



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LOS SISTEMAS
DE CABLES DE POTENCIA SUBLACUSTRES A 400 KV QUE
INTERCONECTAN LAS SUBESTACIONES EL TABLAZO-
CUATRICENTENARIO (CRUCE DEL LAGO DE MARACAIBO).**

Autor: Br. Rondón Romero Willian Antonio

Mérida, Enero, 2018.

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LOS SISTEMAS
DE CABLES DE POTENCIA SUBLACUSTRES A 400 KV QUE
INTERCONECTAN LAS SUBESTACIONES EL TABLAZO-
CUATRICENTENARIO (CRUCE DEL LAGO DE MARACAIBO).**

Trabajo Especial de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista.

Autor: Br. Rondón Romero Willian Antonio.

Tutor (es): Prof. Jean Carlos Hernández

Prof. (a) Marisol Dávila

Asesor: Ing. Juan Toledo Hernández M.Sc.

Corporación Eléctrica Nacional - CORPOELEC.

Mérida, Enero, 2018.

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LOS SISTEMAS DE
CABLES DE POTENCIA SUBLACUSTRES A 400 KV QUE
INTERCONECTAN LAS SUBESTACIONES EL TABLAZO-
CUATRICENTENARIO (CRUCE DEL LAGO DE MARACAIBO)**

Autor: Br. Rondón Romero Willian Antonio.

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de los Andes por el siguiente jurado:

Prof. (a) Marisol Dávila

Tutora

Prof. Jean Carlos Hernández

Tutor

Prof. Ernesto J. Mora N.

Jurado

Prof. Juan Carlos Muñoz.

Jurado

Br. Rondón Romero Willian Antonio. Análisis de transitorios electromagnéticos en los sistemas de cables de potencia sublacustres a 400 kv que interconectan las subestaciones el tablazo-cuatricentenario (cruce del lago de maracaibo). Universidad de Los Andes. **Tutores:** Prof. (a) Marisol Dávila y Prof. Jean Carlos Hernández. Enero 2018

RESUMEN

Los cables de potencia submarinos están sometidos a muchas amenazas por el entorno en el que se encuentran, los agravantes de estas amenazas básicamente son las características eléctricas del cable mismo, por encontrarse en el medio más desfavorable para la transmisión de energía eléctrica. Los fenómenos electromagnéticos son responsables de la mayoría de las fallas en cables submarinos, en consecuencia es necesario establecer modelajes de cables submarinos que permitan estudiar fenómenos electromagnéticos para prevenir los efectos perjudiciales tanto en el sistema de potencia como en el cable. El proceso de modelaje se basa en la implementación de programas de simulación y estudios transitorios, y se enfocó en el cable de potencia submarino mediante la metodología teórico-práctica, sustentada por trabajos de otros autores y validado a través de la reproducción y comparación de un trabajo orientado a la “validación de cables de potencia subterráneos de alta tensión”. Producto de este desarrollo se concretó un modelo confiable para cables de potencia submarinos usando el software ATPDraw y el modelo de J. Martí, junto a elementos de configuración que permiten observar una gran variedad de transitorios según su clasificación. Se debe resaltar que el modelaje realizado en el ATPDraw no contempla los efectos de las juntas (empalmes) del cable ni las terminaciones, por lo cual se recomienda implementar el modelaje de juntas y accesorios de conexión que permita observar sus efectos en los transitorios electromagnéticos.

Palabras claves: Transitorios Electromagnéticos, modelos de línea de transmisión, Cables de Potencia, EMTP/ATP, Redes Sublacustres.

TABLA DE CONTENIDOS

APROBACIÓN.....	ii
RESUMEN.....	iii
TABLA DE CONTENIDOS.....	iv
INTRODUCCIÓN	1

Capítulo	pp.
I. EL PROBLEMA	2
1.1. Justificación del problema.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Objetivos de la investigación	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. Metodología.....	5
1.5. Alcance y limitaciones	6
1.5.1 Alcance.....	6
1.5.2 Limitaciones.....	6
1.6. Antecedentes	7
II. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Cable de potencia	9
2.1.1. Definición:.....	10
2.1.2. Clasificación de los cables de potencia:.....	10

2.1.3.	Partes del Cable de Potencia	12
2.1.3.1.	Núcleo:.....	12
2.1.3.2.	Aislamiento.....	15
2.1.3.3.	Cubierta exterior	19
2.1.3.4.	Pantalla del conductor y del aislamiento	19
2.1.3.5.	Armadura	20
2.1.3.6.	Hermeticidad al agua del conductor	21
2.1.3.7.	Revestimiento bloqueador de agua	22
2.1.3.8.	Protección contra la corrosión	24
2.1.4.	Características del Cable de Potencia	25
2.1.4.1.	Resistencia del conductor	25
2.1.4.2.	Pérdidas del conductor.....	26
2.1.4.3.	Pérdidas dieléctricas	27
2.1.4.4.	Pérdidas en la pantalla/armadura	28
2.1.4.5.	Ampacidad del cable.....	29
2.1.4.6.	Factores varios del diseño térmico.....	30
2.1.4.7.	Juntas o uniones de cables submarinos.....	31
2.1.4.8.	Terminaciones del cable	33
2.2.	Modelos matemáticos para líneas de transmisión	34
2.2.1.	Modelo de J. Martí	36
2.2.2.	Generalidades de modelos de líneas de transmisión.....	37
2.2.3.	Comparación de los modelos	39
2.3	Programa de transitorios electromagnéticos ATPDraw	42

2.3.1	EMTP/ATP (Alternative Transients Program)	42
2.3.2	Tipos de análisis	43
2.3.3	Transitorios Electromagnéticos en el ATPDraw	44
2.3.4	Elementos y fenómenos a simular en el ATPDraw	45
2.3.5	Configuración de la simulación	46
III.	MARCO METODOLÓGICO	50
3.1	Consideración General	50
3.2	Evaluación de alternativas:	51
3.3	Datos obtenidos	51
3.3.1	Disposición del sistema de cables subterráneos	52
3.3.2	Datos del cable	53
3.3.3	Parámetros de la simulación	55
3.3.4	Circuito eléctrico empleado para mediciones de campo	58
3.4	Modelaje del sistema de cables a 400kV en ATPDraw	59
3.4.1.	Resultados de la simulación	61
3.4.2.	Comparación de los resultados	64
	Simulaciones PSCAD vs ATPDraw	64
	Mediciones de campo vs ATPDraw	65
IV.	SIMULACIONES	70
4.1.	Sistema de potencia modelado	70
4.2.	Casos de estudio	71
4.2.1.	Régimen permanente	72
4.2.2.	Descargas atmosféricas	75

4.2.3.	Cargabilidad de los cables d potencia	78
4.2.4.	Conexión de carga nominal.....	81
4.2.5.	Corto circuito	84
V.	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	93
5.1.	Validación	94
5.2.	Simulaciones	95
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES	101
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	103

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
2.1 Temperatura de operación de los materiales aislantes en cables (Worzyk, 2009).	17
2.2 Resistencia específica y coeficiente de temperatura (Worzyk, 2009).....	26
2.3 Clasificación general de los modelos de línea (Restrepo, 2008).	38
2.4 Comparación cualitativa de los modelos de línea (Restrepo, 2008).	39
2.5 Rangos de frecuencia para fenómenos electromagnéticos y electromecánicos (Protecciones Eléctricas, 2017).....	45
3.1 Parámetros del sistema de cables a 400 kV (Gudmundsdottir, 2010).....	54
3.2 Datos del sistema de cables a 400 kV (Gudmundsdottir, 2010).	54
3.3 Parámetros de configuración para el modelo del cable (Gudmundsdottir, 2010). ..	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	pp.
2.1 Sección transversal del cable de 400kV en el norte de Dinamarca (Gudmundsdottir, 2010).....	11
2.2 Diseño de conductores para cables de alta tensión (Worzyk, 2009).....	13
2.3 Corrientes parasitas o arremolinadas (Worzyk, 2009).....	29
2.4 Clasificación de los modelos según los parámetros (Restrepo, 2008).....	35
2.5 Circuito equivalente del modelo de J. Martí en el dominio de la frecuencia (Restrepo, 2008).....	37
2.6 Diagrama de flujo para la selección de los modelos de línea apropiados (Restrepo, 2008).	41
2.7 Ajustes generales del ATP.	47
2.8 Modelo del cable.	47
2.9 Datos del cable.	48
2.10 Nodos del cable.	49
3.1 “Secciones mayores” (aterri-zaje de las pantallas) y “Secciones menores” (trasposición de las pantallas) (Gudmundsdottir, 2010).	52
3.2 Segmentos de cable y sus longitudes a lo largo de la disposición total del cable (Gudmundsdottir, 2010).....	53
3.3 Profundidad bajo tierra, separación de las fases y los circuitos del sistema de cables a 400 kV (Gudmundsdottir, 2010).	53

3.4 Ajustes generales de la simulación.	56
3.5 Ajuste de parámetros para el modelo de J. Martí.....	57
3.6 Acondicionamiento del sistema de cables para pruebas y mediciones de campo (Gudmundsdottir, 2010).....	59
3.7 Modelaje del sistema de cables a 400 kV en el ATPDraw.	60
3.8 Ubicación de los cables respecto a la superficie y los otros cables.	60
3.9 Detalle de dos cables del sistema.....	60
3.10 Datos del cable para la fase #1.....	61
4.1 Diagrama circuital correspondiente al circuito #1 de transmisión a 400 kV.	71
4.2 Corriente de carga capacitiva dependiendo de la ubicación y el nivel de compensación (Faría Da Silva, 2011).	78

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	pp.
3.1 Voltajes en los terminales de envío.....	62
3.2 Corrientes en los terminales de envío.	62
3.3 Voltajes en los terminales de recepción.....	63
3.4 Corrientes en los terminales de recepción.....	63
3.5 Voltajes de envío ATPDraw y PSCAD.	64
3.6 Voltajes de recepción ATPDraw y PSCAD.....	65
3.7 Fuentes de impulsos, ATPDraw y empleada en las pruebas.....	66
3.8 Voltajes de envío de la segunda fase, ATPDraw y mediciones de campo.	67
3.9 Voltajes de envío de la tercera fase, ATPDraw y mediciones de campo.....	67
3.10 Voltajes de recepción de la primera fase, ATPDraw y mediciones de campo. ..	68
3.11 Voltajes de recepción de la segunda fase, ATPDraw y mediciones de campo... 69	
3.12 Voltajes de recepción de la tercera fase, ATPDraw y mediciones de campo.	69
4.1 Voltajes de regimen permanente en los terminales de envío.	72
4.2 Corrientes de regimen permanente en los terminales de envío.....	72
4.3 Voltajes de regimen permanente en los terminales de recepción.	73
4.4 Corrientes de regimen permanente en los terminales de recepción.	73
4.5 Voltajes y corrientes de regimen permanente en las pantallas, punto medio de la ruta del cable.	74
4.6 Voltajes y corrientes de regimen permanente en las pantallas, terminales de recepcion del cable.....	74

4.7 Voltajes y corrientes de regimen permanente en las pantallas, terminales de envío del cable.	75
4.8 Voltajes y corrientes en los terminales de envío del cable.....	75
4.9 Voltajes y corrientes en los terminales de recepción del cable.	76
4.10 Voltajes y corrientes de las pantallas en los terminales de envío del cable.	76
4.11 Voltajes y corrientes de las pantallas en el punto intermedio del cable.....	77
4.12 Voltajes y corrientes de las pantallas en los terminales de envío del cable.	78
4.13 Voltaje en los terminales de envío del cable.....	79
4.14 Corriente en los terminales de envío del cable.....	80
4.15 Tensiones y corrientes de las pantallas en los terminales de envío.....	80
4.16 Tensiones y corrientes de las pantallas en el punto medio de la ruta del cable. .	81
4.17 Tensiones y corrientes de las pantallas en los terminales de recepción.....	81
4.18 Corrientes de envío.	82
4.19 Corriente de recepcion.	82
4.20 Voltajes y corrientes en las pantallas de envío.....	83
4.21 Voltajes y corrientes en las pantallas, punto intermedio.....	83
4.22 Voltajes y corrientes en las pantallas de recepción.	84
4.23 Corrientes de envio bajo cortocircuito de fase a tierra.....	85
4.24 Corrientes de recepción bajo cortocircuito de fase a tierra.	85
4.25 Corrientes y tensiones de envio en las pantallas bajo cortocircuito de fase a tierra.	86
4.26 Corrientes y tensiones en las pantallas en el punto medio bajo cortocircuito de fase a tierra.	86

4.27 Corrientes y tensiones de recepción en las pantallas bajo cortocircuito de fase a tierra.	87
4.28 Corrientes en los terminales de envío bajo cortocircuito de fase-pantalla.....	87
4.29 Voltajes y corrientes de las pantallas en los terminales de envío bajo cortocircuito fase-pantalla.....	88
4.30 Voltajes de las pantallas en el punto intermedio de la ruta del cable bajo cortocircuito fase-pantalla.....	88
4.31 Corrientes de las pantallas en el punto intermedio de la ruta del cable bajo cortocircuito fase-pantalla.....	89
4.32 Voltajes de las pantallas en los terminales de recepción bajo cortocircuito fase-pantalla.....	89
4.33 Corrientes de las pantallas en los terminales de recepción bajo cortocircuito fase-pantalla.....	90
4.34 Voltajes y corrientes en las pantallas de envío sin trasposición.....	91
4.35 Voltajes y corrientes de las pantallas en el punto intermedio sin trasposición. ..	91
4.36 Voltajes y corrientes en las pantallas de recepción sin trasposición.....	92

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía eléctrica aunada al envejecimiento y condiciones del entorno en el que se encuentra el sistema de transmisión a $400kV$ entre las S/E's El Tablazo-Cuatricentenario, requiere plantear soluciones radicales que permitan mejorar la calidad del servicio y minimizar labores e intervenciones de mantenimiento. En consecuencia EDELCA propuso implementar un sistema de transmisión sublacustre empleando la más reciente tecnología en cables submarinos para solventar los problemas de contaminación que acarrea el sistema y asegurar la cobertura de la creciente demanda.

La propuesta planteada requiere de la evaluación profunda de un sistema prácticamente nuevo debido a las diferencias existentes entre sistemas aéreos y submarinos. Así mismo la evaluación del comportamiento del sistema de transmisión submarino es compleja y requiere de estudios específicos en su mayoría relacionados con transitorios electromagnéticos.

El propósito del presente trabajo de grado es dar solución a la realización de los estudios transitorios a través del modelaje del sistema de cables sublacustres que interconectan las subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario (cruce del Lago de Maracaibo), así como el planteamiento de estrategias teórico-prácticas enfocadas en la reducción de fenómenos que perjudiquen el sistema.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

En este capítulo se describen los problemas que afectan el sistema de transmisión a 400 kV que interconecta las subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario, también se describe la propuesta de un sistema de transmisión sublacustre que plantea solucionar dichos problemas considerando tecnologías de transmisión de vanguardia, bajo impacto ambiental y reducción significativa de labores de mantenimiento. Por otro lado el sistema de transmisión submarino requiere ser modelado para la realización de estudios sobre el mismo, en consecuencia se plantean los objetivos, metodología, alcance y limitaciones del presente trabajo de grado.

1.1. Justificación del problema

Según Oliveira, Duarte y Maninat, en el año 2007, CVG-EDELCA realizó un estudio del estado de las líneas de transmisión aéreas que cruzan el Lago de Maracaibo en 400 kV y se llegó a la conclusión de que las mismas presentaban un avanzado deterioro el cual es principalmente debido a la acción altamente corrosiva del medio ambiente de la zona. Esta condición de las líneas conjuntamente con consideraciones adicionales de impacto ambiental y seguridad para la navegación, llevaron a CVG-EDELCA a evaluar un abanico de opciones para dar solución a todos estos problemas. La evaluación dio como resultado que la solución más perdurable y

beneficiosa en el tiempo es la sustitución de los tramos de línea aérea en el cruce del Lago de Maracaibo por dos sistemas, al mismo nivel de tensión de 400 kV, de cables potencia sublacustres de reciente tecnología.

La evaluación inicial realizada por CVG-EDELCA ha considerado solo las características del diseño del sistema de cables sublacustres y sus obras de transmisión asociadas; sin embargo, también son imperativos estudios, desde el punto de vista de análisis de sistemas de potencia, del impacto que tendrá la incorporación de los sistemas de cables de potencia sublacustres en el sistema interconectado occidental. Por lo tanto, el trabajo de grado propuesto se plantea en específico el estudio de los transitorios electromagnéticos en los sistemas de cables sublacustres que Interconectarán las subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario a 400 kV en el Cruce del Lago de Maracaibo a través de la investigación teórica referentes a modelado, simulación y análisis de los transitorios electromagnéticos en sus características e impacto en el sistema eléctrico nacional occidental, (Oliveira, 2009).

1.2. Planteamiento del problema

Las líneas de transmisión que interconectan las sub-estaciones El Tablazo-Cuatricentenario se encuentran bajo la influencia del deterioro ambiental altamente corrosivo del Lago de Maracaibo. Principalmente las torres de transmisión sufren estas consecuencias que conllevan al deterioro acelerado de su estructura poniendo en riesgo no solo la calidad del servicio eléctrico sino también la integridad de los trabajadores y equipos que integran el sistema debido al incremento de la probabilidad de falla del mismo.

En consecuencia EDELCA propuso erradicar el sistema de transmisión aéreo y reemplazarlo por un sistema de cables submarinos. El nuevo sistema reemplazaría los circuitos trifásicos a 400 kV, cruzando aproximadamente 10 Km de trayecto

sublacustre mas dos tramos subterráneos de 600 m y 300 m de largo aproximadamente, a cada extremo del cable submarino. (Oliveira, 2009).

El comportamiento de los cables de transmisión es muy diferente al de las líneas de transmisión aéreas, por lo tanto es necesario determinar el impacto que tendría su introducción al sistema de potencia como cargabilidad de los cables, capacidad de corto circuito y demás aspectos relacionados a transitorios electromagnéticos con el fin de adaptar y realizar los cambios necesarios en el sistema de potencia.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Establecer un modelo en EMTP ATP para transitorios electromagnéticos en los sistemas de cables de potencia sublacustres que interconectan las Subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario a 400 kV (cruce del Lago de Maracaibo).

1.3.2. Objetivos específicos

- Entender los conceptos fundamentales de un sistema de cables de potencia sublacustre.
- Realizar la revisión bibliográfica para el modelado y simulación de transitorios electromagnéticos en sistemas de cables de potencia.
- Aplicar un modelo de cable de potencia XLPE de última tecnología para baja, media y alta frecuencia.

- Estudiar los diagramas unifilares de las subestaciones interconectadas para establecer el modelaje apropiado del sistema.
- Establecer modelos y casos de estudio de transitorios electromagnéticos debidos a descargas atmosféricas, maniobra y corto circuitos.
- Realizar simulaciones de los casos de estudio bajo estándares y procedimientos actuales.

1.4. Metodología

El presente trabajo de grado se basa en la metodología relacionada con un proyecto factible que consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de un modelo simulado que permite cuantificar las variables para prevenir y solucionar problemas, requerimientos, necesidades de organizaciones o grupos sociales que pueden referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos, o procesos.

El trabajo de grado consta de la investigación teórica orientada a cables de potencia submarinos, modelos adecuados para representar cables de transmisión, familiarización con el ATPDraw y modelaje de sistemas de transmisión que emplean cables de potencia en el software.

Posteriormente aplicando el método teórico-práctico, se modelan sistemas de transmisión similares con el fin de identificar parámetros de ajuste relevantes y comparar resultados. Este método permite validar un modelo apropiado para el sistema bajo estudio y ejecutarlo según los parámetros que lo caracterizan.

Los resultados son evaluados mediante la observación y análisis de fenómenos electromagnéticos tanto cualitativa como cuantitativamente, de manera que permite solucionar los problemas planteados.

1.5. Alcance y limitaciones

1.5.1 Alcance

Establecer un modelo adecuado para la observación y análisis de transitorios electromagnéticos en los sistemas de cables sublacustres que interconectarán las subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario a 400 kV en el Cruce del Lago de Maracaibo mediante el software ATPDraw.

1.5.2 Limitaciones

➤ Ausencia de algunos parámetros de entrada necesarios para establecer un modelo del sistema eléctrico más preciso.

➤ No se pudo realizar el modelado del sistema de potencia con exactitud limitada debido al retardo de cómputo y a la falta de datos que lo caracterizan adecuadamente.

➤ El modelado del sistema de potencia se hizo solo a través de simulaciones; dado que no se tiene ningún resultado de pruebas de laboratorio o mediciones de campo.

➤ Se tuvo la necesidad de descartar las capas del cable de potencia menos influyentes en el modelado así como algunos efectos de las juntas de transición (Empalmes), permitividad y permeabilidad el medio e inducción o interferencias causadas por tuberías u otras instalaciones eléctricas cercanas.

➤ Escasez bibliográfica sobre modelado de sistemas de potencia con transmisión submarina en programas computacionales.

➤ No se tienen parámetros de comparación para realizar la validación de los resultados, por tanto se tuvo que modelar primero algunos casos con modelos de cables de potencia subterráneos (caso más cercano a cables de potencia submarinos).

1.6. Antecedentes

En Venezuela existe la tecnología de cables submarinos y sublacustres en los proyectos de cruce hacia la Isla de Margarita a 115 kV y en el lago de Maracaibo a 230 kV desde hace 33 años. El cruce del lago de Maracaibo está compuesto por dos sistemas de transmisión uno aéreo y otro sublacustre, siendo el sistema sublacustre a 230 kV el de menor tensión, aun no existe en Venezuela un sistema a 400 kV sumergido.

Los sistemas submarinos a 400 kV no son muy comunes en el ámbito mundial, sin embargo; con los avances tecnológicos y el mejoramiento de las técnicas de fabricación de cables hace posible la producción de cables de potencia con menores riesgos de falla y mayores longitudes continuas (sin juntas o empalmes). Por ende son cada vez más utilizados en especial los cables extruidos XLPE cuyo mantenimiento es mínimo comparado con otros tipos de cable.

El medio en el que se encuentran las torres de transmisión del lago de Maracaibo representa un ambiente altamente corrosivo proveniente de la propia industria petrolera, altos niveles de salinidad y descomposición de excrementos de aves. Donde muchos elementos de las torres presentan incluso pérdida de sección, además de sobrepasar los límites de las labores de mantenimiento que puede realizar EDELCA. Las evaluaciones realizadas presentan un problema exponencial que amerita implementar un cambio radical en el sistema de transmisión con bajos niveles de mantenimiento y eludiendo hasta donde sea posible la contaminación.

EDELCA concluyó que la solución más duradera y favorable es la sustitución de los tramos de línea aérea en el cruce del lago de Maracaibo por dos circuitos a *400 kV* (mas una fase de reserva) de cables submarinos de reciente tecnología.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación, se presentan una serie de definiciones y conceptos que serán importantes para la comprensión y entendimiento del análisis de los transitorios electromagnéticos mediante el modelado de sistemas de potencia en el software ATPDraw en los sistemas de cables de potencia sublacustres a 400 kV que interconectan las subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario (cruce del lago de Maracaibo), con la finalidad de que los usuarios tengan un mejor entendimiento del mismo.

2.1. Cable de potencia

Los cables de potencia se han utilizado alrededor del mundo por más de cien años para transportar energía eléctrica a través de superficies terrestres, ríos, canales, estrechos, bahías, plataformas, entre otros. Con el paso del tiempo se han creado y mejorado una gran variedad de cables con aplicaciones terrestres y sumergibles o submarinas con diferentes estructuras y composiciones, junto con nuevas técnicas y procesos de producción que mejoran sustancialmente las características del cable. Adicionalmente el desarrollo actual permite al consumidor solicitar cables diseñados para condiciones específicas como por ejemplo grandes profundidades, bajas temperaturas, composición química del medio en particular, entre otras.

Actualmente los cables de transmisión están constituidos por varias estructuras dispuestas en capas. Cada estructura tiene un propósito específico y no debe desmejorar las propiedades de las otras capas.

2.1.1. Definición:

Consiste en un grupo de conductores aislados que sirven para la transmisión de corriente eléctrica, comunicaciones telegráficas o telefónicas y de control.

Viqueira, indica que es “esencialmente, uno o más conductores aislados mediante materiales enrollados o extruidos sobre los conductores que tiene principalmente por objeto lograr el mejor aprovechamiento de las cualidades de los aislamientos y la preservación de esas cualidades (Viqueira, 1993).

2.1.2. Clasificación de los cables de potencia:

Gudmundsdottir, establece que los cables de transmisión se pueden clasificar según el tipo de aislamiento que utilizan. A continuación se mencionan los principales (Gudmundsdottir ,2010):

- Cables llenos de fluido (*Fluid Filled Cables*)
 - Llenos de fluido a alta presión (*High Pressure Fluid Filled o HPFF*)
 - Aislamiento de papel.
 - Aislamiento de papel y polipropileno (PPL)
 - Llenos de fluido auto contenido (*Self Contained Fluid Filled o SCFF*)
 - Aislamiento de papel.
 - Aislamiento de papel y polipropileno (PPL)
- Cables llenos de gas (*Gas Filled Cables*)

- Llenos de gas a alta presión (*High Pressure Gas Filled o HPGF*)
- Cables extruidos (Extruded Cables)
 - Polietileno reticulado (*Cross-Linked Polyethylene o XLPE*)
 - Caucho etileno propileno (*Ethylene Propylene Rubber o EPR*)

Worzyk, expone que los cables de transmisión constan de uno o varios núcleos con la posibilidad de incluir cables de comunicaciones en su interior. Con mayor número de núcleos dentro de un mismo cable se reduce la cantidad de material necesario para su construcción por ende reduce los costos comparado con los cables de núcleo simple, análogamente los cables de núcleo simple poseen mayor ampacidad (Worzyk, 2009). El criterio de selección de cables de transmisión toma en cuenta muchos otros parámetros que no se profundizaran en el presente trabajo debido a que el proyecto contempla el uso de cables submarinos con aislamiento extruido (XLPE) de núcleo simple.

La figura 2.1 muestra el corte transversal de un cable subterráneo de corriente alterna (CA) para alta tensión, donde se puede observar la estructura típica de un cable de transmisión.

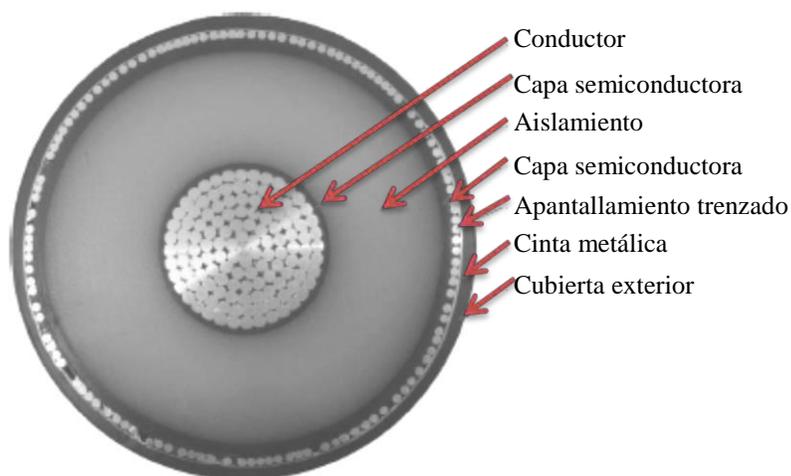


Figura 2.1 Sección transversal del cable de 400kV en el norte de Dinamarca (Gudmundsdottir, 2010).

Los cables de transmisión están estructurados básicamente en cuatro capas de la siguiente manera:

1. Conductor-capa semiconductor.
2. Aislamiento-capa semiconductor
3. Apantallamiento-cinta metálica
4. Cubierta exterior

Adicionalmente el cable puede estar provisto de otras capas especialmente en cables de media tensión (MT), alta tensión (AT) y extra alta tensión (EAT). En lo que compete al presente trabajo el cable esta categorizado en el rango de AT (circuitos trifásicos a 400 kV), por lo tanto a continuación se definen los conceptos de las estructuras (capas) que componen este tipo de cables.

