos de tiempo $\Delta t = 0.00001$, debido a que la relación entre los pasos de tiempo y el tiempo utilizado para la simulación ($\tau/DELTA$) debe tener un valor razonable, es decir τ múltiplo del tiempo de simulación, que depende del sistema en particular, pero que en general está comprendido entre 1 y 10000. Valores menores que a 1 no están permitidos, mientras que los valores superiores a 10000 resultan probablemente muy grandes [11]. En este estudio se utiliza 10000 valores para las simulaciones.

4.2.1 Casos de Estudio

Los casos de estudio que se lleva a cabo están descritos en la tabla 4.2, los cuales fueron designados siguiendo un orden lógico de conexión y desconexión de la red simulada; las gráficas obtenidas de las simulaciones se encuentran en el Anexo C.

Además, también se simula una red pequeña en donde se cambia la línea de transmisión fraccionada que conecta Quito con Guayaquil por una sola línea de transmisión desde la subestación El Inga hasta la subestación Chorrillos, para determinar la influencia de la mayor longitud en la línea de transmisión.

La simulación en estado transitorio se realiza para la energización y apertura de línea de transmisión sin carga, en estos dos escenarios se realiza las operaciones de

apertura y cierre de interruptores en el pico de onda, es decir, cuando está en su máximo valor.

Tabla 4.2 Casos de Estudio para Sistema de 500 kV simulado.

CASOS DE ESTUDIO PARA EL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN DE 500 kV		
Caso 1:	Estado Estable	
	Caso 1.1	Respuesta en estado estable del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV
	Caso 1.2	Respuesta en estado estable del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con línea de transmisión de 350 km.
Caso 2:	Estado Transitorio Energización de Líneas de transmisión sin carga	
	Caso 2.1	Respuesta en energización de la primera línea de transmisión Coca Codo Sinclair - EL Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 2.2	Respuesta en energización de la segunda línea de transmisión Coca Codo Sinclair - EL Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 2.3	Respuesta en energización de la primera línea de transmisión EL Inga-Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 2.4	Respuesta en energización de la primera línea de transmisión Tisaleo - Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 2.5	Respuesta en energización de la primera línea de transmisión EL Inga - Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv con línea de transmisión de 350 km.
Caso 3:	Estado Transitorio Apertura de Líneas de transmisión sin carga	
	Caso 3.1	Apertura de Líneas de transmisión Tisaleo-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 3.2	Apertura de Líneas de transmisión El Inga-Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 3.3	Apertura de Líneas de transmisión Coca Codo Sinclair - EL Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv.
	Caso 3.4	Apertura de Líneas de transmisión Coca Codo Sinclair - EL Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv con el resto del sistema energizado.
	Caso 3.5	Apertura de Líneas de transmisión Coca Codo Sinclair - EL Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kv con el resto del sistema energizado y línea de transmisión de 350 km.

4.2.2 RESULTADOS DE SIMULACIONES DE CASOS DE ESTUDIO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ESTUDIOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

Los resultados de las simulaciones que se obtienen se encuentran en el Anexo C, los cuales contribuyeron para realizar la tabulación y determinar una gráfica conjunta entre los resultados de los modelos Pi, Bergeron y J. Marti en la subestación de llegada con la mayor afectación para cada caso de estudio.

4.2.2.1 Estado Estable

Caso 1.1: Respuesta en estado estable de la Línea de Transmisión Tisaleo-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

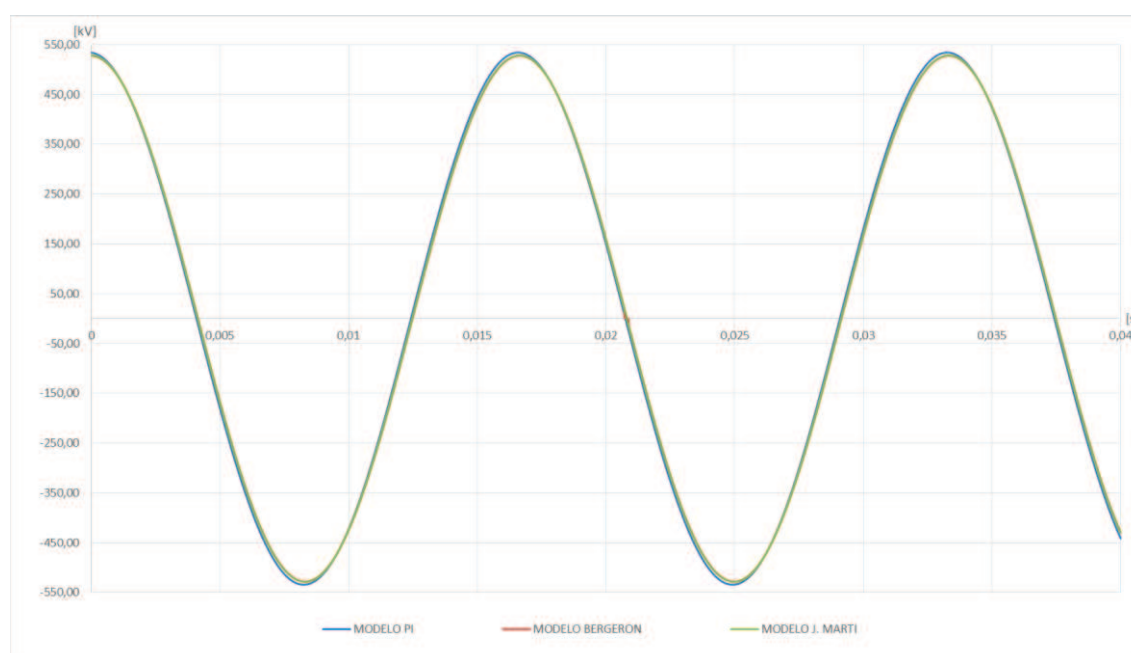


Figura 4.19 Respuesta de simulación en Estado Estable de la onda de voltaje del SNT de 500 kV medida en Subestación Chorrillos

La Figura 4.19 muestra la respuesta de simulación en estado estable de la onda de voltaje medida en Subestación Chorrillo, la cual no presenta variaciones significativas entre los modelos Pi, Bergeron y J. Marti confirmando la teoría de la sección 2.11.1 y

el análisis de sensibilidad de la línea de transmisión, los cuales mostraban que cualquiera de los modelos analizados presentan resultados próximos en estado estable. De igual forma se observa que a pesar de la compensación reactiva a los extremos de cada línea el efecto Ferranti se hace presente, aumentando el nivel de voltaje a cerca del 7% en la subestación Chorrillo con respecto a la medición en Coca Codo Sinclair, como se muestra en la tabla 4.2.

Caso 1.2: Respuesta en estado estable de la Línea de Transmisión El Inga-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con línea de transmisión de 350km.

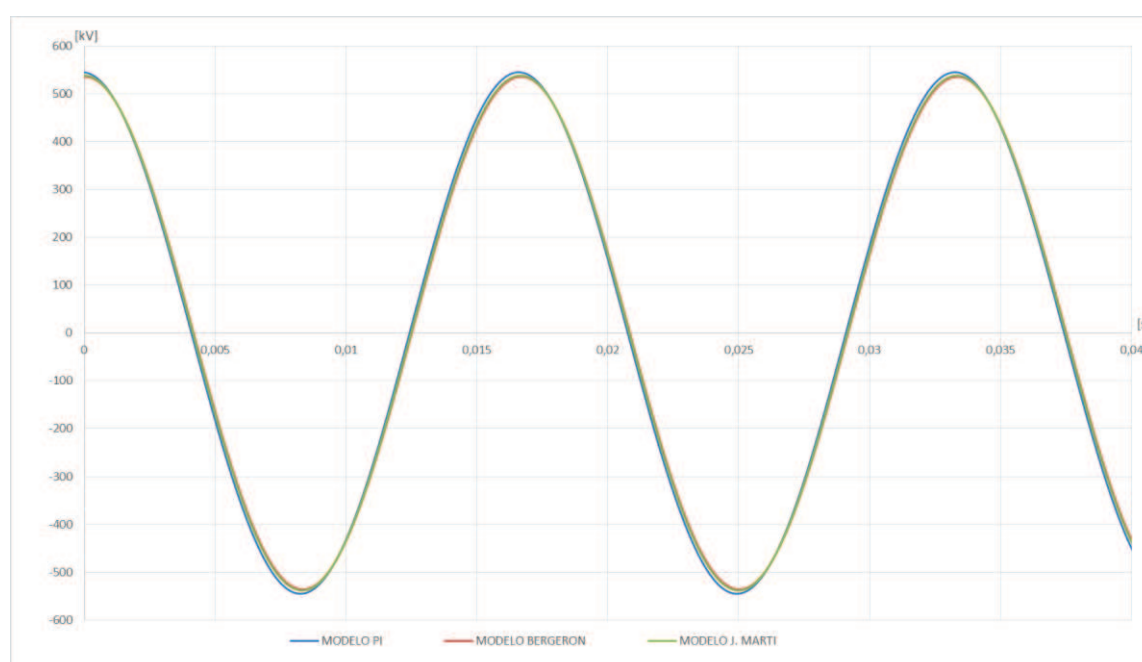


Figura4.20 Respuesta de simulación en Estado Estable de la onda de voltaje del SNT de 500 kV con línea de transmisión de 350km medida en Subestación Chorrillos.

La Figura 4.20 muestra la respuesta de simulación en estado estable de la onda de voltaje medida en Subestación Chorrillos, con línea de transmisión de 350km, la cual no presenta variaciones significativas entre los modelos Pi, Bergeron y J. Marti. El efecto Ferranti se hace presente elevando el valor del voltaje en un 10% en la

subestación Chorrillo con relación a la medición obtenida en la subestación Coca Codo Sinclair, como se muestra en la tabla 4.2.

4.2.2.2 Simulación en estado transitorio: Energización de Líneas

Las simulaciones de energización de las líneas del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV indicada en la Figura 3.2 se realiza partiendo desde la central Coca Codo Sinclair por una de las dos líneas de transmisión que enlazan la central Coca-Codo Sinclair con la subestación El Inga, siguiendo un orden hasta llegar a la subestación Chorrillos y mostrando las mediciones en cada extremo último energizado.

Caso 2.1: Respuesta en energización de la primera Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair- El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

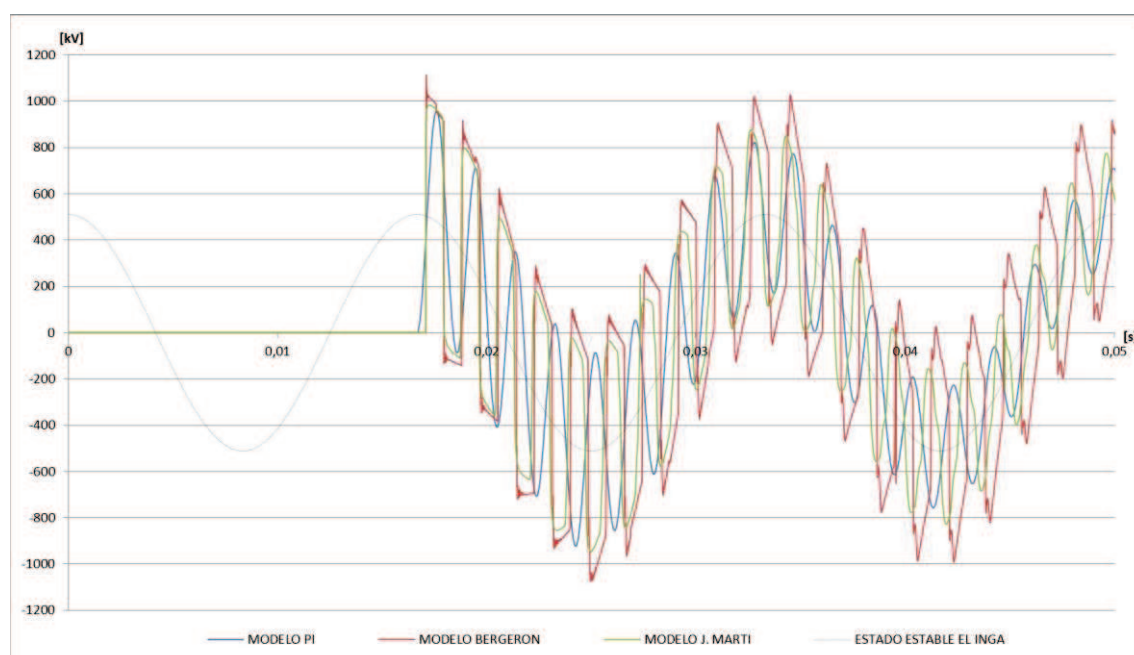


Figura 4.21 a. Respuesta de simulación en energización de la primera Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair- El Inga del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.

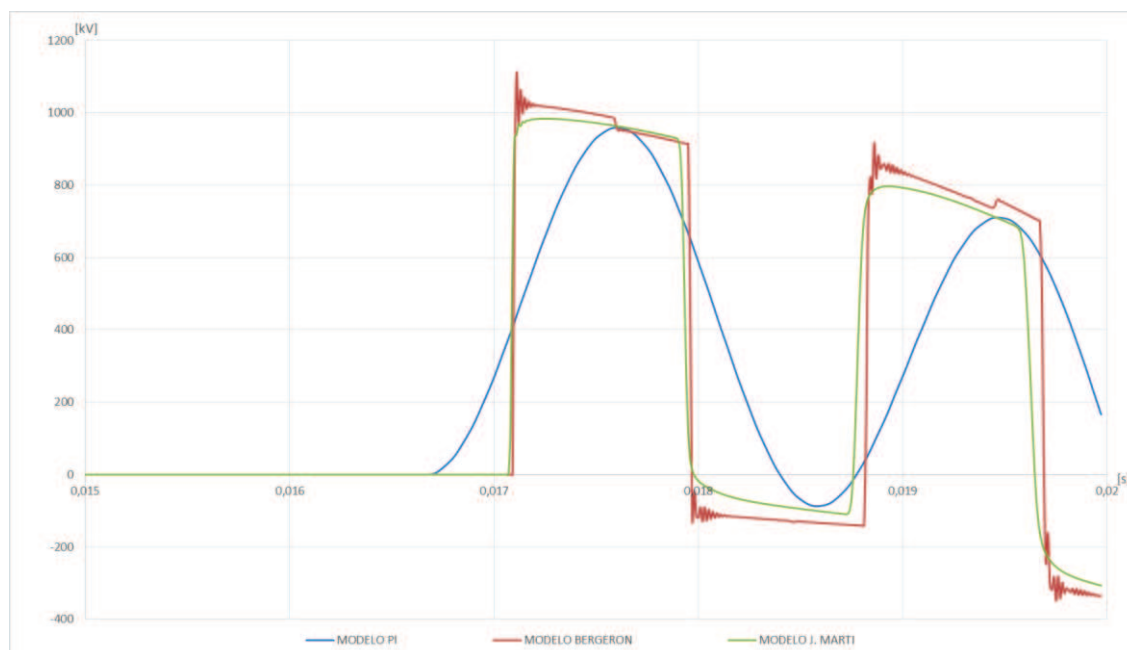


Figura 4.21 b. Zoom de la respuesta de simulación en energización de la primera Línea de Transmisión Coca Coco Sinclair- El Inga del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.

La Figura 4.21 muestra la respuesta de simulación en energización de la primera Línea de Transmisión de 125 km Coca Codo Sinclair-El Inga del SNT de 500 kV indicada en la Figura 3.2, con la medición de la onda de voltaje realizada en la Subestación El Inga en la cual se verifica que los modelos Bergeron y J. Marti tienen un retraso respecto al modelo Pi debido a la técnica de solución de ondas viajeras descrita en las sección 2.10. Los valores obtenidos en los tres modelos no presentan grandes variaciones debido a que se trata de un transitorio de mediano rango de frecuencia y como se verifica en la respuesta de impedancia para líneas de mediana longitud en la sección 4.1.6 los valores son aproximados entre los tres modelos, siendo el modelo J. Marti el más exacto por lo cual se considera como referencia para el resto de modelos en este tipo de transitorios.

Caso 2.2: Respuesta en energización de la segunda Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

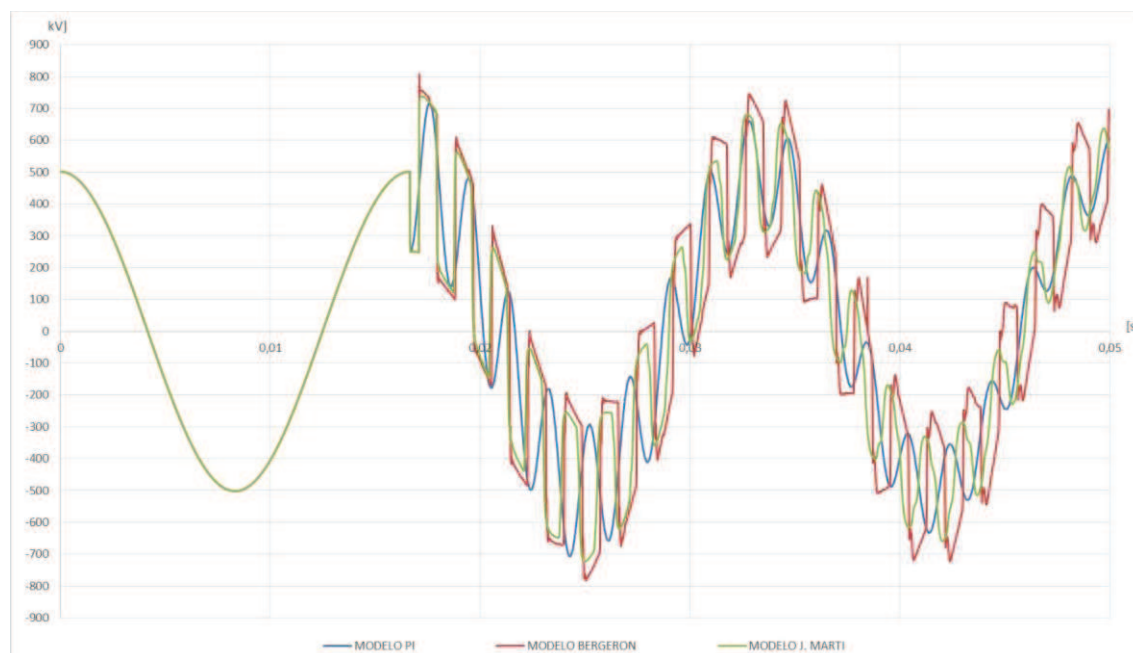


Figura4.22 Respuesta de simulación en energización de la Segunda Línea de Transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.

La Figura 4.22 muestra la respuesta de voltaje en la subestación El Inga de la energización de la segunda Línea de Transmisión de 125km Coca Codo Sinclair-El Inga previa energización en estado estable de la primera línea de transmisión de 500 kV, indicado en la Figura 3.2 del SNT, la medición de la onda de voltaje muestra que los modelos Bergeron y J. Marti tienen un retraso respecto al modelo Pi en el momento de energización debido a la técnica de solución de ondas viajeras, descrita en las secciones 2.9 y 2.10.2. Además se determina que los picos de voltaje son menores con respecto al caso 2.1 debido al sistema estable en paralelo previo a la energización de la segunda línea en paralelo.

Caso 2.3: Respuesta en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

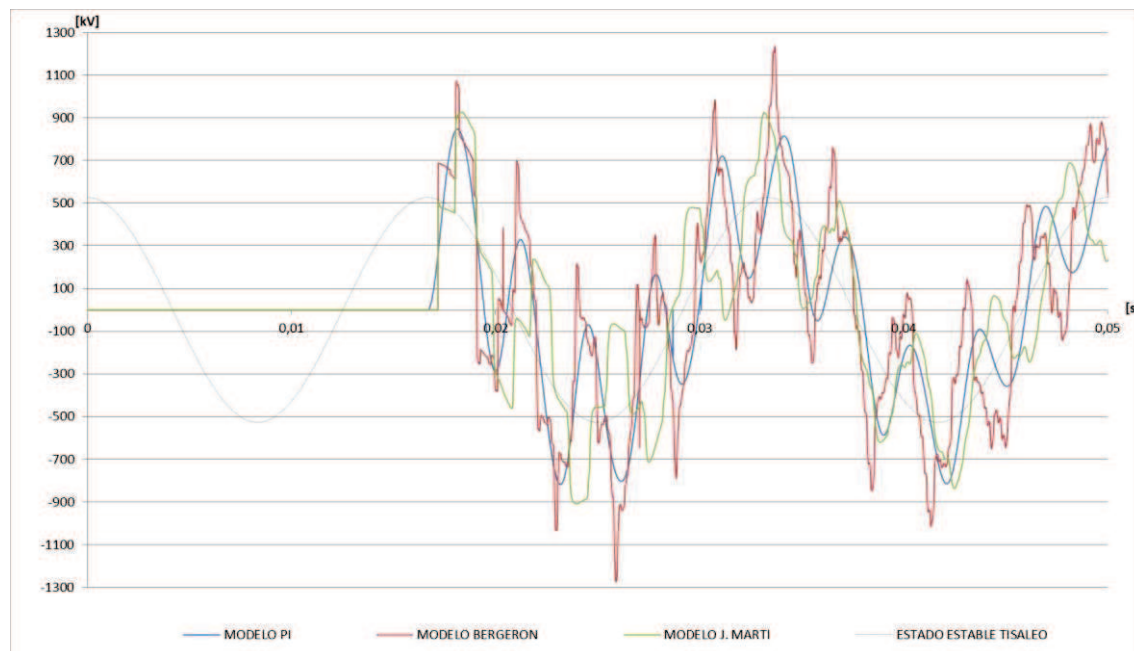


Figura 4.23 Respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Tisaleo del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación Tisaleo.

La Figura 4.23 muestra la respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión de 150km El Inga-Tisaleo previo energización en estado estable de las dos líneas de transmisión Coca Coco Sinclair-El Inga, indicado en la Figura 3.2. La medición de la onda de voltaje se realiza en la Subestación Tisaleo determinándose que los modelos Bergeron y J. Marti tienen un retraso respecto al modelo Pi en el momento de energización debido a la técnica de solución de ondas viajeras descrita en las secciones 2.9 y 2.10.2. Además, muestra picos de voltaje mayores con respecto al caso 2.2 debido a que en este caso solo existe una línea que enlaza las dos subestaciones.

Caso 2.4: Respuesta en energización de la Línea de Transmisión Tisaleo-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

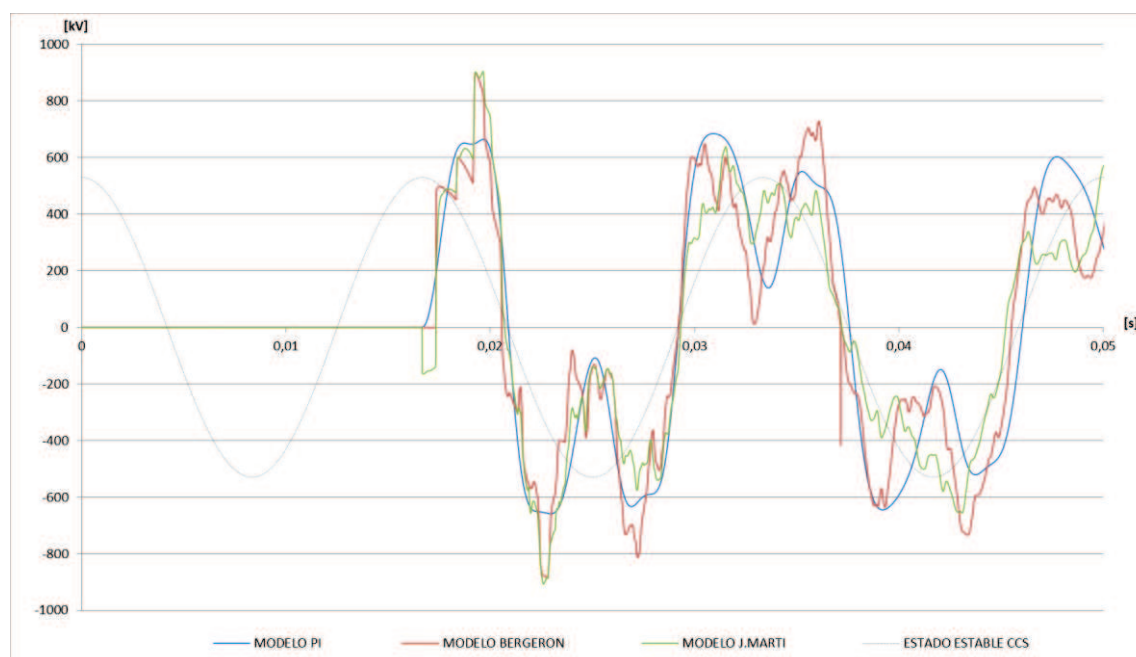


Figura 4.24 Respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión Tisaleo-Chorrillos del SNT de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.