2.1.3. Partes del Cable de Potencia

2.1.3.1. Núcleo:

Según Worzyk el núcleo o conductor del cable es el encargado de llevar la corriente de conducción y puede estar diseñado de diferentes formas, que permiten mejorar características específicas como pueden ser: la ampacidad, resistencia térmica, esfuerzo mecánico, efecto piel, entre otros. Los diseños para AT más utilizados se muestran en la figura 2.2 (Worzyk, 2009).

Las características principales de algunos de los diseños mostrados en la figura 2.2 se describen a continuación (Worzyk, 2009).

Conductor solido: Consiste en un cable conductor masivo. Este diseño es utilizado para secciones transversales hasta alrededor de los 400 mm². Su fabricación es sencilla y posee buena

impermeabilidad longitudinal, importante característica para cables submarinos. En ocasiones el aislamiento extruido tiende a resbalar hacia atrás sobre la superficie lisa del cable cuando es cortado para realizar juntas.

Este tipo de conductores son utilizados para tensiones $> 150 \text{ kV}$ ya que para tensiones más altas la sección transversal necesaria del conductor es mayor a los 400 mm^2 .

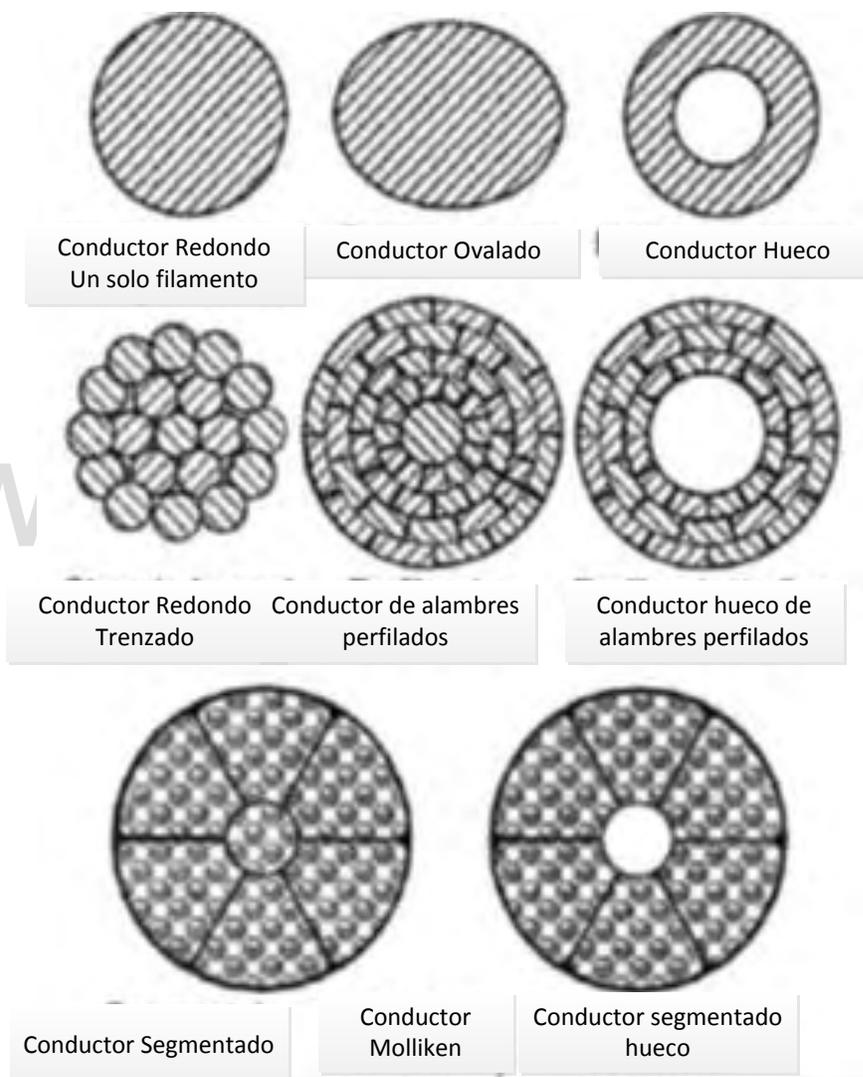


Figura 2.2 Diseño de conductores para cables de alta tensión (Worzyk, 2009).

Conductores redondos de alambres trenzados: Conforman la mayoría de los conductores submarinos. Este tipo de conductores pueden alcanzar un factor de relleno del 92% después de comprimidos. Dado que los cables se trabajan en frío por la compresión, la conductividad del material se ve reducida.

Los conductores pueden ser trenzados en dos direcciones diferentes, “mano derecha o mano izquierda” que también se conoce como “Z-Lay o S-Lay”. A menudo se emplean ambas direcciones alternadamente, pero es posible emplear otras combinaciones para mayor estabilidad del conductor u otras razones de producción. La conductividad no depende de la dirección de enroscado. El cambio en la dirección de enroscado respecto a la capa anterior hace que el conductor se comprima durante el proceso. Si el conductor se expande debido al estrés de enroscado posiblemente infrinja el aislamiento.

Más a menudo este tipo de cables son fabricados bajo estándares IEC 60228, clase 2.

Conductores de hilo perfilado: Estos conductores están formados por secciones transversales de alambre en forma de trozos de pastel, también llamados conductores de cables trapezoidales. En la máquina de trenzado los cables (hilos) se combinan perfectamente en un conductor circular. Grados de relleno de hasta el 96% se logran e incluso un poco más. El estándar IEC 60228 no cubre este tipo de conductores.

Conductores huecos para cables llenos de aceite: Los cables llenos de aceite o llenos de fluido, se rellenan con aceites de baja viscosidad. Estos contienen un ducto central que permite el flujo de aceite mediante expansión térmica y fuentes presurizadoras a cada extremo del cable.

Conductor de Milliken: H. Milliken publicó dos patentes en los años 1930 describiendo el diseño de un conductor con efecto piel reducido, partiendo de saber que el campo magnético alterno de la corriente alterna en un conductor, produce una fuerza electromagnética (fem) que concentra las líneas de flujo de corriente en las partes periféricas del conductor (la piel), lo que implica que la

corriente se compacta en la periferia del conductor. La densidad de corriente en la parte interna del conductor disminuye y se vuelve inútil para el transporte de corriente, por tal razón el efecto piel reduce sustancialmente la ampacidad en los conductores muy largos de corriente alterna. Basado en estas condiciones la fabricación de un conductor de Milliken comienza con sub-conductores estándar trenzados de alambres redondos. Estos sub-conductores son moldeados en forma de trozos de pastel triangulares y luego son pre-torcidos. Finalmente determinado número de sub-conductores son colocados en un conductor circular. Estos conductores son también conocidos como conductores segmentados y pueden o no tener un ducto central o un cable (Worzyk, 2009).

En conductores estándar la distancia de cada alambre al eje del conductor es constante y la fem inducida se concentra a una distancia particular del eje del conductor. Por el contrario en el conductor de Milliken cada alambre individual cambia su posición radial desde cerca del centro hasta lejos del centro, la fem en el centro y en la periferia del conductor poseen signos opuestos y se cancelan en parte, reduciendo considerablemente el efecto piel. A mayor número de sub-conductores (segmentos) mayor será la reducción del efecto piel, normalmente se utilizan de 5 a 6 segmentos.

2.1.3.2. Aislamiento

Según Worzyk, durante más de 150 años han sido investigados y desarrollados una gran cantidad de materiales aislantes para cables submarinos, cuyo objetivo es aislar las capas conductoras de potenciales diferentes. Mayormente no se han obtenido grandes diferencias respecto de los cables subterráneos teniendo como resultado básicamente dos compuestos que son los más implementados.

- a) *Polietileno (PE)*: Hidrocarburo que consiste en largas cadenas de moléculas $CH_3 - (CH_2)_n - CH_3$. Es un termoplástico que teóricamente puede ser refundido.

Para aislamientos eléctricos está disponible en distintas densidades: baja densidad (LDPE), media densidad (MDPE), alta densidad (HDPE); que van desde 0.90 hasta 0.97 g/cm^3 . El PE posee menor factor de disipación y pérdidas dieléctricas que el papel impregnado.

El PE fue reemplazado por el polietileno reticulado (XLPE) debido a la limitada temperatura de conducción que va de 70 a 80°C mientras que el XLPE opera a 90°C y en corto circuito más de 200°C . Sin embargo la tendencia es a reducir las temperaturas de operación de los cables por lo que el PE podría ser implementado nuevamente. La tabla 2.1 muestra las temperaturas máximas en condiciones de operación y contingencia.

b) *Polietileno reticulado (XLPE)*: Implementado en cables submarinos desde 1973 y subterráneos mucho más temprano, está hecho de largas cadenas moleculares reticuladas de LDPE para formar una red tridimensional. El termoplástico PE se ablanda y derrite a temperaturas entre los $80-110^\circ\text{C}$, por el contrario el XLPE es estable a altas temperaturas y en lugar de derretirse este se destruye por pirolisis alrededor de los 300°C .

El XLPE obtuvo muy mala fama al comenzar a aplicarse en cables submarinos pues introdujo una nueva y peligrosa falla denominada “árbol de agua” causada por la combinación del agua, estrés eléctrico e impurezas en el aislamiento que permiten la creación y crecimiento del árbol hasta hacer fallar el aislamiento. Más tarde se mejoraron los procedimientos de reticulación y extrusión mediante ambientes muy secos, extrusión por capas, entre otros; que permitieron mejorar sustancialmente el producto final y desaparecer casi por completo este fenómeno.

Tabla 2.1 *Temperatura de operación de los materiales aislantes en cables (Worzyk, 2009).*

	Temperatura de operación	Temperatura de cortocircuito
LDPE	70° C	125° C
XLPE	90° C	250° C
EPR	90° C	250° C
Papel Masivo (<i>Mass paper</i>)	50°-55° C	
Papel de aceite (<i>Oil Paper</i>)	85°-90° C	

Las propiedades dieléctricas del XLPE no poseen un valor fijo constante. Este valor depende mucho de las condiciones en las que se produce el aislamiento (temperatura, preparación de la muestra, pruebas, y muchos otros). El concepto de resistencia dieléctrica, está basado en la distribución estadística de tensiones de ruptura experimentales en muestras de un diseño de aislamiento dado (Distribución de Weibull).

Influencia del envejecimiento y la humedad en el aislamiento XLPE: El aislamiento se deteriora principalmente por estas dos condiciones y prácticamente son las que determinan vida útil del cable (Worzyk, 2009).

➤ Envejecimiento: Según Worzyk, es el deterioro de las propiedades del material aislante debidas a la temperatura, estrés mecánico o eléctrico, agresión química, o cualquier combinación de estos. Bajo efecto del envejecimiento la resistencia dieléctrica disminuye gradualmente, cuando ha disminuido a un punto tal que se encuentre en el rango del “estrés de operación”, el cable habrá llegado al final de su vida útil. La naturaleza estadística de la resistencia dieléctrica

establece que algunas secciones del cable llegaran primero a la “edad de la pensión” mientras al resto del cable aún le quedan años de operación. Por razones estadísticas se establece también que un cable de mayor longitud enfrenta mayores riesgos de falla que uno de longitud más corta. Se realizan análisis para justificar económicamente el tiempo de vida del cable.

La duración del cable depende de la temperatura y el voltaje. Esto se traduce en la posibilidad de acortar la duración del cable por efecto de altas temperaturas o sobretensiones. Para algunas instalaciones es necesario evaluar riesgos de sobretensiones de larga duración. Existen un par de reglas fundamentales que rigen la duración de los aislamientos hechos de materiales orgánicos:

1) Regla de Montsinger (1930), al incrementar la temperatura de operación de $8-10^{\circ}\text{C}$ se acortara su duración a la mitad. Ejemplo: Un cable de 30 años de duración con 90°C como temperatura nominal del conductor tendrá una vida duplicada operando a $80-82^{\circ}\text{C}$. El valor establecido en esta regla puede variar en distintas aplicaciones de materiales aislantes. Para sistemas de cables con carga variable el envejecimiento acumulativo puede tomar en cuenta el estrés temporal térmico o eléctrico.

2) Al incrementar el voltaje de operación 8-10% se acortara su duración a la mitad (Worzyk, 2009).

➤ Humedad: Es bien conocido que la humedad disminuye la resistencia dieléctrica y la resistencia al envejecimiento. El aislamiento del cable submarino debe estar protegido del agua y la humedad por un diseño factible. Es de hacer notar que los materiales de polímeros están completamente libres de la penetración de agua, pero permiten la difusión de la humedad. Si no es posible bloquear completamente la humedad, la barrera contra el agua debe al menos retardar la difusión/intrusión del agua tal que el nivel de humedad dentro del aislamiento se mantenga dentro de los límites durante la vida económica del cable. De acuerdo con esta estrategia se tiene una capa de polímero para prevenir la intrusión del agua. Las cintas absorbentes tienen la capacidad para absorber toda humedad durante la vida economía del cable (Worzyk, 2009).

2.1.3.3. Cubierta exterior

En se establece que los rasguños pueden deteriorar el efecto anti-corrosivo de las capas de bitumen y zinc. Para evitarlo una cubierta exterior los protege de la carga, colocación y entierro del cable submarino. Los cables submarinos de potencia modernos poseen o una cubierta de polímero extruida, o porciones de capas de hilos enrollados. Los cables de capas de hilos enrollados son diseñados para la penetración de agua salada entre los alambres de la armadura hasta la porción interna de plástico.

Una cubierta exterior extruida provee una apariencia limpia del cable de potencia submarino y más aún un ambiente seco para los alambres de la armadura. Así el sistema de armadura debe ser diseñado para exposición al agua en caso de que la cubierta exterior extruida sea dañada (Worzyk, 2009).

2.1.3.4. Pantalla del conductor y del aislamiento

En (Worzyk, 2009) se explica que si el aislamiento XLPE se extrude directamente sobre el conductor disminuye considerablemente la resistencia dieléctrica debido a las irregularidades del conductor, espacios vacíos entre hilos, entre otros; para eliminarlo se coloca una capa de XLPE semiconductor entre el aislamiento y el conductor que además refuerza su unión ante los esfuerzos mecánicos; análogamente se extrude por encima del aislamiento otra capa semiconductor con los mismos propósitos, este método es llamado el método de triple extrusión.

El XLPE semiconductor esta hecho de co-polimeros a base de PE mezclado con 40% de carbón oscuro. De acuerdo con estándares internacionales la resistividad volumétrica debe ser menor a $250 \Omega m$ (CENELEC) o $500 \Omega m$ (AEIC, IEC). Si esta resistencia del material de las pantallas es demasiado alta, los voltajes de impulso pueden inducir un gran estrés en el material semiconductor y eventualmente causar una ruptura del aislamiento. Este parámetro depende fuertemente de la temperatura y el estrés mecánico entre otros (Worzyk, 2009).

2.1.3.5. Armadura

Definido como el elemento más prominente de la construcción del cable submarino, que provee tanto estabilidad de tensión como protección mecánica. Para cada proyecto de cable submarino la armadura debe ser diseñada con respecto a la estabilidad de tensión, el patrón de amenaza externa y requerimientos de protección para cada sección de la ruta planificada del cable. Los cables submarinos están sometidos a fuerzas de tensión durante la instalación no solo por el peso propio del cable que está colgando, sino también por las fuerzas dinámicas de los movimientos verticales del buque. La fuerza total durante la instalación del cable puede exceder dramáticamente la fuerza estática de un cable que cuelga hasta el lecho marino. La armadura debe además proveer protección mecánica contra la agresión externa esperada de las herramientas utilizadas para la instalación, equipos de pesca y anclas (Worzyk, 2009).

El blindaje del cable submarino esta hecho de hilos metálicos enrollados alrededor del cable con cierta longitud de disposición (también llamado tono). La longitud de la disposición; es decir, la longitud del hilo en el cual el alambre de armadura completa un giro alrededor del cable, esta entre 10 y 30 veces el diámetro del cable debajo de la armadura. Los alambres circulares de blindaje tienen un diámetro de 2-8 mm. El diseño de la armadura tiene una fuerte influencia en las propiedades del cable como lo son la rigidez de flexión, estabilidad de tensión, balance de torsión, y sobre la elección de métodos de manejo e instalación.

En muchos casos el blindaje es hecho de acero dulce, que es un material magnético, concentra el campo magnético alrededor del conductor, y genera pérdidas no deseadas y calentamiento extra en cables submarinos de CA. En cables de un solo núcleo las pérdidas en el blindaje de acero pueden reducir la ampacidad sustancialmente. Algunas estrategias fueron desarrolladas para reducir estas pérdidas:

- 1) Blindajes hechos de materiales no magnéticos como el bronce, latón, cobre o el aluminio. Es importante considerar la resistencia a la tracción de los metales no ferrosos. Aleaciones basadas en cobre son una costosa elección para el blindaje.

Una solución superior pero más costosa es el uso de cables de acero inoxidable para el blindaje. Estos proveen un blindaje no magnético de bajas pérdidas con alta resistencia de tensión y muy buena resistencia a la corrosión.

2) Reducción de la inducción magnética. Los cables CA de núcleo simple pueden ser provistos con una pantalla masiva de cobre, que es firmemente aterrada a ambos lados de las terminaciones del cable. Se genera una corriente en la pantalla casi tan grande como la del conductor. Estas dos corrientes circulan en direcciones opuestas dentro del blindaje y virtualmente cancelan sus campos magnéticos. Las pérdidas magnéticas desaparecen casi por completo pero en su lugar aparecen pérdidas en el cobre. Para alcanzar este objetivo la pantalla de cobre necesita tener una sección transversal similar a la del conductor.

La armadura es aplicada sobre un vendaje o funda que protege las capas más internas del cable (normalmente capas extruidas) de puntos de presión indebidos por parte de los alambres de la armadura. Las fundas normalmente están hechas de cintas de tela que ofrecen cierta cantidad de compresibilidad (Worzyk, 2009).

2.1.3.6. Hermeticidad al agua del conductor

Para prevenir la penetración longitudinal del agua en el cable bien sea por falla, defecto de cubierta exterior o durante la manipulación e instalación del cable; se colocan agentes absorbentes de humedad en forma de polvo, cintas o hilos; entre las capas del cable, que al contacto con el agua se expanden y boquean su paso. Otros materiales bloqueadores son empleados como el Petrojelly (material basado en la vaselina).

2.1.3.7. Revestimiento bloqueador de agua

El aislamiento dieléctrico debe estar protegido contra el ingreso indebido de agua para conservar la resistencia dieléctrica. Muchos cables submarinos de alta tensión tienen un revestimiento metálico para proveer protección contra el ingreso de agua. El aluminio, plomo, cobre y otros metales pueden ser utilizados con este propósito. Los cables de media tensión pueden ser implementados sin revestimientos metálicos o con diseños más simples debido al bajo estrés eléctrico en el aislamiento. Una estrategia es equipar el cable con un agente absorbente de agua bajo un revestimiento de polímero. La capa de polímero sería una barrera para bloquear el agua pero permite una pequeña penetración de humedad en forma de vapor a través de la cubierta. El agente absorbente debe tener la capacidad para mantener el aislamiento completamente seco durante la vida económica restante del cable y más allá (Worzyk, 2009).

Muchos revestimientos metálicos proveen protección ante el Teredo, una familia de “gusanos de barco” muy agresiva (en realidad, son moluscos), que devoran no solamente los barcos piratas hundidos sino también los cables submarinos. Es abundante en aguas salobres. Puede mantenerse a raya con barras de cobre o cintas de latón.

Revestimiento de plomo: Las cubiertas de plomo con buena calidad de fábrica son completamente impermeables ante el ingreso de agua y la difusión de humedad. Para cables submarinos, el plomo añade al cable peso, que en ciertos casos es importante para la estabilidad del cable en el fondo marino.

La cubierta de plomo está sujeta a procesos de fatiga. Vibraciones, repetidos dobleces, y ciclos térmicos pueden resultar en la recristalización de la aleación de plomo. Estos cristales pueden derivar en micro-fracturas y deteriorar la barrera contra el agua de la cubierta de plomo. Ondas inducidas por el recipiente que coloca el cable puede someter al cable que cuelga del recipiente a muchas curvaturas repetidas. Dependiendo de las características de la onda, amplitud, número de

dobleces, y radio de los dobleces, puede causar fatiga prematura en el revestimiento de plomo y eventualmente la cobertura de plomo se puede romper.

Revestimiento de aluminio: Los revestimientos de aluminio vienen en diferentes formas, extruidas, soldadas o laminadas. Sin embargo, fueron aplicadas durante poco tiempo debido a los problemas de corrosión. Hoy en día ya no se utiliza el aluminio extruido para cables submarinos.

Revestimiento de cobre: Los revestimientos de cobre hechos de cintas de cobre soldado y corrugado son eventualmente utilizados para aplicaciones de cables submarinos. El perfil de las ondas corrugadas, puede ser sinusoidal, trapezoidal, u otra forma. Estas formas tienen diferentes propiedades considerando resistencia a la presión interna o externa, y propiedades de curvatura y fatiga. Las cubiertas de cobre son resistentes a la corrosión y, con las dimensiones adecuadas pueden soportar la corriente de cortocircuito. Las propiedades del cobre pueden ser mejoradas utilizando aleaciones con elementos como el berilio.

Revestimientos de polímeros: El revestimiento de polímero tiene diferentes funciones según el lugar en donde se encuentre localizado el cable en la construcción. Una cubierta polimérica usualmente protege la cubierta de plomo subyacente de la corrosión y abrasión. Para este propósito se usan capas de HDPE o LDPE. Ellos proveen una excelente estabilidad química y mecánica a lo largo de la vida del cable por costos moderados. Otros materiales empleados para revestir son el PVC, polyamide (NYLON) y poliuretano.

Pequeños rasguños o incluso pequeños orificios en la cubierta plástica, normalmente no constituyen ningún peligro para la protección a la corrosión, así como el acceso de agua rica en oxígeno es muy limitado.

Los revestimientos de polímero a veces son hechos de materiales semiconductores de PE mezclados con carbón oscuro. Ellos proveen una tensión uniforme entre la cubierta metálica y la armadura exterior.

2.1.3.8. Protección contra la corrosión

El agua salada de mar es un ambiente corrosivo. En mares marginales, islas y áreas costeras el contenido de sal puede variar considerablemente debido a la mezcla con el agua dulce de los ríos, o el grado de evaporación en la zona. La salinidad también varía con las temporadas del año y con la profundidad (Worzyk, 2009).

La corrosión básicamente ocurre cuando el agua salada impacta los alambres de la armadura. Los hilos de la armadura en muchos casos están hechos de acero revestido con zinc. Una capa de zinc de $50 \mu\text{m}$ o más es la principal protección contra la corrosión de los hilos de acero. La protección secundaria se realiza mediante el lavado de la armadura con bitumen caliente durante su construcción. La duración de la protección de bitumen depende mucho de impactos mecánicos sobre el cable. Un papel importante en la corrosión es el acceso libre de agua de mar fresca que contiene oxígeno disuelto. Si el intercambio de agua alrededor del cable es inhibido por el suelo o las capas protectoras, el oxígeno existente cerca del cable no es repuesto y la tasa de corrosión disminuye considerablemente.

Se ha identificado la corrosión eléctrica como un posible fuerte efecto. Esta está asociada a corrientes eléctricas que entran y salen de los alambres de acero al ambiente. Los flujos de marea en combinación con el campo magnético de la tierra son presuntamente los responsables de estas corrientes. También las corrientes pérdidas de rieles de tren cercanos, protección catódica cercana de los sistemas de tuberías, o fuertes operaciones de soldadura se han identificado como fuentes de estas corrientes.

La armadura también puede ser protegida de la corrosión mediante capas poliméricas individuales. Estas evitan el contacto directo con el agua salada, siempre y cuando no sea lavada con abrasión de arena. Este método puede evadir muchos problemas de la cubierta de bitumen. El bitumen es frágil y suele quebrarse cuando se preparan las terminaciones del cable. Entonces, la cubierta de plástico es una mejor solución. Sin embargo una vez dañadas, las fundas individuales podrían provocar un efecto, “la corrosión por picadura” ocurre cuando la corriente localizada entra al alambre.

La armadura se puede construir a partir de muchos metales resistentes a la corrosión. De cualquier manera el aluminio no debe ser utilizado con este fin en agua salada. También el uso de una capa o cubierta exterior alrededor del cable como protector anti corrosivo, es útil siempre y cuando no sea dañada. Los daños localizados en esta cubierta pueden concentrar la corrosión incrementando las corrientes galvánicas.

2.1.4. Características del Cable de Potencia

2.1.4.1. Resistencia del conductor

Según Worzyk, es la propiedad más importante del conductor. La resistencia específica del material conductor es dependiente de la temperatura (Worzyk, 2009):

$$R_{\theta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha(\theta - 20)) \quad (2.1)$$

Donde:

R_{θ} : Resistencia del material a la temperatura θ (°C)

R_{20} : Resistencia del material a la temperatura de 20 °C

α : Coeficiente de temperatura de la resistividad eléctrica

El estándar especifica los valores de resistencia para los conductores incluyendo la influencia de la longitud de disposición de los hilos IEC 60228. En la tabla 2.2 se puede apreciar la resistencia y el coeficiente térmico del cobre y el aluminio.

Los cables de potencia submarinos se solicitan según la sección transversal principalmente, pero en realidad la solicitud está especificando la resistencia deseada por el comprador según el estándar IEC 60228. Raramente los conductores se pueden seleccionar desde los valores estandarizados ya que las necesidades a cubrir son bastante específicas y deben cumplirse desde

que se comienza a fabricar el cable. Por lo tanto la mayoría de los cables suelen ser diseñados a medida.

Tabla 2.2 Resistencia específica y coeficiente de temperatura (Worzyk, 2009).

	Cobre	Aluminio
R_{20} : Resistencia eléctrica específica a 20, °C, $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,01786	0,02874
α : Coeficiente térmico de la resistencia eléctrica específica a 20 °C, 1/K	0,00392	0,0042

2.1.4.2. Pérdidas del conductor

El campo magnético alterno que rodea al conductor produce el efecto piel, causando distribuciones de corriente bajas en el centro del conductor y altas en la periferia. El área útil del conductor es reducida y la resistencia efectiva aumenta. El efecto piel es más pronunciado en conductores con secciones transversales grandes. Mayormente el efecto piel depende de la resistencia eléctrica del material conductor, su diseño y la frecuencia de operación. Estos efectos son tomados en cuenta en el factor de efecto piel y_s representando pérdidas en el conductor y en consecuencia reduciendo su ampacidad. Conductores con diseños específicos pero costosos, pueden reducir el efecto piel considerablemente sobre todo para grandes secciones transversales (Worzyk, 2009).

Otro efecto perjudicial es el factor de proximidad (y_p), que es causada por la proximidad de los conductores en un sistema de transmisión trifásico. Bajo la influencia de conductores vecinos, la corriente tiende a concentrarse en áreas alejadas de la perturbación adyacente. La densidad de corriente en el conductor se vuelve no homogénea, causando que las áreas cercanas a los conductores vecinos sean menos útiles para el transporte de corriente. Este efecto es más pronunciado en conductores muy cercanos entre sí y de gran ampacidad. La resistencia aparente resultante es expresada como:

$$|R = R' \cdot (1 + y_s + y_p) \quad (2.2)$$

R : Resistencia AC del conductor para la máxima temperatura de operación

R' : Resistencia DC del conductor para la máxima temperatura de operación

y_s : Factor de efecto piel

y_p : Factor de proximidad

La resistencia AC R (Ω/m) debe ser utilizada para el cálculo de las pérdidas del conductor. Los factores y_s y y_p dependen del material conductor y su diseño (trenzado, longitud de disposición, segmentado o no), impregnado o no, frecuencia del sistema. Por propósitos prácticos de planeamiento de proyectos, a menudo se conoce que $(1 + y_s + y_p)$ para secciones transversales pequeñas (500 mm^2) normalmente se encuentra por debajo de 1.1, el incremento de la resistencia efectiva por parte de estos efectos es menor al 10%. Dada la incertidumbre de la resistencia térmica del suelo, se pueden considerar despreciables los efectos piel y de proximidad. En los conductores con secciones transversales grandes ($\geq 1200 \text{ mm}^2$), estos efectos pueden causar incrementos de la resistencia AC por más del 30%.

2.1.4.3. Pérdidas dieléctricas

Según Worzyk, el aislamiento del cable es un material dieléctrico que puede ser modelado a través de un capacitor en paralelo con una resistencia, conectados entre el conductor y la pantalla aterrizada. Al aplicar tensión al conductor se generan corrientes resistivas y capacitivas, la resistiva en fase con el voltaje mientras que la capacitiva se adelanta 90° . La corriente resistiva es una pérdida que genera calor en el aislamiento. Ambas corrientes están relacionadas mediante la pérdida angular $\tan \delta$.

$$\tan \delta = \frac{|I_r|}{|I_c|} = \frac{1}{R_i C \omega} \quad (2.3)$$

R_i : Es la resistencia en un metro de aislamiento del cable ($\Omega.m$)

C : Es la capacitancia por metro (F/m)

$\omega = 2\pi f$: Es la frecuencia angular del sistema de potencia

La capacitancia se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{18 \ln \frac{D_i}{d_c}} \quad (2.4)$$

D_i : Es el diámetro del aislamiento

d_c : Es el diámetro de la pantalla del conductor

ϵ_r : Es la constante dieléctrica relativa del material aislante

Ahora las pérdidas dieléctricas en el aislamiento se pueden calcular como:

$$W_d = \omega C U_0^2 \tan \delta \quad (2.5)$$

Las pérdidas dieléctricas incrementan con el cuadrado de la tensión y son relevantes para altos niveles de tensión. Las pérdidas dieléctricas no dependen del arreglo de los conductores en cables de núcleo simple o de tres núcleos, tampoco del diseño del conductor (Worzyk, 2009).

2.1.4.4. Pérdidas en la pantalla/armadura

El campo magnético alterno alrededor del conductor genera corrientes circulantes parasitas en la pantalla metálica y armadura como se muestra en la figura 2.3. Estas corrientes contribuyen a la generación de calor y reducción de la ampacidad. Cuatro tipos diferentes de pérdidas por corrientes inducidas son consideradas de acuerdo con los términos IEC 60287:

Las pérdidas debido a “corrientes circulantes en la pantalla/cubierta” (λ'_1). Estas corrientes circulantes ocurren cuando la pantalla o cubierta es aterrizada a ambos extremos del cable. Las pérdidas dependen de la inductancia, resistencia del material de la pantalla y del arreglo de cada fase respecto a las otras. Las corrientes circulantes pueden alcanzar grandes amplitudes (incluso

la amplitud del conductor principal). La ampacidad se reduce considerablemente. Particularmente los cables submarinos CA de núcleo simple sufren de este tipo de pérdidas.

Las “pérdidas debidas a corrientes parasitas en la pantalla” (λ_1''). El conductor de corriente alterna genera una fuerza electromagnética (fem) sobre la pantalla metálica que genera corrientes parasitas localizadas en ella. La amplitud de las corrientes parasitas depende fuertemente del espesor de la pantalla metálica, también la geometría y la resistencia específica de los materiales involucrados juegan un rol importante.

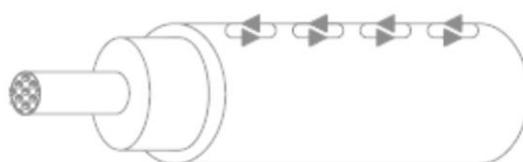


Figura 2.3 Corrientes parasitas o arremolinadas (Worzyk, 2009).

Las “pérdidas debidas a corrientes circulantes en la armadura y tuberías” (λ_2' y λ_2'') de protección metálicas. λ_2' depende en gran medida de la resistencia total de la capa de armadura. También la longitud de disposición y los puntos de contacto entre alambres individuales influyen las pérdidas por corrientes parasitas.

En conductores CA con pantallas o cubiertas metálicas de baja resistencia, poseen por el contrario mayor corriente inducida en dirección opuesta a la corriente del conductor. Los campos magnéticos de la corriente del conductor y de la corriente opuesta de la pantalla se cancelan en parte mutuamente. Por esta razón los efectos magnéticos en las tuberías externas y las armaduras se ven enormemente reducidos.

2.1.4.5. Ampacidad del cable

Para Worzyk, en los cables de núcleo simple, el cálculo de la resistencia térmica puede ser tratado con los métodos del estándar IEC 60287.

Las pérdidas del conductor y el ambiente térmico del cable, son los factores más dominantes en el diseño térmico. Adicionalmente en cables CA, el control de pérdidas en la pantalla o cubierta y en la armadura, es importante para alcanzar gran ampacidad.

2.1.4.6. Factores varios del diseño térmico

En la vida real los cables raras veces son operados con cargas constantes durante largos periodos de tiempo. Teniendo en cuenta, que el diseño térmico de un proyecto de cable submarino dado puede ser reconsiderado. Es importante saber que tan rápido incrementa la temperatura del cable al ser conectado, y luego cuanto tiempo le toma alcanzar su condición de estado estacionario bajo el impacto de carga constante. Tomando en consideración también las variaciones de carga, cargas cíclicas, sobrecargas, entre otros. Se plantean modelos para el análisis de estos factores, sin embargo, no es propósito del presente trabajo profundizar este aspecto por lo que solo se hará mención de estos factores como parte de suma importancia en el criterio de selección de cables submarinos. Los factores son los siguientes (Worzyk, 2009):

- Condiciones transitorias
- Sobrecargas temporales
- Cargas cíclicas o variables
- Resistencia térmica del fondo marino
- Temperatura ambiental
- Condiciones de carga con el tiempo
- El criterio 2 K
- Aspectos económicos del diseño térmico

2.1.4.7. Juntas o uniones de cables submarinos

La fabricación de una junta de cable de potencia submarino requiere de tiempo valioso en el buque, equipo especializado para la construcción y despliegue de la articulación, personal altamente especializado a bordo, y un periodo de tiempo suficiente con condiciones meteorológicas adecuadas (Worzyk, 2009).

Actualmente las juntas representan un porcentaje de falla muy bajo comparado con las fallas que presenta el cable en sí. Ensambladas por personal bien preparado y con el equipamiento adecuado en el buque, las juntas no deben ser vistas como puntos débiles en el trayecto del cable. Aun así se considera necesario reducir el número de juntas en el cable tanto como sea posible.

Existe una gran variedad de juntas para cables submarinos. Todas para cables de uno o más núcleos, a continuación se definen las más utilizadas.

Juntas de fábrica: Las juntas de fábrica conectan las piezas del cable semi-terminadas, antes de colocarle la armadura. La flexibilidad de la junta permite la aplicación de armadura continua por encima de esta.

La fuerza de tensión del cable se ve alterada en la porción adyacente a la junta soldada, el calor de la soldadura recalienta el material adyacente reduciendo la fuerza de tensión al 70% del conductor original.

Una vez unido el conductor, se añade el aislamiento, normalmente con la misma composición del aislamiento del cable. En algunos casos la junta de aislamiento es un poco más grueso que la del resto del cable para evitar el estrés eléctrico.

Las juntas de fábrica también incluyen cubiertas de plomo por encima de la junta aislante. Esta cubierta es aplicada como un tubo ancho de plomo, que se desliza por encima del cable y se ubica a un lado de la junta antes de unir el conductor. Finalmente, una cubierta polimérica protectora encogida es aplicada por encima y el cable está listo para continuar el proceso de

producción como la aplicación de la armadura. Una pequeña diferencia de espesor entre la junta y el resto del cable no representa ningún inconveniente para el proceso de producción.

Juntas de instalación fuera de la costa: La noción de junta de instalación o junta de campo describe una junta o unión completa del cable de potencia submarino incluyendo conductor, sistema de aislamiento, armadura y todas las capas intermedias.

Las juntas de instalación son construidas a bordo del buque, o en tierra firme. Durante la unión del cable al menos una parte del cable está colgando del buque, lo que supone un riesgo en aguas muy agitadas para el equipo y el cable. Una vez iniciado el proceso de unión, solo puede ser interrumpido cortando el cable.

Juntas de instalación flexibles: Las juntas de cable flexibles pueden ser implementadas como una ventaja cuando la ruta del cable es muy larga, ya que se realizan a bordo del buque para empalmar las distintas longitudes de cable.

La junta puede ser un poco más gruesa que el diámetro del cable. Finalmente un atributo especial de estas juntas de instalación es la armadura, que provee alta fuerza de tensión pero flexible.

Para juntas flexibles el uso de armaduras hechas de alambres es necesario para cubrir esta sección. El espacio entre las armaduras de ambos extremos de cable se puede sellar con alambres pre torcidos. Estos alambres son soldados en un lado de la junta, torcidos alrededor y luego conectados a la armadura al otro lado de la junta.

Juntas rígidas: Son completamente diferentes a las juntas flexibles. El nombre denota que la junta posee una cubierta externa rígida, que muy a menudo es hecha en forma de tubería de acero. La tubería de acero sirve como punto de conexión entre los alambres del blindaje de cada extremo de cable y como protección a la junta interna.

La cubierta de acero hace posible el uso de juntas pre fabricadas para cables submarinos. A veces una cubierta más interna de cobre o latón es aplicada para sellar la junta pre fabricada y esta es soldada al revestimiento de plomo para una impermeabilidad completa (Worzyk, 2009).

Diseño de juntas mixtas: Muchas juntas de transición han sido diseñadas para conectar cables submarinos de diferentes tipos. La unión de cables submarinos a veces comprende diferentes tamaños de conductores para preservar las condiciones térmicas a lo largo de la ruta. Las diferencias de tamaño pequeñas pueden ser unidas mediante juntas flexibles. Para diferencias mayores, las juntas rígidas son preferidas debido a que proveen protección contra el estrés mecánico, que puede ser determinante a la transición sensitiva de la pantalla del conductor altamente estresado.

Articulaciones de playa: En ocasiones el cable submarino puede conectarse a líneas de transmisión aéreas o a una subestación directamente al acercarse a tierra, pero en muchos casos la ruta del cable continúa bajo tierra. Una articulación o junta de playa puede ser necesaria para unir el cable submarino con el cable subterráneo por motivos como terminaciones del cable demasiado lejos de la costa, condiciones térmicas que exigen mayor calibre del conductor, entre otros.

2.1.4.8. Terminaciones del cable

El cable submarino al llegar a la costa, normalmente es conectado (empalmado) con un cable subterráneo cerca de la playa. El cable subterráneo continúa hasta la subestación donde es terminado con una terminación estándar para cables. La subestación puede encontrarse a pocos metros o a varios kilómetros de la costa. Las terminaciones de cables no están específicamente diseñadas para cables submarinos (Worzyk, 2009).

Terminaciones terrestres: Las terminaciones terrestres para cables de CA tanto submarinos como subterráneos son idénticas en muchos aspectos. Las terminaciones estándar para cables submarinos están disponibles en varias formas:

- Terminaciones al aire libre, para conectar los cables con líneas aéreas o barras de una subestación. El aislamiento puede ser de porcelana o polimérico. La longitud de fuga entre las pestañas de los aisladores está entre 25 y 40 mm/kV dependiendo de la carga de salinidad y contaminación esperados.

- Terminaciones llenas de gas (GIS), para conectar los cables con aparatajes rellenos de gas. Este tipo de terminaciones es bien conocida para aplicaciones de cables terrestres con altos niveles de tensión. Se encuentran estandarizadas, y se basan en un cono de alivio de tensión en el extremo del aislamiento del cable.

- Terminaciones al transformador, en general son idénticas o muy similares a las terminaciones GIS. De cualquier manera ya se han usado anteriormente para cables submarinos, como parte de la planificación de la subestación para tener cortacircuitos entre el cable submarino y el transformador.

2.2. Modelos matemáticos para líneas de transmisión

Los fenómenos transitorios en las líneas de transmisión representan un campo de estudio bastante amplio e importante debido a los daños que estos pueden ocasionar en el sistema de potencia a pesar de que suelen ser de muy corta duración. La comprensión de estos fenómenos permite aplicar estrategias para poder prevenirlos y evitarlos de ser posible, mediante el estudio de modelos matemáticos de líneas que son suficientemente exactos para un rango de frecuencias específico.

Restrepo, Caicedo y Castro, realizaron un estudio en el que se analizaron modelos de parámetros concentrados constantes, modelos de parámetros distribuidos constantes y modelos de

parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia desarrollados en el dominio modal y en el dominio de la fase. En la figura 2.4 se ilustra la clasificación de los modelos (Restrepo, 2008).

El software EMTP/ATPDraw dispone de los modelos PI, Bergeron, J. Martí, Semlyen y T. Noda. Siguiendo el estudio realizado por Restrepo, Caicedo y Castro, se seleccionó el modelo de J. Martí.

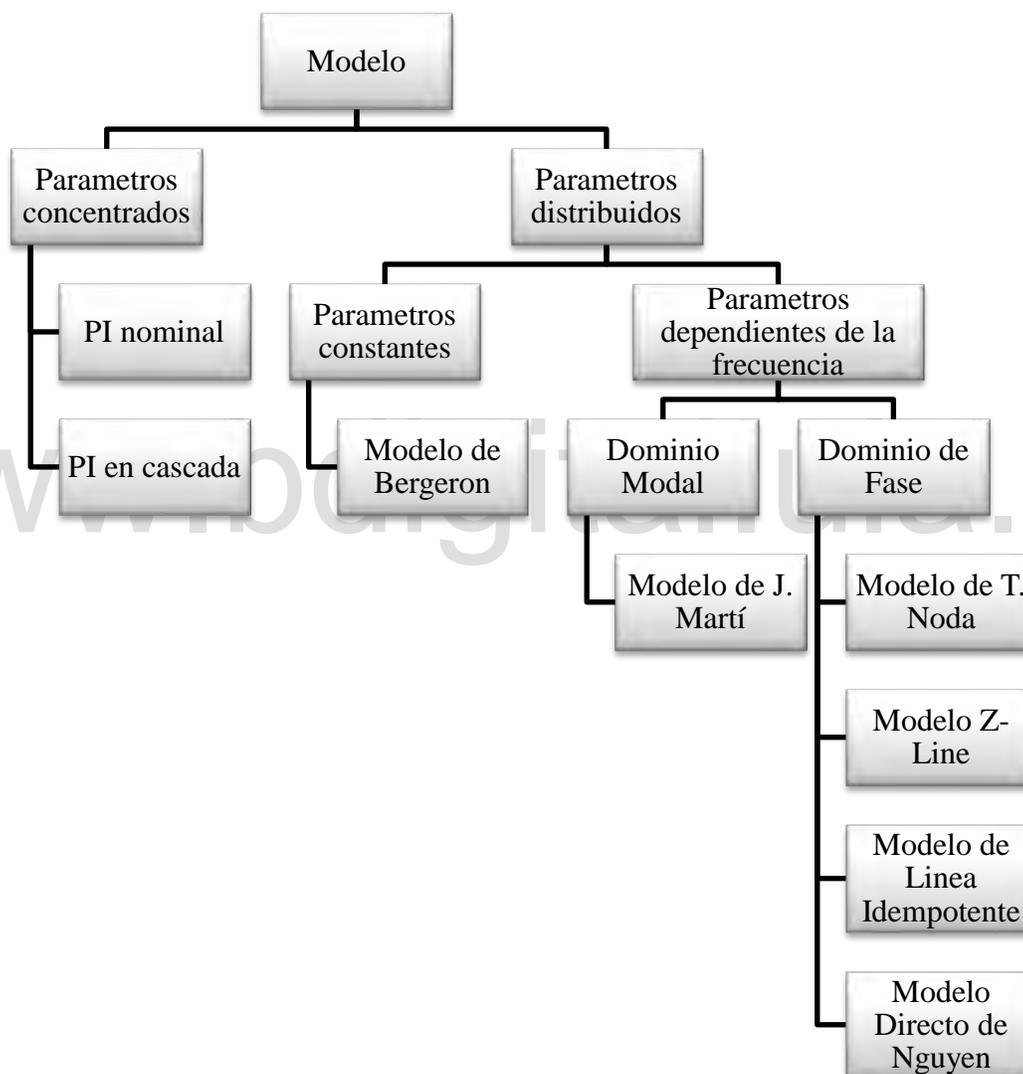


Figura 2.4 Clasificación de los modelos según los parámetros (Restrepo, 2008).

2.2.1. Modelo de J. Martí

Según Restrepo, Caicedo y Castro, la naturaleza distribuida de las pérdidas y a la dependencia de la frecuencia de los parámetros, es más conveniente desarrollar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$V_k(w) = Z_c(w)I_k(w) + E_{mk}(w) \quad (2.6)$$

$$V_m(w) = Z_c(w)I_m(w) + E_{kk}(w) \quad (2.7)$$

Donde

$$E_{mh} = A(w)F_{pk} = [V_k(w) + Z_c(w)I_k(w)]e^{-\gamma(\omega)t} \quad (2.8)$$

$$E_{kh} = A(w)F_{pm} = [V_m(w) + Z_c(w)I_m(w)]e^{-\gamma(\omega)t} \quad (2.9)$$

Son las fuentes historiales de voltaje en los nodos k y m. La impedancia característica Z_c y la constante de propagación γ de las ecuaciones (2.8) y (2.9) se ilustran en las siguientes ecuaciones:

$$Z_c(w) = \sqrt{\frac{R'(w) + jwL'(w)}{G'(w) + jwC'(w)}} \quad (2.10)$$

$$\gamma(w) = \sqrt{(R'(w) + jwL'(w))(G'(w) + jwC'(w))} \quad (2.11)$$

El circuito equivalente de las ecuaciones 2.10 y 2.11 en el dominio de la frecuencia, se ilustra en la figura 2.5.

Transformando las ecuaciones 2.6 y 2.7 al dominio del tiempo, se obtienen las ecuaciones 2.12 y 2.13:

$$v_k = Z_c * i_k(t) + [v_m(t) + Z_c * i_m(t)] * a(t) \quad (2.12)$$

$$v_m = Z_c * i_m(t) + [v_k(t) + Z_c * i_k(t)] * a(t) \quad (2.13)$$

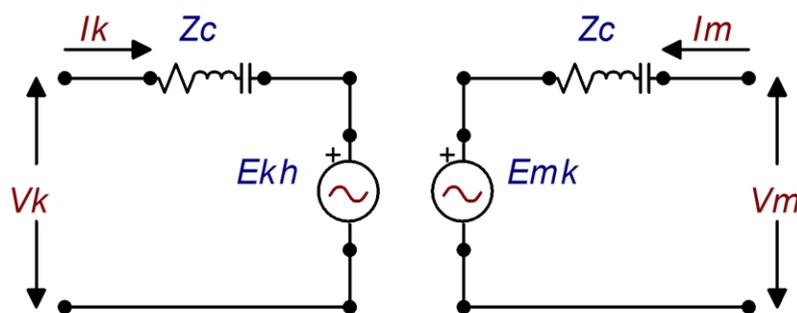


Figura 2.5 Circuito equivalente del modelo de J. Martí en el dominio de la frecuencia (Restrepo, 2008).

En las ecuaciones 2.12 y 2.13 la evaluación numérica de la convolución dada por el símbolo “*” para el cálculo de transitorios, es lenta. Para acelerar este proceso, es necesario sintetizar los elementos involucrados en la convolución, como son la impedancia característica Z_c y la función de propagación A , debido a la naturaleza irracional de γ y Z_c . La síntesis por medio de funciones racionales permite que la evaluación numérica de la convolución se vuelva más rápida, ya que se obtienen exponenciales en el dominio del tiempo, aplicando así las técnicas de convolución recursiva. El método de aproximación utilizado por el autor es el procedimiento de trazado asintótico de bode, donde el principio básico es aproximar la curva dada o la curva original por segmentos de línea recta, los cuales son horizontales o tienen una pendiente de 20dB/década. Los puntos donde la pendiente cambia, definen los polos y los ceros de la función racional. El modelo de J. Martí no es muy exacto para bajas frecuencias y para secciones de línea muy cortas, debido a las imprecisiones presentes para los cálculos en el dominio del tiempo.

2.2.2. Generalidades de modelos de líneas de transmisión

Restrepo, Caicedo y Castro, enunciaron que el modelo PI nominal es exacto solo si la longitud de la línea es pequeña comparada con la longitud de onda (λ) del transitorio, ya que los tiempos de desplazamiento de las ondas electromagnéticas se vuelven despreciables y la línea se puede representar a través de modelos de parámetros concentrados.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.14)$$

Donde

v : Velocidad de propagación de la onda (aprox. La velocidad de la luz: $3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

f : Frecuencia del fenómeno transitorio bajo estudio

La ecuación 2.14 define la longitud de onda. Al ser inversamente proporcional a la frecuencia es de notar que las bajas frecuencias producirán λ muy grandes y por el contrario, altas frecuencias λ muy cortas. En consecuencia en bajas frecuencias una onda que sale desde el nodo m aparece instantáneamente en el nodo k . En estos casos modelos de parámetros concentrados son bastante exactos.

Por otra parte para operaciones de altas frecuencias λ es muy corta con respecto a la longitud de la línea, generando un retardo en el tiempo de desplazamiento de la onda. En estos casos los modelos basados en ondas viajeras son mucho más exactos. Restrepo L., Caicedo G., Castro F., clasifican los modelos de línea según la frecuencia de los transitorios como se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Clasificación general de los modelos de línea (Restrepo, 2008).

Rango de frecuencia	0,1 Hz – 3kHz	50 Hz – 20 kHz	10 kHz – 3 MHz
Fenómeno	Sobrevoltajes temporales	Sobrevoltajes por maniobras	Sobrevoltajes por descargas atmosféricas
Modelo	Modelos basados en circuitos PI	Modelos de ondas viajeras	Modelos de ondas viajeras

2.2.3. Comparación de los modelos

Para comparar los modelos Restrepo L., Caicedo G., Castro F., indicaron que se deben tomar en cuenta cuatro índices muy importantes que son: la exactitud del modelo, el tiempo de respuesta computacional, la capacidad del modelo de simular líneas con alta asimetría y su complejidad. Estableciendo como modelo estándar el desarrollado por J. Martí por ser computacionalmente más lento y más exacto que el de Bergeron a la vez que es computacionalmente más rápido y menos exacto que los modelos en el dominio de la fase (Restrepo, 2008).

En este sentido a continuación se propone la tabla 2.4, donde se comparan cualitativamente los modelos de interés respecto al modelo de J. Martí.

Tabla 2.4 Comparación cualitativa de los modelos de línea (Restrepo, 2008).

Modelo	Índices de evaluación			
	Exactitud del modelo		Tiempo de respuesta computacional	
	SM	SD	SM	SD
Circuitos PI nominales en cascada	-E	-E	Lento	Lento
Bergeron	-E	-E	10 al 30% mas rápido	10 al 30% mas rápido
Taku Noda	+E	+E	Lento	Lento

Donde

SM: Sobrevoltajes por maniobras

SD: Sobrevoltajes por descargas

+E/-E: Más/Menos Exacto

Finalmente, los resultados de todos estos análisis cualitativos contienen suficiente información para seleccionar el modelo a utilizar de forma adecuada según los fenómenos que se desean estudiar. El modelo de J. Martí fue el punto de comparación para establecer ventajas y desventajas, y caracterizar los otros modelos.

Cabe destacar que el grado de complejidad de un modelo es directamente proporcional a la exactitud e inversamente proporcional al tiempo de cómputo.

Hoy en día existen muchos modelos para fenómenos transitorios; sin embargo, no existe un acuerdo sobre cuál es el más adecuado. Restrepo, Caicedo y Castro, concluyeron realizando un diagrama de decisiones que permite seleccionar el modelo adecuado según el sistema.

En la figura 2.6 se muestra un diagrama de flujo según las necesidades del sistema a modelar

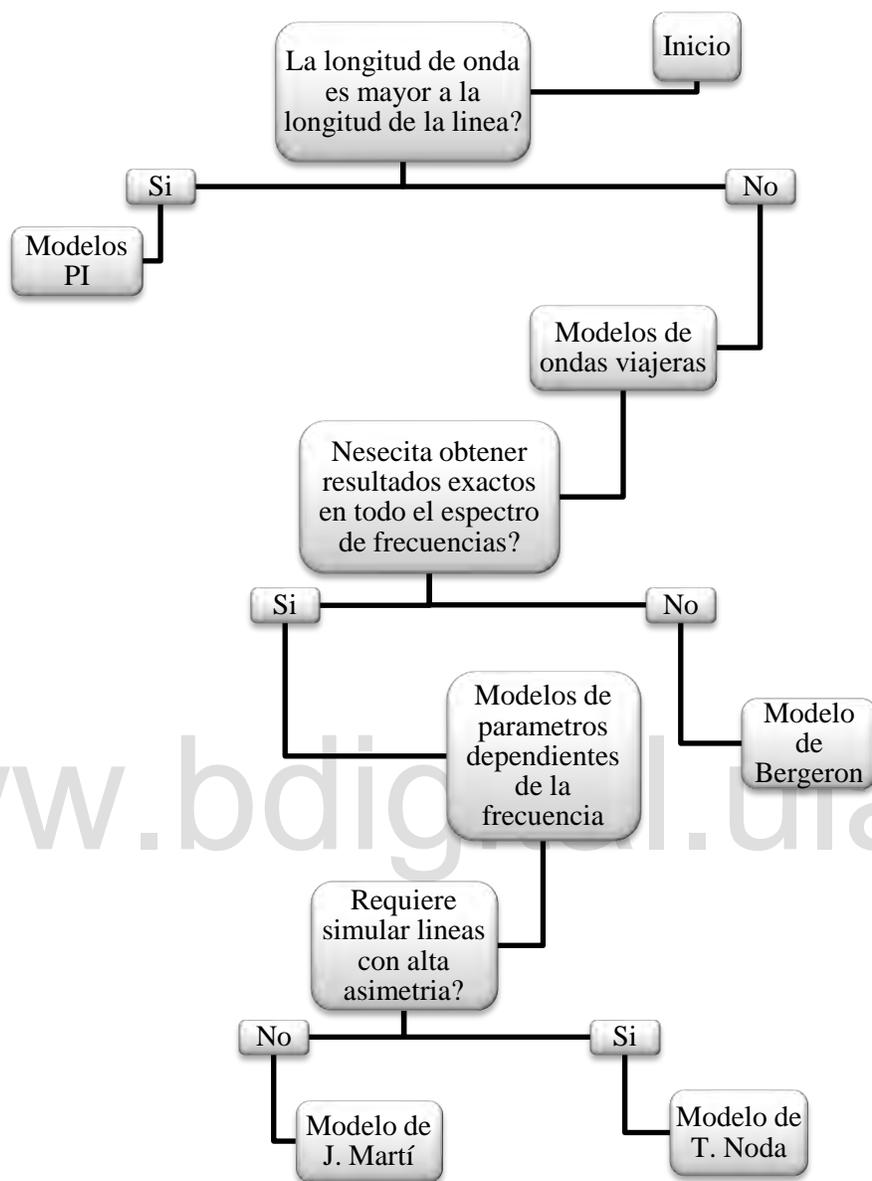


Figura 2.6 Diagrama de flujo para la selección de los modelos de línea apropiados (Restrepo, 2008).

2.3 Programa de transitorios electromagnéticos ATPDraw

Las líneas de transmisión actualmente se estudian a través mediciones de campo y simulaciones de modelos matemáticos, que idealmente se deben realizar en conjunto para certificar los resultados obtenidos del modelo. La resolución de los modelos se suele realizar mediante programas, debido a la complejidad de las redes eléctricas de potencia y los cálculos necesarios para definirlos. Por lo tanto, es importante definir el modelo a utilizar, caracterizarlo según el tipo de parámetros que utiliza y modelar el resto de los elementos que conforman el sistema de potencia.