La Figura 4.24 muestra la respuesta de simulación en energización de la línea de transmisión de 200km Tisaleo-Chorrillos, indicado en la Figura 3.2. La medición de la onda de voltaje realizada en la Subestación Chorrillos indica que los modelos Bergeron y J. Marti tienen un retraso respecto al modelo Pi en el momento de energización, debido a la técnica de solución de ondas viajeras descrita en las secciones 2.9 y 2.10.2. Se aprecia el comportamiento de la onda de voltaje del modelo Pi no sigue la tendencia de los modelos Bergeron y J. Marti debido a su naturaleza de parámetros concentrados y constantes confirmando lo descrito en la sección 2.10.2 en las soluciones para estado transitorio, también confirma el análisis de la respuesta de impedancia en función de la frecuencia en donde se observa que a mayor longitud de la línea peores resultados del modelo Pi en estado transitorio.

Caso 2.5: Respuesta en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con línea de transmisión de 350km.



Figura4.25 Respuesta de simulación en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Chorrillos del SNT de 500 kV con línea de transmisión de 350km, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.

La Figura 4.25 muestra la respuesta de la simulación en energización de la línea de transmisión El Inga-Chorrillos de 350km. La medición de la onda de voltaje se realiza en la Subestación Chorrillos la cual indica que los modelos Bergeron y J. Marti tienen un retraso respecto al modelo Pi debido a la técnica de solución de ondas viajeras y es mayor a casos anteriores debido a la mayor longitud de la línea. Además el pico de voltaje o el sobrevoltaje es mayor debido al aumento de la capacitancia de la línea.

4.2.2.3 Simulación en estado transitorio: Apertura de Líneas

Las simulaciones en apertura de líneas de transmisión del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV indicada en la Figura 3.2 se realiza partiendo de la condición del sistema energizado en su totalidad y en estado estable, la apertura de las líneas se realiza desde la última línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos hasta desenergizar la red por completo, la medición mostrada será del último punto energizado del SNT. El transitorio de frente de onda lento se produce al desconectar la línea de transmisión debido a la variación de la cantidad de reactivos en el sistema producido por la variación de reactivos capacitivos principalmente en la línea de transmisión desconectada, el transitorio producido es de menor rango de frecuencia que en energización.

Caso 3.1: Apertura de Líneas de transmisión Tisaleo-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

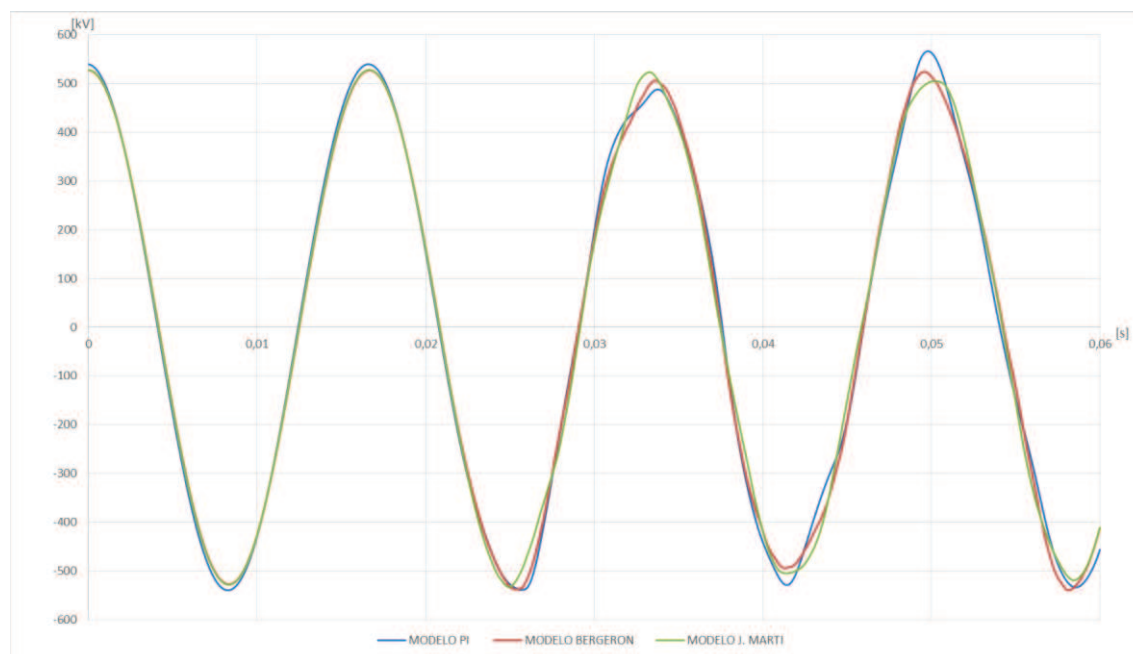


Figura 4.26 Respuesta de apertura de la Línea de Transmisión Tisaleo – Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación Tisaleo.

La Figura 4.26 muestra la respuesta de simulación en la apertura de la línea de transmisión de 200km Tisaleo-Chorrillos en el instante $t = 0.016s$, la medición de la onda de voltaje se realiza en la Subestación Tisaleo; se verifica en los modelos Pi, Bergeron y J. Marti valores cercanos entre sí, debido a que se trata de un transitorio de bajo rango de frecuencia, como lo indica la respuesta de impedancia en la sección 2.1.6, la cual muestra valores próximos en dichas frecuencias entre los modelos, de igual forma la respuesta de impedancia presenta en el modelo Pi una tendencia distinta; se refleja en la simulación una pequeña variación de la respuesta entre los modelos Bergeron y J Marti, los cuales son más cercanos al valor del transitorio producido.

Caso 3.2: Apertura de Líneas de transmisión El Inga –Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

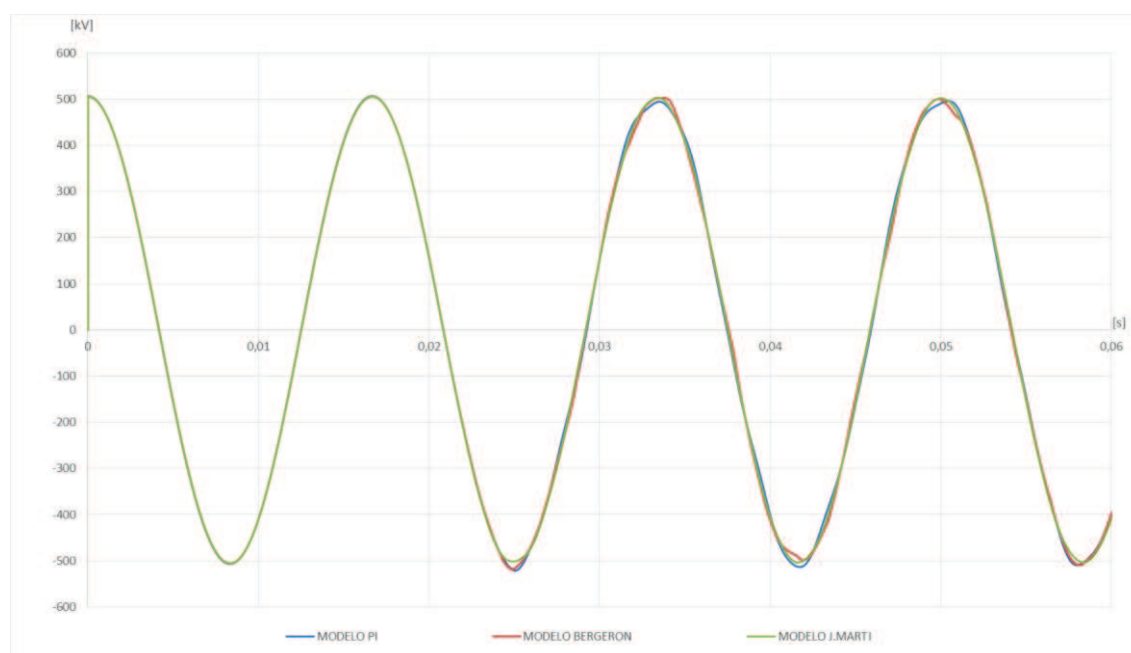


Figura 4.27 Respuesta de apertura de línea de transmisión EL Inga-Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.

La Figura 4.27 muestra la respuesta de simulación en la apertura de la línea de transmisión de 150km El Inga-Tisaleo en el instante $t = 0.016s$, la medición de la

onda de voltaje se realiza en la Subestación Tisaleo, se verifica en los modelos Pi, Bergeron y J. Marti valores cercanos entre sí, debido al transitorio de bajo rango de frecuencia, como lo indica la respuesta de impedancia en la sección 2.1.6, en la que se tiene valores próximos en dichas frecuencias entre los modelos.

Caso 3.3: Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

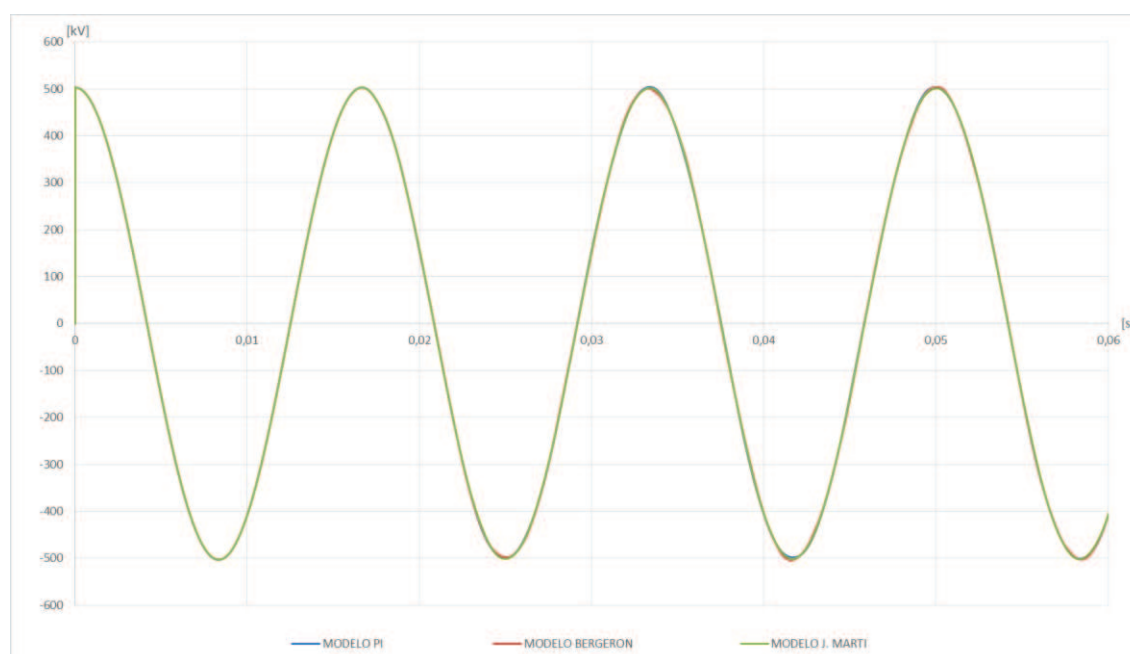


Figura 4.28 Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, medición de la onda de voltaje Subestación El Inga.

La Figura 4.28 muestra la respuesta de simulación en la apertura de la línea de transmisión de 125km Coca Codo Sinclair - El Inga, la medición de la onda de voltaje se realiza en la Subestación El Inga, se verifica en los modelos Pi, Bergeron y J. Marti valores muy cercanos entre sí, debido a que la variación de reactivos es mucho menor ya que es una línea de transmisión más corta, además tiene una línea en paralelo lo cual ayuda a la estabilidad del sistema.

Caso 3.4: Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair - El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado.

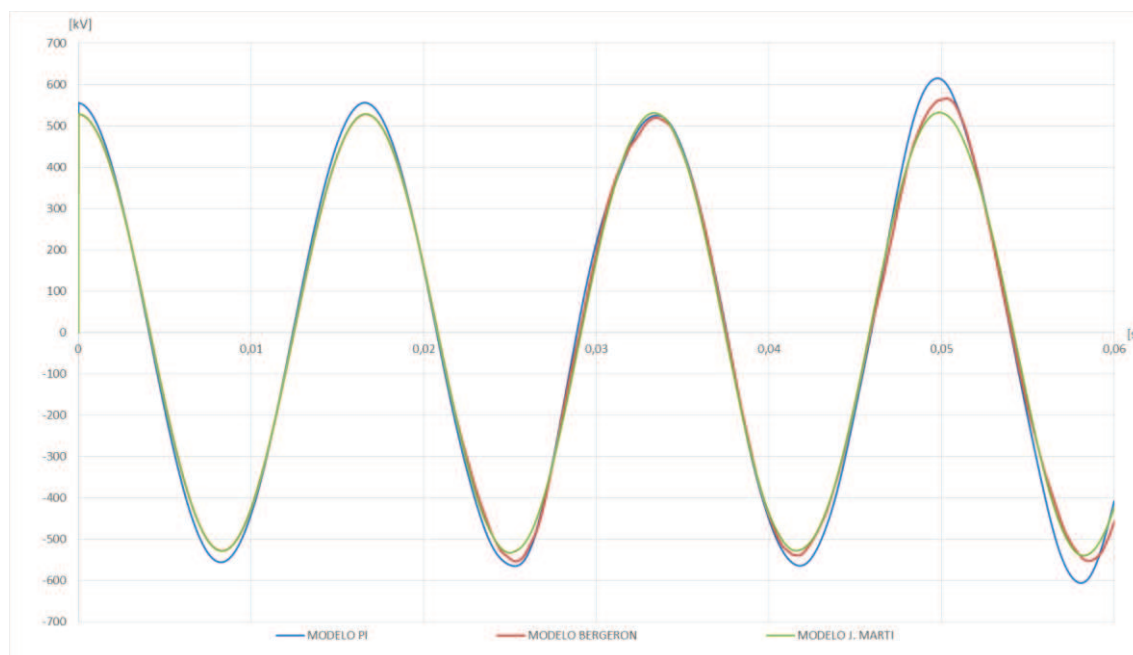


Figura 4.29 Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.

La Figura 4.29 muestra la respuesta de simulación en apertura de la línea de transmisión Coca Codo Sinclair - El Inga de 125 km, con el resto del sistema energizado, la medición de la onda de voltaje realizada en la Subestación Chorrillo indica que los modelos Pi, Bergeron y J. Marti tienen valores muy cercanos entre sí, teniendo un sobrevoltaje debido a la variación de la cantidad de reactivos lo cual se denota en la medición de la subestación Chorrillos. Esta simulación muestra la mayor variación entre los modelos de parámetros distribuidos con el de parámetros concentrados PI.

Caso 3.5: Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair - El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado y línea de transmisión de 350 km.

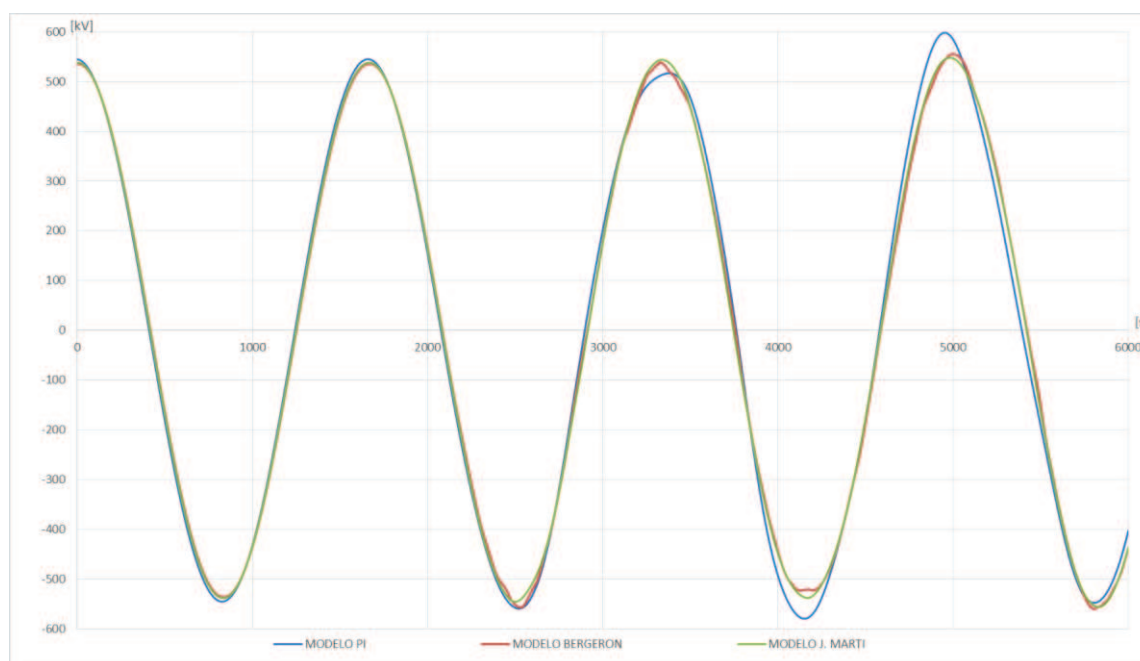


Figura 4.30 Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado y líneas de transmisión de 350km, medición de la onda de voltaje Subestación Chorrillos.

La Figura 4.30 muestra la respuesta de simulación en la apertura de una de las dos líneas de transmisión de 125km Coca Codo Sinclair - El Inga con el resto del sistema energizado y considerando una línea de 350km, la medición de la onda de voltaje se realiza en la Subestación Chorrillo, teniendo un sobrevoltaje debido a la variación de la cantidad de reactivos lo cual se propaga hacia la subestación Chorrillos, se verifica en los modelos Bergeron y J. Marti valores muy cercanos entre sí, que respecto al Caso 3.4 no presenta variaciones, también existe una variación mayor en el modelo Pi debido a que considera sus parámetros constantes y concentrados.

Tabla 4.3 Resultados y variación porcentual de valores de simulaciones de casos de estudio.

CASO	MODELO J. MARTI						MODELO PI						MODELO BERGERON												
	S/E COCA CODO SINCLAIR		S/E INGA		S/E TISALEO		S/E EL INGA		S/E TISALEO		S/E EL INGA		S/E COCA CODO		S/E EL INGA		S/E TISALEO		S/E CHORRILLO						
	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %	MEDICIÓN	Δ %					
ESTADO ESTABLE	500,1	0,0	510,2	0,0	527,6	0,0	528,4	0,0	500,1	0,0	512,3	0,4	532,9	1,0	534,2	0,0	500,1	0,0	510,0	0,0	526,4	-0,2	527,7	0,0	
ENERGIZACIÓN DE LÍNEAS																									
CASO 1: ENERGIZACIÓN 1ra L/T CCS_INGA	549,7	0,0	963,2	0,0	0,0	0,0	0,0	818,6	48,9	948,0	-1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	609,9	10,9	1091,7	13,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CASO 2: ENERGIZACIÓN 2da L/T CCS_INGA	520,3	0,0	718,2	0,0	0,0	0,0	632,1	21,5	707,1	-1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	561,7	7,9	769,4	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CASO 3: ENERGIZACIÓN L/T INGA-TISALEO	500,3	0,0	717,9	1001,0	0,0	0,0	500,3	0,0	657,6	-8,4	831,8	-16,9	0,0	0,0	0,0	0,0	500,3	0,0	744,8	3,7	1030,2	2,9	0,0	0,0	-
CASO 4: ENERGIZACIÓN L/T TISALEO-CHORRILLOS	515,6	0,0	638,3	692,2	0,0	0,0	500,5	-2,9	507,3	-20,5	671,5	-3,0	632,8	-0,3	615,1	-3,6	505,0	-2,1	615,1	-3,6	723,9	4,6	904,7	0,0	-
APERTURA DE LÍNEAS																									
CASO 1 : APERTURA L/T TISALEO- CHORRILLOS	500,7	0,0	510,9	528,3	0,0	0,0	500,7	0,0	513,0	0,4	533,6	1,0	513,0	-	516,4	1,1	500,7	0,0	516,4	1,1	532,6	0,8	0,0	0,0	-
CASO 2 : APERTURA L/T INGA-TISALEO	500,4	0,0	506,1	0,0	0,0	0,0	500,5	0,0	507,3	0,2	0,0	-	507,3	-	512,1	1,2	500,3	0,0	512,1	1,2	0,0	-	0,0	0,0	-
CASO 3 : APERTURA UNA L/T COCA CODO- EL INGA	500,3	0,0	503,0	0,0	0,0	0,0	500,3	0,0	511,7	1,7	0,0	-	511,7	-	504,3	0,3	500,3	0,0	504,3	0,3	0,0	-	0,0	0,0	-
CASO 4 : APERTURA L/T UNA LÍNEA COCA CODO-EL INGA RESTO DESENERGIZADO	500,6	0,0	518,5	537,2	0,0	0,0	500,7	0,0	526,7	1,6	563,9	5,0	526,7	0,0	529,1	2,0	500,7	0,0	529,1	2,0	548,8	2,2	553,6	0,0	-
LÍNEA DE 350km																									
CASO 1 : ESTADO ESTABLE	500,08	0,0	512,76	-	-	-	500,08	0,0	515,08	0,5	-	-	550,28	1,5	512,24	-0,1	500,08	0,0	512,24	-0,1	-	-	541,75	-0,1	-
CASO 2 : ENERGIZACIÓN L/T EL INGA-CHORRILLOS	500,04	0,0	527,52	-	-	-	500,03	0,0	617,42	17,0	-	-	910,60	-8,9	563,22	6,8	521,04	4,2	563,22	6,8	-	-	1050,83	5,1	-
CASO 3 : APERTURA UNA L/T COCA CODO SINCLAIR-EL INGA RESTO DEL SISTEMA ENERGIZADO	500,05	0,0	522,12	-	-	-	500,05	0,0	554,20	6,1	-	-	598,08	6,9	521,48	-0,1	500,05	0,0	521,48	-0,1	-	-	556,78	-0,4	-

La tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos en los casos de estudio de los modelos J. Marti, Pi y Bergeron, en la cual se toma al modelo J. Marti como referencia, debido a que muestra mejores resultados en la respuesta de impedancia para líneas de mediana y larga longitud de la sección 4.1.6, obteniéndose:

En estado estable la máxima diferencia de los valores obtenidos entre los tres modelos es del 1.5 %.

En estado transitorio de energización se tiene las mayores diferencia, teniendo una máxima variación entre el modelo J. Marti y Pi del 48.9% y para el modelo Bergeron una variación del 13.3%.

En cuanto a la implicación de usar una sola línea de transmisión desde la subestación EL Inga hasta la subestación Chorrillos y no línea seccionada en Tisaleo se tiene: un aumento del 5,66% del valor del pico de voltaje en la subestación Chorrillo en estado estable por efecto Ferranti con respecto a usar línea seccionada, de la misma forma en energización se muestra un incremento del 14,22% y en apertura de línea del 3,95%, lo cual muestra la importancia técnica de la implementación de la Subestación Tisaleo.

Por lo analizado se presenta la Tabla 4.4, guía que permite encaminar un correcto modelamiento de las líneas de transmisión, considerando que al trabajar con parámetros distribuidos dentro de la resolución se incluyen las ondas viajeras, por lo cual son ideales para estudios de líneas de transmisión de larga longitud y donde sea necesario el tiempo de propagación de la onda en transmitirse como en protecciones; otro aspecto, es la influencia de los parámetros dependientes de la frecuencia, los cuales toman mayor importancia a medida que el rango de frecuencia del transitorio analizado es mayor.

Tabla 4.4 Directrices para modelar líneas de transmisión.

	Estado Estable	Transitorio de baja Frecuencia	Transitorio de frente de onda corta	Transitorio de frente de onda rápida
Barra	Pi, Bergeron	Bergeron	Bergeron	Bergeron
Líneas cortas	Pi, Bergeron	Bergeron	Bergeron	Bergeron, J. Marti
Líneas medianas	Pi, Bergeron	Bergeron	Bergeron, J. Marti	J. Marti
Líneas largas	Pi, Bergeron	Bergeron	Bergeron, J. Marti	J. Marti
Líneas muy largas	Bergeron	Bergeron	Bergeron, J. Marti	J. Marti

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones

- a. Del análisis de sensibilidad de líneas de transmisión (Sección 4.1) se concluyó:
- No es necesario determinar gran exactitud de la geometría de las torres y alturas de los conductores de la línea de transmisión ya que ante grandes modificaciones la variación de la respuesta de impedancia es pequeña.
 - En cuanto a la resistividad del suelo y su influencia en la impedancia de la línea para secuencia positiva la afectación es pequeña, mientras para secuencia cero es mucho mayor, razón por la cual se requiere un valor más próximo para estudios de este tipo, como fallas a tierra. También se denota su efecto en la velocidad de propagación de las ondas ya que a mayor resistividad del suelo menor velocidad de propagación, como se observa en la sección 4.1.3.
 - El efecto del cable de guarda se analizó obteniéndose que al considerarlo en la simulación se verifica mayor afectación en los resultados ante variaciones de la resistividad del suelo. Además, al considerar el cable de guarda en la simulación se determina el aumento del valor de la impedancia de la línea de transmisión, por ello los voltajes generados son menores, como se verifica en la Sección 4.1.4 en energización. Además, se observa mayor pico del voltaje generado a medida que aumenta la longitud de la línea de transmisión.

- b. En el análisis de respuesta de impedancia en el rango de frecuencia de transitorios de frente de onda lenta de 1 a 15kHz, tanto para secuencia positiva como cero y para diferentes longitudes en los distintos modelos de cálculo de líneas de transmisión, se concluye:
- El modelo Pi como lo describe la teoría es un modelo que trabaja con parámetros concentrados y constantes, siendo adecuado para representar líneas de transmisión de corta y mediana longitud en estudios de estado estable, sin embargo, en la respuesta de impedancia para secuencia cero se verifica que el modelo no es el indicado para este tipo de estudios como falla a tierra. Además el modelo Pi no es la mejor opción para métodos de soluciones transitorias, debido a que la inclusión de ondas viajeras en la resolución determina resultados más rápidos y generalmente más exactos.
 - El modelo Bergeron usa parámetros distribuidos y constantes, es un buen modelo para representar líneas de transmisión de corta, mediana, larga y muy larga longitud en estado estable, por ello, es adecuado para estudios en estado estacionario y fenómenos de baja frecuencia, como sobretensiones temporales, resonancia subsincrónica y otros; en estado transitorio la exactitud de la solución va a depender de la longitud de la línea de transmisión y de la frecuencia del fenómeno analizado, es así que para el rango de frecuencia analizado en la sección 4.1.6 se obtiene valores muy buenos en la respuesta de impedancia para transitorios de mediano rango de frecuencia, en cambio para sobretensiones atmosféricas los resultados no son tan precisos. Del trabajo teórico se determina: el aplicar el modelo Bergeron en líneas desbalanceadas no es lo más óptimo, ya que trabaja con la matriz de transformación de parámetros de

características de fase a modal constante, lo cual no es válido, porque las matrices son dependientes de la frecuencia.

- El modelo J. Marti maneja parámetros distribuidos en función de la frecuencia, en secuencia positiva presenta excelentes resultados para representar líneas de transmisión de larga y muy larga longitud en estado estable y transitorio; mientras para líneas cortas no es el indicado, en secuencia cero es donde se nota la mayor utilidad de este modelo ya que presenta una excelente respuesta.
 - También se determinó a medida que aumenta la longitud de la línea de transmisión y la frecuencia del fenómeno a analizar el modelo que represente de mejor forma la línea de transmisión debe ser más desarrollado, es decir, un modelo más completo que considere los parámetros distribuidos sean constantes o dependientes de la frecuencia.
- c. De la simulación del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV, se concluye:
- En estado estable tal como lo describe la teoría y los resultados de la respuesta de impedancia en función de la frecuencia se obtuvieron resultados cercanos entre los tres modelos de líneas de transmisión, presentando una variación máxima del 1.5% en el caso más de la línea de transmisión de 350km, además se verificó el efecto Ferranti, ya que al incrementar la longitud de la línea de transmisión el sistema mostró también un aumento en el nivel de voltaje el cual llega al 10% en la línea de 350 km, a pesar de la compensación inductiva en cada subestación.

- En estado transitorio de energización y apertura de líneas de transmisión se denotan sobrevoltajes en los cuales se observa las mayores diferencias entre los modelos de representación de líneas de transmisión, donde el modelo Pi presenta una respuesta diferente al modelo Bergeron y J. Marti, la cual a medida que se incrementa la longitud de la línea de transmisión mayor es la variación del sobrevoltaje generado siendo del 48.9% en energización y 6.1% en apertura con respecto al modelo J. Marti, confirmando la teoría que los modelos basados en parámetros concentrados y constantes no son los ideales para transitorios.
 - El modelo Bergeron presenta resultados más próximos al modelo J. Marti, presentando una variación máxima del 13.3% en energización y 2.2% en apertura entre los dos modelos. El modelo Bergeron es adecuado usarlo si se desea determinar el valor del sobrevoltaje generado por transitorios de frente de onda corta.
 - El Modelo J. Marti por lo determinado en la respuesta de impedancia en función de la frecuencia presenta el mejor resultado para transitorios de frente de onda corta, siendo el más adecuado si se desea determinar el valor del sobrevoltaje y la energía generada.
- d. Finalmente una exacta representación de la línea de transmisión en estado transitorio no es posible, pero la selección más adecuada del modelo para un específico rango de frecuencia es más factible. Cada rango de frecuencia podría corresponder a un particular fenómeno transitorio.

5.2 Recomendaciones

- a. Realizar un análisis por separado de la respuesta de cada uno de los parámetros fundamentales en función de la frecuencia y determinar el comportamiento presentado en los diferentes rangos de frecuencia tanto para secuencia positiva y cero.
- b. Realizar un estudio de los valores de reactores instalados en las diferentes subestaciones para comprobar los valores óptimos, con especial atención en la Subestación El Inga.
- c. Analizar los casos de estudio y los modelos para escenarios de aperturas monopolares en fallas fase a tierra, y considerar la importancia de la implementación del reactor de neutro para la disminución de los sobrevoltajes inducidos en el cable de guarda.
- d. Incrementar el rango de frecuencia para la obtención de la respuesta de impedancia y de esta manera determinar el comportamiento de los diferentes modelos ante transitorios de frente de onda rápido y muy rápido.
- e. Realizar un análisis de los modelos de cálculos de parámetros de líneas de transmisión en transitorios de frente de onda rápido como rayos y de secuencia cero como cortocircuito fase-tierra y determinar las variaciones que puedan presentar los modelos descritos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE. Transactions on Power Apparatus and System. Power System Engineering Committee. 1992.
- [2] GONZÁLEZ, Francisco. Introducción a los Sistemas de Transmisión. VENEZUELA. 2007.
- [3] PÉREZ, Constantino; ZAMANILLO, José; CASANUEVA, Alicia. “Líneas de Transmisión”. Sistemas de Telecomunicación. Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones; Universidad de Cantabria. España. 2007.
- [4] FERNÁNDEZ, Alécio; NEVES, Washington; COSTA, Edson; CAVALCANTI, Max. “The Effect of the Shunt Conductance on Transmission Line Models”. Laboratorio de Alta Tensão; Universidade Federal da Paraíba; Companhia Hidroelétrica do São Francisco. Brasil.
- [5] ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM. Theory Book. USA.1995
- [6] VISMOR, Timothy. Transmission Line Mode.2011
- [7] MARTINEZ, Juan. Power System Transients Parameter Determination.CRC Press. 2010.
- [8] SOLA, Pamela. Cálculo de transitorios en la línea de transmisión a 230 KV con aplicación a la línea Quevedo Totoras. Tesis de grado. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.
- [9] Norma IEC 60071-4 “Coordinación de Aislamiento”.
- [10] RESTREPO, Luis; CAICEDO, Gladys; CASTRO, Ferley. Modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. Escuela de Ingeniería Eléctrica y electrónica; Universidad del Valle; Cali-Colombia. 2008.
- [11] BIANCHI, Raúl. ATP para Inexpertos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires-Argentina.

[12] LANDÁZURI, Deysi; RUMIPAMBA, Martha. Estudio y Propuesta de un Tipo de Interruptor a ser Implementado en la Línea de 500 kV Mediante Modelación en ATP. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Escuela Politécnica Nacional; Quito-Ecuador. 2011.

[13] CELEC EP – TRANSELECTRIC. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 KV. Ecuador. 2008.

ANEXO A

MODELOS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL SOFTWARE ATP

Para acceder a estos modelos de líneas de transmisión aéreas se tiene que acceder a través del graficador que tiene ATP, llamado ATP Draw, y en su ventana de trabajo tomar la opción de líneas/cables y luego LCC, Figura A1.

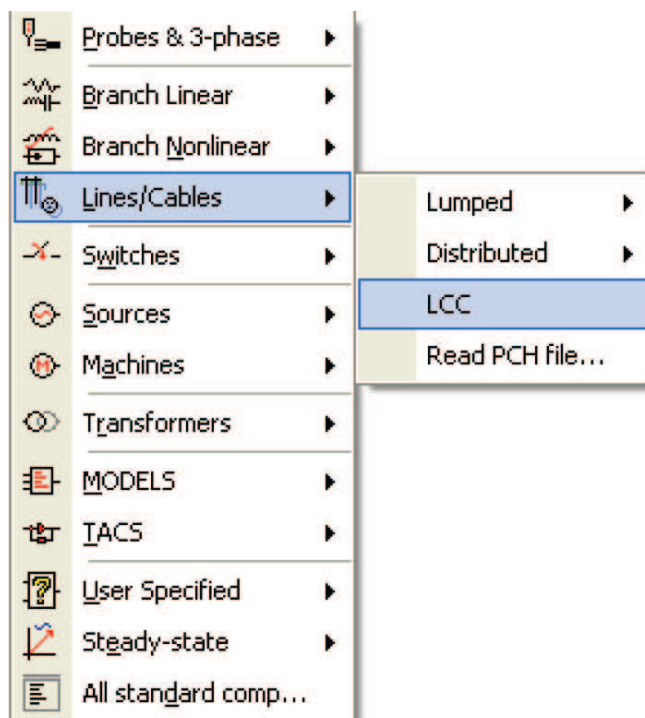


Figura A.1 Ventana de Biblioteca de elementos del software ATP.

En la ventana que se despliega Figura A.2 se procede a elegir el modelo a ocupar, como también las características operativas de la línea de transmisión como frecuencia, longitud y características que se desea para simulación:

- Considerar como línea de transmisión transpuesta
- El efecto piel.
- Tierra segmentada

- Matriz de transformación Real
- Sea convertido en un conductor equivalente automáticamente

Cuyos efectos se los analizó en el Capítulo 2.

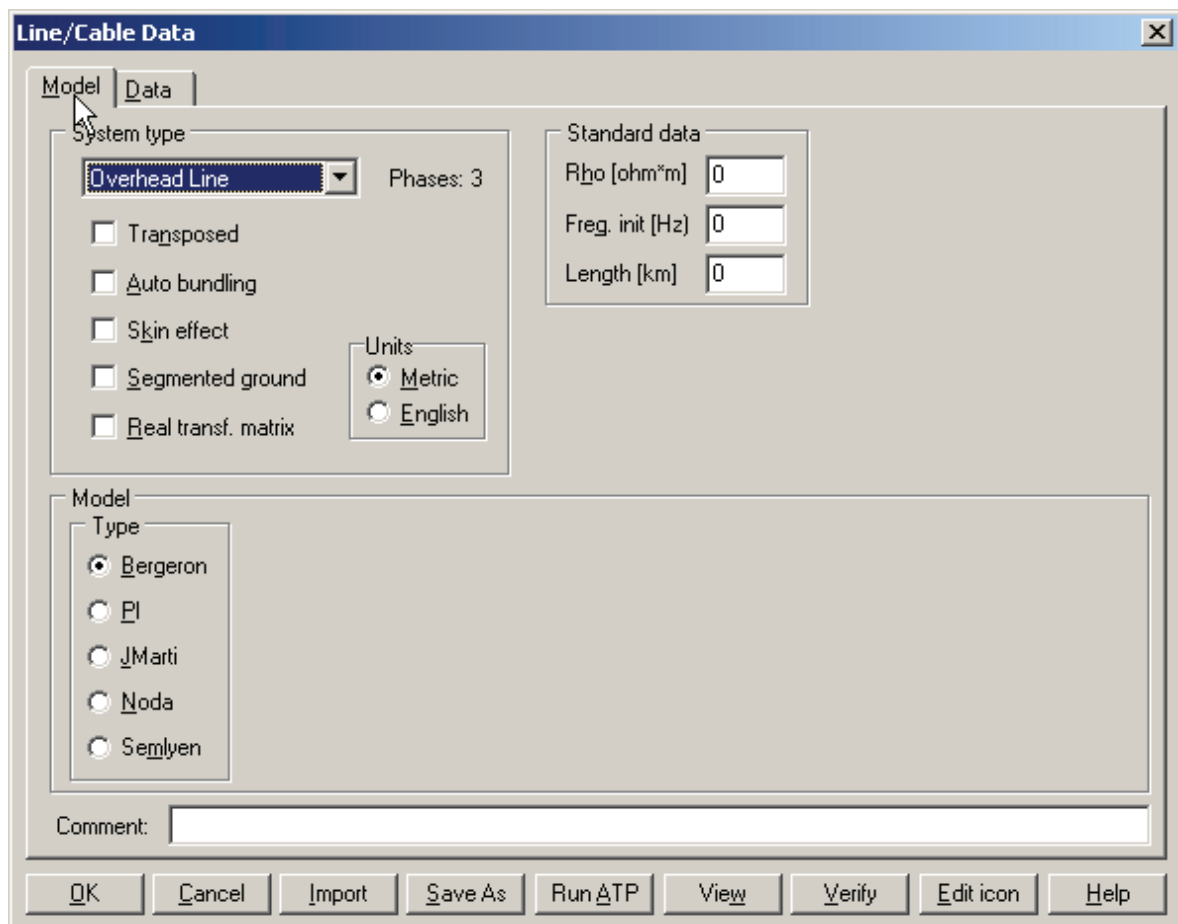


Figura A.2 Ventana de Biblioteca de elementos del software ATP.

ANEXO B

SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV.

El Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV se muestra en la Figura B.1

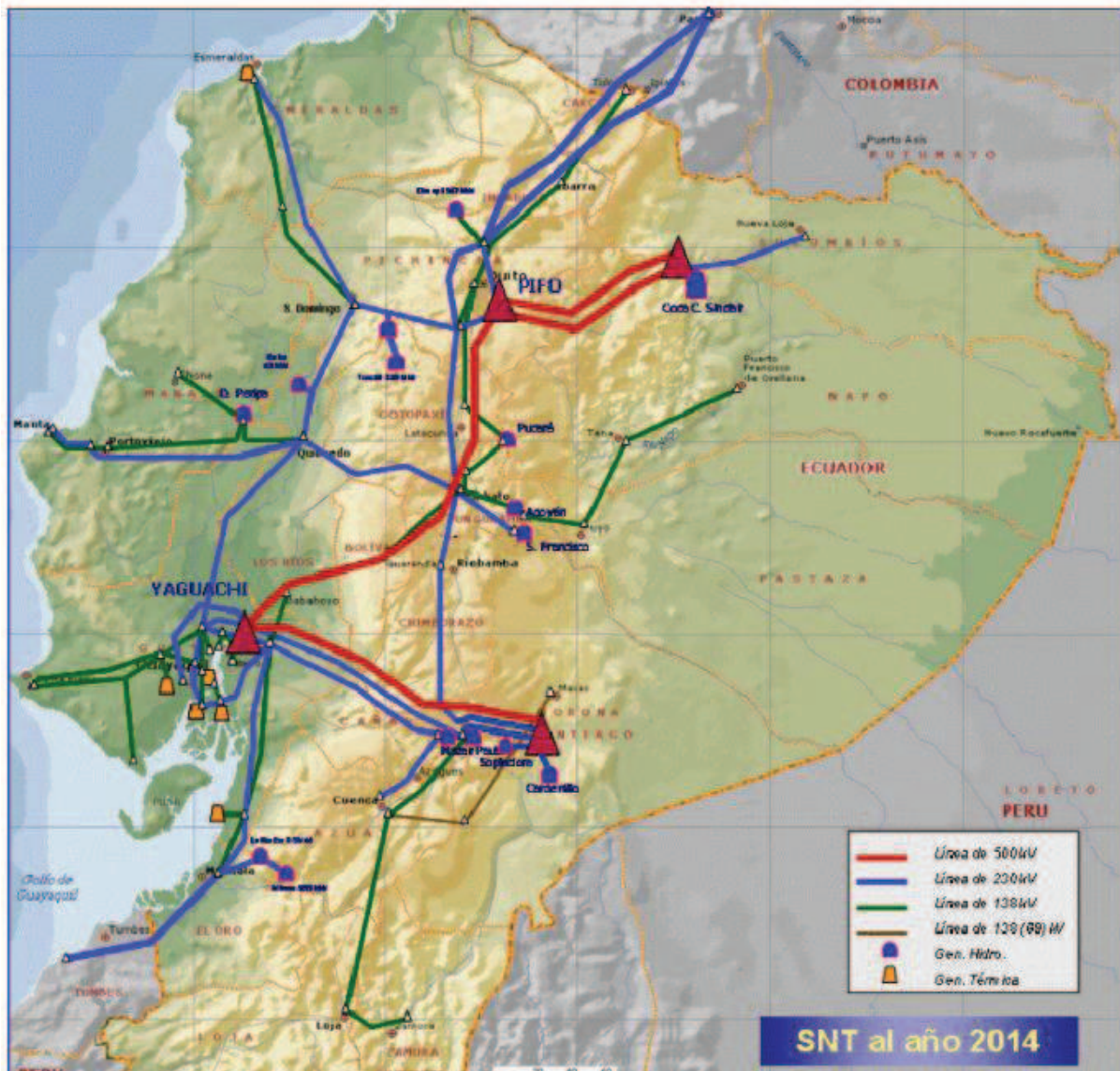


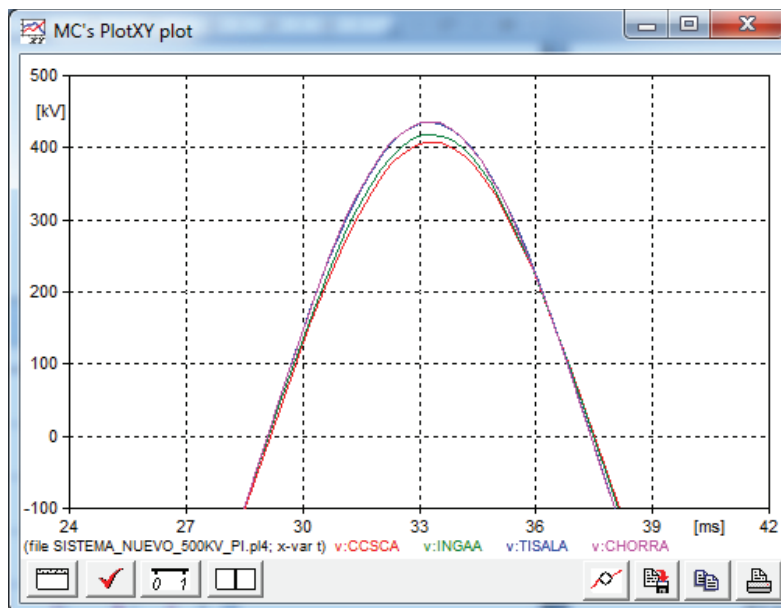
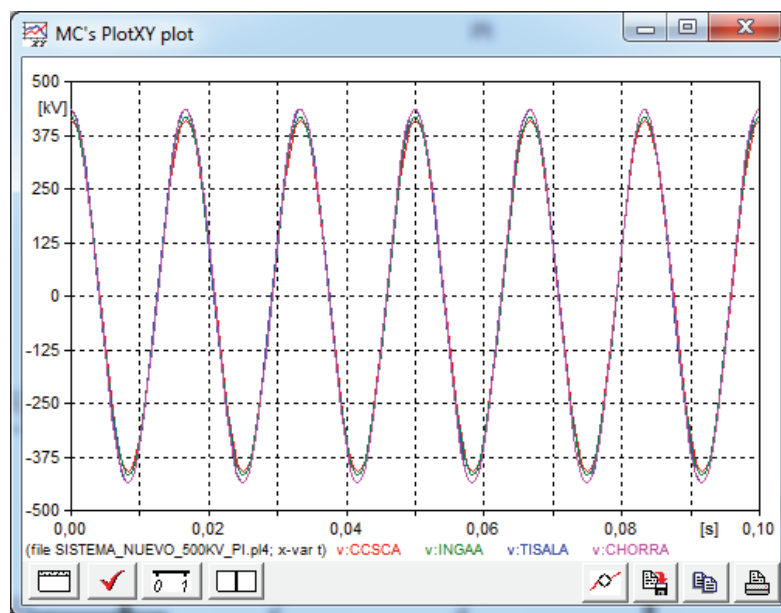
Figura B.1 Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV[13].

ANEXO C

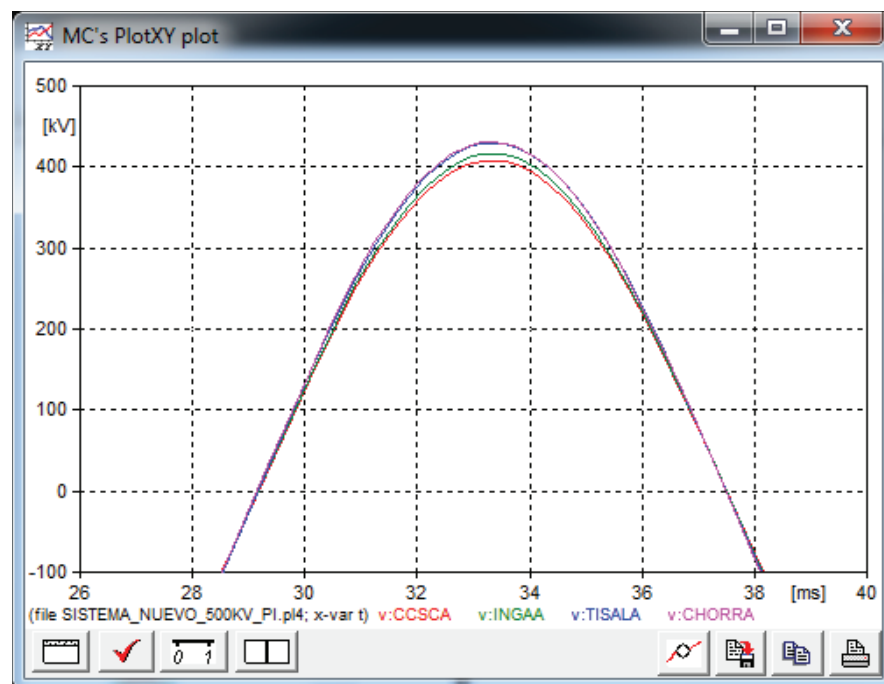
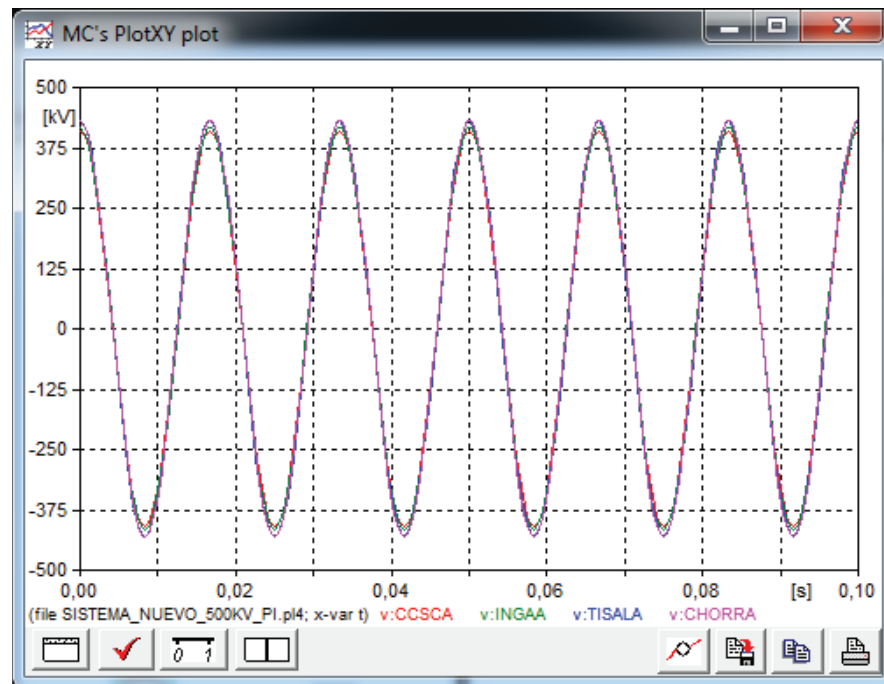
CASOS DE SIMULACIÓN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV.

Caso 1.1: Respuesta en estado estable del SNT de 500 kV.