2.3.1 EMTP/ATP (Alternative Transients Program)

El EMTP/ATP para Ramírez, es un programa ejecutable escrito en lenguaje de programación FORTRAN empleado para la simulación de sistemas eléctricos enfocados en los transitorios electromagnéticos y electromecánicos en sistemas polifásicos. Con el paso de los años se han desarrollado herramientas adicionales que expanden los resultados obtenidos y facilitan la interfaz con el usuario, las herramientas más comunes utilizadas son las siguientes (Ramírez, 2016):

ATPDraw: Es una herramienta que permite ingresar los sistemas eléctricos mediante símbolos de manera que se puede apreciar el circuito gráficamente, su configuración y los elementos que lo componen en una ventana de interfaz gráfica.

PLOTXY/PLOTXWIN: Básicamente forman parte de una misma herramienta que es controlada por el mouse. Se encarga de extraer los resultados generados por el ATP y graficarlos según la

configuración pre-establecida, ofrece además la posibilidad de trabajar sobre los gráficos con un conjunto de herramientas aplicables a este.

GTPPlot: Es una herramienta alternativa al PLOTXY, con la diferencia de que se maneja a través de comandos de símbolo del sistema según una sintaxis creada para este, por esta razón es menos popular que el PLOTXY pero GTPPlot posee una mayor gama de representaciones gráficas como fasores, Fourier, barridos de frecuencia, entre muchos otros disponibles pero que únicamente se manejan a través de comandos.

Existen otras herramientas disponibles para usar junto con el ATPDraw pero que son menos usadas porque no ofrecen aportes sustanciales al análisis de los resultados.

2.3.2 Tipos de análisis

Prikler y Høidalen, explicaron cuales análisis y como se pueden realizar.

Análisis transitorio:

- Maniobras, Impactos de descargas eléctricas
- Calculo de régimen permanente de sistemas no lineales

Solución en el dominio del tiempo:

- Regla trapezoidal de integración
- Simulación de no linealidades por medio de representación a pedazos

Análisis en frecuencia:

- Variación de impedancias. (*Escaneo de frecuencias*)
- Propagación de armónicos. (*Escaneo de frecuencias armónicas*)

Solución en el dominio de la frecuencia:

- Solución de ecuaciones nodales. (Z fasor)

Análisis de sensibilidad:

- *Calculadora de parámetros de bolsillo*

Análisis estadístico:

- Densidad de la probabilidad de sobretensiones producidas por maniobras
- Método de Monte Carlo para tiempos de cierre y apertura

Entre otros. (Høidalen, 2009).

2.3.3 Transitorios Electromagnéticos en el ATPDraw

El análisis de transitorios presente en el ATP es un modelo que emula el comportamiento de este fenómeno en la realidad. Los transitorios electromagnéticos están ligados a los transitorios electromecánicos, donde cada uno de ellos representa:

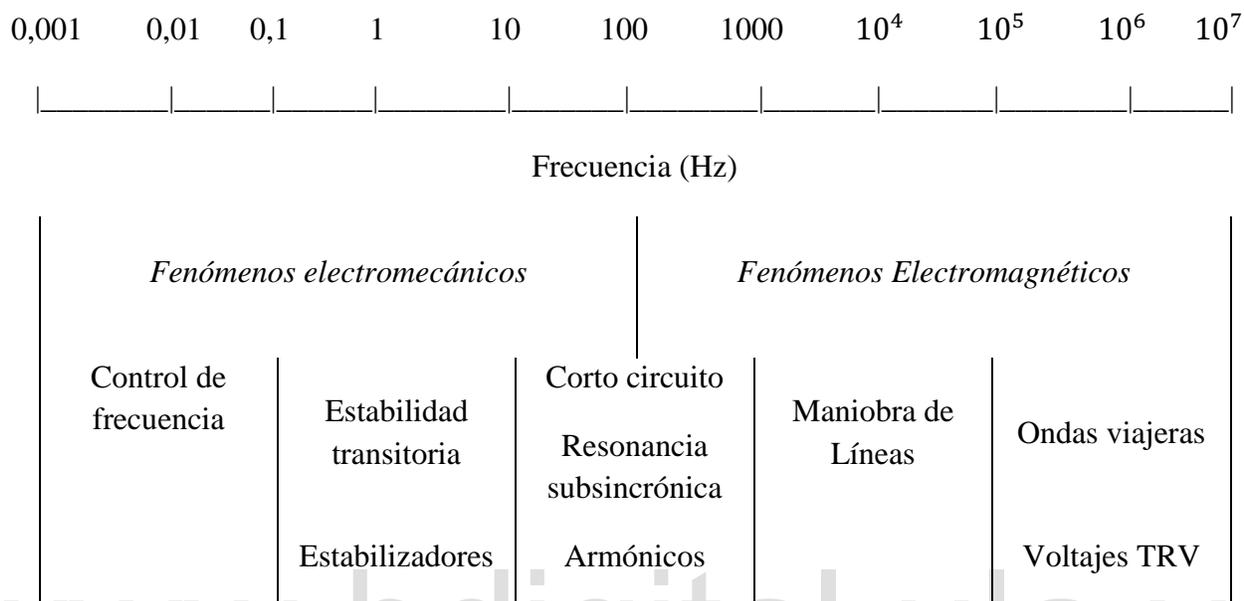
- Transitorios Electromagnéticos: Son los que resultan de la interacción de las energías almacenadas en los capacitores e inductores.

- Transitorios Electromecánicos: Resultan de la interacción de la energía mecánica almacenada en las partes móviles de máquinas y la energía almacenada en los circuitos. En la tabla 2.5 se muestran los rangos de frecuencia para ambos tipos de transitorios.

Estos dos fenómenos están ligados y no se pueden separar en la vida real, sin embargo, los transitorios electromagnéticos ocurren a una velocidad superior permitiendo así que a nivel de simulación se puedan considerar constantes las variables electromecánicas durante aproximadamente el primer segundo de simulación.

Como tal en el EMTP/ATP se simulan solo unos cientos de milisegundos, lo que permite conservar constantes las variables de tensión, frecuencia y fase de generadores y motores.

Tabla 2.5 Rangos de frecuencia para fenómenos electromagnéticos y electromecánicos
(Protecciones Eléctricas, 2017)



Los transitorios electromagnéticos por las frecuencias que manejan se circunscriben a una zona particular del sistema. Para representarlos en el ATP se seleccionan explícitamente el/los elemento(s) afectado(s) por el transitorio (líneas, barras, transformadores, etc.) y lo que se encuentre conectado en su entorno. El resto del sistema es representado como un equivalente de Thevenin.

2.3.4 Elementos y fenómenos a simular en el ATPDraw

- Cálculo de parámetros de líneas para frecuencias superiores a 60 Hz
- Ondas viajeras en líneas o cables
- Inducciones en circuitos o elementos paralelos
- Impacto de descargas atmosféricas
- Fenómenos con limitadores de sobre-tensión

- Fenómenos de saturación de reactores o transformadores, ferro resonancias
- Simulación detallada de electrónica de potencia

El ATPDraw solo devuelve como respuesta señales de características eléctricas como tensión, corriente, potencias; no calcula campos eléctricos, magnéticos o radios de interferencia.

Para la simulación de transitorios electromagnéticos en redes polifásicas se debe ingresar adecuadamente la configuración de la red, esto es posible ya que el ATPDraw formula matrices de admitancias de barras. El proceso de simulación se realiza mediante la “la escritura interna” y la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que representan al sistema, empleando el método trapezoidal de integración; este método de integración es único y se debe realizar el ajuste del paso de tiempo según el estudio a realizar.

La solución arroja los valores instantáneos de las variables preseleccionadas, obtenidas en intervalos de integración de Δt segundos y plasmadas en dos archivos: Un listado de extensión “.LIS” y un gráfico de extensión “.PI4”. Los resultados son valores instantáneos (no RMS) cuya referencia es fase-tierra. (Protecciones Eléctricas, 2017).

2.3.5 Configuración de la simulación

A continuación se resume en diferentes figuras los parámetros de configuración necesarios para modelar y simular un sistema eléctrico de transmisión. En la figura 2.7 se muestran los ajustes principales del ATP.

Para modelar cables y líneas de transmisión se emplea una subrutina del ATP llamada “LCC” que es un componente donde se procesan aparte los datos del cable o línea que luego serán usados en la rutina principal del ATP para emular los efectos que produce con el resto de los componentes en el circuito. En la figura 2.8 se muestra la sección “Modelo del cable” de la subrutina LCC.

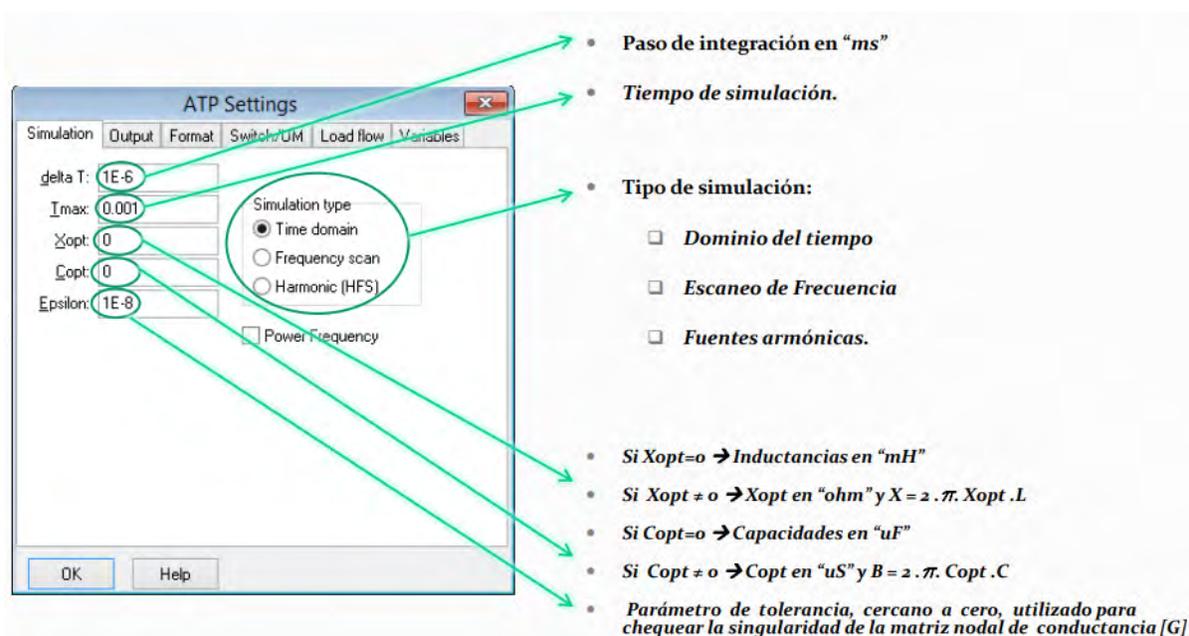


Figura 2.7 Ajustes generales del ATP.

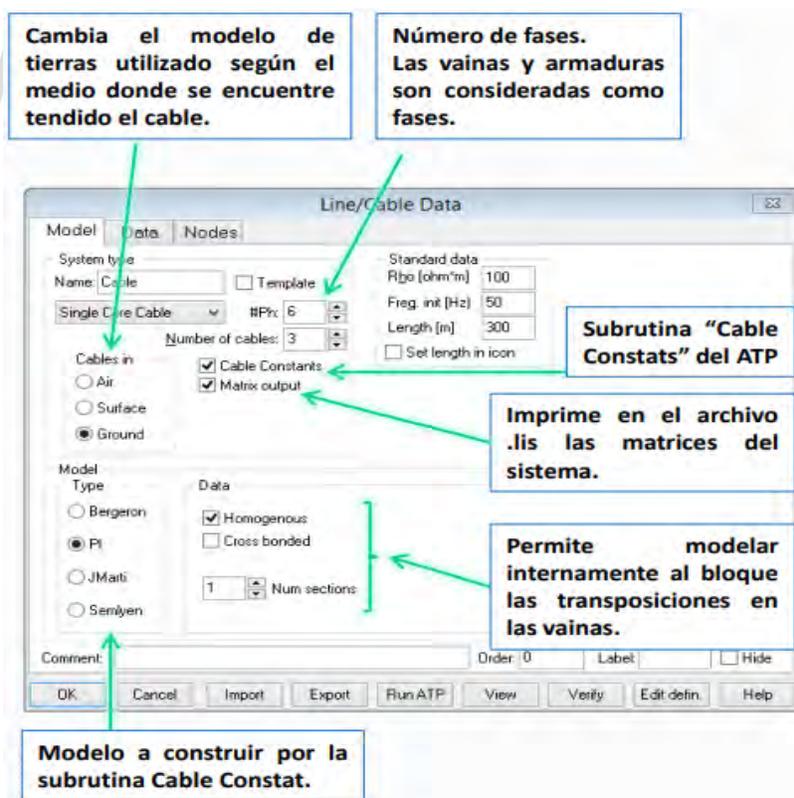


Figura 2.8 Modelo del cable.

En la figura 2.9 se muestra la sección “Datos del cable” de la subrutina LCC.

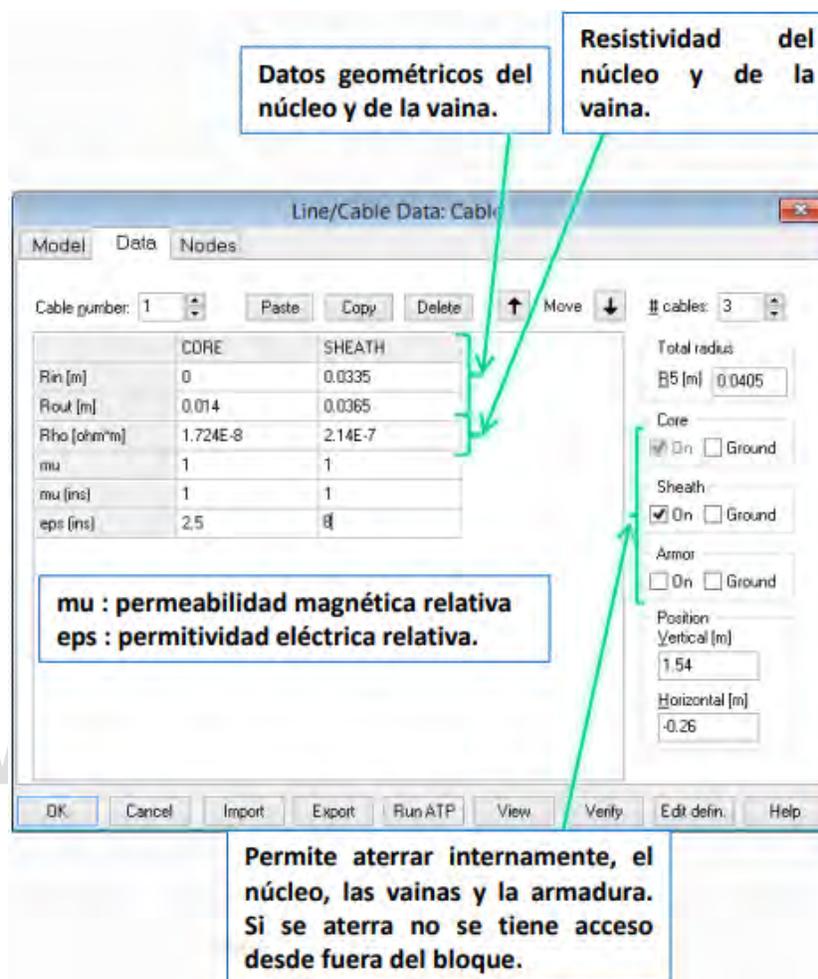


Figura 2.9 Datos del cable.

En la figura 2.10 se muestra la sección “Nodos del cable” de la subrutina LCC.

Todos estos ajustes y elementos conforman las configuraciones básicas del modelo a implementar. Otros elementos son utilizados como por ejemplo transformadores y fuentes, pero solo se modifican algunos valores como amplitud, frecuencia o incluso algunos valores que vienen por defecto.

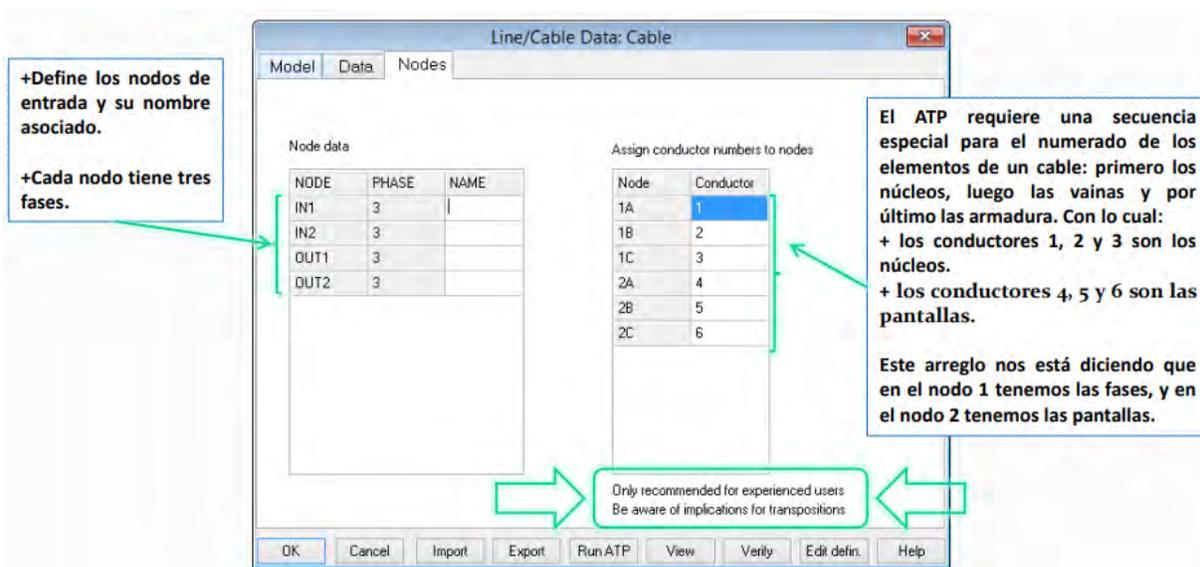


Figura 2.10 *Nodos del cable.*

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Consideración General

El presente trabajo se desarrolla básicamente en un ámbito de exploración de contenidos relacionados a cables submarinos y su modelaje. La metodología de desarrollo empleada en estos casos es la validación de modelos y resultados, e implica tomar un caso estudiado e implementarlo bajo condiciones equivalentes o similares a fin de comparar los resultados obtenidos.

El sistema de potencia bajo estudio está condicionado al uso de cables submarinos de transmisión. Como se indicó en el capítulo II, la documentación al respecto es bastante limitada o poco accesible y más aún para el perfil de tensión que maneja el sistema bajo estudio. En este caso, se recurre a evaluar otros estudios para definir el grado de semejanza y establecer si puede ser utilizado como caso de validación.

3.2 Evaluación de alternativas:

De la investigación que se realizó, se obtuvieron diferentes trabajos a nivel de tesis de maestría y doctorales referentes al modelaje de cables de transmisión y transitorios electromagnéticos. Los trabajos con mayores semejanzas fueron los realizados por Faría Da Silva, Bak Claus y Gudmundsdottir Unnur. En los trabajos realizados por Faría Da Silva y Bak Claus los datos y descripción del proyecto no están lo suficientemente explícitos como para reproducir el modelo en el ATPDraw, por otro lado Gudmundsdottir describe con más detalle el sistema bajo estudio, los parámetros y el proceso empleados para el modelaje.

Gudmundsdottir U. realizó el “Modelado de largos cables de CA de alto voltaje en sistemas de transmisión”. En él se expone el procedimiento de modelaje basado en cables subterráneos con pantallas traspuestas y aterrizadas cada cierta distancia en un sistema de potencia de 400 kV y 7625 m de longitud. A pesar de ser un estudio sobre cables subterráneos, es considerado para validar debido a las semejanzas tanto en longitud, tecnología del cable (XLPE), tensión nominal, número de fases, entre otros. A continuación se describen en forma resumida los parámetros empleados para reproducir el modelaje en ATPDraw.

3.3 Datos obtenidos

Los datos necesarios están clasificados en: disposición del sistema de cables a 400 kV , características del cable, circuito eléctrico instalado para realizar las medidas y ajustes de parámetros para la simulación.

3.3.1 Disposición del sistema de cables subterráneos

El sistema de cables subterráneos consta de dos circuitos trifásicos a 400 kV en seis cables de núcleo simple con aislamiento XLPE dispuesto en segmentos de aproximadamente 11% de la longitud total del cable. Consta de dos “secciones mayores” definidas entre el aterrizaje de las pantallas metálicas y seis “secciones menores” definidas entre las trasposiciones de las pantallas, dispuestas en nueve segmentos. Para un mejor entendimiento, a continuación se muestran las figuras que describen la disposición del cable.

El esquema mostrado en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 fue utilizado para la validación de modelos a través de fenómenos transitorios de alta frecuencia. Para cumplir este objetivo de acuerdo al IEC 60071-2 se puede utilizar una fuente de impulsos de $1.2 \times 50\ \mu\text{s}$ para simular sobretensiones por descargas atmosféricas.

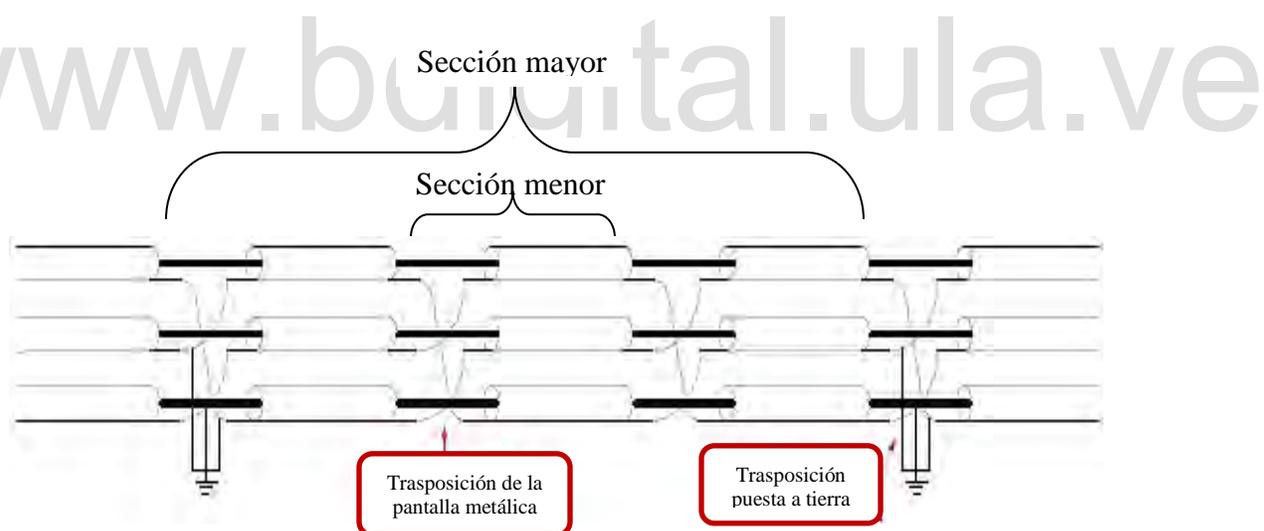


Figura 3.1 “Secciones mayores” (aterrizaje de las pantallas) y “Secciones menores” (trasposición de las pantallas) (Gudmundsdottir, 2010).

Para asegurar tensiones y corrientes apreciables, la amplitud del impulso será de 5 kV y los extremos de las fases serán conectados a resistencias en lugar de mantenerlas abiertas. Las pantallas están conectadas a tierra.

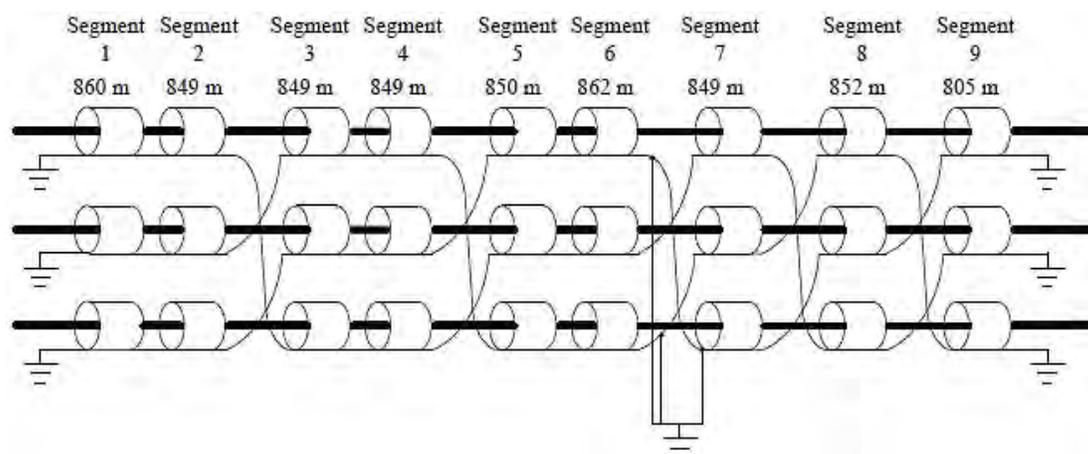


Figura 3.2 Segmentos de cable y sus longitudes a lo largo de la disposición total del cable (Gudmundsdottir, 2010).

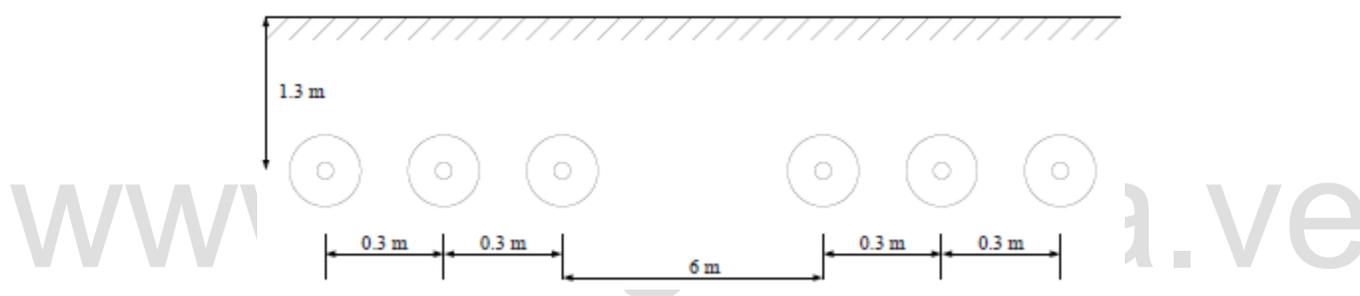


Figura 3.3 Profundidad bajo tierra, separación de las fases y los circuitos del sistema de cables a 400 kV (Gudmundsdottir, 2010).

3.3.2 Datos del cable

Gudmundsdottir plasmó los datos del cable de tres maneras diferentes: Una a través de la hoja de datos aportada por el fabricante, otra a partir del muestreo y medición realizado por el fabricante sobre el cable, y por último un muestreo y medición realizado por el autor del trabajo sobre una porción de cable.

Se utilizaron los datos de fábrica por ser más confiables que los muestreos realizados en secciones de cable.

El tipo de conductor utilizado por fase es extruido de polietileno reticulado (XLPE), con alma conductora trenzada y apantallamiento metálico. La tensión nominal del cable es 400 kV a 50 Hz. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los datos:

Tabla 3.1 *Parámetros del sistema de cables a 400 kV (Gudmundsdottir, 2010).*

Interface del cable	
Parámetros de entrada	Valores instalados
Numero de cables	3
Conexiones eléctricas del cable	Conductor y Apantallamiento

Tabla 3.2 *Datos del sistema de cables a 400 kV (Gudmundsdottir, 2010).*

Configuración del cable – Datos constantes del cable coaxial	
Profundidad de instalación	1.3 m
Separación entre faces	0.3 m
Configuración del cable	C1-I1-C2-I2 *
Radio interno de C1	0 m
Radio externo de C1	21.6 mm
Resistividad de C1	$3.4567 \cdot 10^{-8} \Omega m$
Permeabilidad relativa de C1	1
Radio externo de I1	51.02 mm
Permitividad relativa de I1	2.7588
Permeabilidad relativa de I1	1.0385
Radio externo de C2	53.41 mm
Resistividad de C2	$5.66 \cdot 10^{-8} \Omega m$
Permeabilidad relativa de C2	1
Radio externo de I2	57.71 mm
Permitividad relativa de I2	2.5
Permeabilidad relativa de I2	1

Las casillas marcadas con un * están definidas bajo la siguiente nomenclatura:

C1: Conductor # 1 (conductor principal del cable)

I1: Aislamiento # 1 (Aislamiento más capa semiconductor entre el conductor principal y el apantallamiento metálico)

C2: Conductor # 2 (Apantallamiento metálico más cinta metálica)

I2: Aislamiento #2 (Aislamiento más capa semiconductor entre el apantallamiento y el radio total del cable)

3.3.3 Parámetros de la simulación

La configuración necesaria del programa está dada según los requerimientos del estudio realizado por Gudmundsdottir en el sistema de cables a 400 kV. Se tomó en consideración que las simulaciones realizadas por Gudmundsdottir corresponden al software PSCAD, por lo tanto se tienen parámetros de configuración que coinciden con los del ATPDraw y otros que no coinciden. En la tabla 3.3 se muestran los parámetros de configuración que coinciden con la configuración del ATPDraw.

Tabla 3.3 Parámetros de configuración para el modelo del cable (Gudmundsdottir, 2010).

Configuración del cable –Opciones de FDPM	
Parámetros de entrada	Valores instalados
Frecuencia de estado estacionario	50 Hz
Límite de baja frecuencia	0.5 Hz
Límite de alta frecuencia	1 MHz
Número total de incrementos de frecuencia	100
Resistividad a tierra	150 Ω m

El ATPDraw utiliza además otros parámetros correspondientes al modelo de J. Martí y a los pasos de tiempo de integración y simulación que serán descritos a continuación.

En la figura 3.4 se observa el tiempo máximo de la simulación en segundos (Tmax) y el tiempo de paso también en segundos (delta T). Este último es calculado según la recomendación generalmente empleada en programas de simulación de transitorios electromagnéticos, como establece Gudmundsdottir, que debe ser por lo menos la décima parte del tiempo de cambio más rápido en las señales presentes, y vendría siendo el “frente de onda” de la señal de impulso de $1.2 \mu\text{s}$. El tiempo de paso debe ser por lo menos $1.2/10=0.12 \mu\text{s}$.

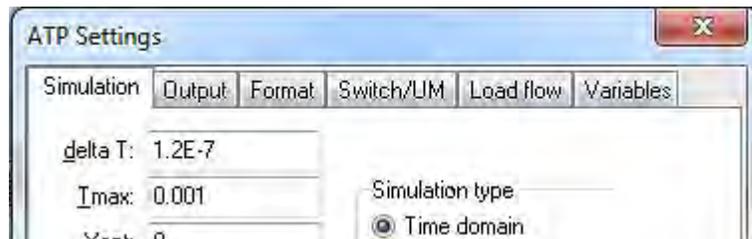


Figura 3.4 Ajustes generales de la simulación.

Más adelante se explica detalladamente los parámetros utilizados para la fuente de impulso y las conexiones empleadas en el sistema de cables.

Los datos empleados en el modelo de J. Martí se ajustaron según el caso bajo estudio, algunos parámetros se conservaron por defecto. En la figura 3.5 se muestran los ajustes del modelo:

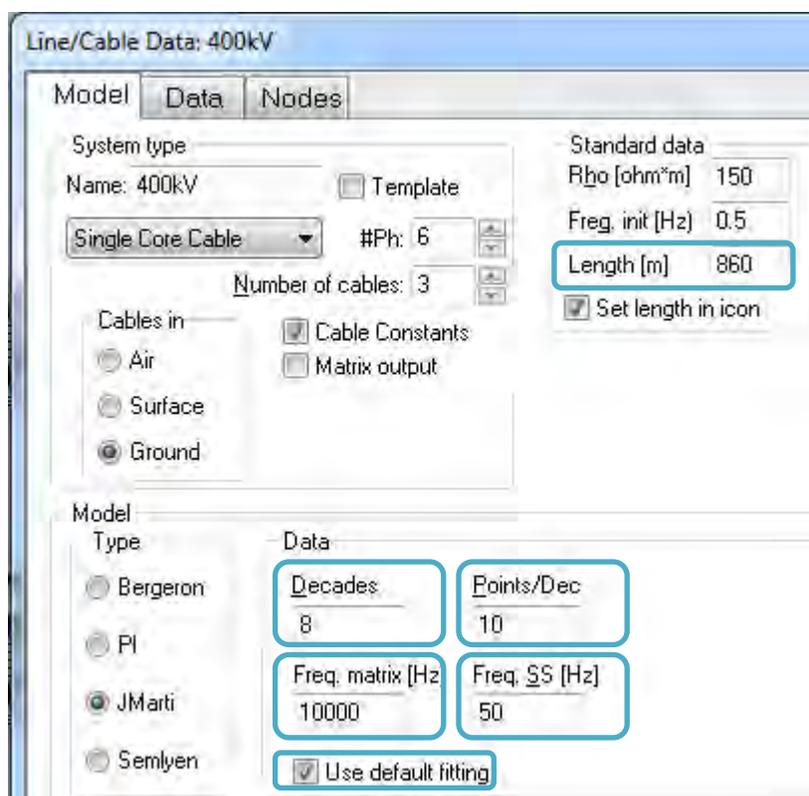


Figura 3.5 Ajuste de parámetros para el modelo de J. Martí.

- Longitud (Length {m}): Es la longitud del segmento de cable. En este caso varía según el segmento.
- Décadas (Decades) y puntos por década (Points/Dec): Establecen el valor final del rango de frecuencias del modelo según el valor inicial “Freq init {Hz}” y el número de puntos evaluados por cada década respectivamente.
- Frecuencia de la matriz (Freq. Matrix{Hz}): Parámetro usado para calcular la matriz de transformación. Este valor debe seleccionarse de acuerdo con el componente de frecuencia dominante del estudio transitorio.
- Frecuencia de estado estacionario (Freq. SS {Hz}): Este valor es utilizado para calcular la condición de estado estacionario.
- Usar ajustes predeterminados (Use default fitting): Ajustes avanzados del modelo, permite utilizar valores predeterminados.

3.3.4 Circuito eléctrico empleado para mediciones de campo

El sistema de cables a 400 kV forma parte de un sistema de potencia del cual se tuvo que desconectar y acondicionar adecuadamente para poder realizar las mediciones de campo como se explica Gudmundsdottir. Obviamente el acondicionamiento modificó el circuito, otorgándole algunas características extras a considerar en la simulación. En la figura 3.6 se pueden apreciar los cambios introducidos.

Los cambios más relevantes corresponden a la introducción de una fuente de impulsos y las cargas de $500\ \Omega$. Como establece Gudmundsdottir la fuente de impulsos corresponde al estándar internacional de la IEC60071-2 para la validación de modelos de transitorios electromagnéticos de alta frecuencia. Las cargas de $500\ \Omega$ se emplearon para asegurar tensiones y corrientes apreciables en las otras fases en lugar de conservarlas abiertas.

Por otro lado el apantallamiento está conectado a tierra a través de conductores de cobre de aproximadamente 1 m de longitud y con una inductancia estimada en $1\ \mu\text{H}$ por metro. En la sección media donde el apantallamiento traspuesto es conectado a tierra, la distancia entre la pantalla y la caja de conexiones a cada lado del cable es de 10 m .

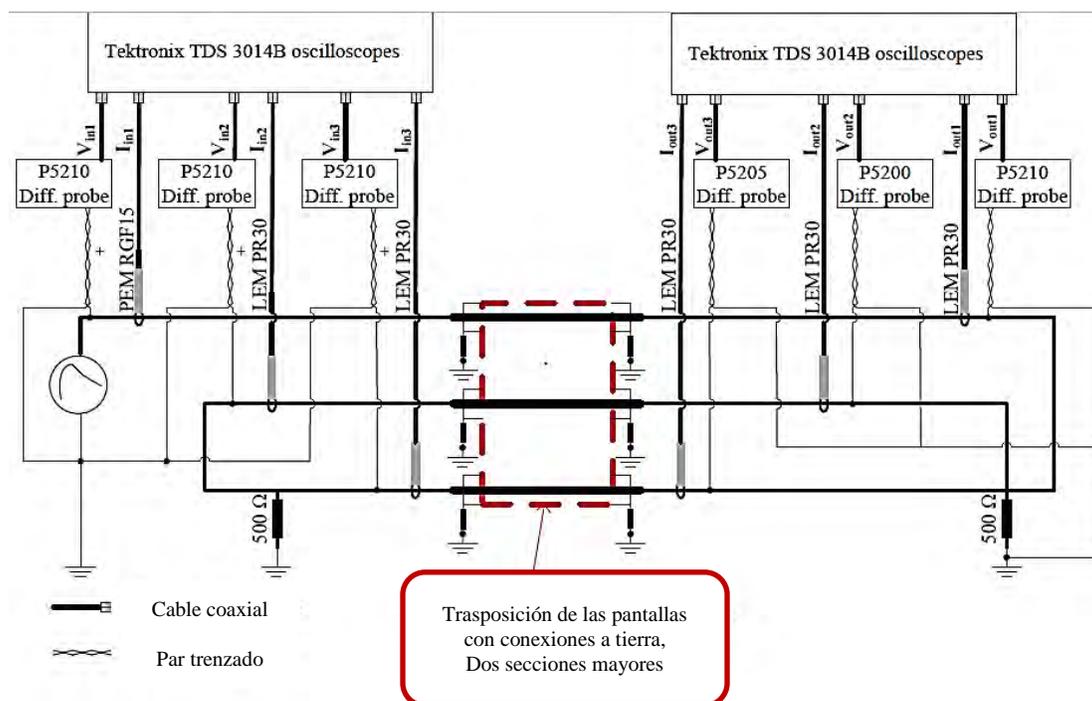


Figura 3.6 Acondicionamiento del sistema de cables para pruebas y mediciones de campo (Gudmundsdottir, 2010).

3.4 Modelaje del sistema de cables a 400kV en ATPDraw

Con la información expuesta en los apartados anteriores, se realizó la configuración correspondiente en el ATPDraw. Algunos parámetros se probaron para evitar conflictos que impidan al programa culminar la simulación o generen respuestas erróneas.

La siguiente figura muestra el esquema del sistema de cables conectado a una fuente de impulsos de tipo HEIDLER en una de las fases laterales de la formación mostrada en la figura 3.7, y los elementos de puesta a tierra, trasposición e inductancia.

Cada componente LCC contiene la información sobre las características del cable y su configuración en la instalación. En las figuras 3.8 y 3.9 se muestra la opción “View” que permite ver las capas del cable configurado y su ubicación respecto a las demás fases en el terreno.

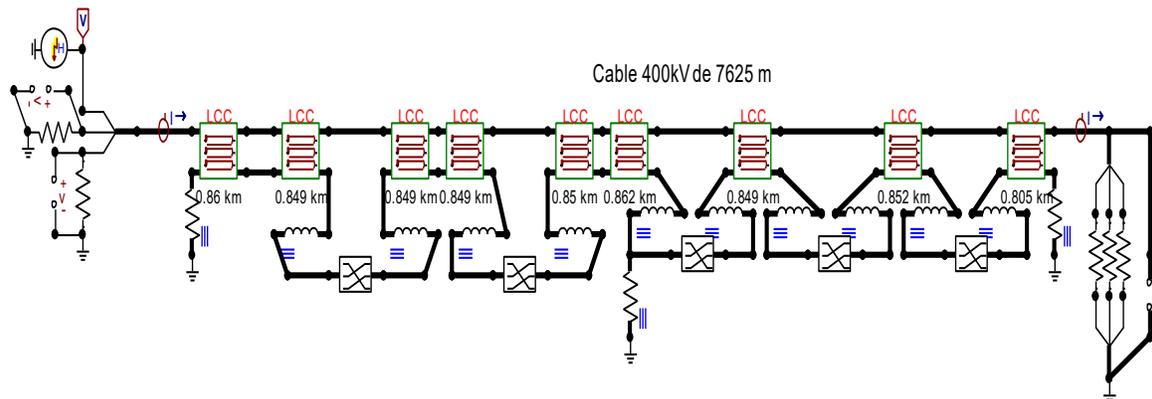


Figura 3.7 Modelaje del sistema de cables a 400 kV en el ATPDraw.

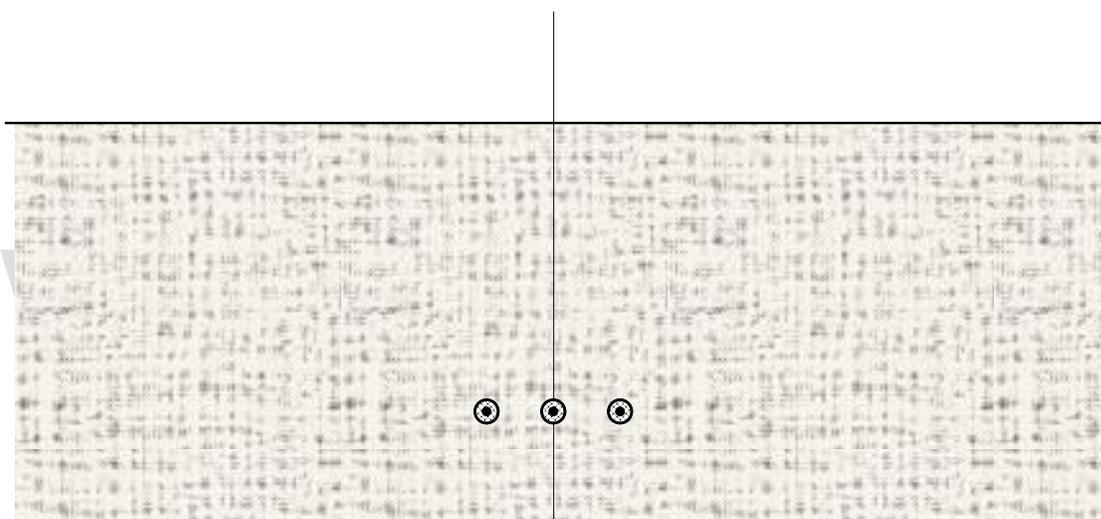


Figura 3.8 Ubicación de los cables respecto a la superficie y los otros cables.



Figura 3.9 Detalle de dos cables del sistema.

La enumeración establece cuantos conductores tiene cada cable y el área cuadrículada representa a las capas aislantes.

Y por último la pestaña de ingreso de los datos del cable que definen tanto las características de los materiales usados en el cable, como sus dimensiones y posición en el terreno. La figura 3.10 muestra la pestaña que contiene los datos de la fase #1.

Cable number: Move # cables:

	CORE	SHEATH
Rin [m]	0	0.05102
Rout [m]	0.0216	0.05341
Rho [ohm*m]	3.4567E-8	5.66E-8
mu	1	1
mu [ins]	1.0385	1
eps [ins]	2.7588	2.5

Total radius
R5 [m]

Core
 On Ground

Sheath
 On Ground

Armor
 On Ground

Position
Vertical [m]

Horizontal [m]

Figura 3.10 Datos del cable para la fase #1.

3.4.1. Resultados de la simulación

Los fenómenos transitorios evaluados en el sistema de cables a 400 kV, fueron medidos a partir de los voltajes y corrientes de envío, y los voltajes y corrientes de recepción. Las gráficas muestran los resultados obtenidos en el ATPDraw.

Al aplicar un pulso de alta frecuencia en una de las fases laterales se obtienen tensiones y corrientes inducidas como se muestra en los gráficos 3.1 y 3.2. Este fenómeno depende fuertemente de los parámetros del cable y la rapidez con la que se ejecuta la simulación, ya que estas dos características afectan en gran medida la velocidad de las ondas y terminan originando discrepancias.

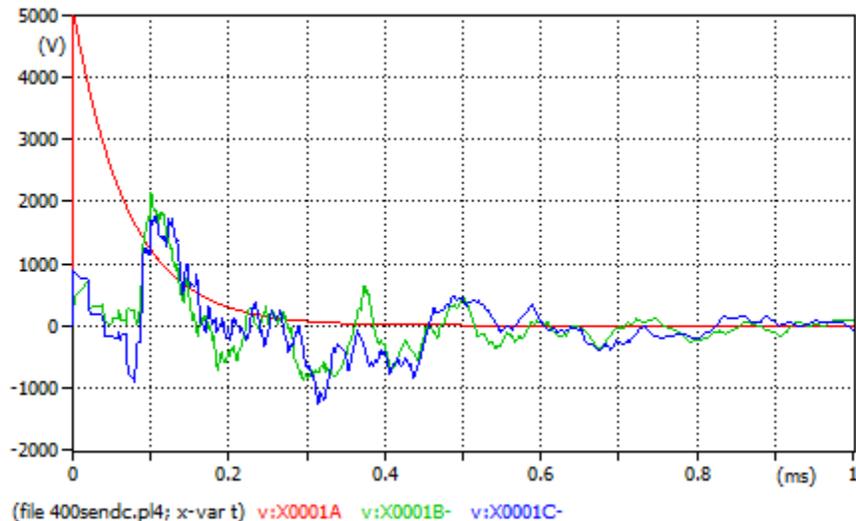


Gráfico 3.1 Voltajes en los terminales de envío.

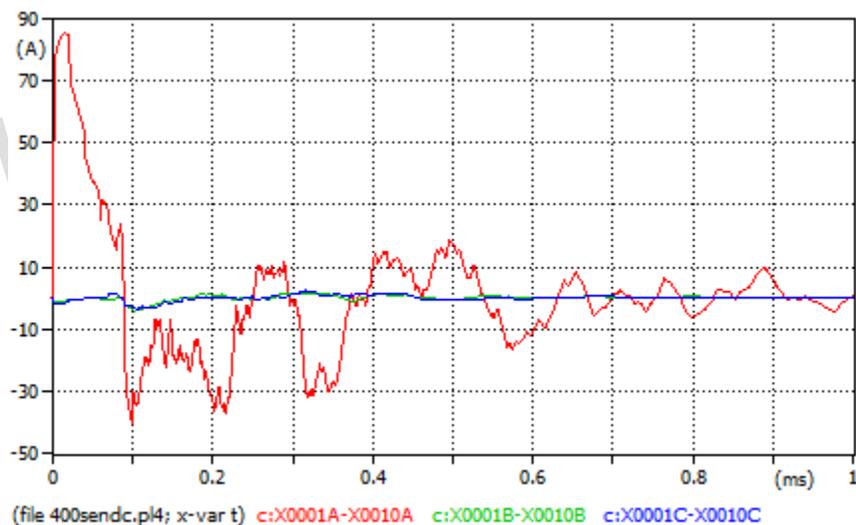


Gráfico 3.2 Corrientes en los terminales de envío.

Al otro extremo del sistema de cables se puede apreciar el retardo en las señales de tensión y corriente (Figuras 3.3 y 3.4). Esto se debe a la longitud de la línea comparada con la longitud de onda, considerando que las ondas viajan aproximadamente a la velocidad de la luz.

Se puede apreciar que en el circuito se inducen tensiones y corrientes importantes a pesar de las estrategias empleadas en los apantallamientos (trasposiciones y conexiones a tierra) para reducir al mínimo los efectos transitorios.

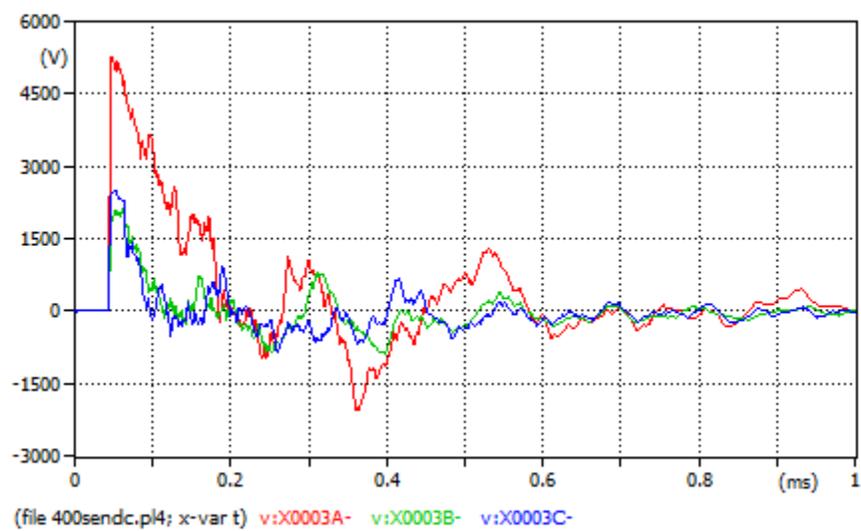


Gráfico 3.3 Voltajes en los terminales de recepción.

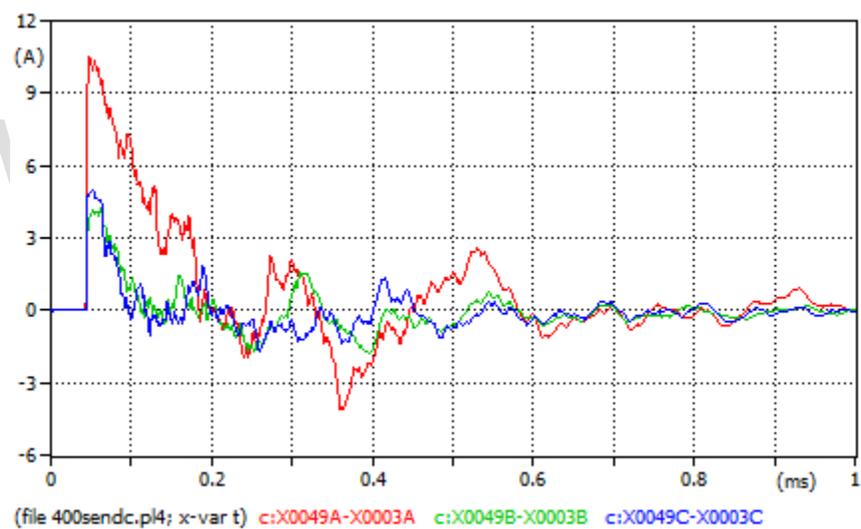


Gráfico 3.4 Corrientes en los terminales de recepción.

3.4.2. Comparación de los resultados

Para validar de manera efectiva el modelo aplicado, se realizó la comparación de los resultados obtenidos por Gudmundsdottir para el sistema de cables a 400 kV tanto para las simulaciones como para las mediciones de campo.

En los gráficos 3.5 y 3.6 se puede apreciar la comparación de los resultados mediante la superposición de gráficas, en tonos grises se presentan los resultados obtenidos por Gudmundsdottir (PSCAD) y en colores rojo, verde, azul y negro los obtenidos en el ATPDraw.

Simulaciones PSCAD vs ATPDraw

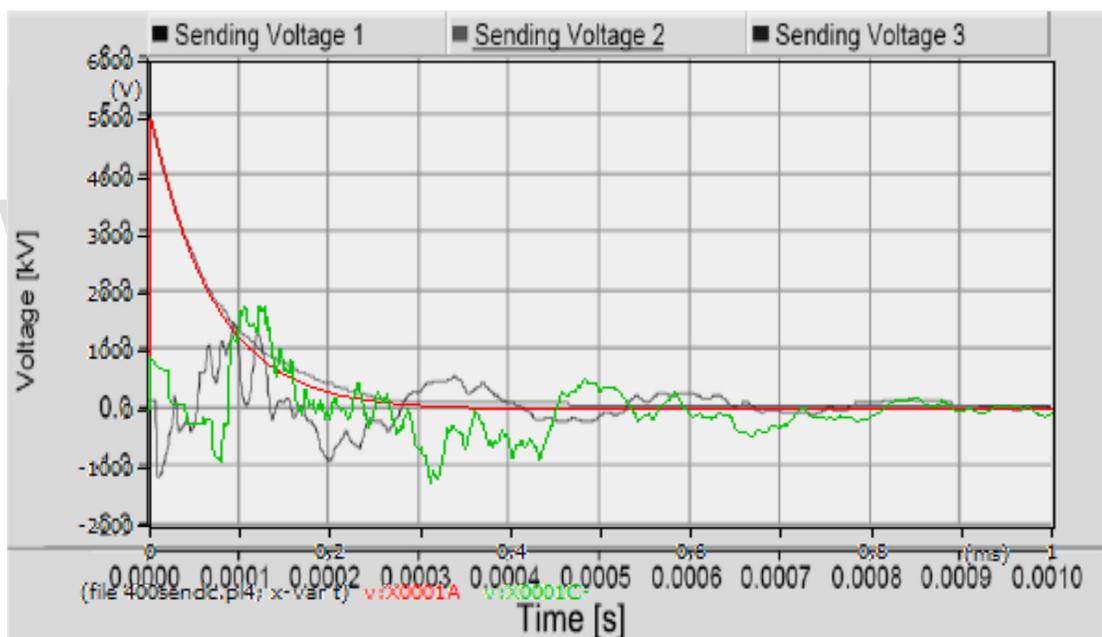


Grafico 3.5 Voltajes de envío ATPDraw y PSCAD.

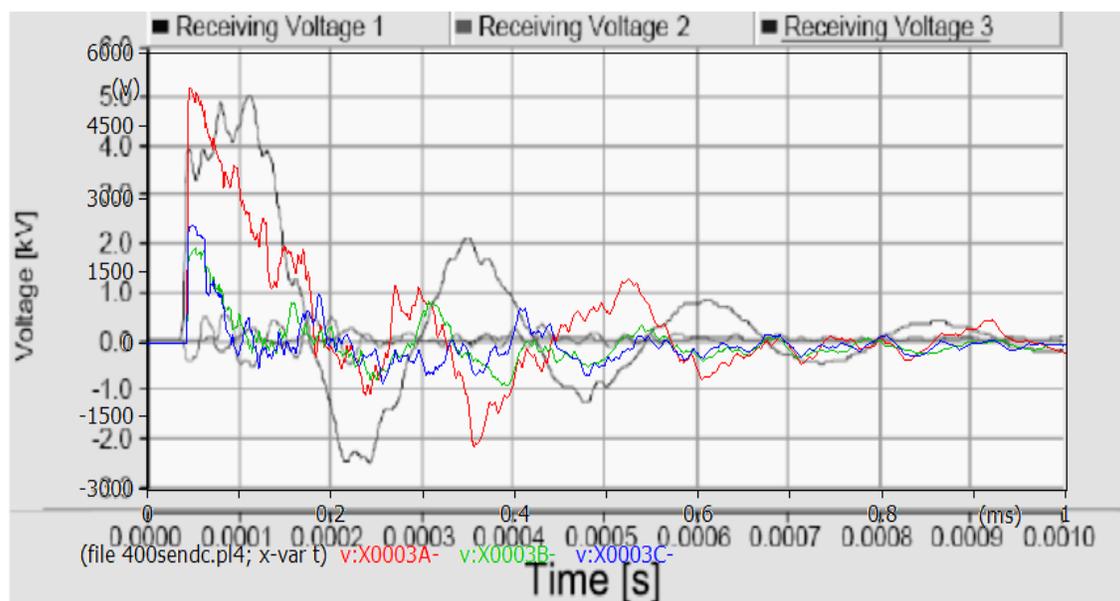


Gráfico 3.6 Voltajes de recepción ATPDraw y PSCAD.

En ambos casos se pueden apreciar discrepancias considerables; sin embargo, ya se mencionó anteriormente que los parámetros son de gran influencia y, al tener dos programas diferentes se modifican los parámetros obtenidos para el cable de transmisión así como las rutinas y modelos de cada programa son diferentes. Por ende es más apreciable la diferencia entre simulaciones de distintos programas. La velocidad de las ondas se ve afectada por distintas causas en cada uno a pesar de tener parámetros de configuración similares.

Mediciones de campo vs ATPDraw

Para poder comparar los resultados se realizó la superposición de las gráficas mediante herramientas de edición de imágenes.

Las mediciones realizadas por Gudmundsdottir tiene discrepancias respecto a la fuente de impulsos empleada comparada con la implementada en ATPDraw, para aclarar este punto en la gráfica 3.7 se aprecian las diferencias.