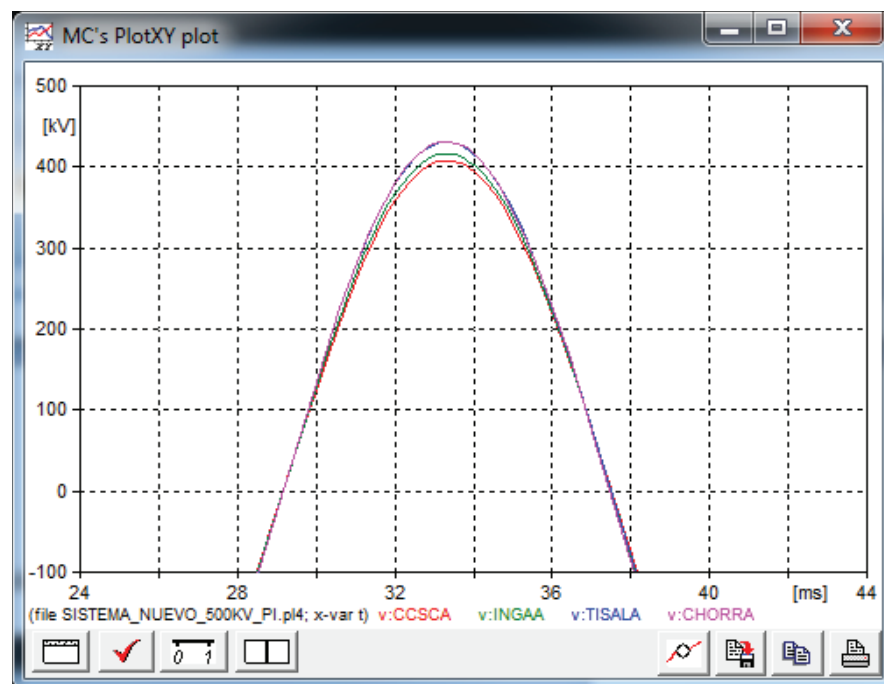
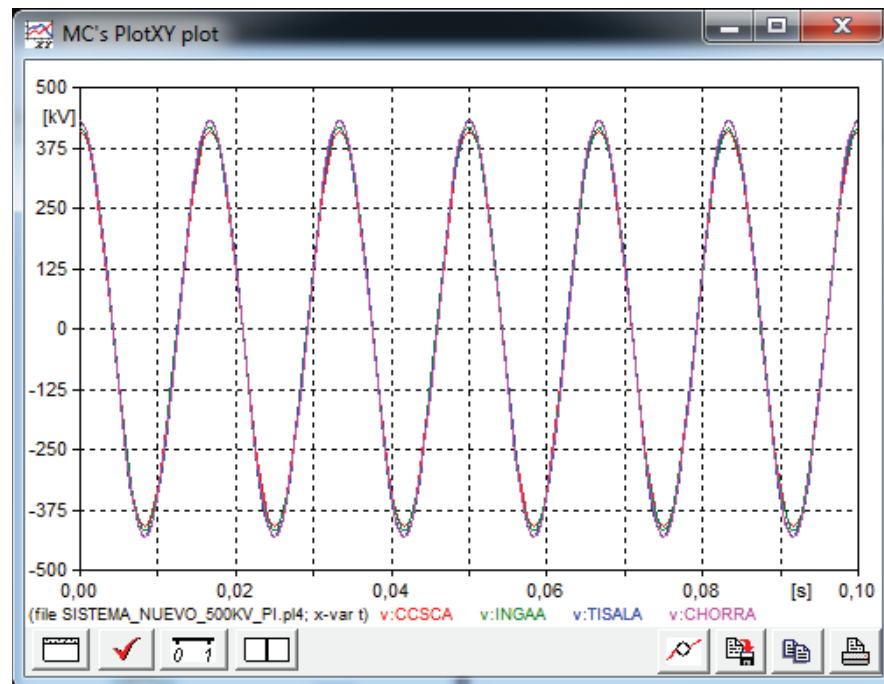
Caso 1.1.1 Modelo PI



Caso 1.1.2 Modelo Bergeron

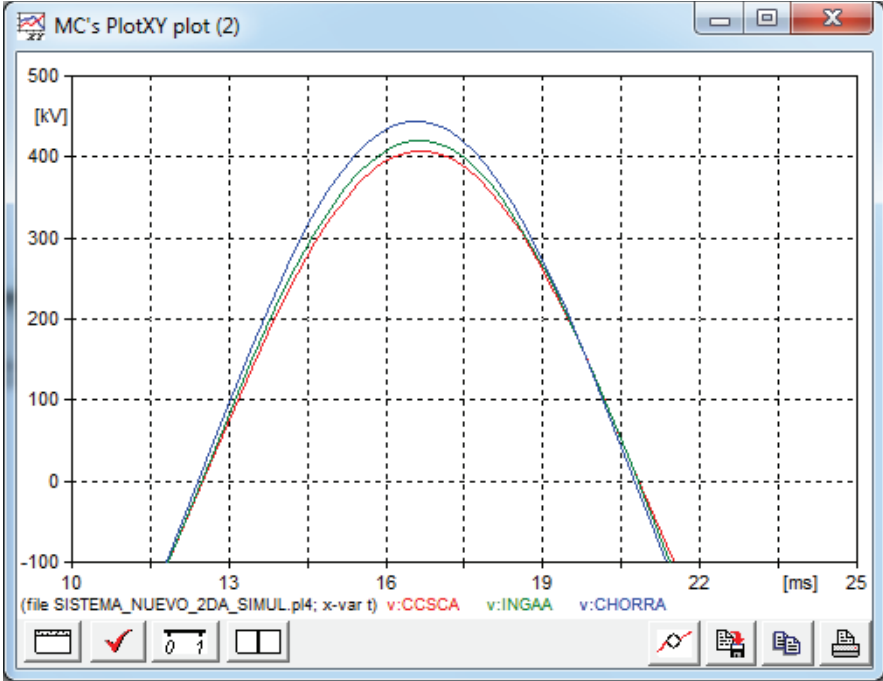
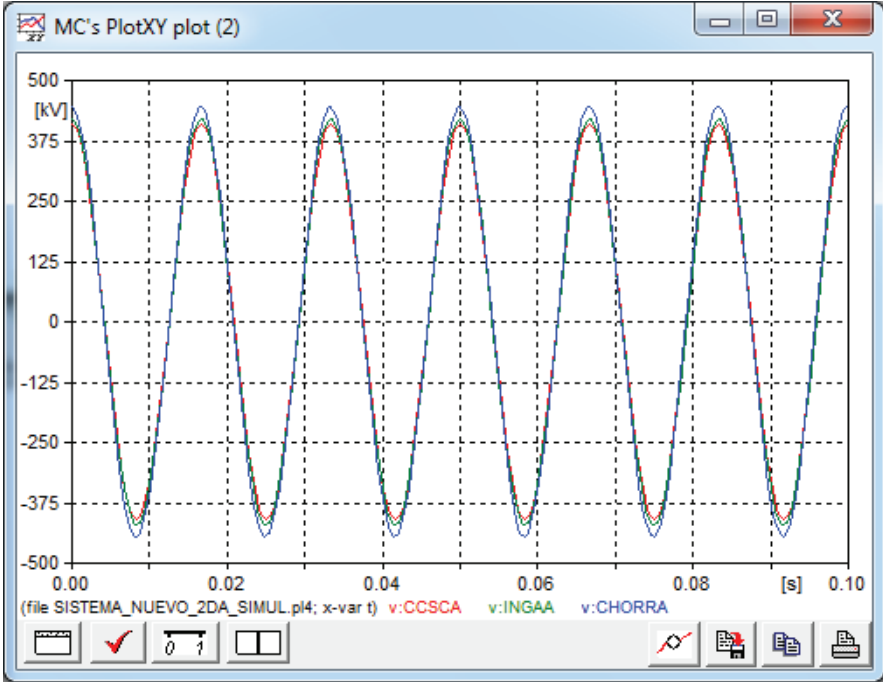


Caso 1.1.3 Modelo J. Marti

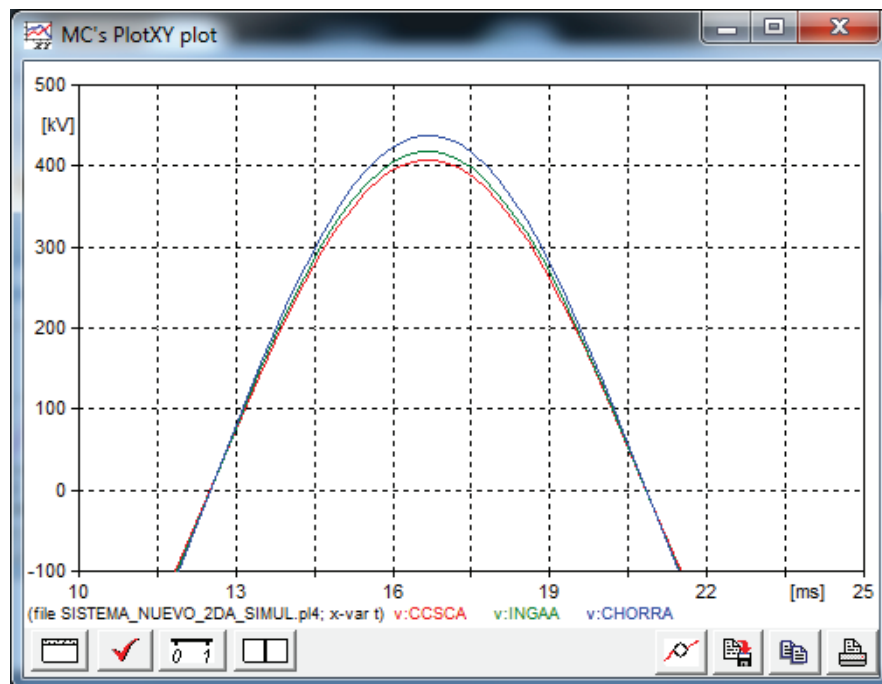
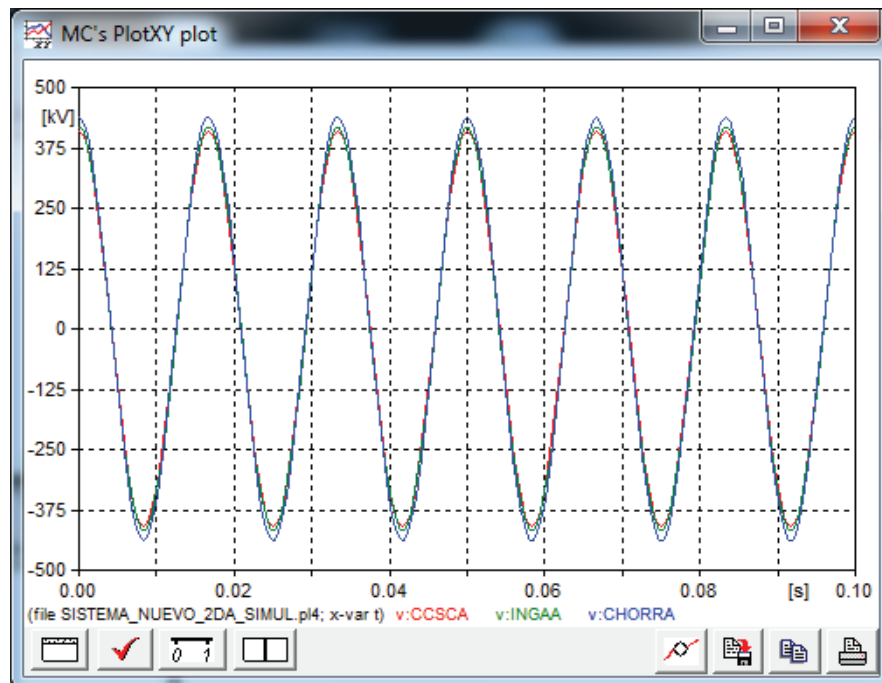


Caso 1.2: Respuesta en estado estable Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con línea de transmisión de 350km.

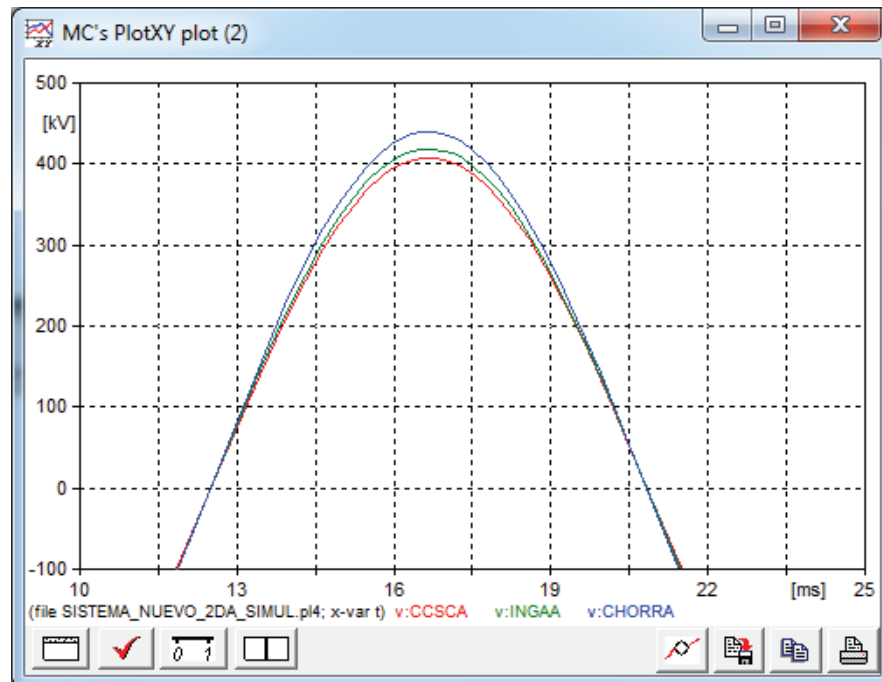
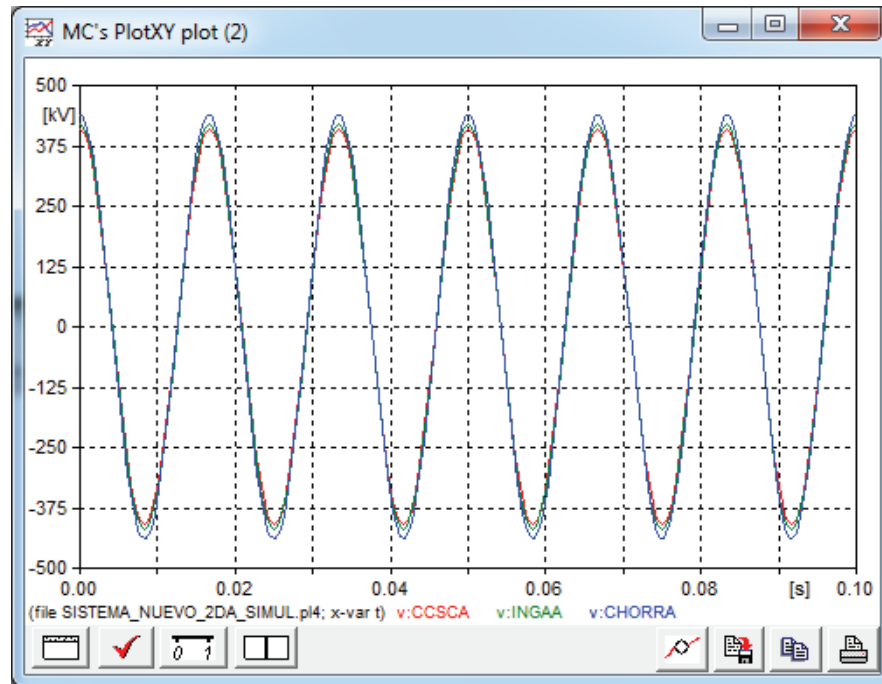
Caso 1.2.1 Modelo PI



Caso 1.2.2 Modelo Bergeron



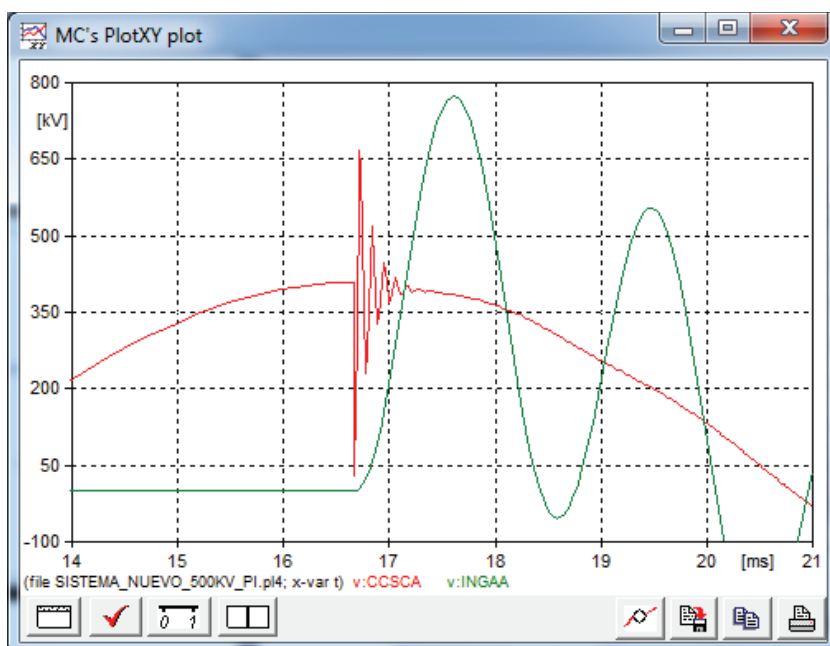
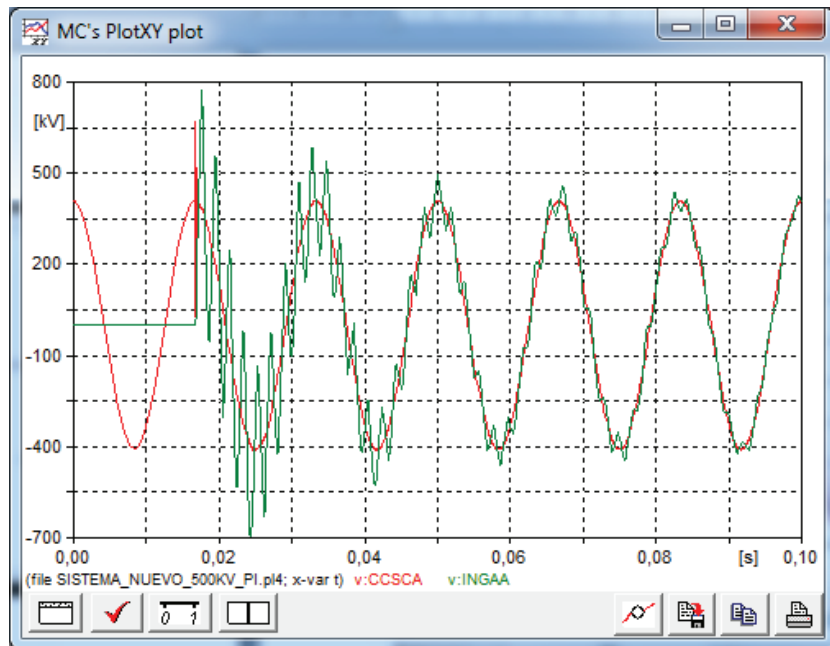
Caso 1.2.3 Modelo J. Marti



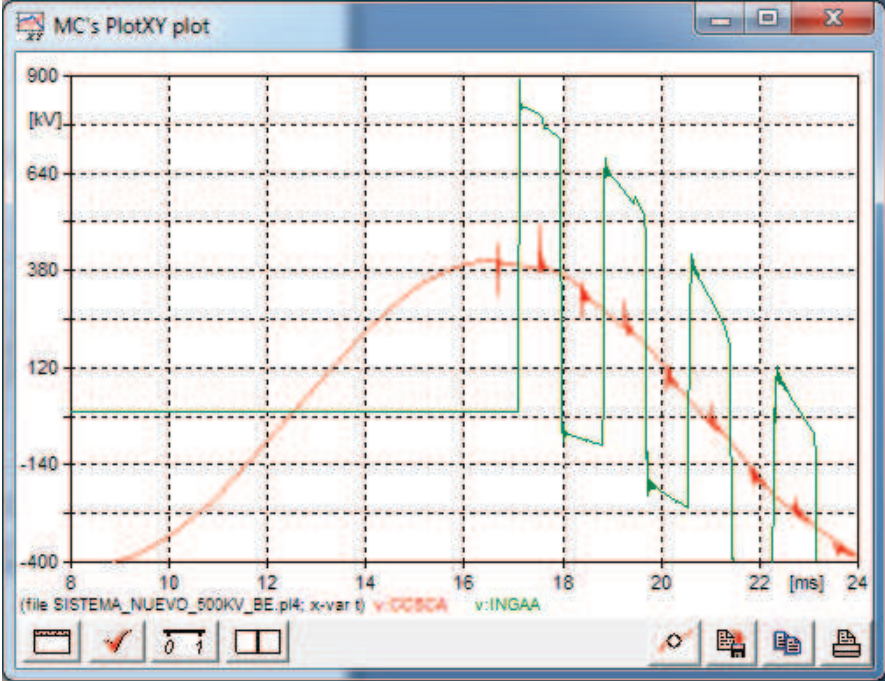
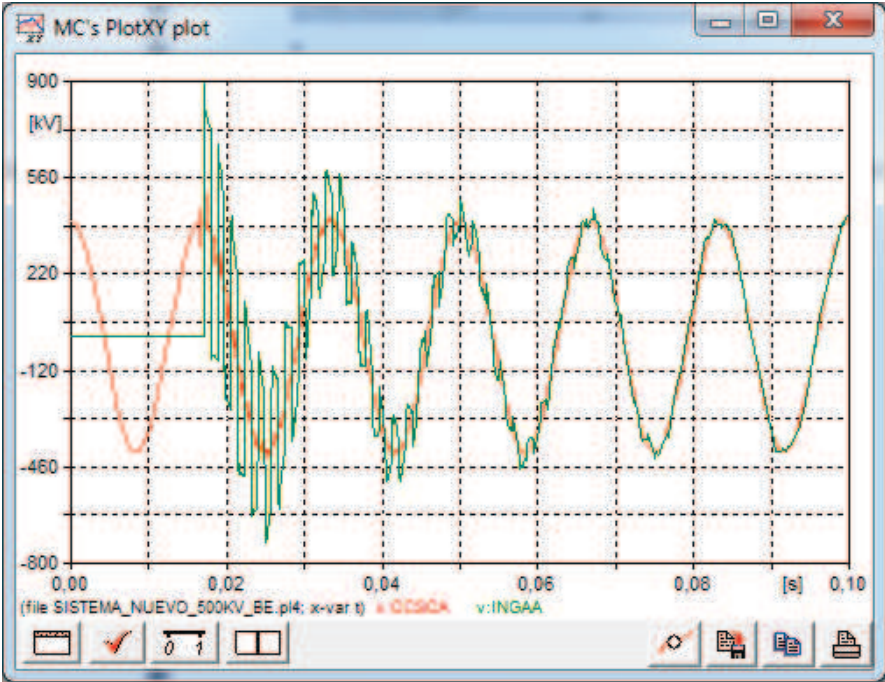
Caso 2: Estado Transitorio Energización de Líneas de Transmisión Sin Carga.

Caso 2.1: Respuesta en energización de la primera Línea de Transmisión Coca Coco Sinclair-EI Inga del SNT de 500 kV.

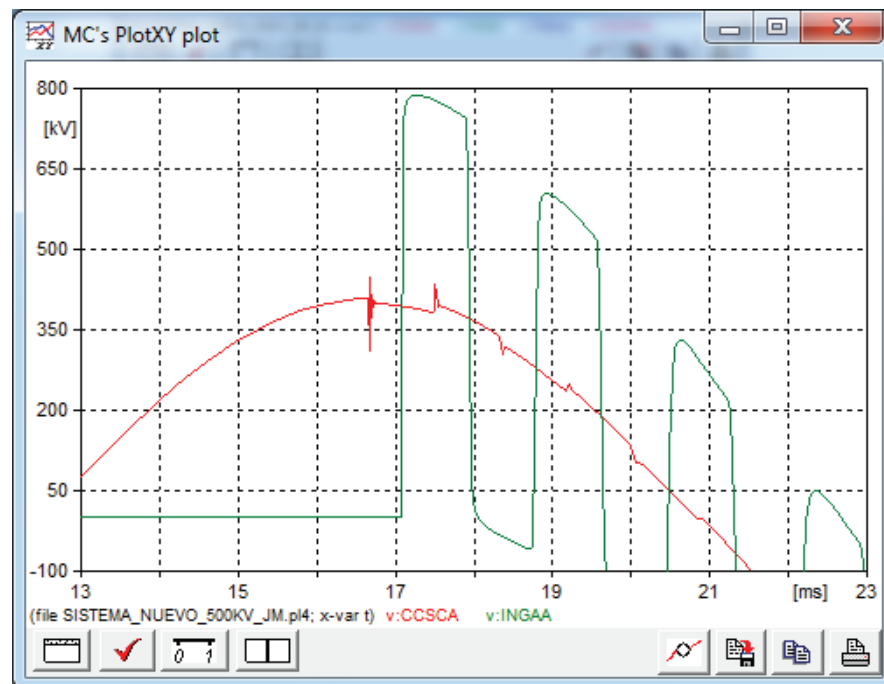
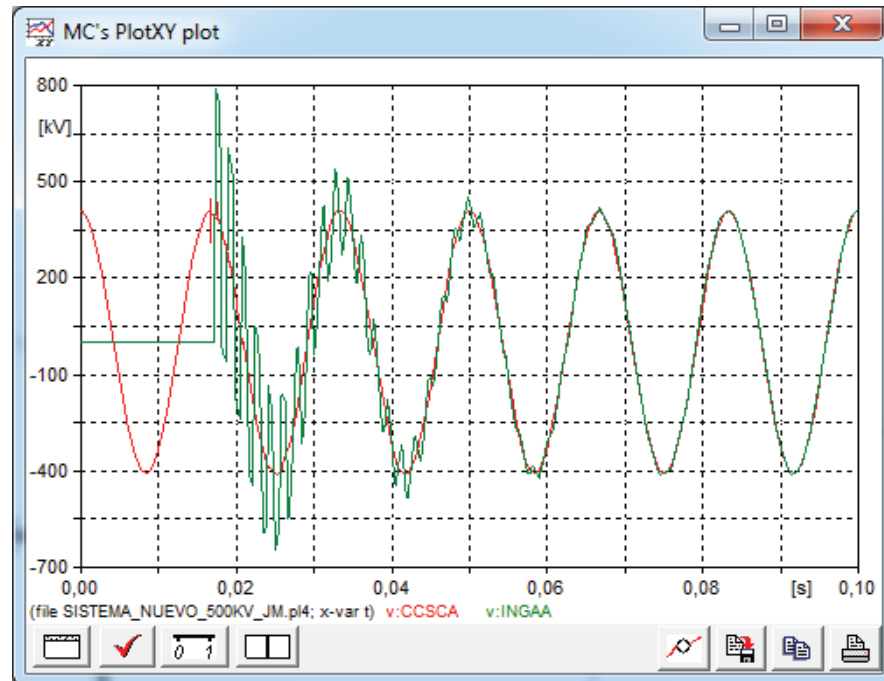
Caso 2.1.1 Modelo Pi



Caso 2.1.2 Modelo Bergeron

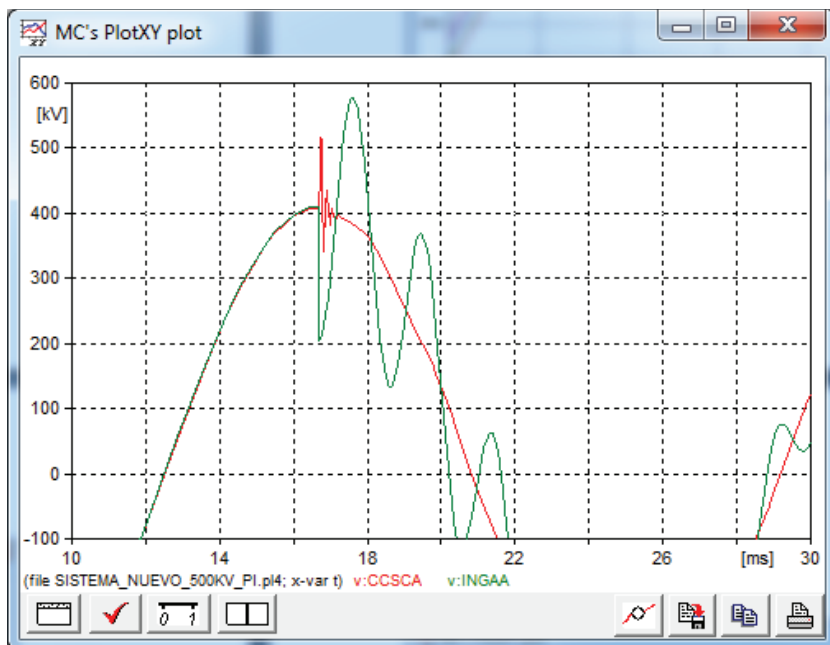
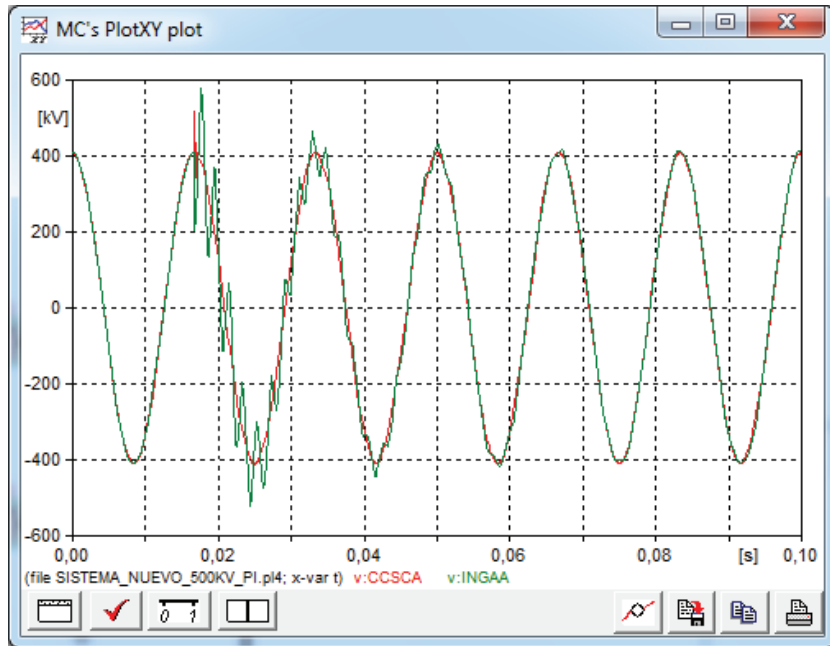


Caso 2.1.3 Modelo J. Marti

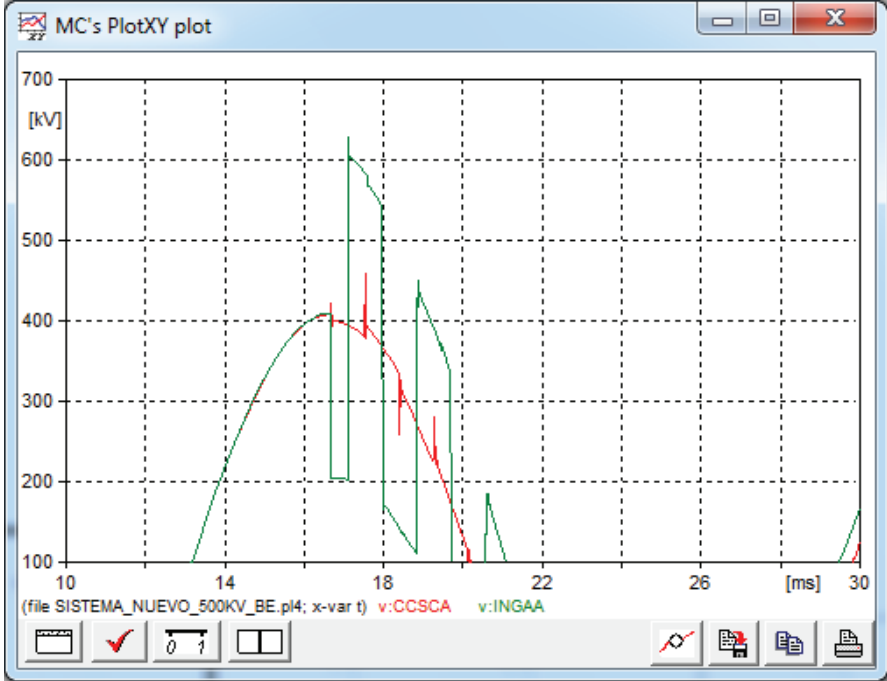
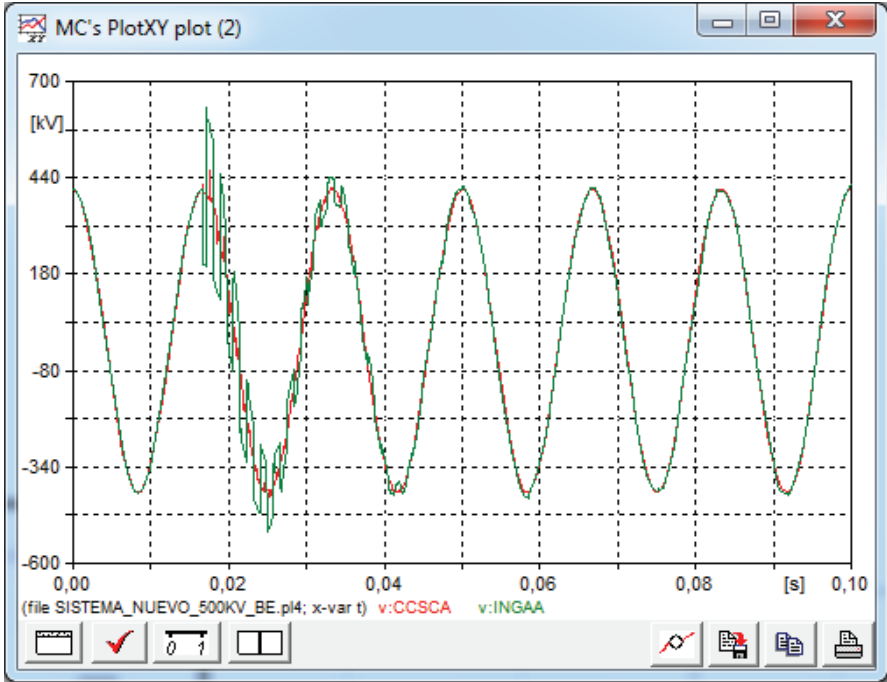


Caso 2.2: Respuesta en energización de la segunda Línea de Transmisión Coca
Coco Sinclair- El Inga del SNT de 500 kV.

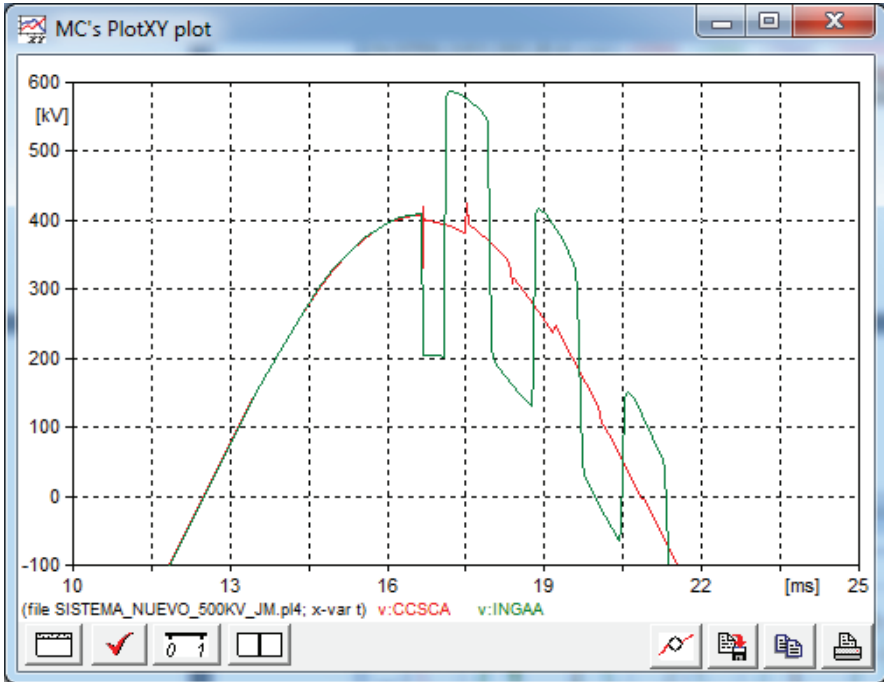
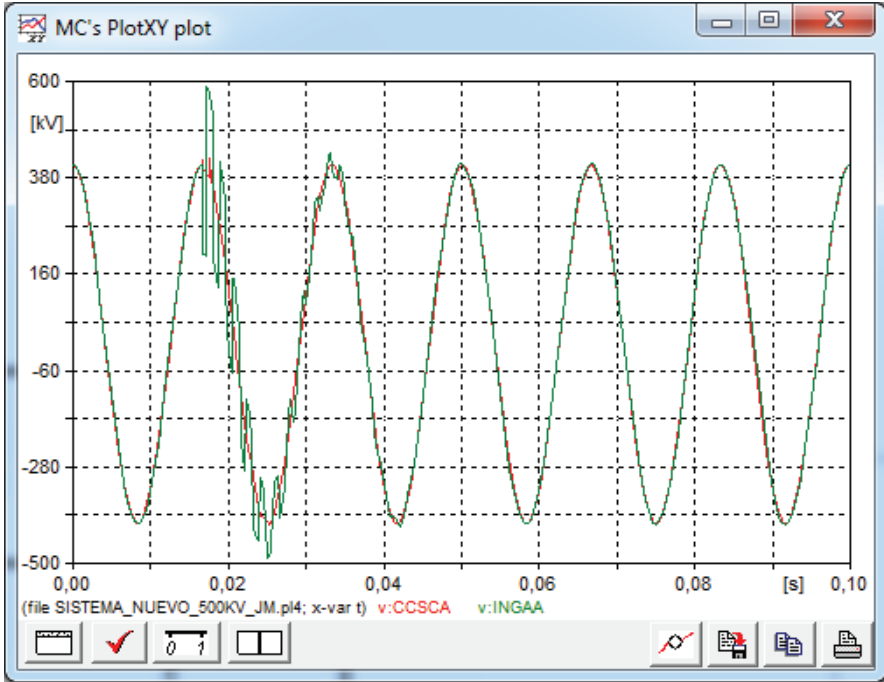
Caso 2.2.1 Modelo Pi



Caso 2.2.2: Modelo Bergeron

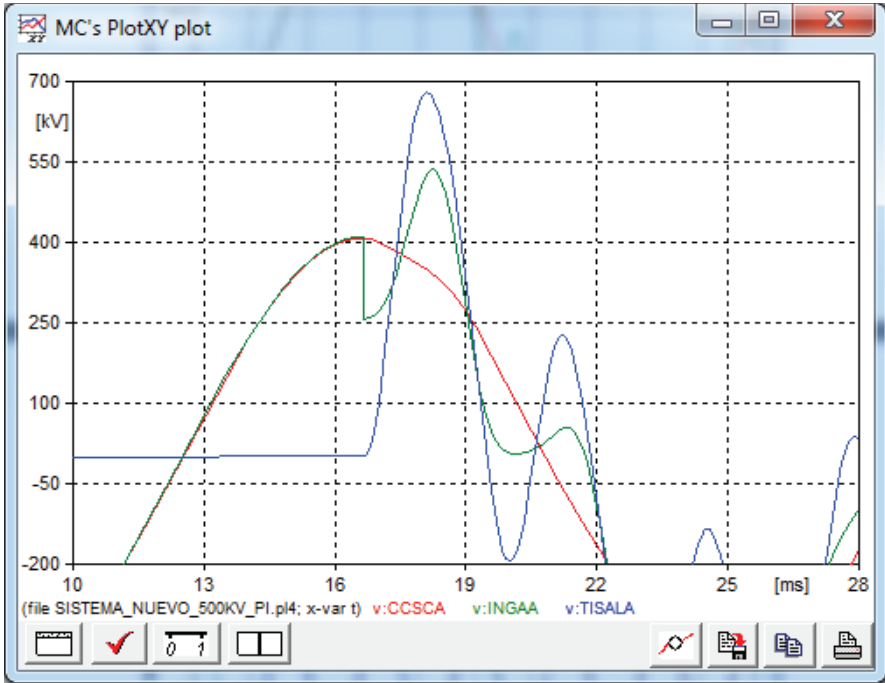
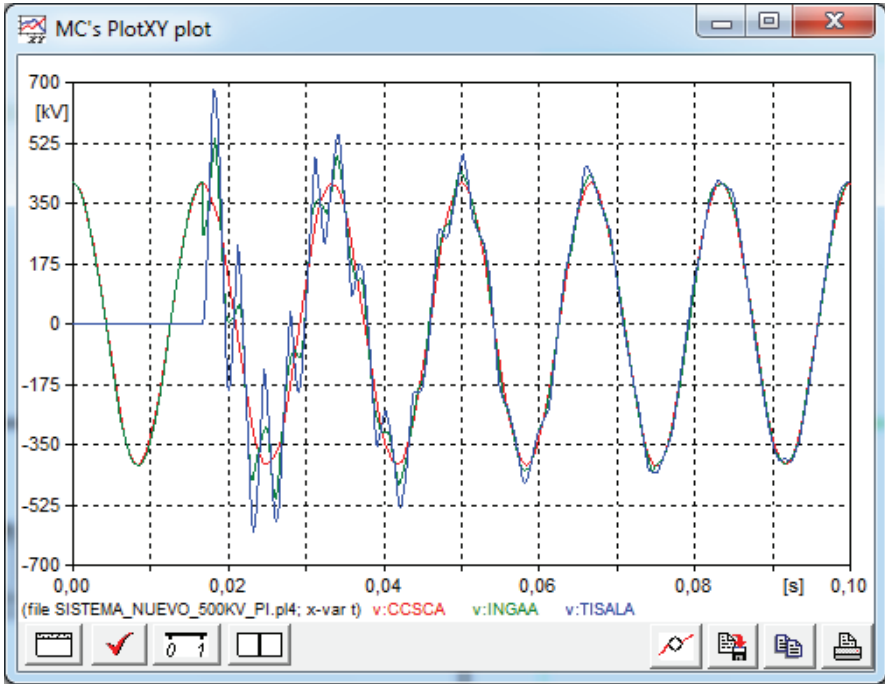


Caso 2.2.3 Modelo J. Marti

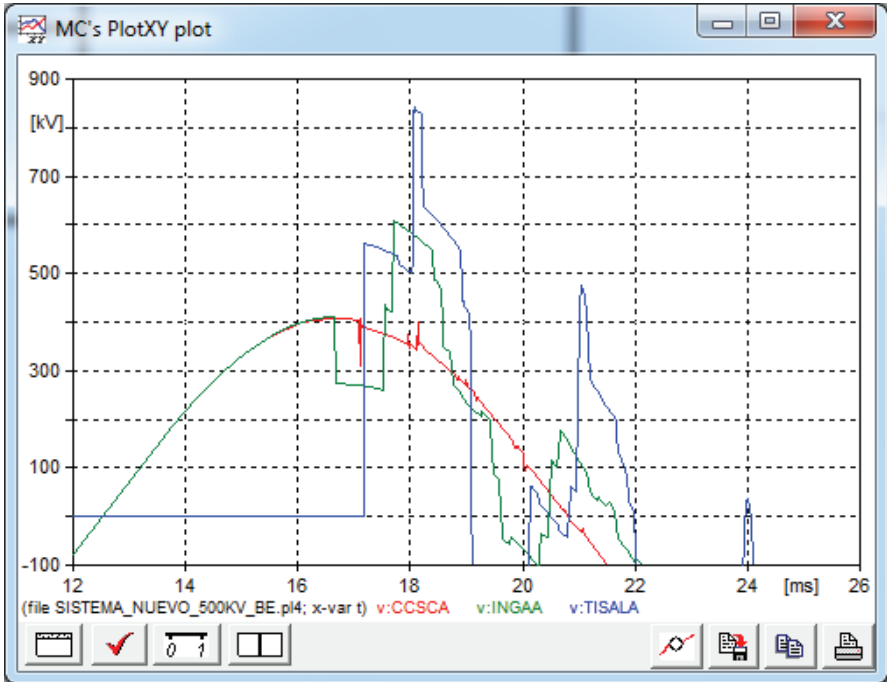
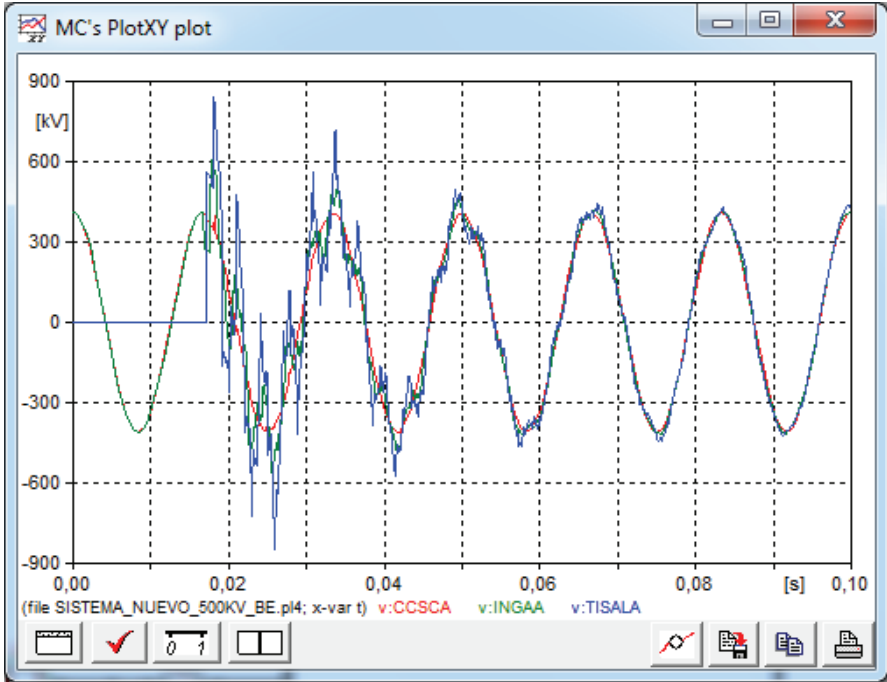


Caso 2.3: Respuesta en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

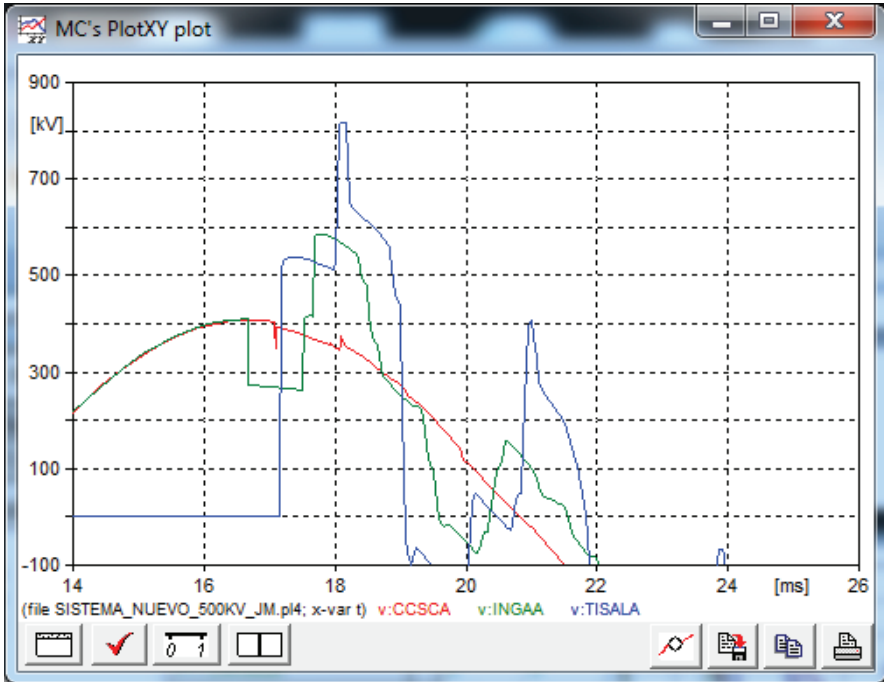
Caso 2.3.1 Modelo Pi



Caso 2.3.2 Modelo Bergeron

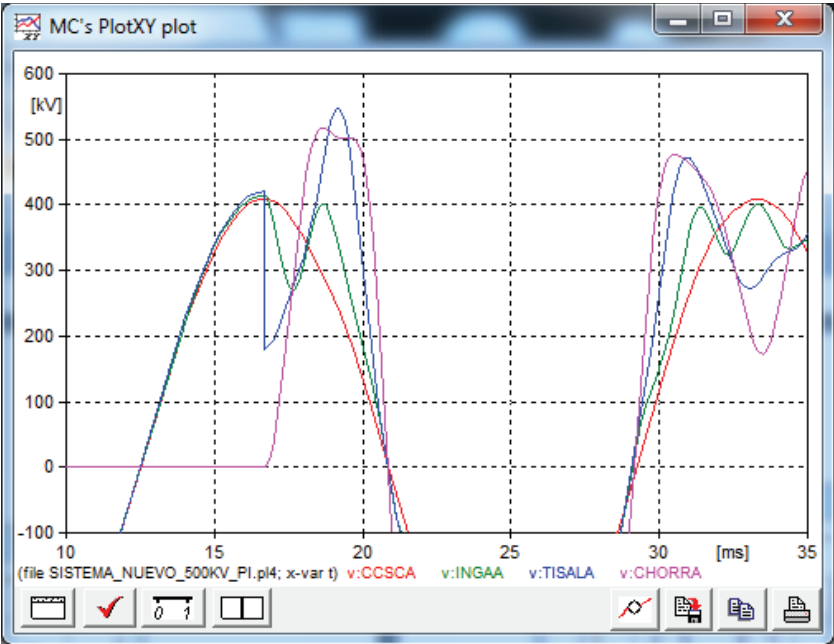
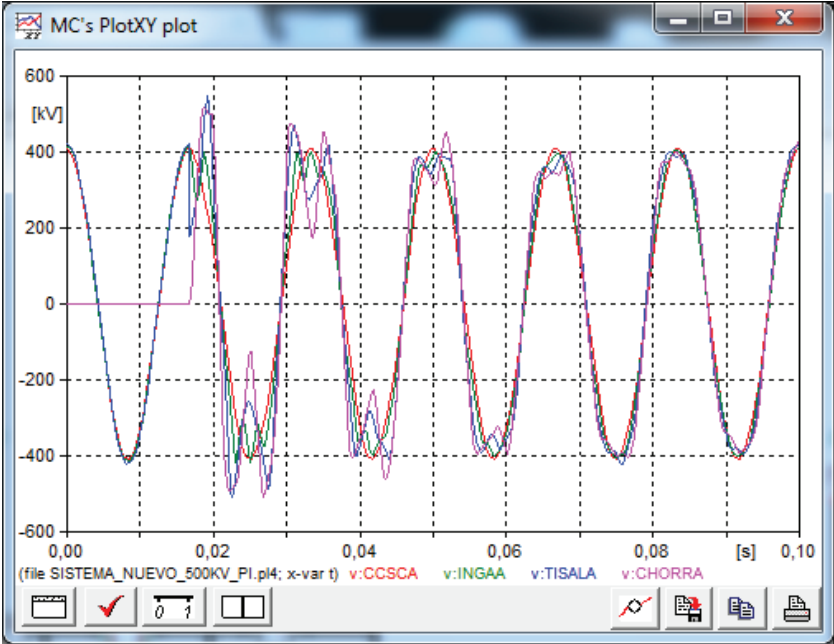