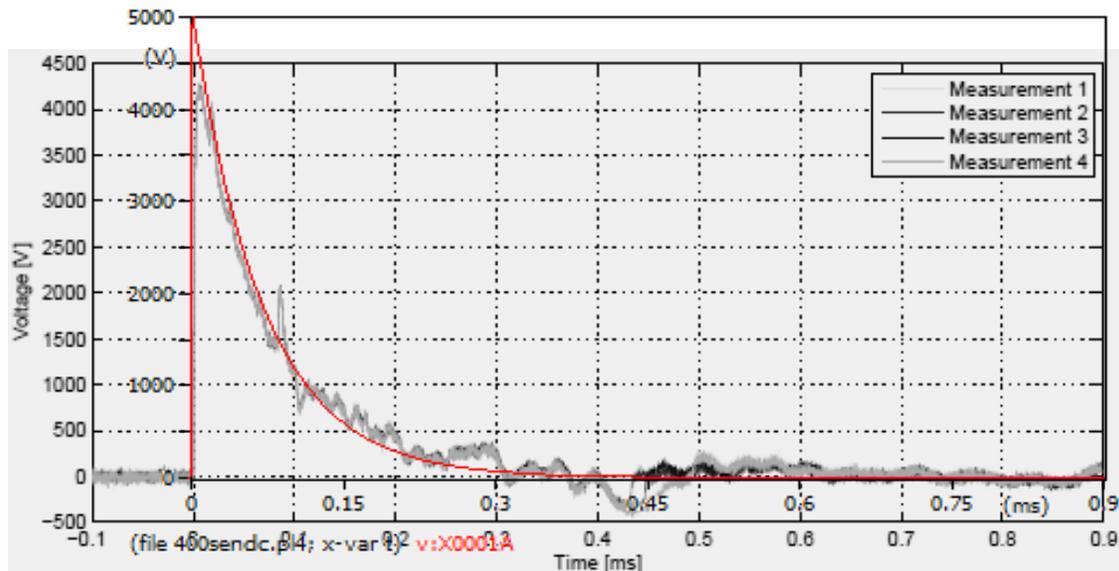


Grafico 3.7 Fuentes de impulsos, ATPDraw y empleada en las pruebas.

Son apreciables las diferencias tanto en amplitud como en el ruido que introduce cada fuente.

Ambas son aproximadamente del mismo orden; sin embargo, el ruido introducido por la fuente aplicada en la práctica puede generar cambios importantes en las señales obtenidas.

En las gráficas 3.8 y 3.9 se comparan las tensiones de envío inducidas en las dos fases restantes, la escala de grises corresponde a los resultados de las mediciones de campo (Gudmundsdottir) mientras que en colores verde, rojo, azul y negro los resultados obtenidos en el ATPDraw.

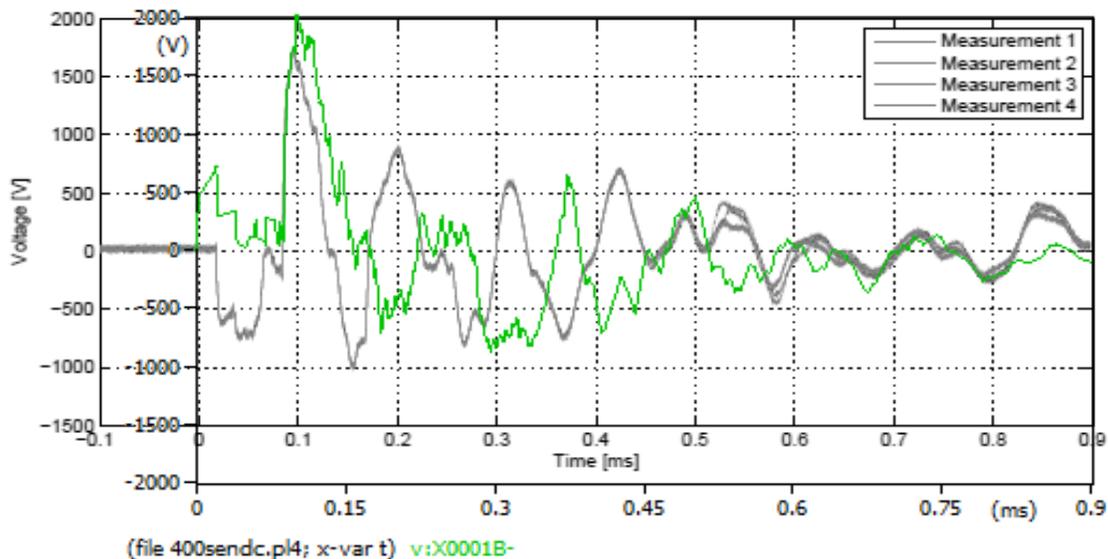


Gráfico 3.8 Voltajes de envío de la segunda fase, ATPDraw y mediciones de campo.

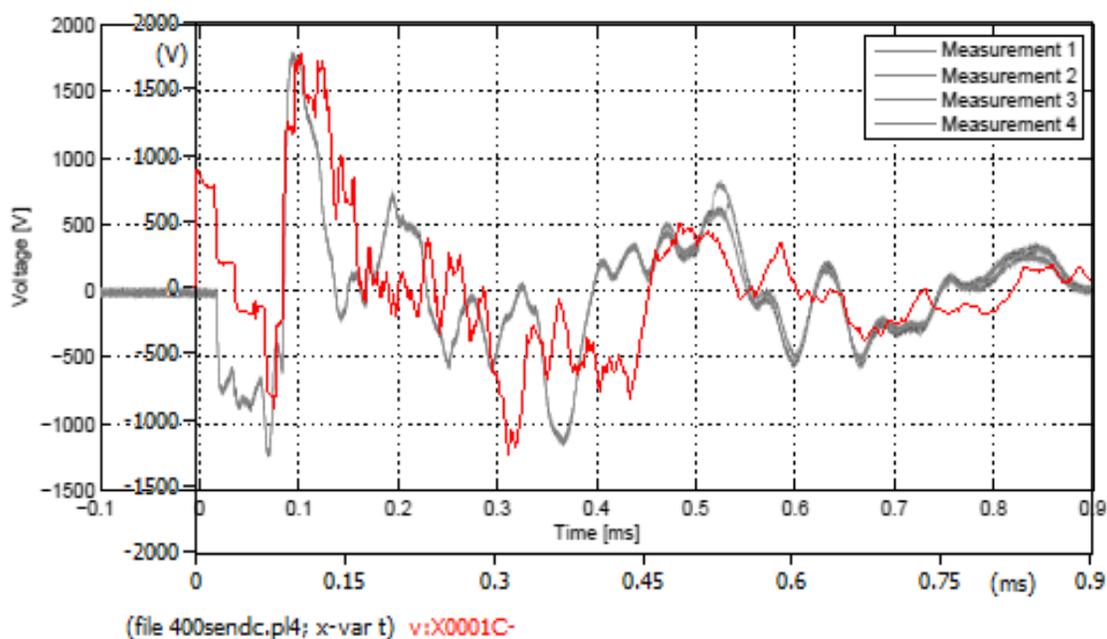


Gráfico 3.9 Voltajes de envío de la tercera fase, ATPDraw y mediciones de campo.

En este caso se puede apreciar que las diferencias respecto a las mediciones son menores comparadas a las del PSCAD. Las diferencias en amplitud se deben a las fuentes empleadas, y las de fase se deben principalmente al ajuste de los parámetros del cable. El modelo empleado para la

solución del sistema de cables está basado en ondas viajeras, esto significa que los parámetros del cable condicionan en gran medida los resultados, donde la obtención de datos fiables en cuanto a espesores de capas, las constantes de resistividad, permeabilidad y permitividad de cada uno de los materiales que constituye el cable son de suma importancia. Por otro lado los programas de simulación influyen en el desfase según la velocidad de computación y el grado error que cometen.

En las gráficas 3.10, 3.11 y 3.12 se comparan las tensiones de envío inducidas en las dos fases restantes, la escala de grises corresponde a los resultados de las mediciones de campo (Gudmundsdottir) mientras que en colores verde, rojo, azul y negro los resultados obtenidos en el ATPDraw.

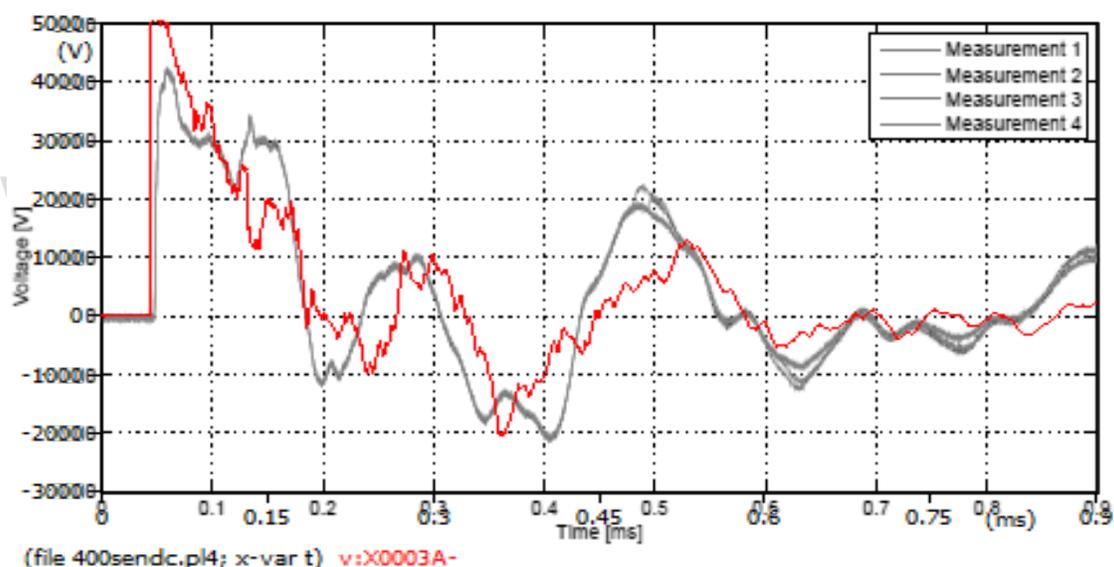


Grafico 3.10 Voltajes de recepción de la primera fase, ATPDraw y mediciones de campo.

En los terminales de recepción se puede apreciar que la señal sigue estando desfasada y con picos de amplitud un poco más altos. Esto significa que a lo largo de la línea los parámetros del cable no son similares a los valores reales, en el ATPDraw estos parámetros son calculados en la subrutina LCC marcando la casilla “cable constants”. Adicionalmente la influencia del apantallamiento sobre los transitorios es considerable, ya que los puntos de trasposición y

aterramiento introducen cambios considerables en las señales que normalmente se aproximan (mas no son exactos) a los valores reales.

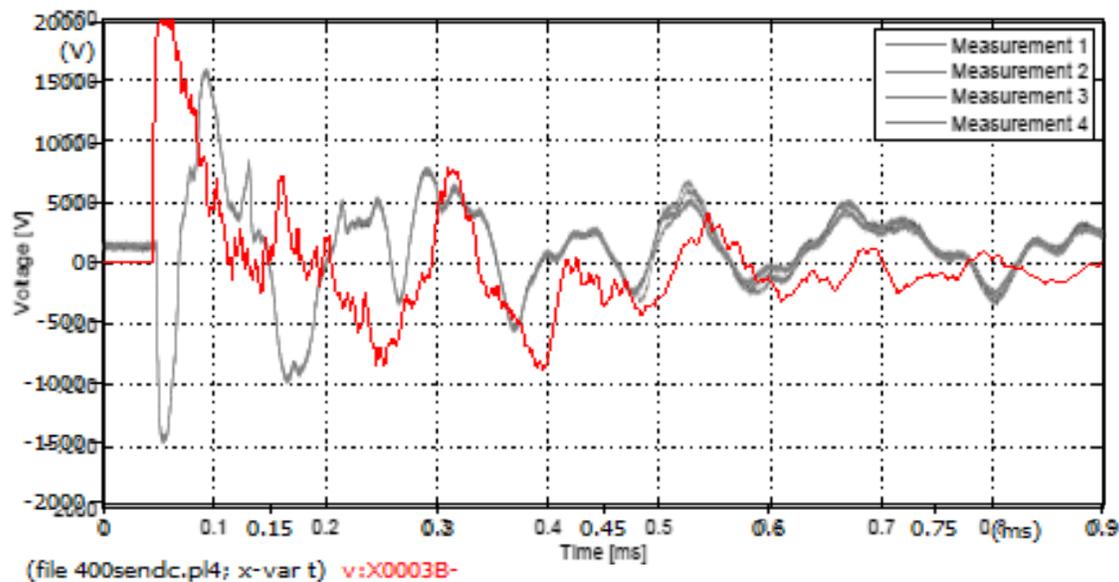


Gráfico 3.11 Voltajes de recepción de la segunda fase, ATPDraw y mediciones de campo.

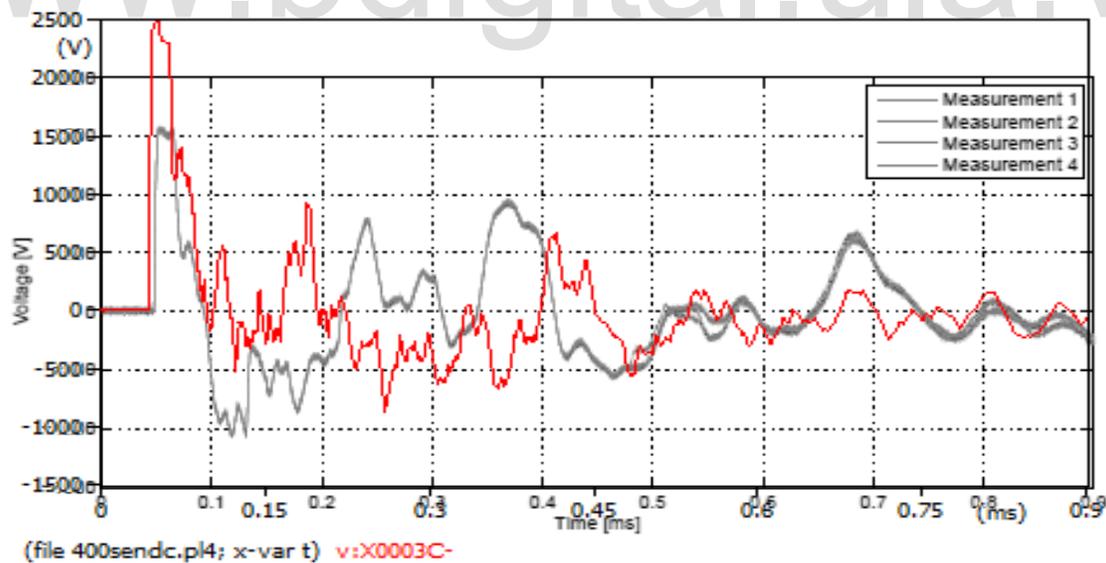


Gráfico 3.12 Voltajes de recepción de la tercera fase, ATPDraw y mediciones de campo.

CAPITULO IV

SIMULACIONES

4.1. Sistema de potencia modelado

Para realizar simulaciones son necesarios una gran cantidad de datos, no solo los característicos del cable de potencia a utilizar, sino también de las subestaciones, transformadores, y elementos en general que puedan ser representados circuitalmente.

En el caso del cable de potencia se obtuvo la información de ABB donde se publicó una hoja de datos con las características más relevantes de cables submarinos para perfiles de tensión de hasta 400 kV (ABB, 2010).

El sistema de potencia se diseñó a partir de la publicación del CIGRE, “*características de diseño de los cables sublacustres a 400 kV en el lago de Maracaibo y sus obras de transmisión asociadas*” (2009), de este documento se tomaron datos de potencia nominal, capacidad de cortocircuito, topología del sistema de transmisión y consideraciones sobre las estrategias a emplear para reducir los efectos perjudiciales para el sistema como por ejemplo, emplear reactancias de compensación, entre otros.

La figura 4.1 muestra el sistema de potencia modelado, este representa la interconexión de las S/Es El Tablazo-Cuatricentenario en donde debido a la ausencia de datos para su completa caracterización, se asumieron los indispensables para implementar un modelo útil del sistema.

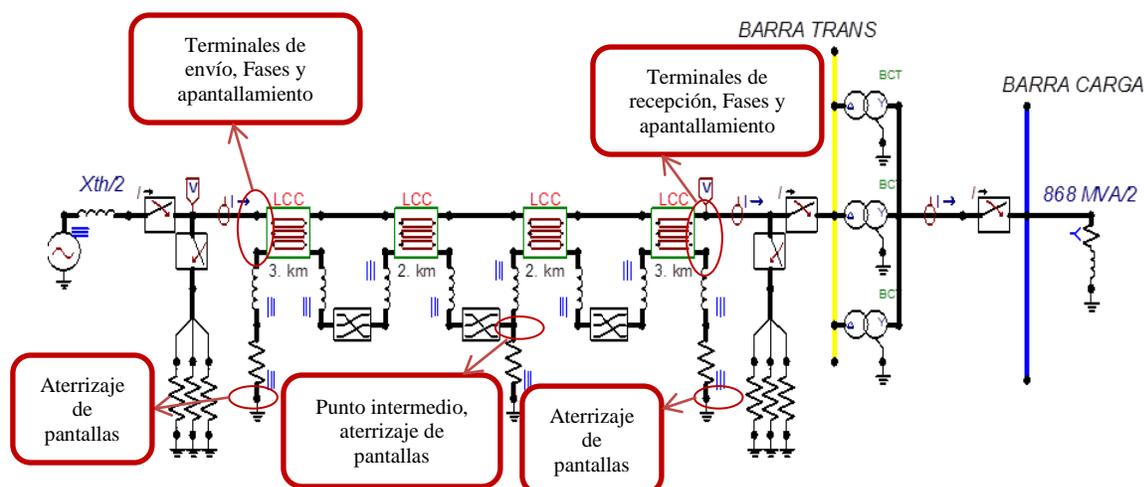


Figura 4.1 Diagrama circuital correspondiente al circuito #1 de transmisión a 400 kV.

4.2. Casos de estudio

En los sistemas de transmisión las alteraciones producidas bajo ciertas condiciones son objeto de estudio. Estas condiciones generan perturbaciones en los campos eléctricos y magnéticos, y por ende los voltajes y corrientes se ven afectadas. Se tomaron los casos más comunes de estudio y se modelaron para observar sus efectos en el sistema de cables.

En todos los casos se graficaron tanto tensiones como corrientes de envío y recepción en las fases, y en las pantallas se graficaron los mismos parámetros pero en los puntos críticos (donde el apantallamiento se encuentra aterrizado) debido a que en estos puntos se obtienen las tensiones y corrientes más elevadas.

4.2.1. Régimen permanente

Empleando el circuito mostrado en la figura 4.1, se alimenta el sistema de potencia con una fuente trifásica de 400 kV (tensión nominal) manteniendo interruptores de línea y carga cerrados, y los de falla a tierra abiertos. En las gráficas 4.1 y 4.2 se observan los voltajes y corrientes de envío en régimen permanente, mientras que en las gráficas 4.3 y 4.4 se observan los de recepción.

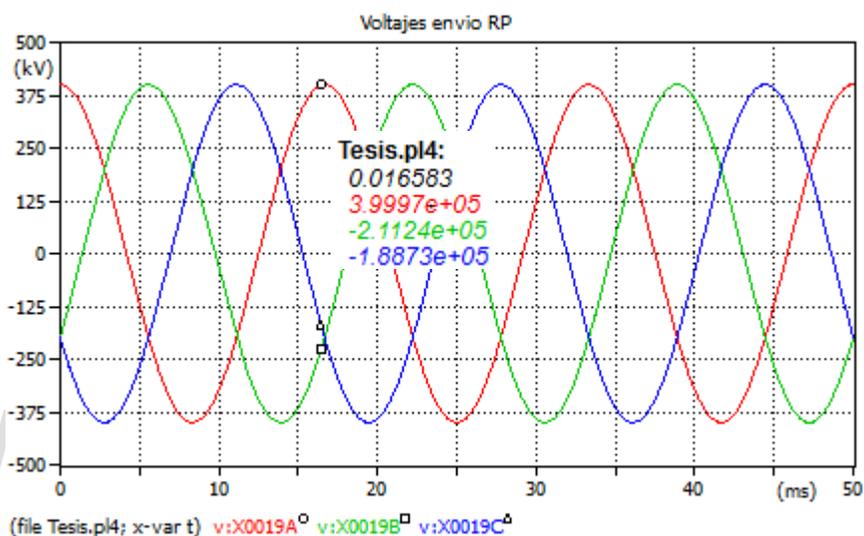


Gráfico 4.1 Voltajes de régimen permanente en los terminales de envío.

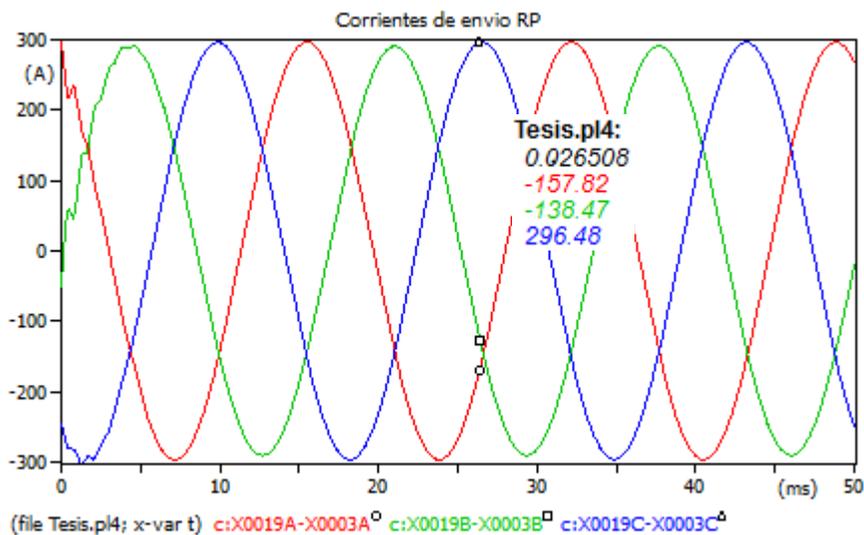


Gráfico 4.2 Corrientes de régimen permanente en los terminales de envío.

En las figuras anteriores se muestran las condiciones de corriente y tensión nominales de envío en régimen permanente. La corriente de envío es ligeramente mayor a la de recepción como se verá en las figuras 4.3 y 4.4 debido a la pérdida de potencia a lo largo de la ruta del cable.

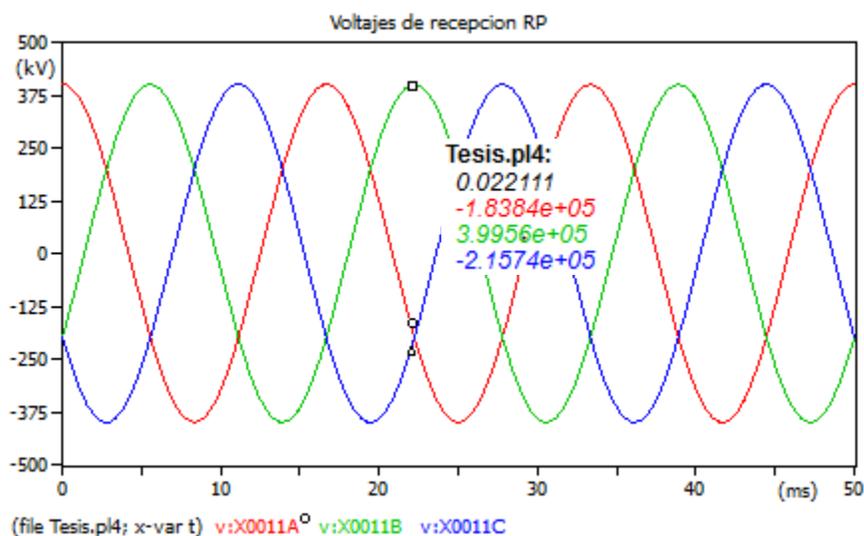


Gráfico 4.3 Voltajes de régimen permanente en los terminales de recepción.

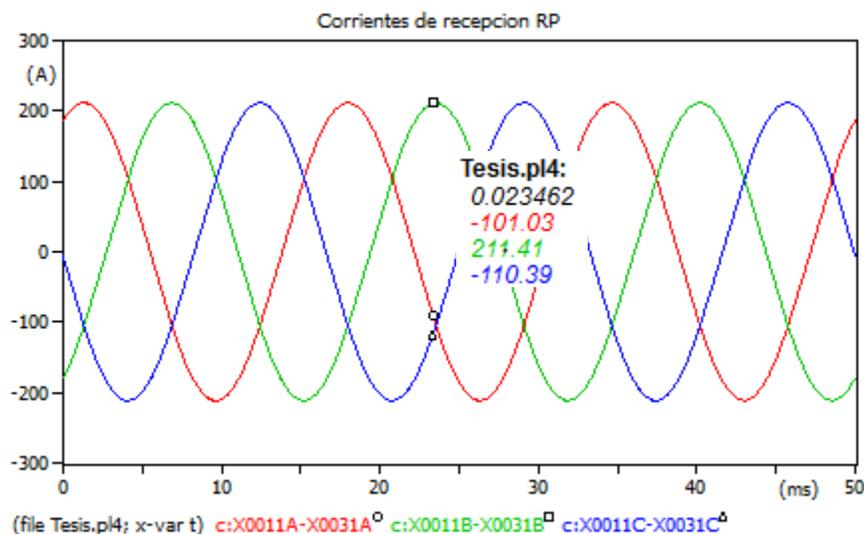


Gráfico 4.4 Corrientes de régimen permanente en los terminales de recepción.

Los puntos de medición en el apantallamiento se ubicaron en las tres zonas de puesta a tierra debido a que es en estos puntos en donde se produce la mayor caída de tensión así como el mayor

amperaje. En las gráficas 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran los voltajes y corrientes en régimen permanente de los puntos en los que las pantallas están conectadas a tierra (los extremos y el punto medio de la ruta del cable).

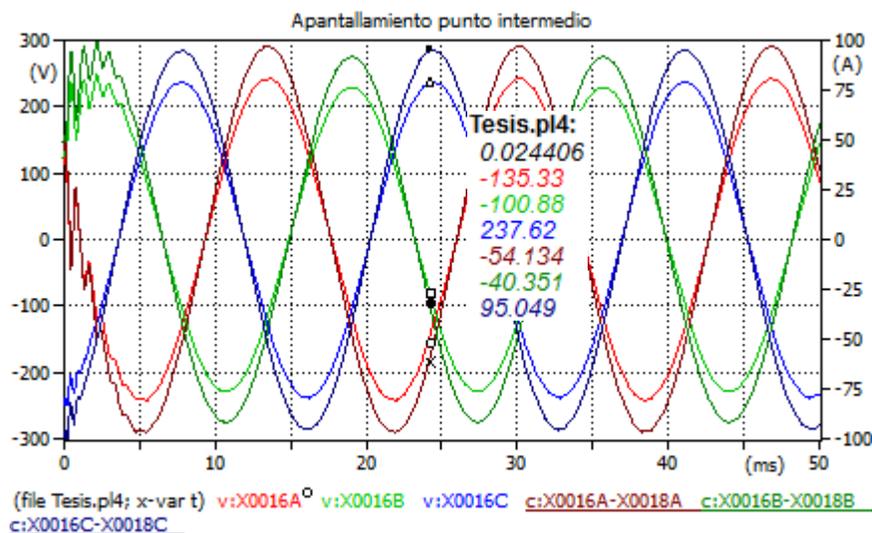


Gráfico 4.5 Voltajes y corrientes de régimen permanente en las pantallas, punto medio de la ruta del cable.