Caso 2.3.3: Modelo J. Marti

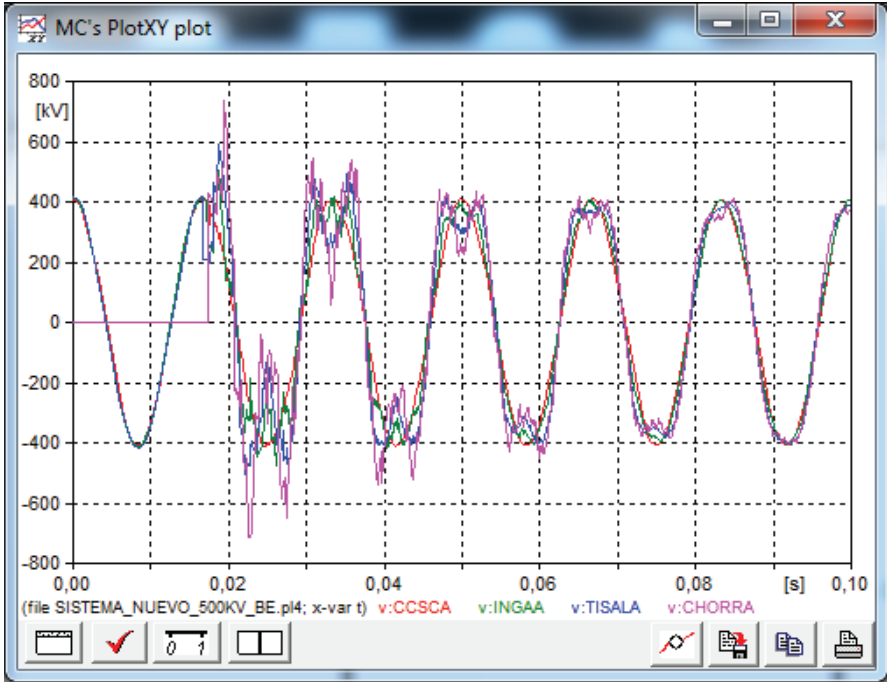


Caso 2.4: Respuesta en energización de la Línea de Transmisión Tisaleo-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

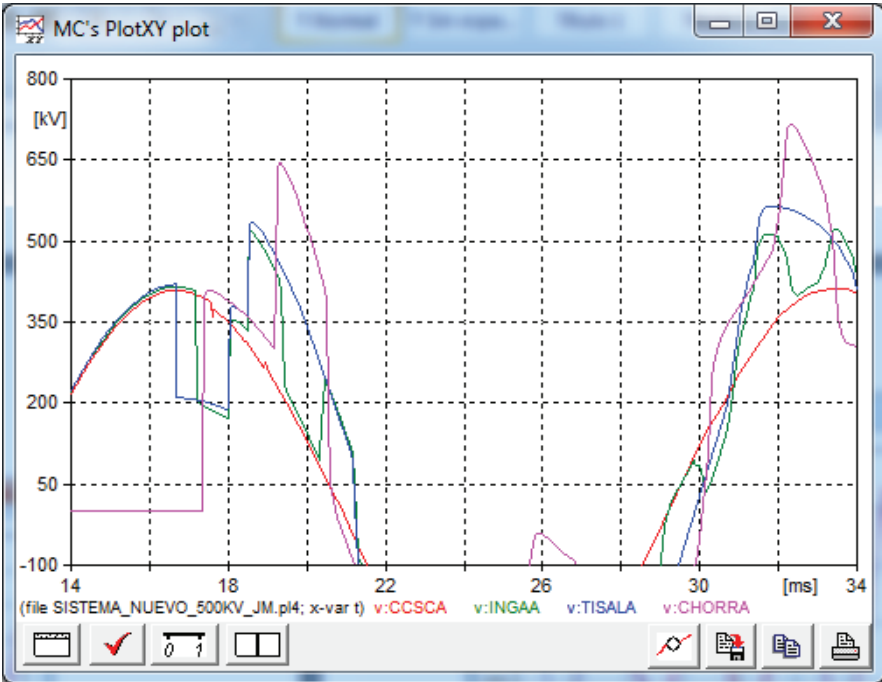
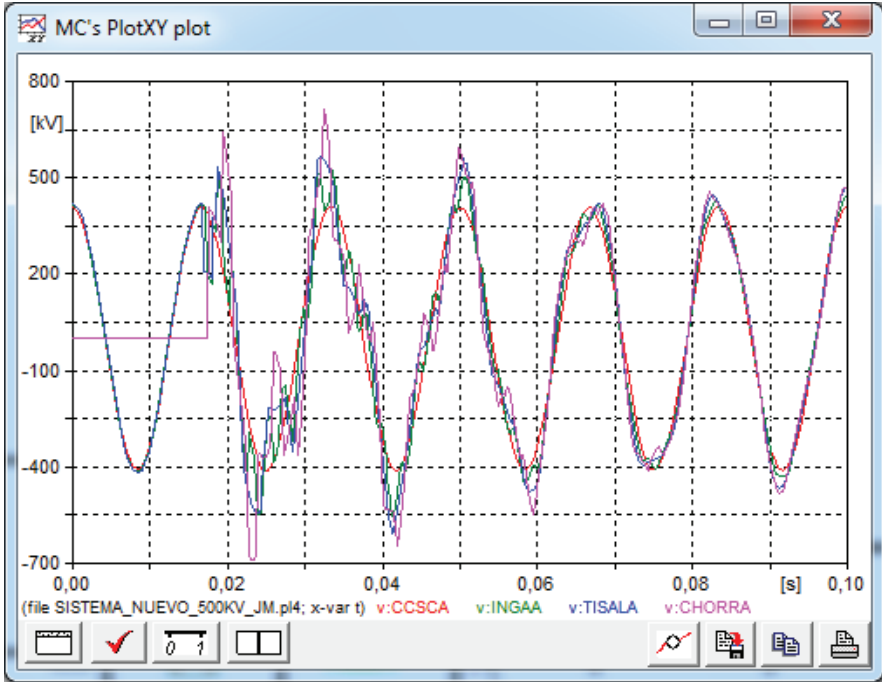
Caso 2.4.1 Modelo Pi



Caso 2.4.2 Modelo Bergeron

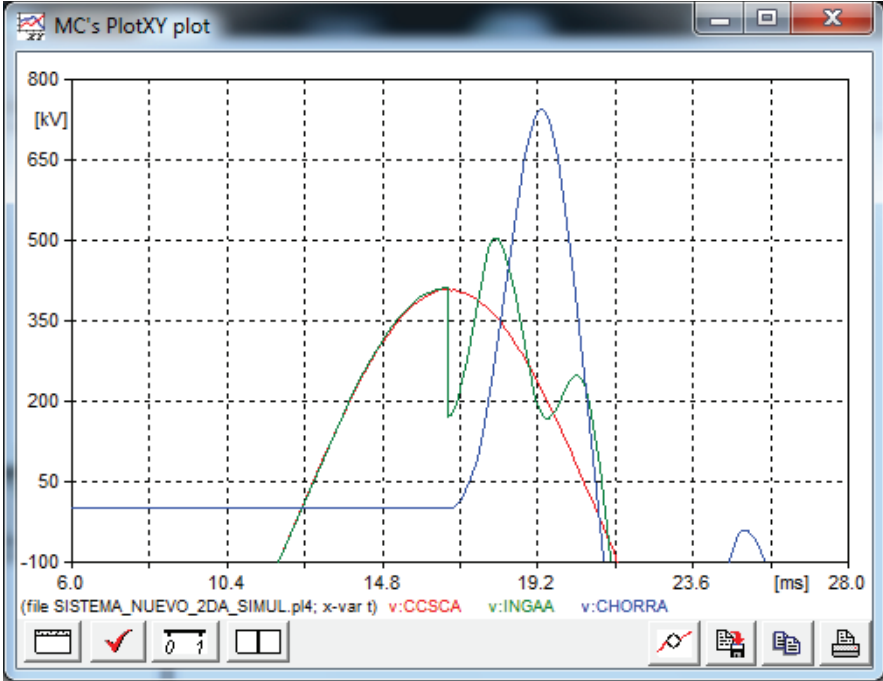
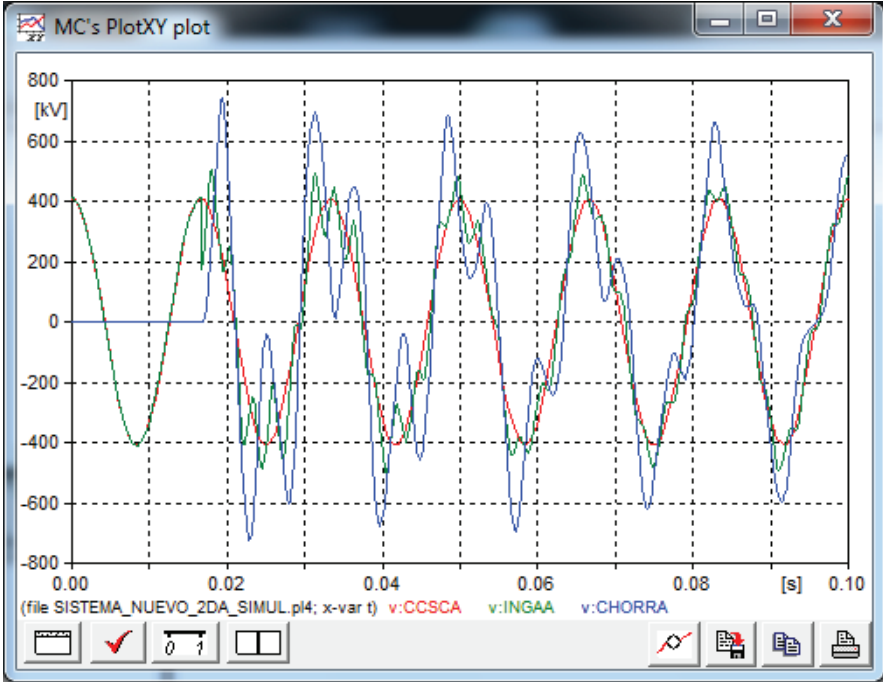


Caso 2.4.3 Modelo J Marti

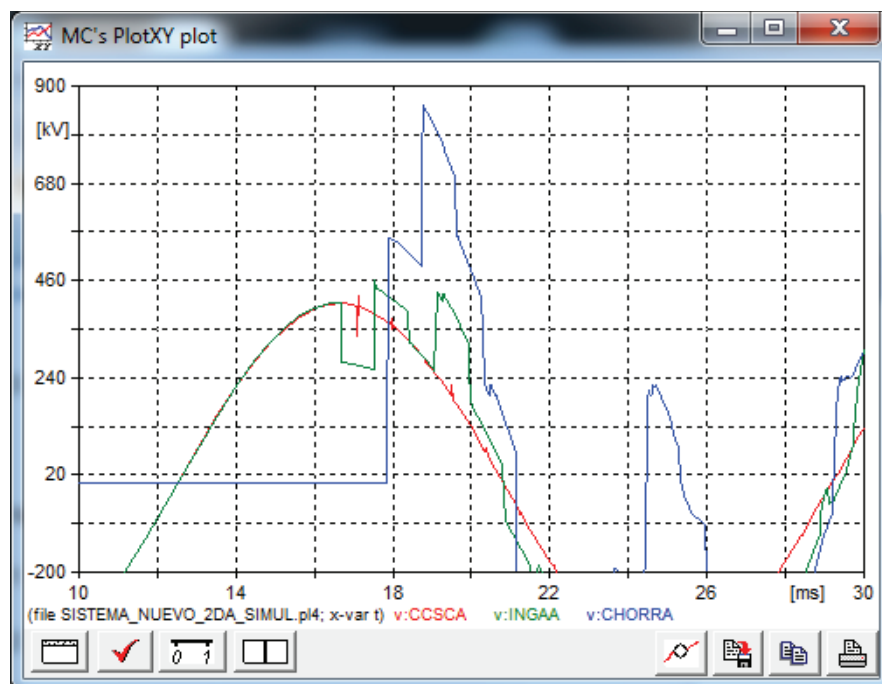
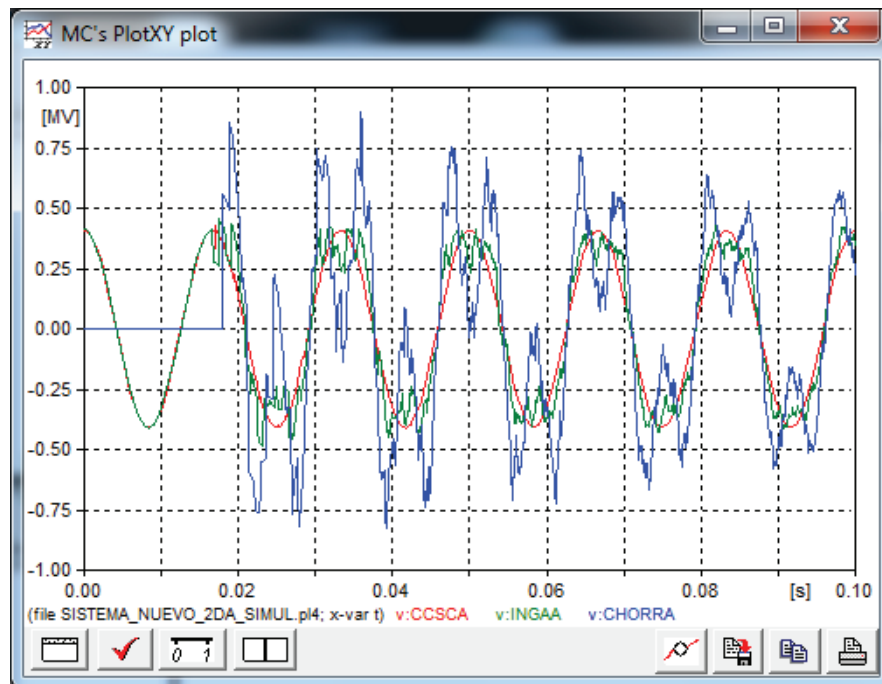


Caso 2.5: Respuesta en energización de la Línea de Transmisión El Inga-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con línea de transmisión de 350km.

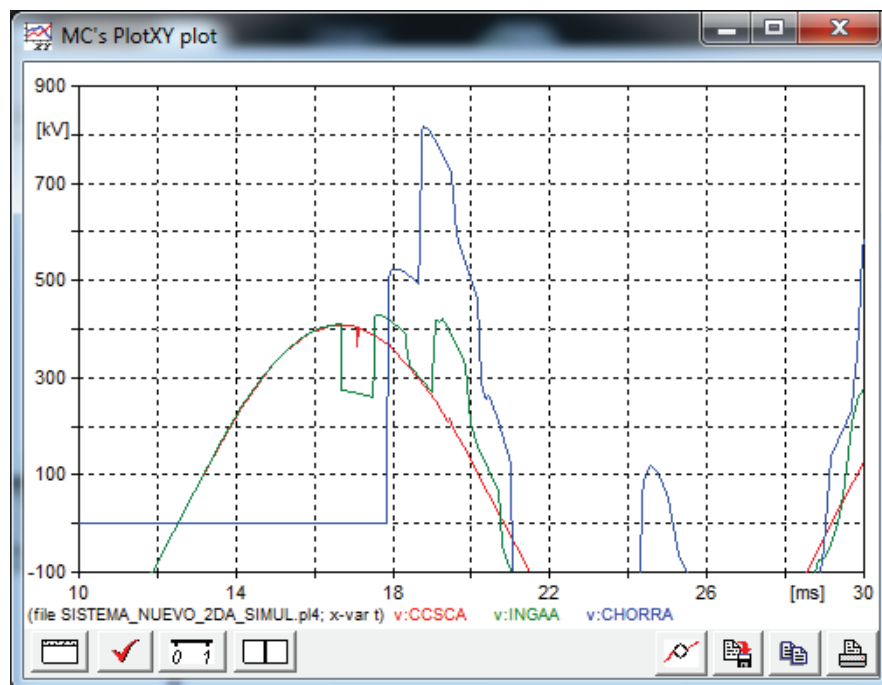
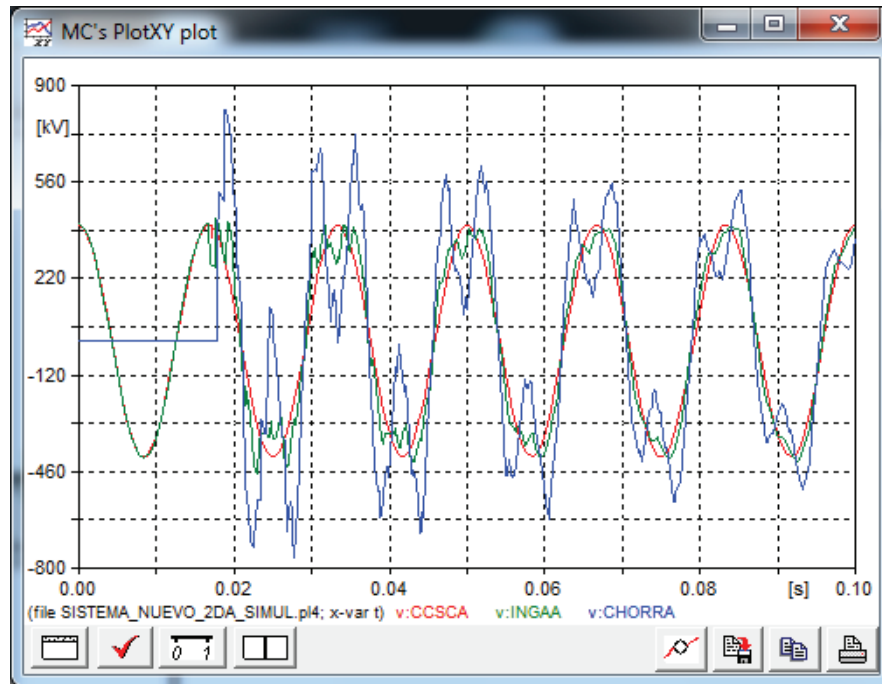
Caso 2.5.1 Modelo PI



Caso 2.5.2 Modelo Bergeron



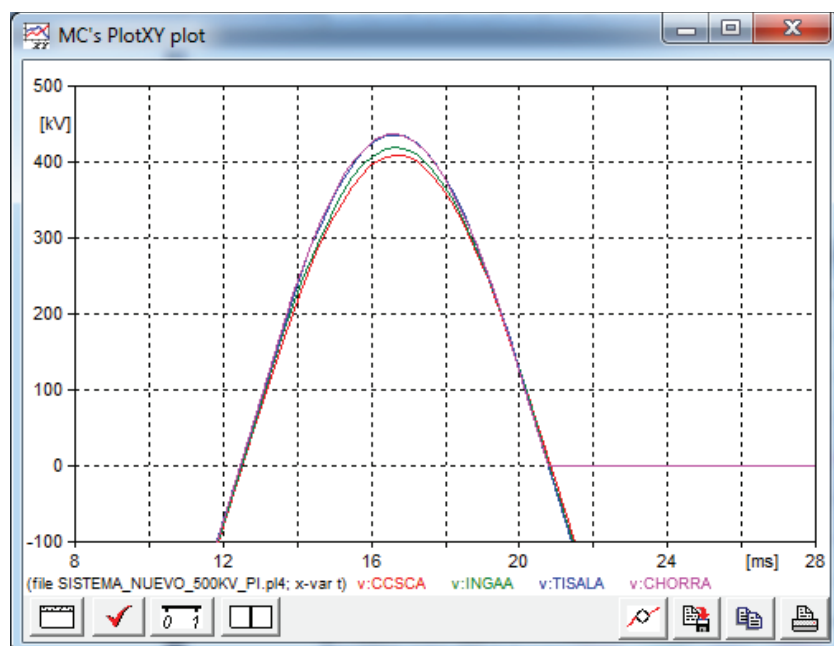
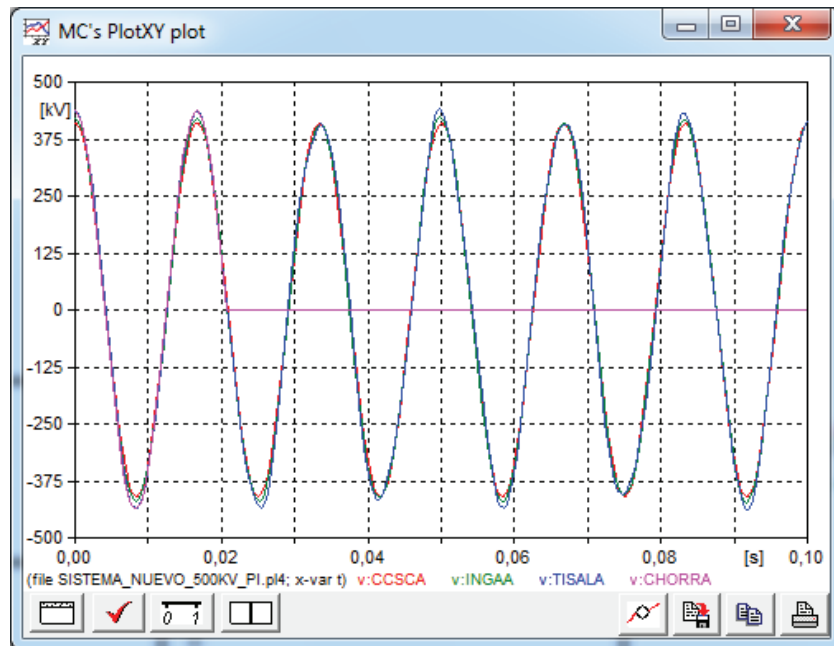
Caso 2.5.3 Modelo J. Marti



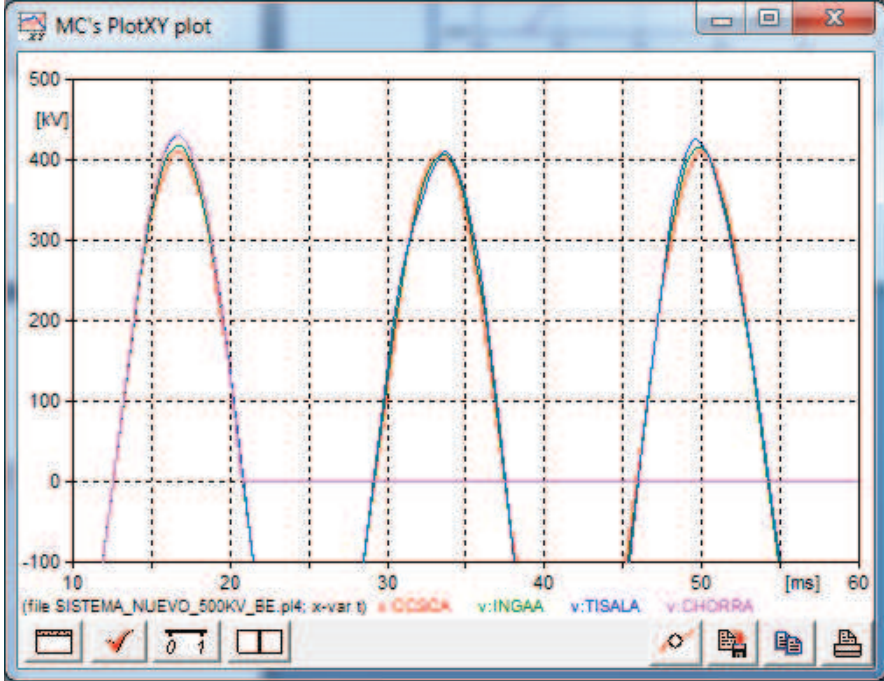
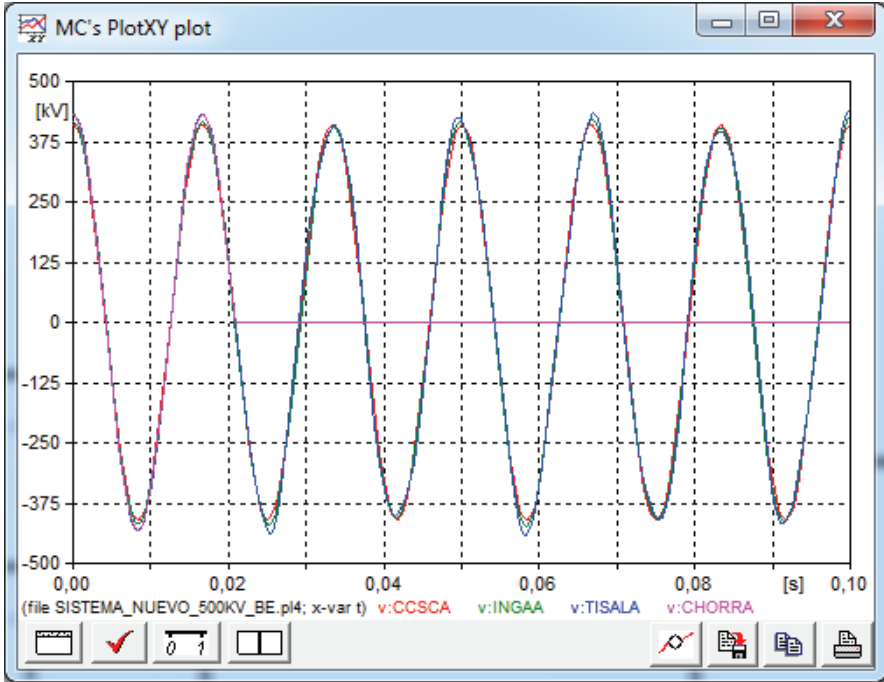
Caso 3: Estado Transitorio Apertura de Líneas de Transmisión Sin Carga

Caso 3.1: Apertura de Líneas de transmisión Tisaleo-Chorrillos del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

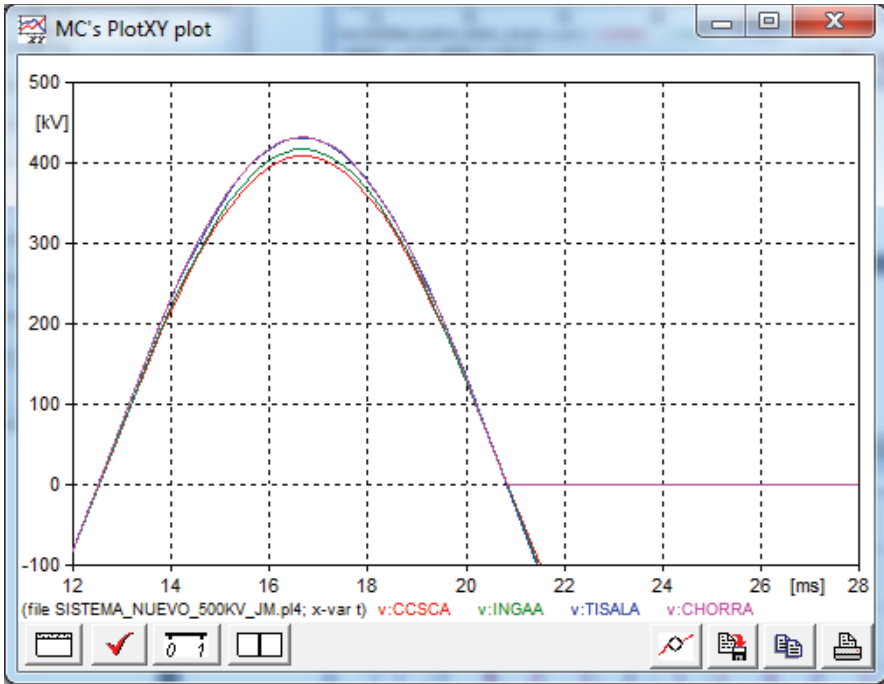
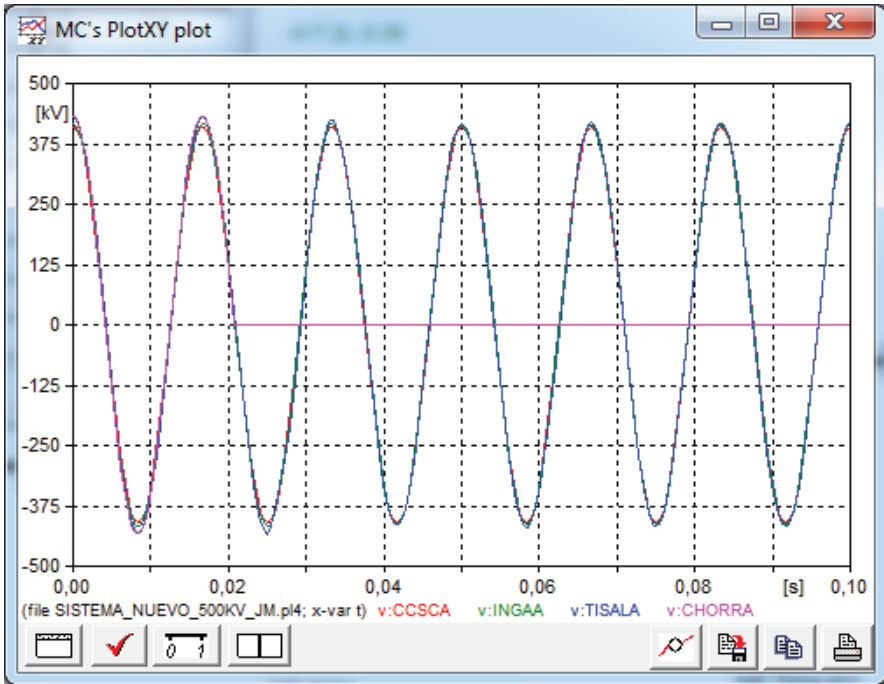
Caso 3.1.1: Modelo Pi



Caso 3.1.2 Modelo Bergeron

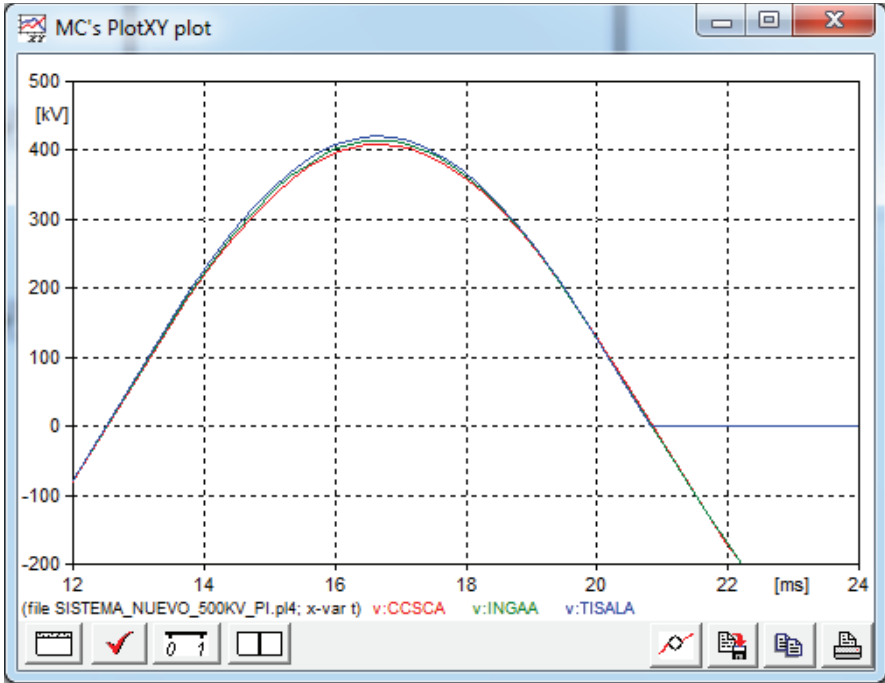
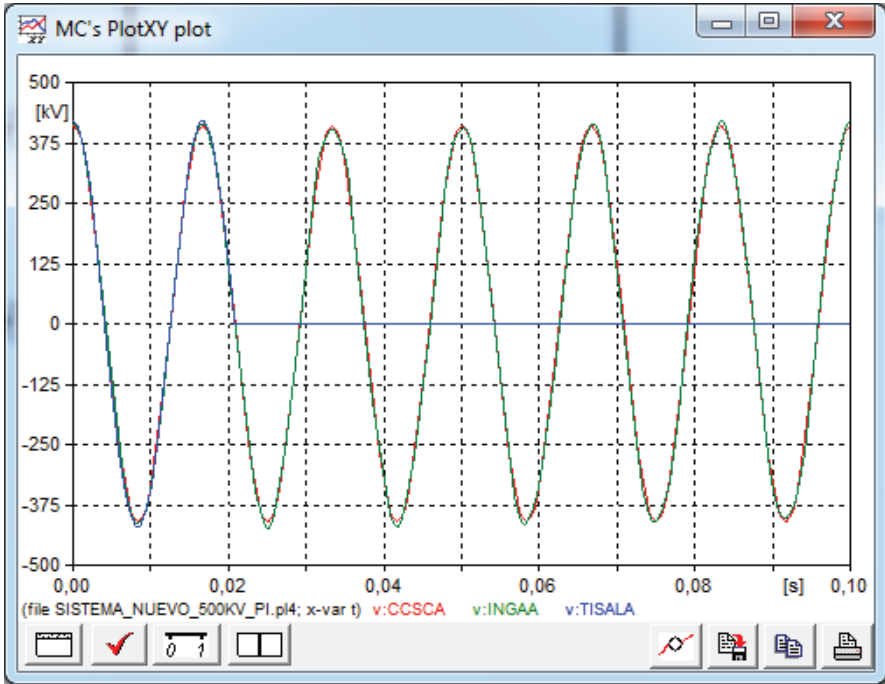


Caso 3.1.3 Modelo J. Marti

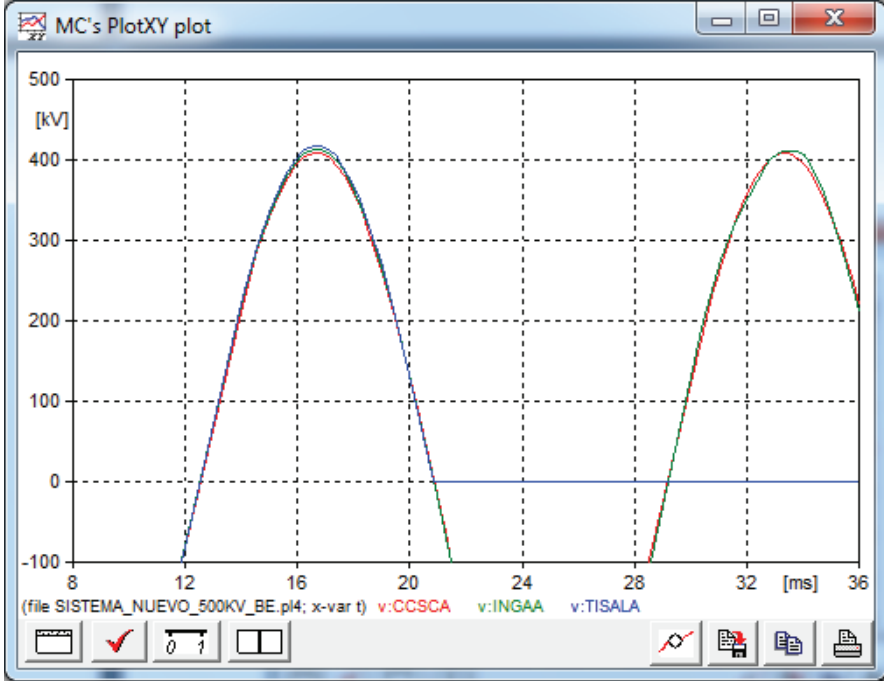
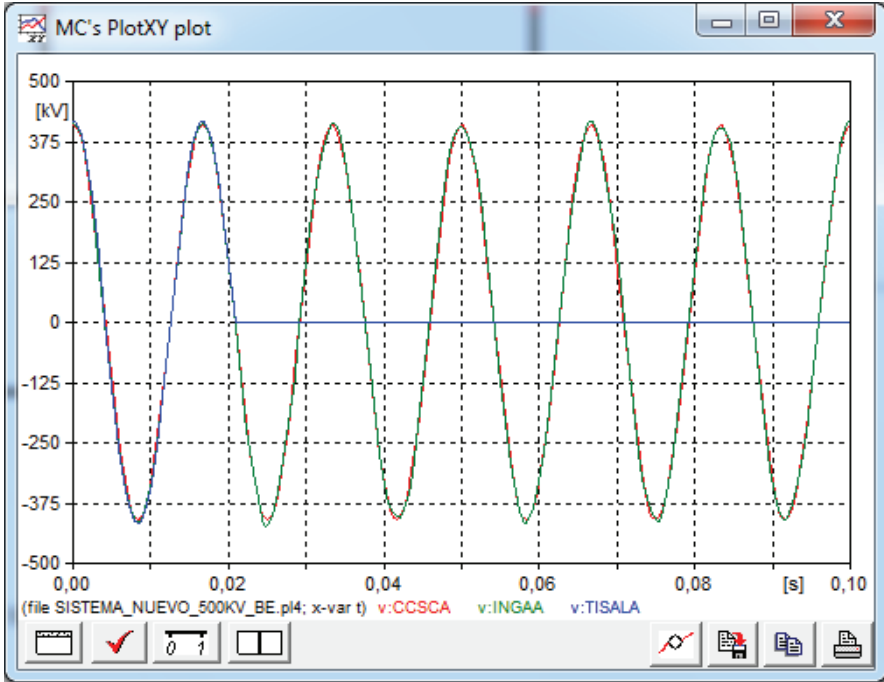


Caso 3.2: Apertura de Líneas de transmisión El Inga - Tisaleo del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

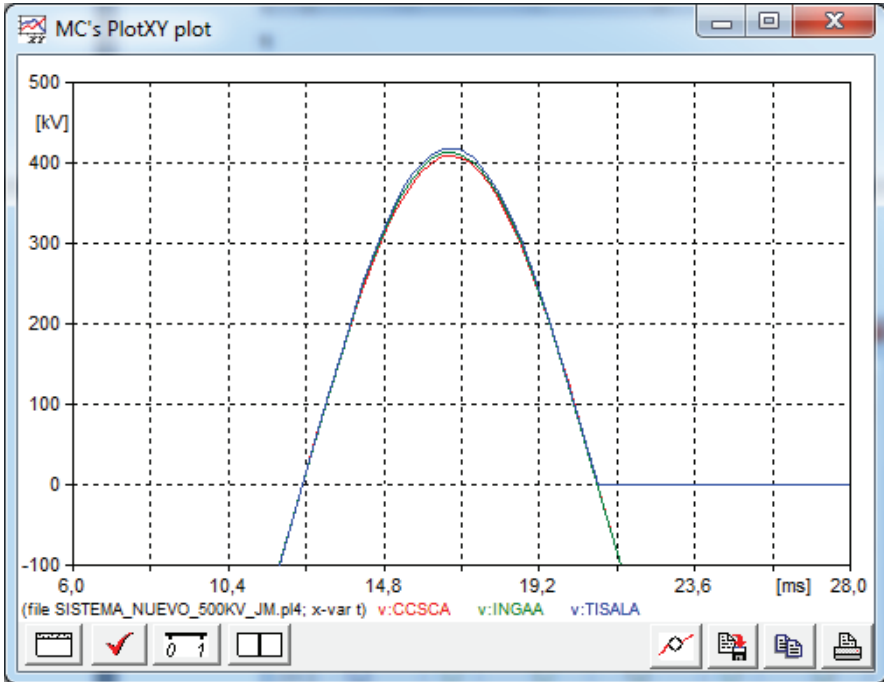
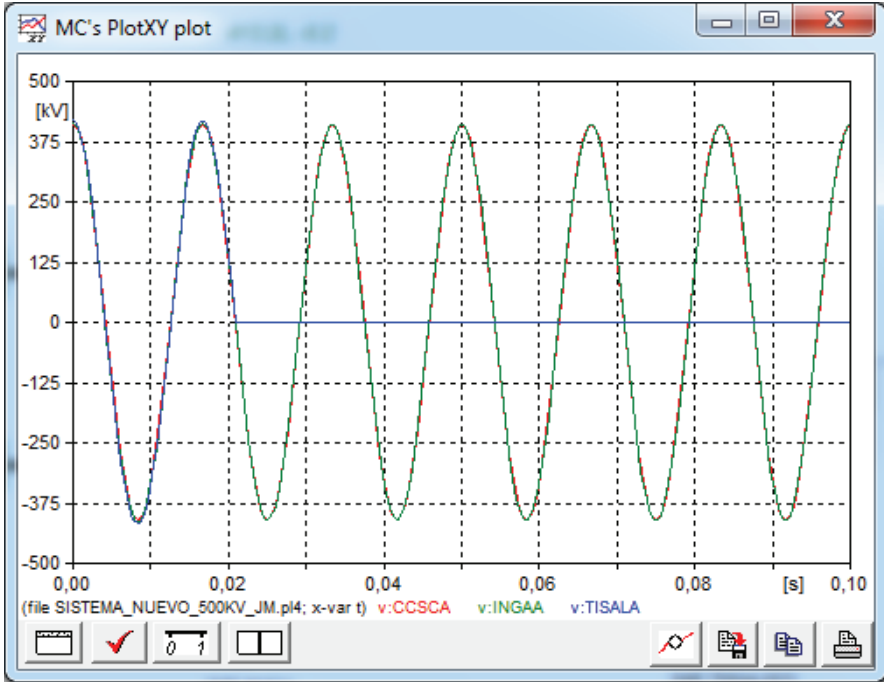
Caso 3.2.1 Modelo Pi



Caso 3.2.2 Modelo Bergeron

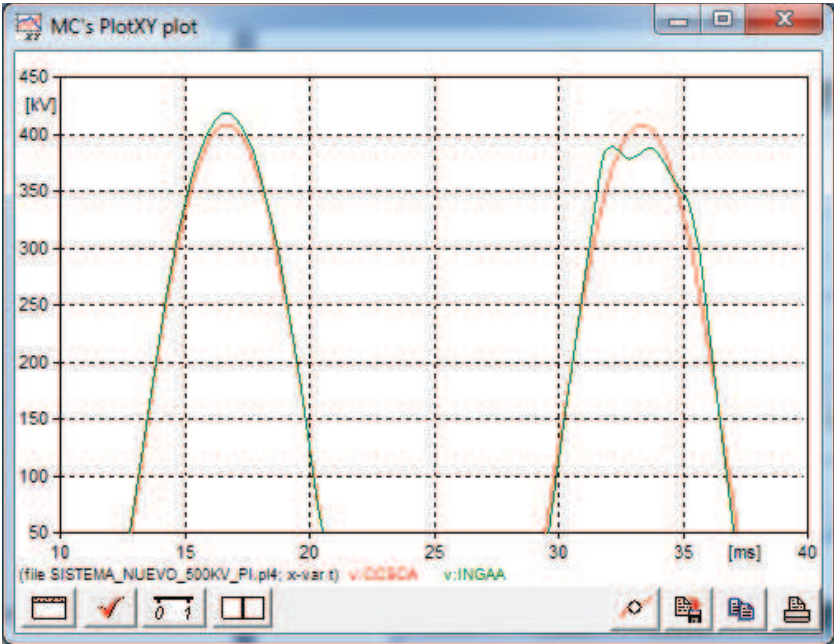
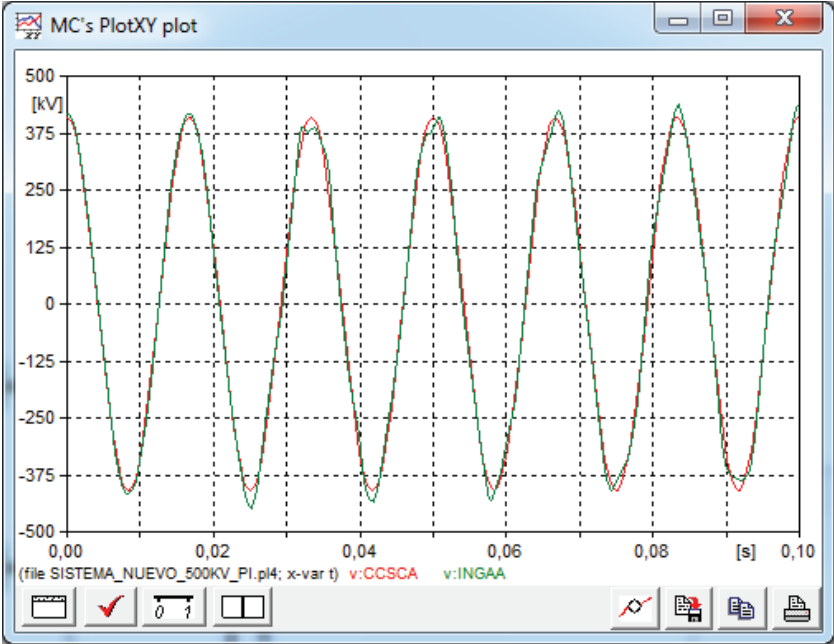


Caso 2.2.3.2: Modelo J. Marti

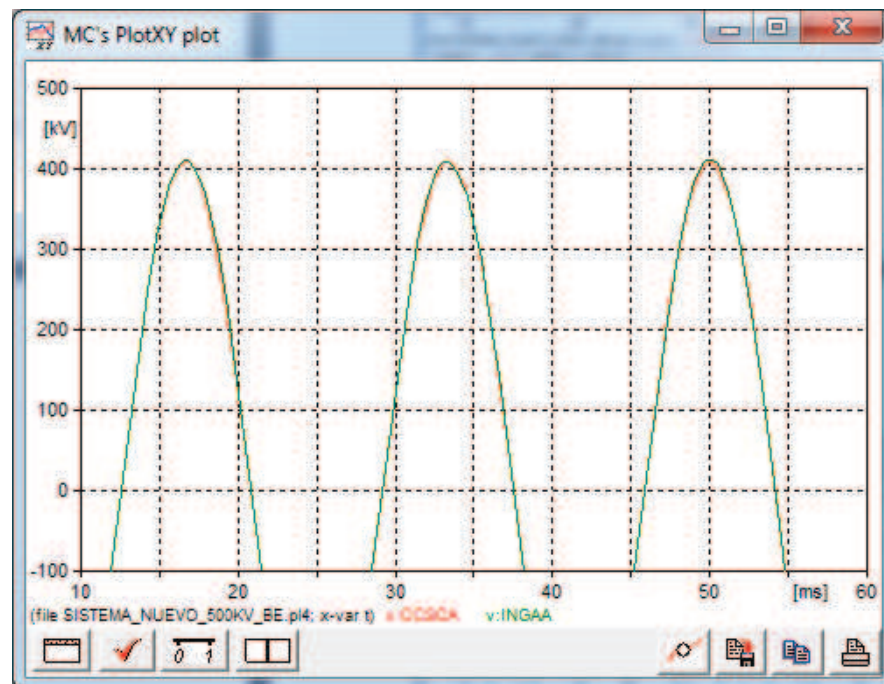
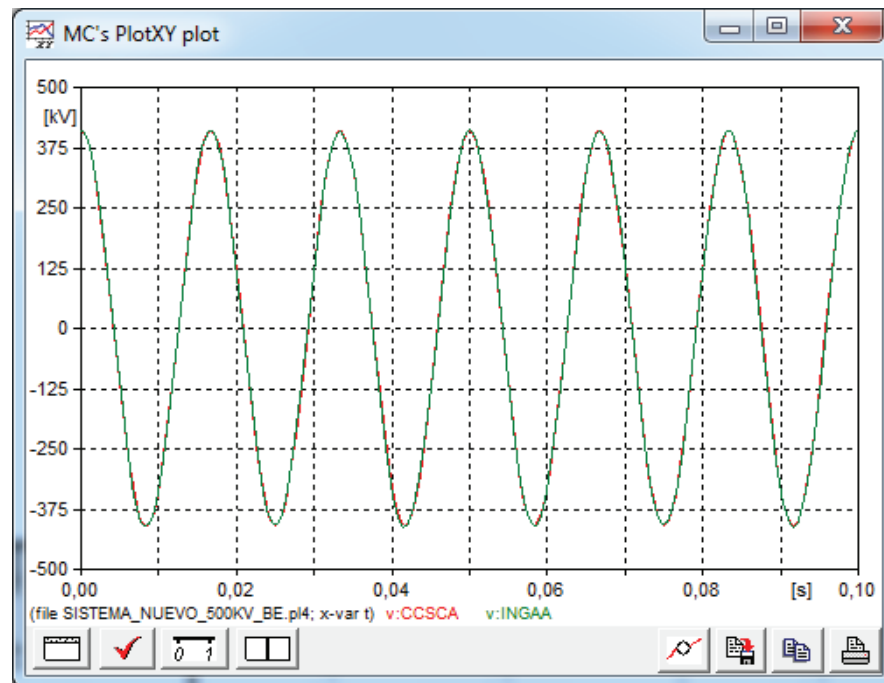


Caso 3.3: Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair-El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV.