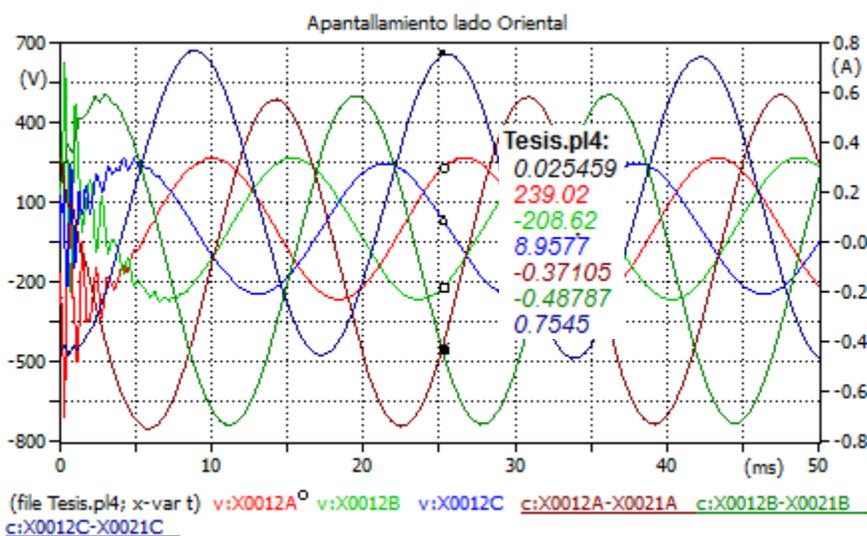


Gráfico 4.6 Voltajes y corrientes de régimen permanente en las pantallas, terminales de recepción del cable.

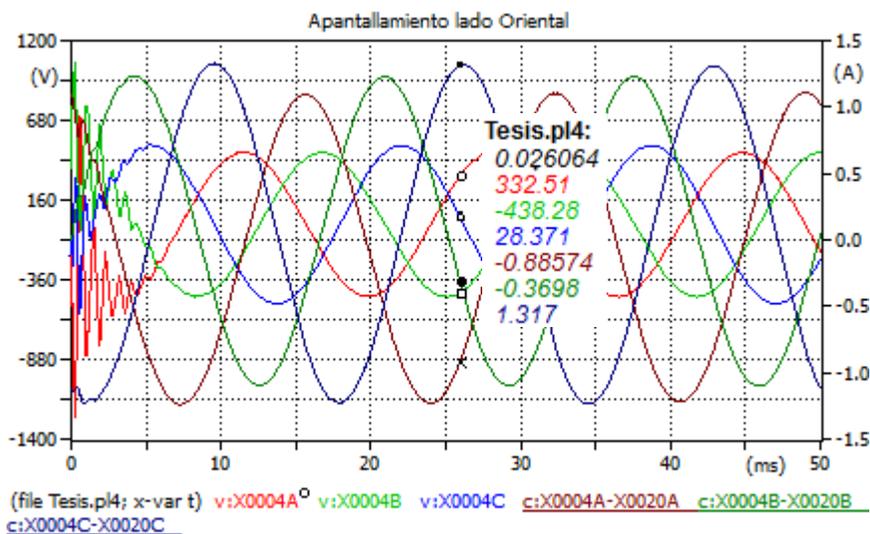


Grafico 4.7 Voltajes y corrientes de régimen permanente en las pantallas, terminales de envío del cable.

4.2.2. Descargas atmosféricas

En este caso se empleó la misma topología circuital utilizada en el capítulo III (Validación) cambiando el sistema de cables por el modelado para la interconexión de las S/Es El Tablazo-Cuatricentenario en el ATPDraw. En las figuras 4.8 y 4.9 se pueden observar las tensiones y corrientes en los terminales de envío y recepción respectivamente

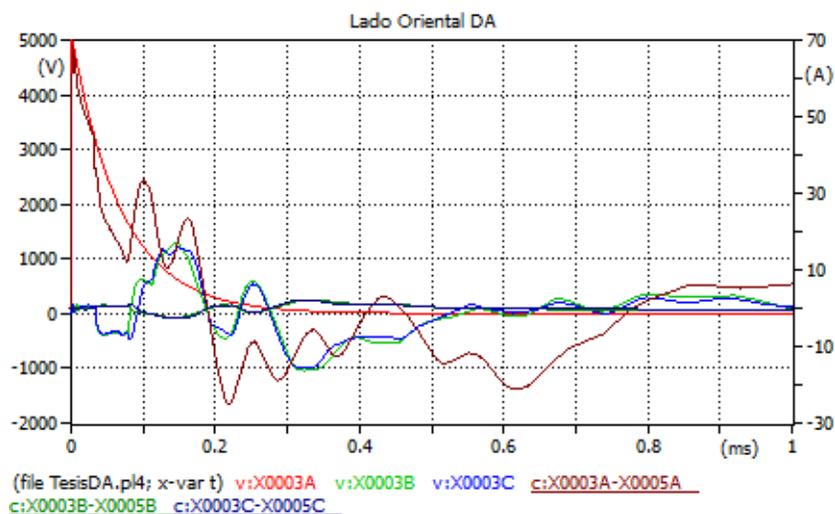


Grafico 4.8 Voltajes y corrientes en los terminales de envío del cable.

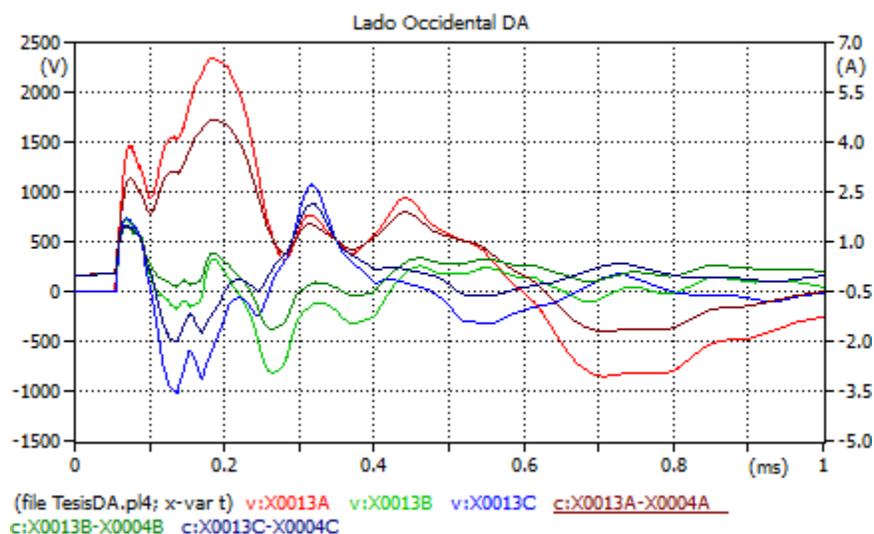


Gráfico 4.9 Voltajes y corrientes en los terminales de recepción del cable.

El sistema de cables de transmisión fue modificado para simular los efectos de una descarga atmosférica sobre una de las fases más externas. Se observa que los efectos de sobretensión y sobrecorriente generados son de magnitudes pequeñas y se disipan en poco tiempo. A continuación se presentan las gráficas 4.10, 4.11 y 4.12 correspondientes a las tensiones y corrientes en las pantallas.

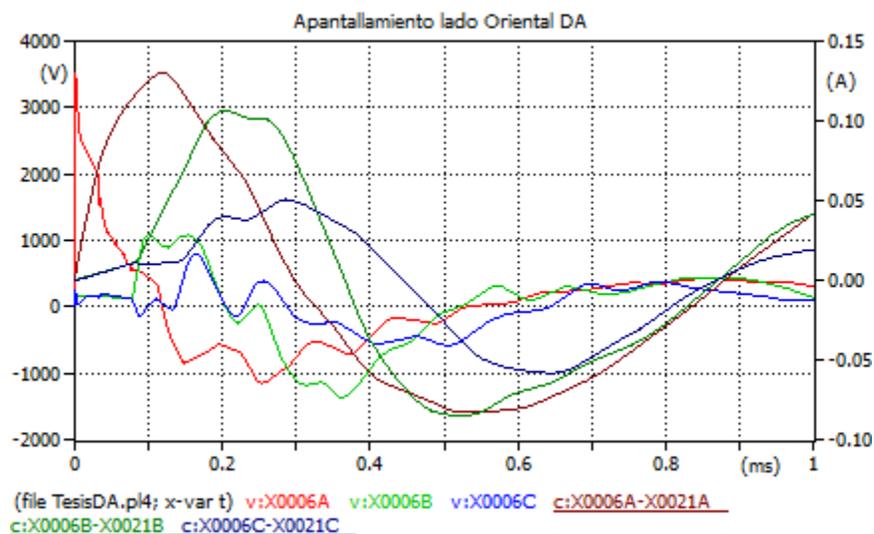


Gráfico 4.10 Voltajes y corrientes de las pantallas en los terminales de envío del cable.

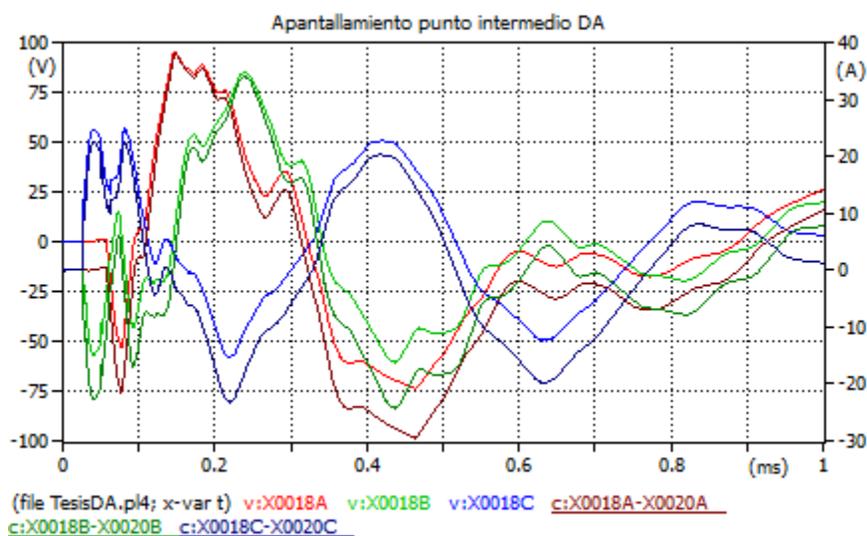


Grafico 4.11 Voltajes y corrientes de las pantallas en el punto intermedio del cable.

El apantallamiento de los cables de potencia se ve afectado por la descarga atmosférica al punto de alcanzar grandes magnitudes de tensión en el punto donde impacta la descarga, en las pantallas y principalmente la pantalla del conductor que recibe la descarga llegando a alcanzar el 70% de la tensión de descarga aproximadamente. Por otro lado la sección intermedia del apantallamiento donde este es aterrizado, las magnitudes de corriente son considerables en las tres pantallas, y principalmente en la pantalla de la fase que recibe la descarga representando aproximadamente el 55% de la corriente inyectada por la descarga en el punto de impacto.

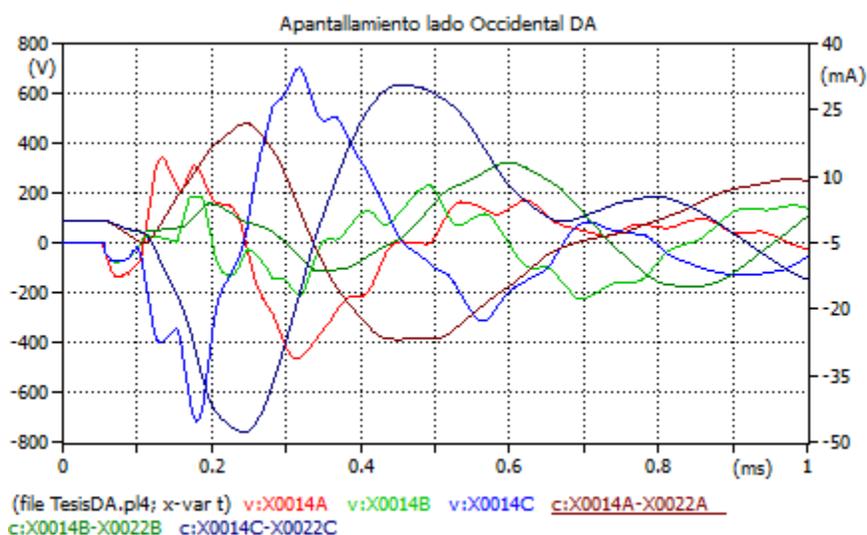


Grafico 4.12 Voltajes y corrientes de las pantallas en los terminales de envío del cable.

4.2.3. Cargabilidad de los cables d potencia

Los cables de potencia están sometidos a los efectos reactivos generados principalmente por la capacitancia del cable. Estos efectos son apreciables evaluando la cargabilidad del cable al conectarlo a la alimentación y sin carga conectada, generalmente estos reactivos son compensados mediante reactancias inductivas considerando la dificultad de que el cable se encuentra enterrado en el lecho sublacustre.

Faría Da Silva y Bak definieron los efectos de las reactancias según su ubicación a lo largo de la ruta del cable. En la figura 4.2 se muestra el comportamiento de la corriente de carga capacitiva respecto a la ubicación de las reactancias.

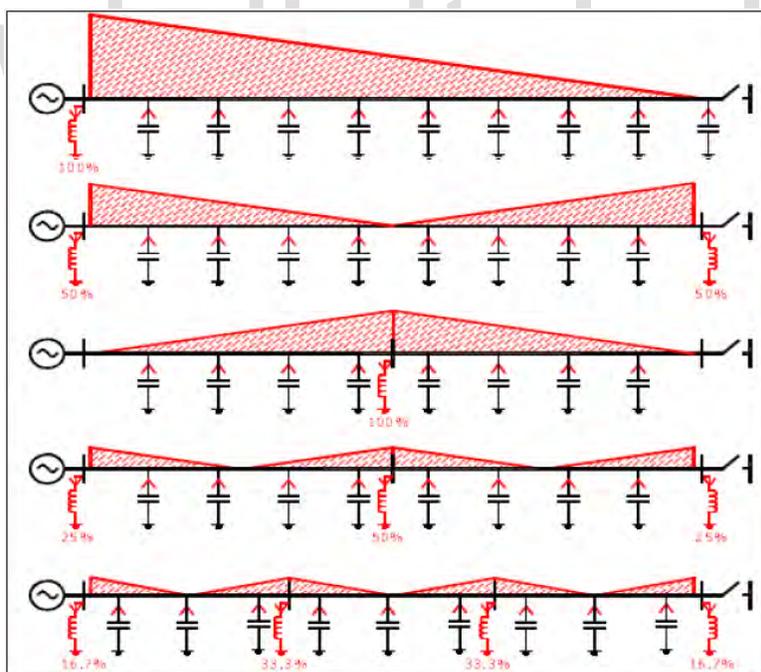


Figura 4.2 Corriente de carga capacitiva dependiendo de la ubicación y el nivel de compensación (Faría Da Silva, 2011).

En el ATPDraw se obtuvieron los reactivos del cable calculados por una subrutina del programa empleando las características del cable ingresadas. Los reactivos presentes en el cable son aproximadamente 200 MVar , las reactancias empleadas para compensar estos efectos son de 2.14 H dispuestas en dos reactores de 1.074 H conectados en cada extremo del sistema de cables.

Los cables de potencia consumen gran cantidad de reactivos al ser conectados al sistema de alimentación. Se empleó un interruptor ideal para conectar las fases una por una, similar a la forma empleada en la práctica para la conexión de sistemas de transmisión. En el extremo abierto la amplitud de corriente es nula mientras la tensión es la nominal, por lo tanto no es necesario plasmar este resultado. En los gráficos 4.13 y 4.14 podemos observar las tensiones y corrientes de envío.

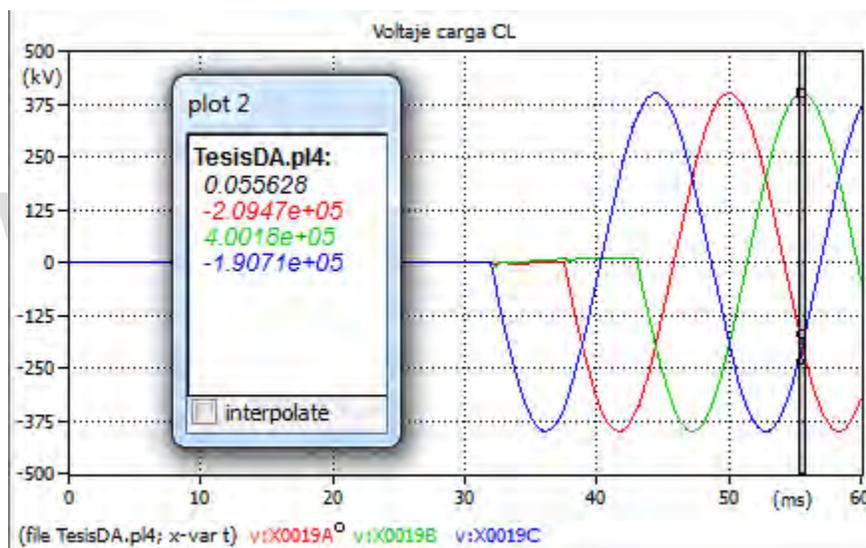


Gráfico 4.13 Voltaje en los terminales de envío del cable.

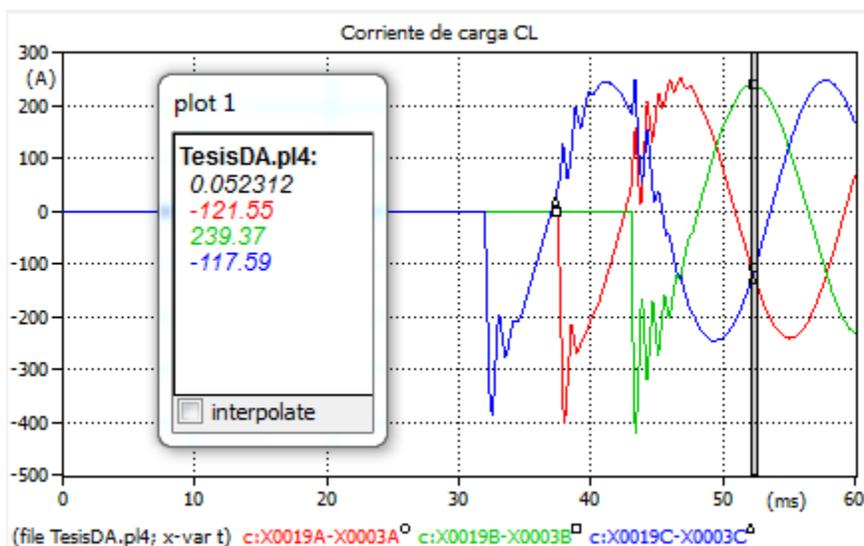


Gráfico 4.14 Corriente en los terminales de envío del cable.

En las pantallas se produce un efecto similar al caso de descargas atmosféricas, donde se puede apreciar que las tensiones críticas se producen en el extremo de envío (donde se conecta la fuente de alimentación) y la amplitud de corriente es mucho mayor en el punto intermedio de las pantallas que se encuentra aterrizado. Las gráficas 4.15, 4.16 y 4.17 muestran cómo se distribuyen las perturbaciones electromagnéticas en los cables.

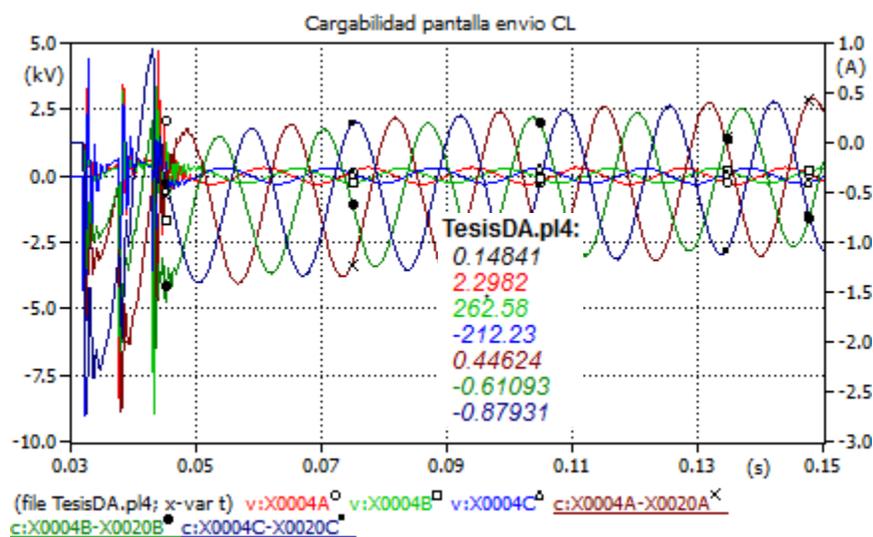


Gráfico 4.15 Tensiones y corrientes de las pantallas en los terminales de envío.

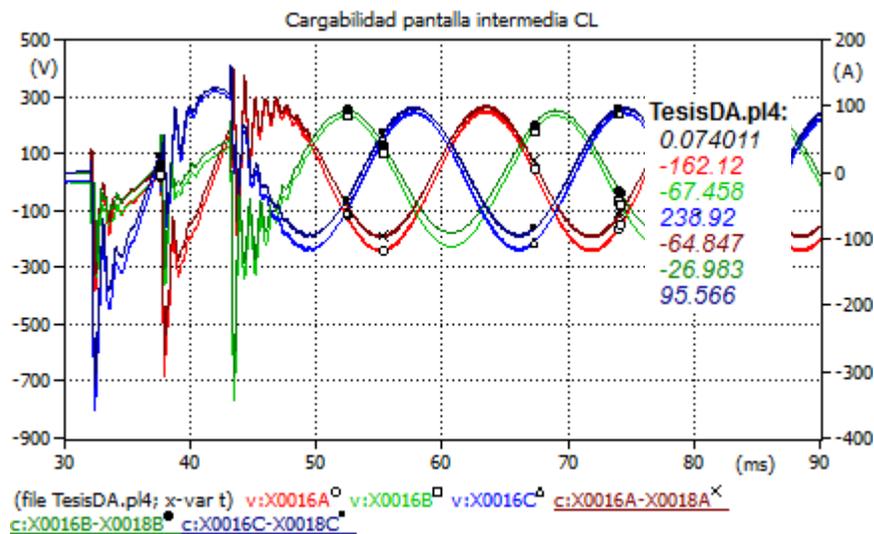


Gráfico 4.16 Tensiones y corrientes de las pantallas en el punto medio de la ruta del cable.

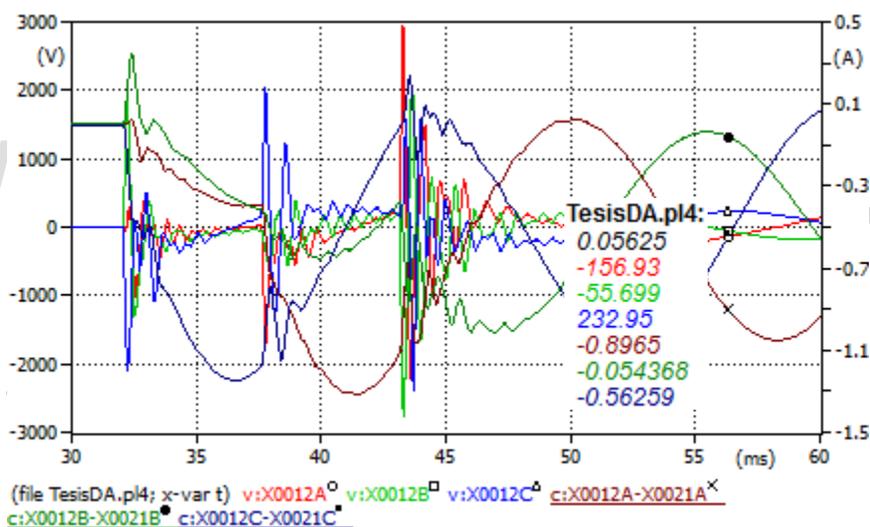


Gráfico 4.17 Tensiones y corrientes de las pantallas en los terminales de recepción.

El sistema de cables debe ser conectado a la carga de forma cuidadosa, en la práctica se realiza fundamentalmente conectando segmentos de carga de forma que los transitorios generados sean menos perjudiciales para el sistema. En este caso se consideró el peor, conectando toda la carga al mismo tiempo fase por fase mediante un interruptor ideal. En las gráficas 4.18 y 4.19 se pueden observar los resultados.

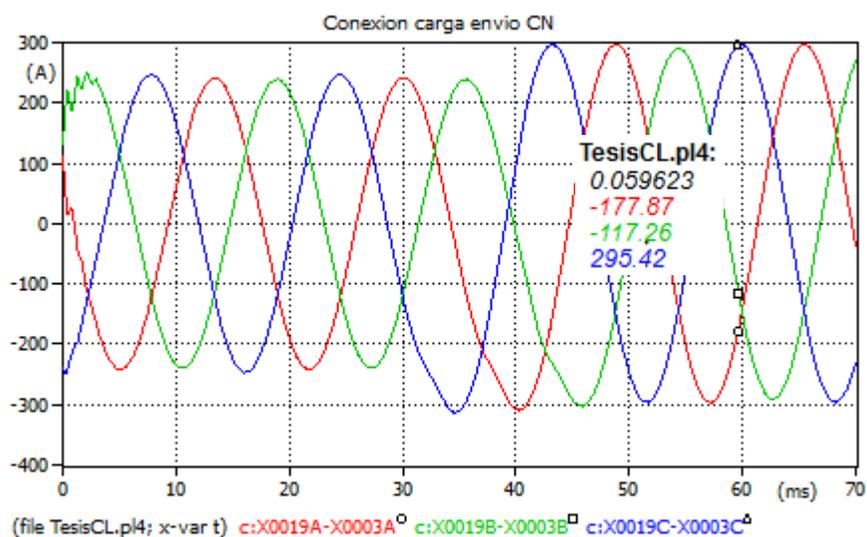


Gráfico 4.18 Corrientes de envío.

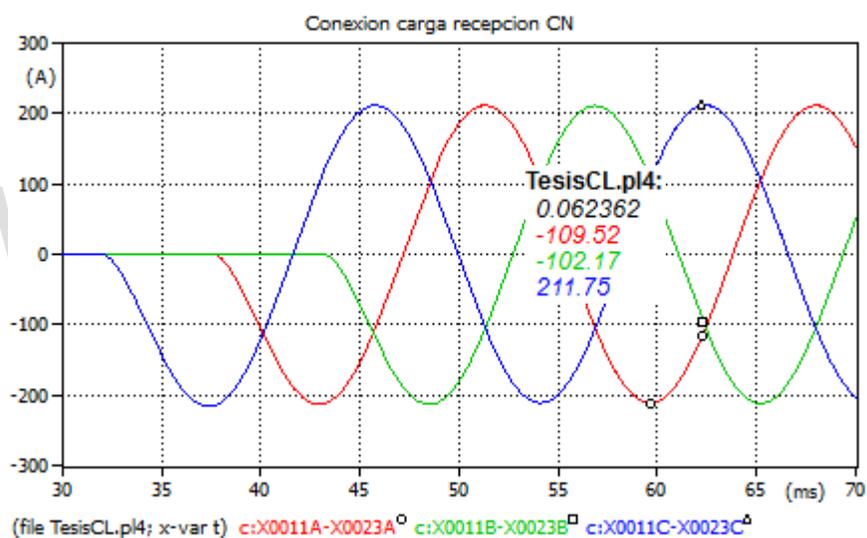


Gráfico 4.19 Corriente de recepción.

El ingreso de carga al sistema no produce alteraciones importantes sobre las fases, el incremento de amperaje es aproximadamente el nominal. Los picos de tensión y corriente que genera el cierre de interruptores de potencia no son apreciables debido a que los interruptores disponibles en el ATPDraw son ideales, por lo tanto no toman en cuenta estos efectos. En las gráficas 4.20, 4.21 y 4.22 se pueden observar los efectos producidos en las pantallas.