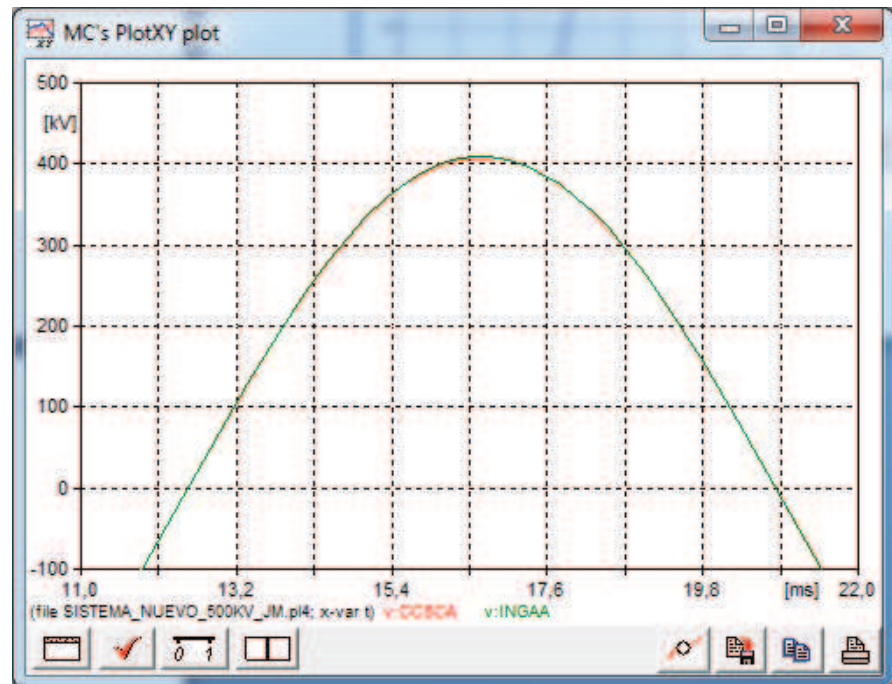
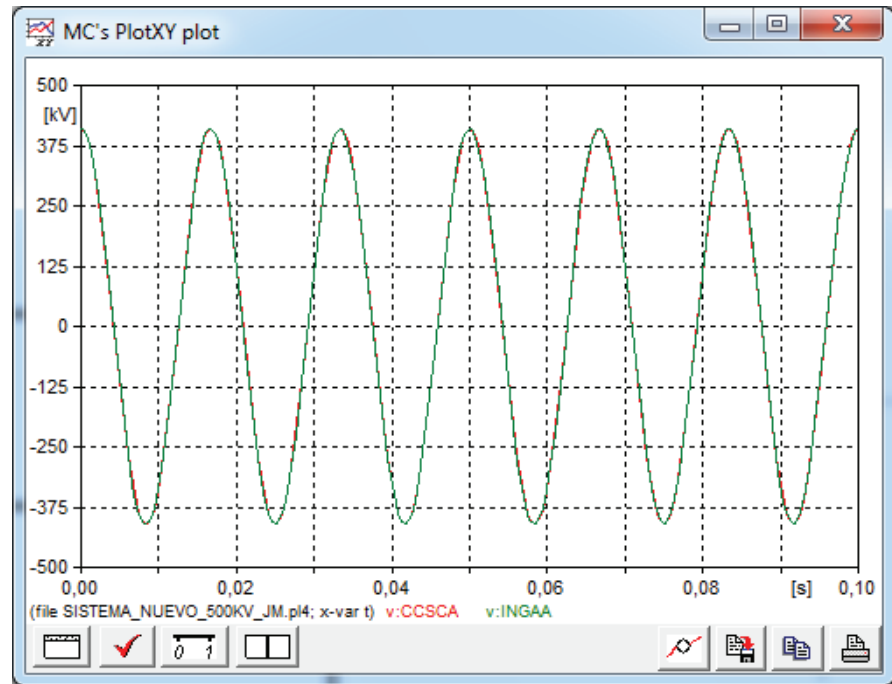
Caso 3.3.1 Modelo Pi



Caso 3.3.2 Modelo Bergeron

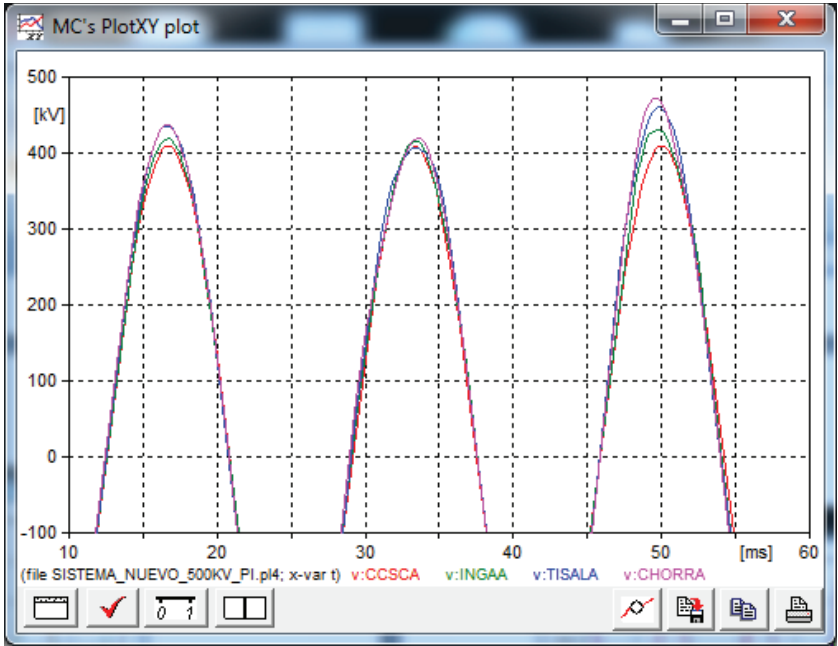
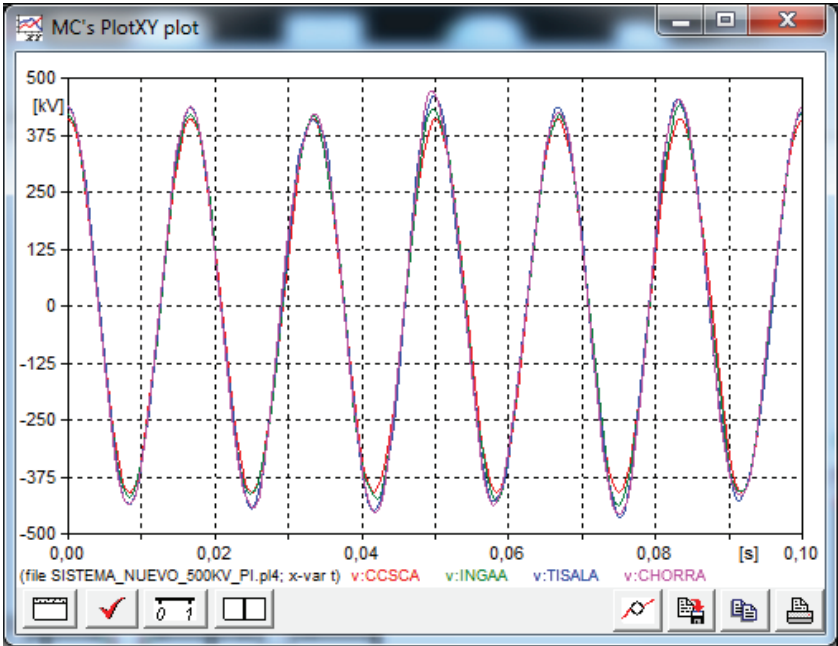


Caso 3.3.3 Modelo J. Marti

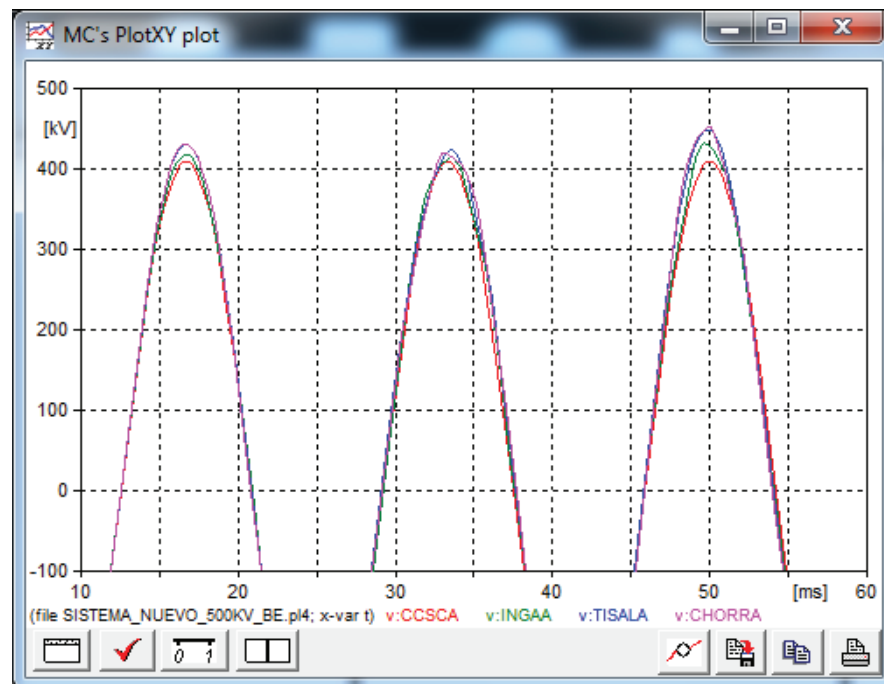
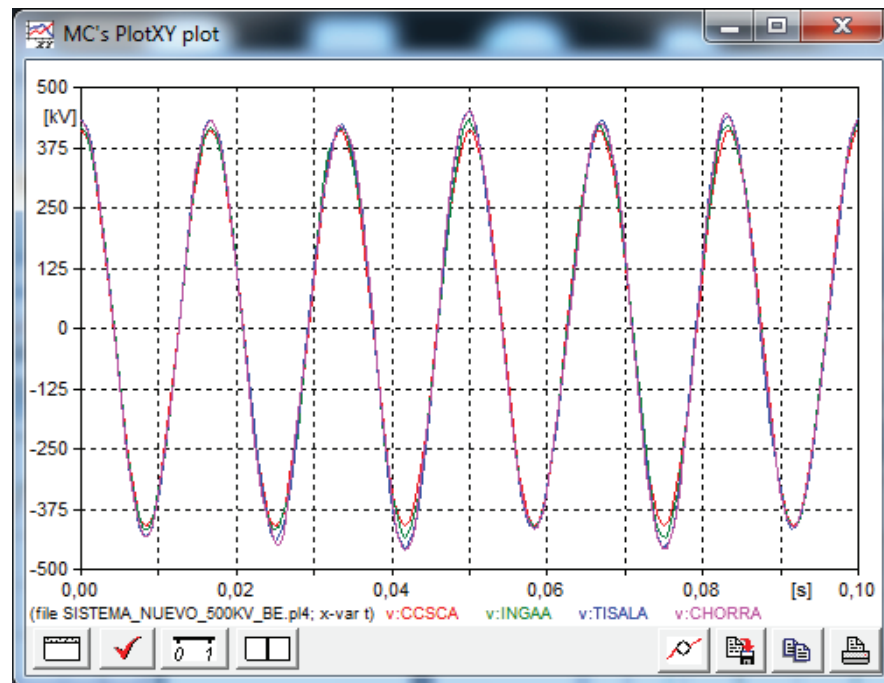


Caso 3.4: Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair - El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado.

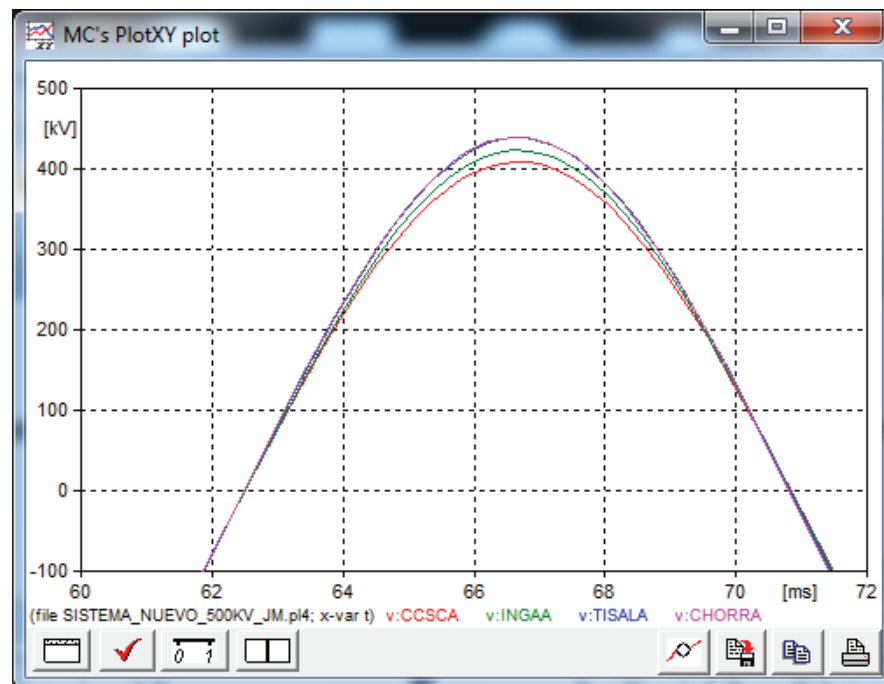
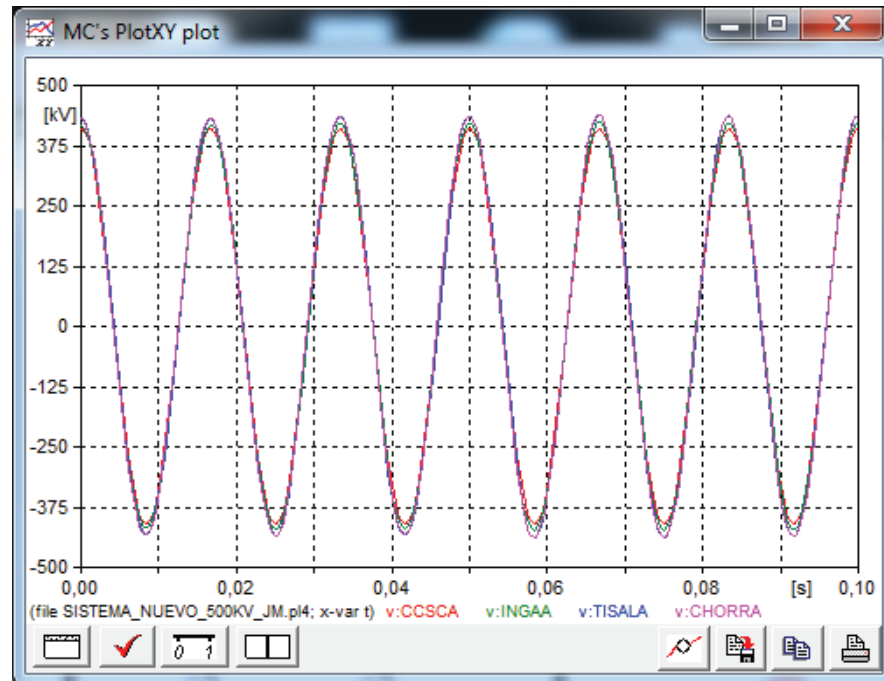
Caso 3.4.1 Modelo Pi



Caso 3.4.2 Modelo Bergeron

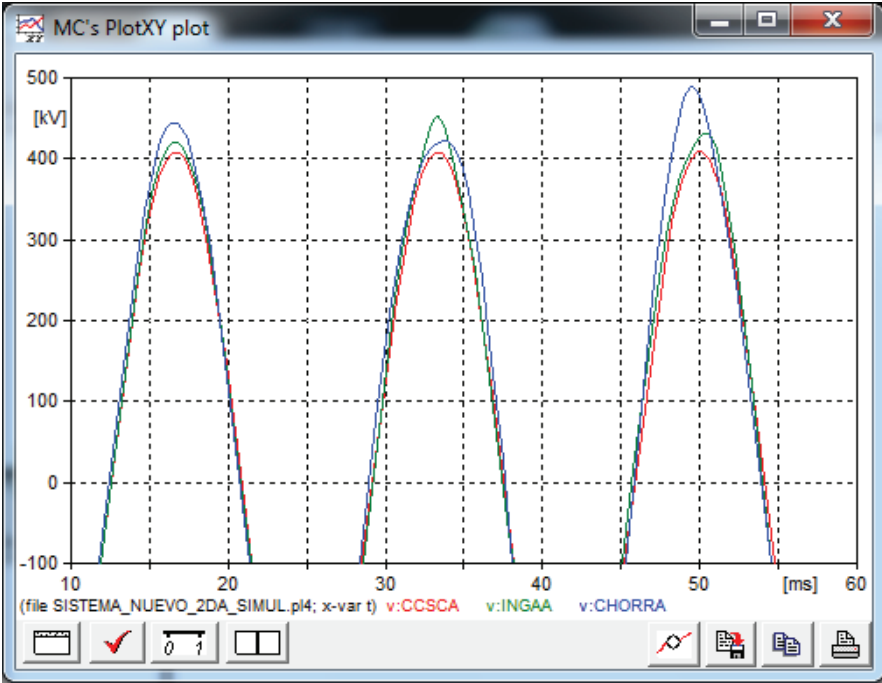
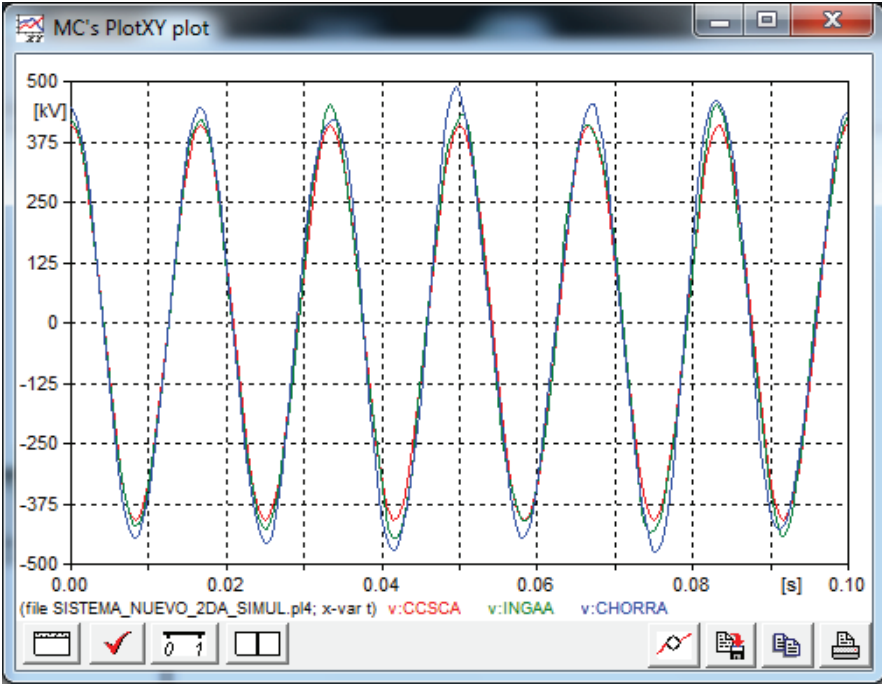


Caso 3.4.3 Modelo J. Marti

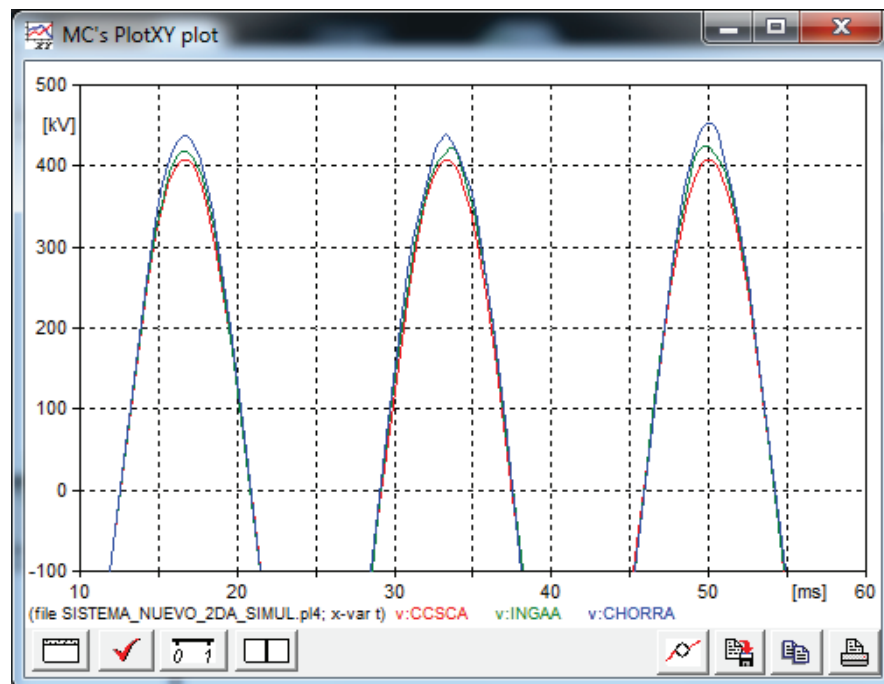
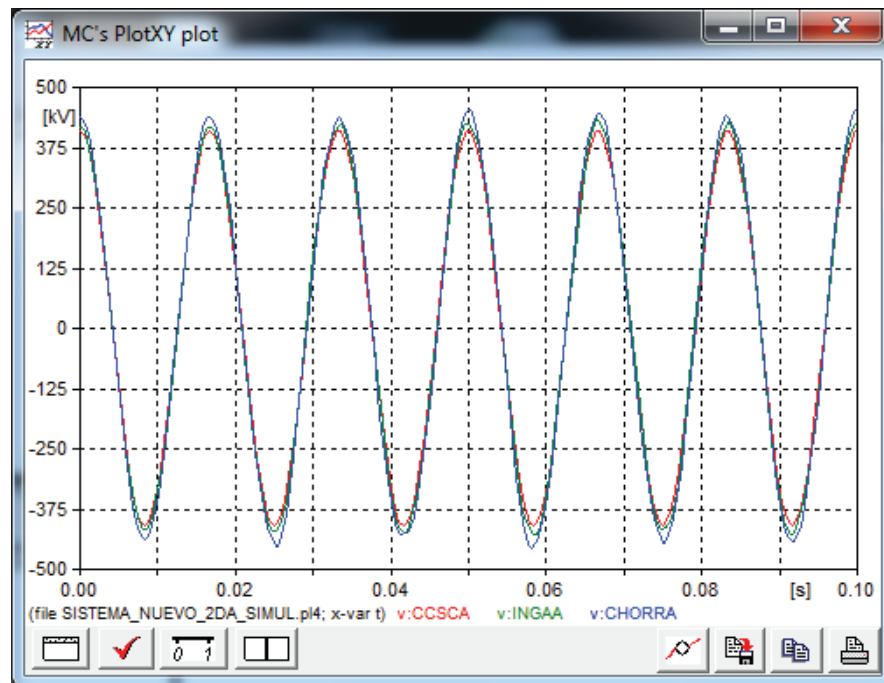


Caso 3.5: Apertura de una Línea de transmisión Coca Codo Sinclair - El Inga del Sistema Nacional de Transmisión de 500 kV con el resto del sistema energizado y línea de transmisión de 350 km.

Caso 3.5.1 Modelo PI



Caso 3.5.2 Modelo Bergeron



Caso 3.5.3 Modelo J. Marti