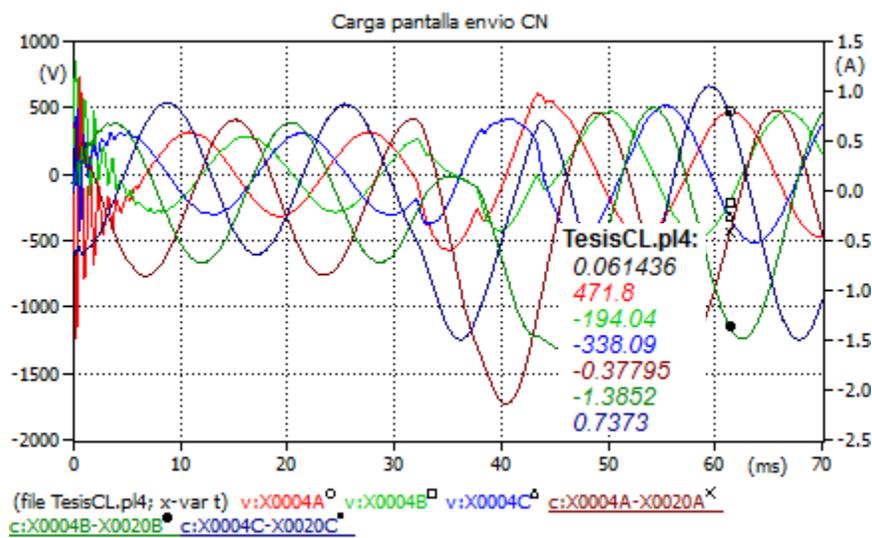


Gráfico 4.20 Voltajes y corrientes en las pantallas de envío.

En las pantallas se pueden apreciar efectos importantes al momento de conectar carga en el sistema. El efecto más prominente es el incremento en las pérdidas de potencia (mayormente reactiva) que se denotan con los incrementos de tensión y corriente en las pantallas de los cables en sus extremos. Por otro lado la circulación de corriente en los extremos es bastante pequeña al igual que los picos de tensión son bajos comparados con la tensión principal del sistema.

En el punto medio de la pantalla se puede observar que se mantienen prácticamente constantes la tensión y el amperaje; sin embargo, se puede apreciar que el amperaje es aproximadamente el 30% de la corriente de línea siendo bastante perjudicial para el sistema.

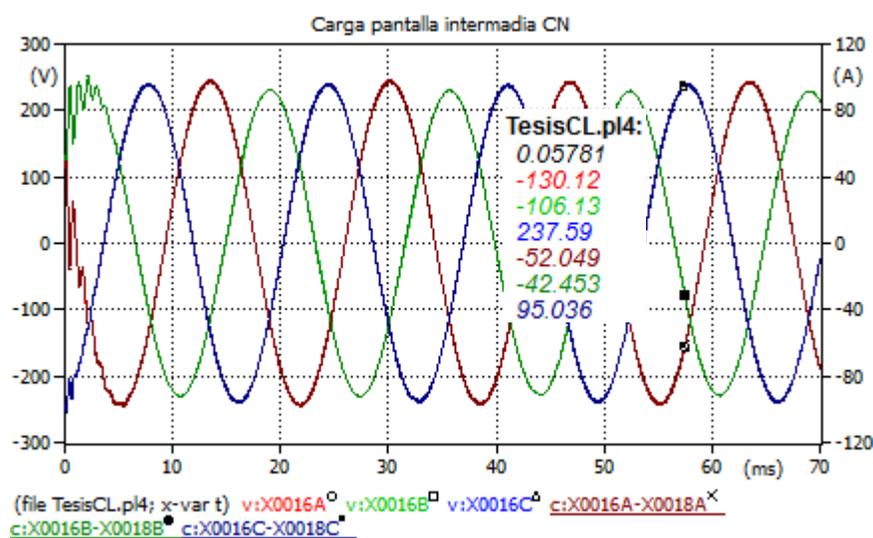


Gráfico 4.21 Voltajes y corrientes en las pantallas, punto intermedio.

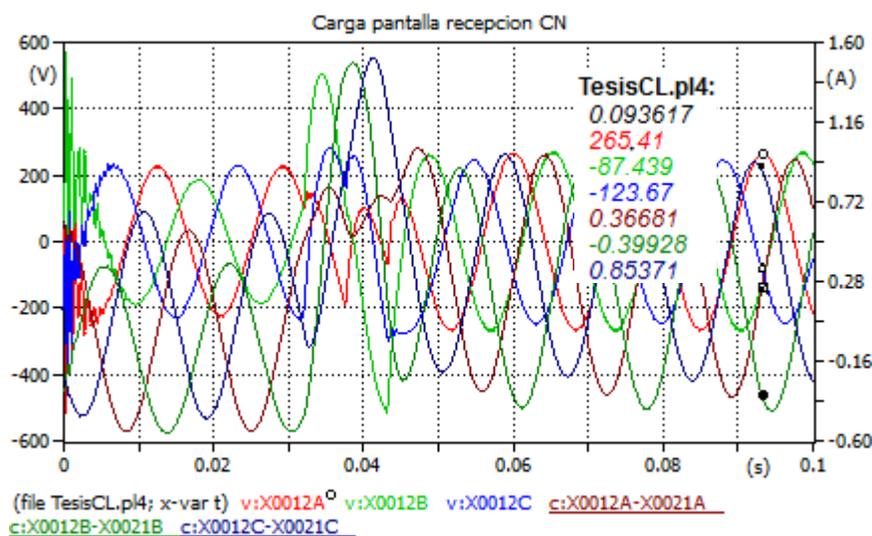


Gráfico 4.22 Voltajes y corrientes en las pantallas de recepción.

4.2.5. Corto circuito

Es uno de los casos más importantes debido a lo perjudiciales que pueden ser. Para este caso se simularon varias condiciones de corto circuito a través del uso de interruptores ideales, resistencias y rutinas internas del ATPDraw.

De fase a tierra en el extremo de envío

Una de las fases laterales es conectada a tierra a través de un interruptor. La tierra es considerada con una resistencia de 2Ω .

El corto circuito monofásico produjo alteraciones significativas en la fase cortocircuitada, 162 kA aproximadamente en el terminal de envío. Las otras fases se vieron afectadas, alcanzando un valor pico de casi 700 A en la fase adyacente a la fallada, aproximadamente el 270% de la corriente nominal. En los gráficos 4.23 y 4.24 se pueden apreciar los efectos del corto circuito en las fases.

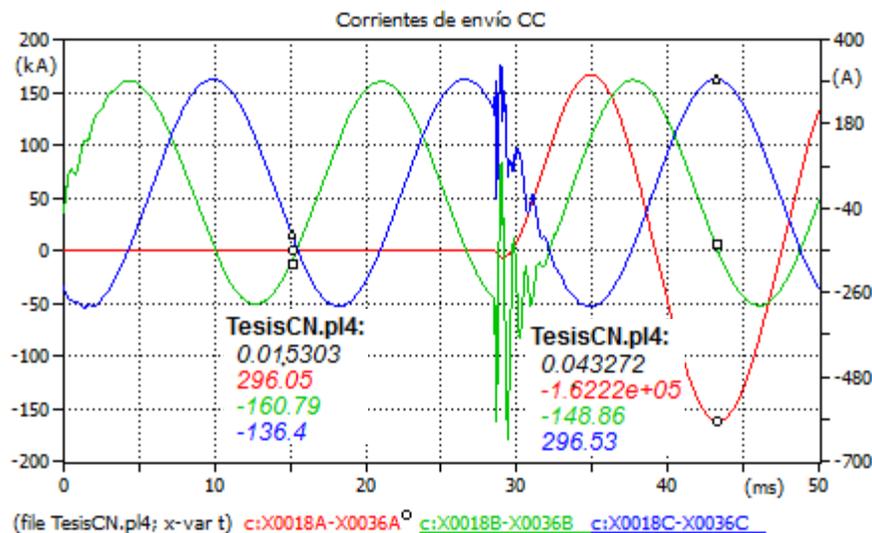


Gráfico 4.23 Corrientes de envío bajo cortocircuito de fase a tierra.

Los voltajes se vieron ligeramente afectados pero no tuvieron mucha relevancia. En los terminales de recepción las perturbaciones son pequeñas, la mas apreciable es la perdida de potencia en la fase falla debido a la caída de tensión por corto circuito.

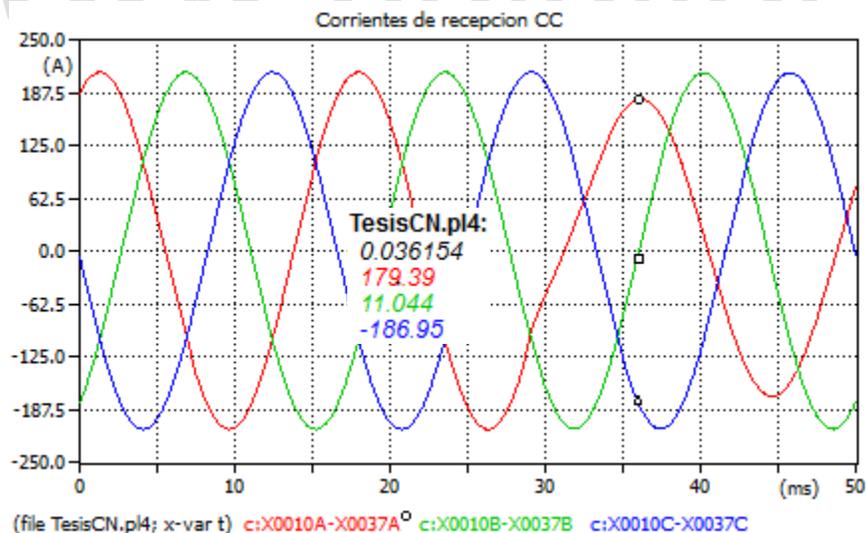


Gráfico 4.24 Corrientes de recepción bajo cortocircuito de fase a tierra.

En el apantallamiento son apreciables los efectos del corto circuito, las tensiones y corrientes inducidas son considerables como se puede observar en las gráficas 4.25, 4.26 y 4.27, esto representa un riesgo para el aislamiento en caso de exceder su tensión de ruptura, el aislamiento es principalmente sensible al envejecimiento por sobretensiones, acelera su deterioro acortando la vida útil para la que fue diseñado. Por esta razón es común emplear limitadores de sobretensión en las pantallas.

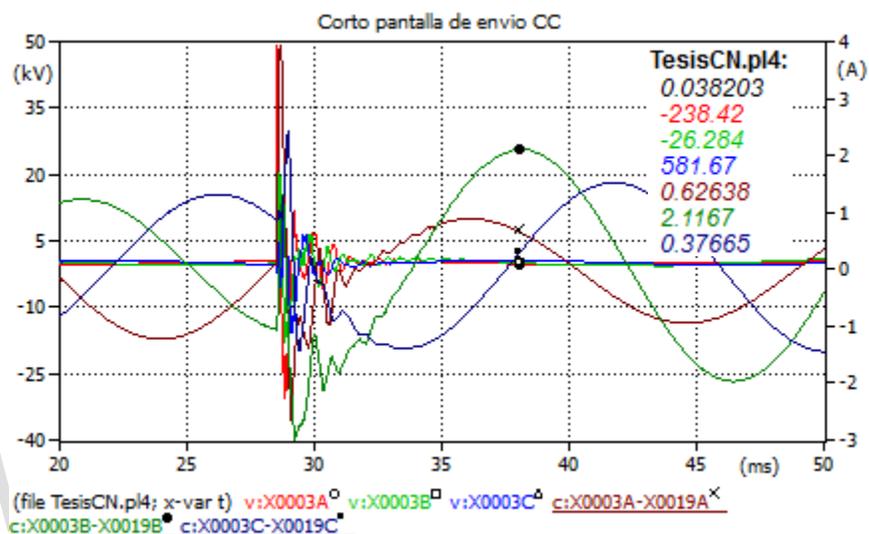


Grafico 4.25 Corrientes y tensiones de envío en las pantallas bajo cortocircuito de fase a tierra.

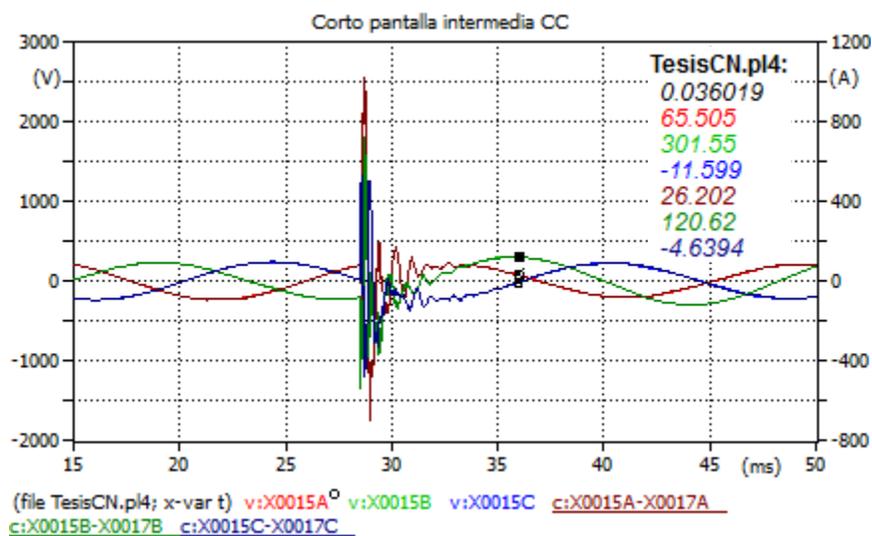


Grafico 4.26 Corrientes y tensiones en las pantallas en el punto medio bajo cortocircuito de fase a tierra.

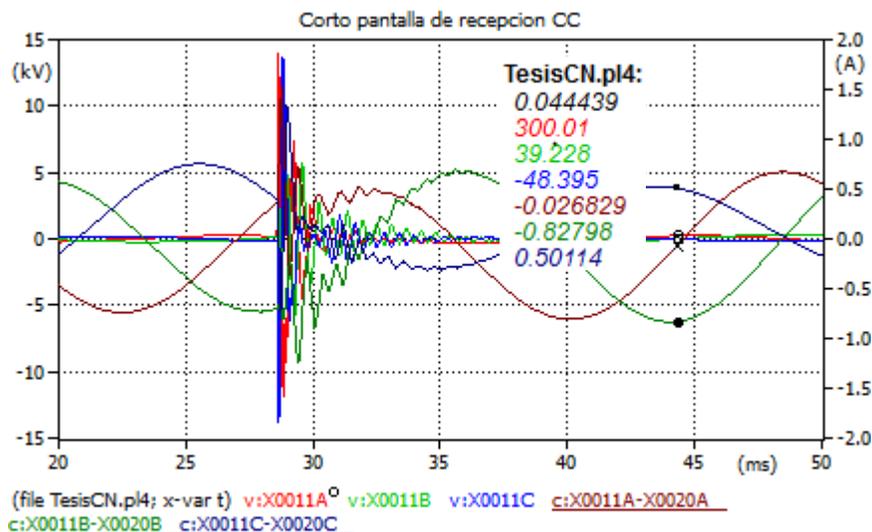


Gráfico 4.27 Corrientes y tensiones de recepción en las pantallas bajo cortocircuito de fase a tierra.

Entre fase y pantalla

Es probable que el cable de potencia falle por pérdida de propiedades aislantes y produzca un corto circuito entre el conductor y su apantallamiento. En este caso se conectó mediante un interruptor ideal y una resistencia de arco, la fase del cable a su pantalla, en un punto intermedio entre los aterrizajes de la pantalla. En el gráfico 4.28 se puede apreciar el efecto producido por el corto circuito en las otras fases.

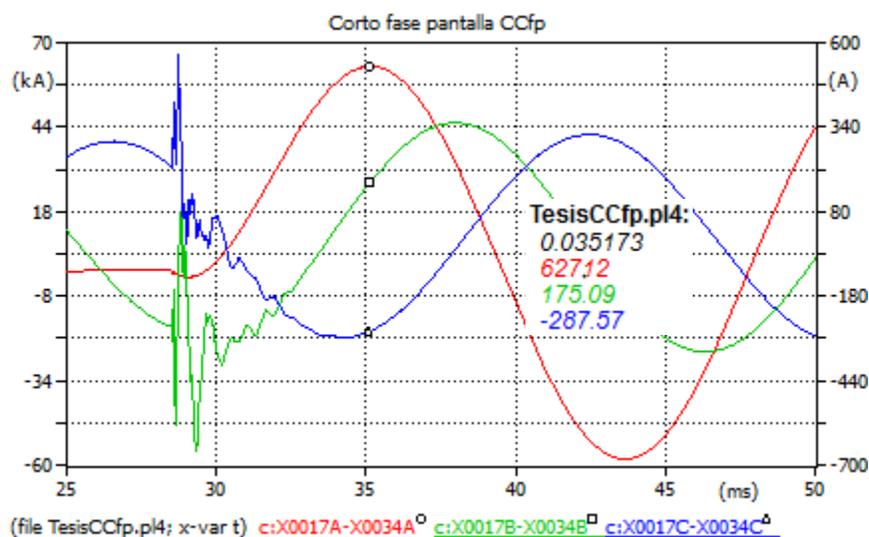


Gráfico 4.28 Corrientes en los terminales de envío bajo cortocircuito de fase-pantalla.

La capacidad de corto circuito entre la fase y la pantalla es casi de 63 kA , este valor es bastante grande y perjudicial para el material conductor. Este tipo de fallas en la práctica son escasas; sin embargo, se emplean protecciones para detectarlas y despejarlas lo más rápido posible. A continuación se presentan las gráficas 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33 que muestran de forma más detallada los efectos del corto circuito bajo estudio.

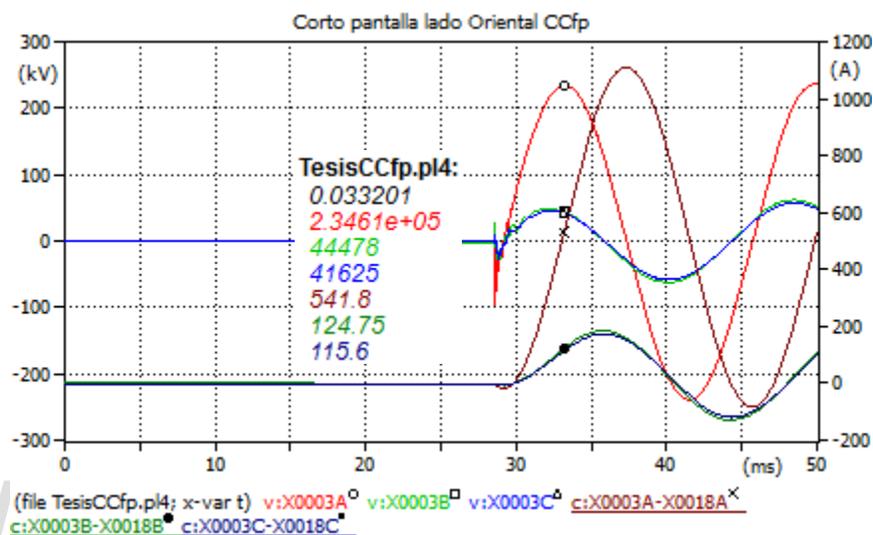
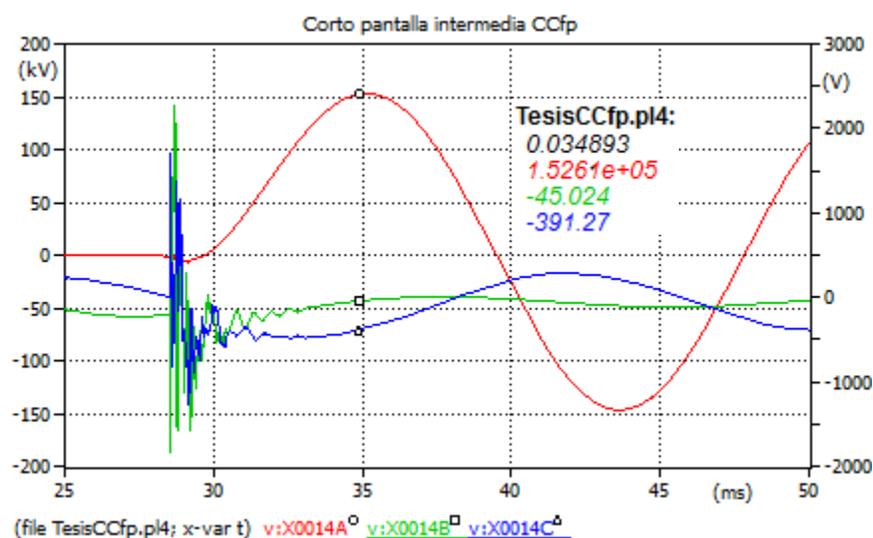


Gráfico 4.29 Voltajes y corrientes de las pantallas en los terminales de envío bajo cortocircuito fase-pantalla.



Gráficos 4.30 Voltajes de las pantallas en el punto intermedio de la ruta del cable bajo cortocircuito fase-pantalla.

En el caso de los apantallamientos, la pantalla fallada alcanza los 234 kV e induce en el caso más desfavorable aproximadamente 200 kV en la pantalla de la fase adyacente. La magnitud del amperaje es relativamente pequeña en los extremos del cable, pero en la sección intermedia de los apantallamientos se encuentra en el orden de los 61 kA , las corrientes muy altas en la pantalla son perjudiciales para el aislamiento por el efecto Joule, el exceso de temperatura acelera el envejecimiento del aislamiento acortando su vida útil.

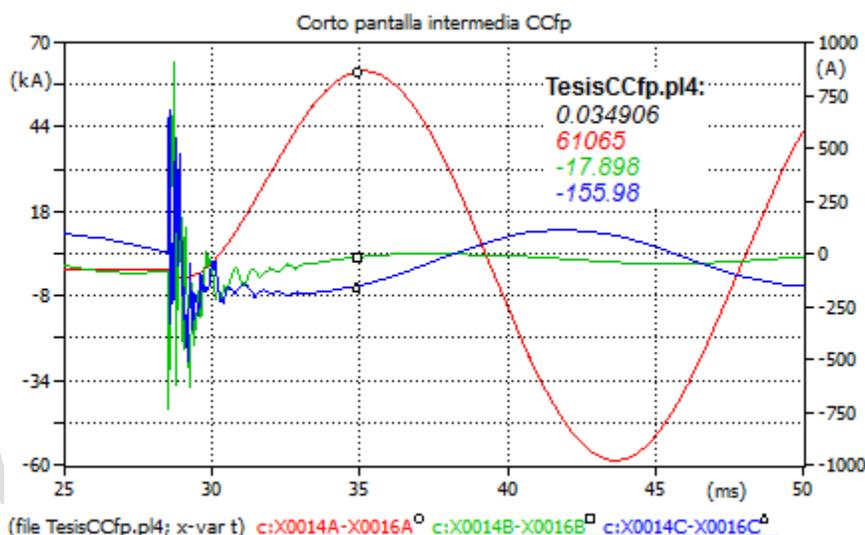


Grafico 4.31 Corrientes de las pantallas en el punto intermedio de la ruta del cable bajo cortocircuito fase-pantalla.

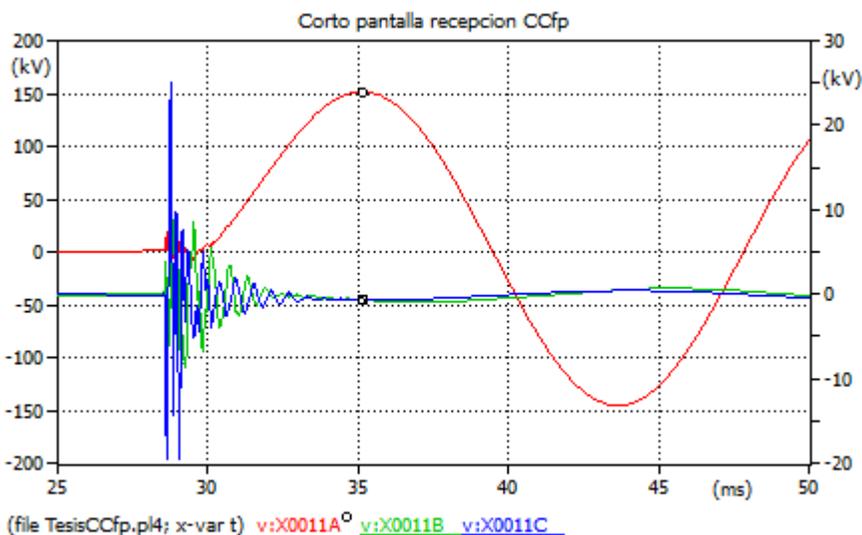


Grafico 4.32 Voltajes de las pantallas en los terminales de recepción bajo cortocircuito fase-pantalla.

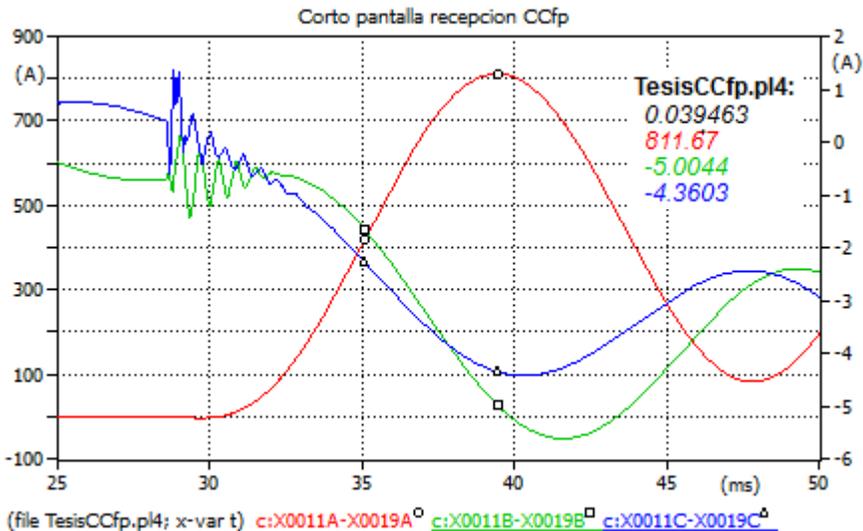


Grafico 4.33 Corrientes de las pantallas en los terminales de recepción bajo cortocircuito fase-pantalla.

Ausencia de trasposición en las pantallas

La trasposición es empleada en cables de potencia tanto en conductores como en sus pantallas a fin de reducir los efectos electromagnéticos asociados al cable. Para verificar la efectividad de esta estrategia en el sistema de cables se simuló el modelo sin ningún tipo de trasposición en las pantallas. En las gráficas 4.34, 4.35 y 4.36 podemos observar la variación de las amplitudes de tensión y corriente bajo esta condición.

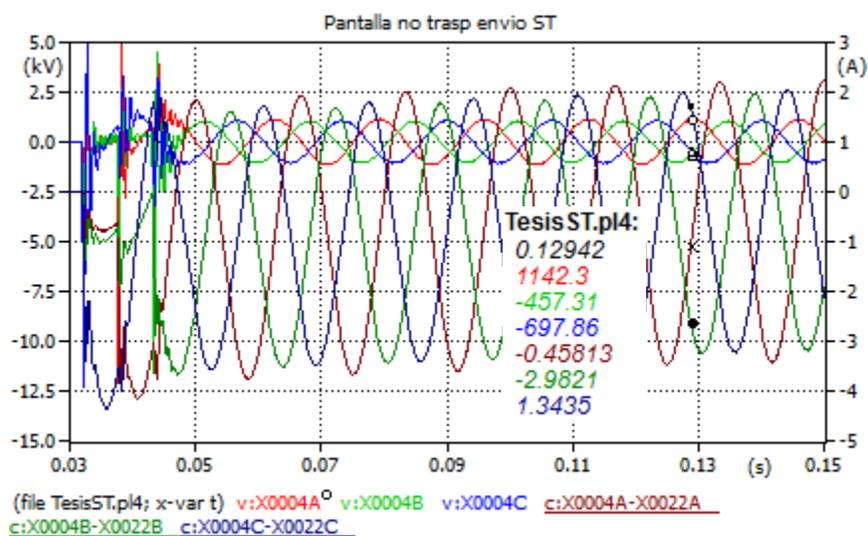


Grafico 4.34 Voltajes y corrientes en las pantallas de envío sin trasposición.

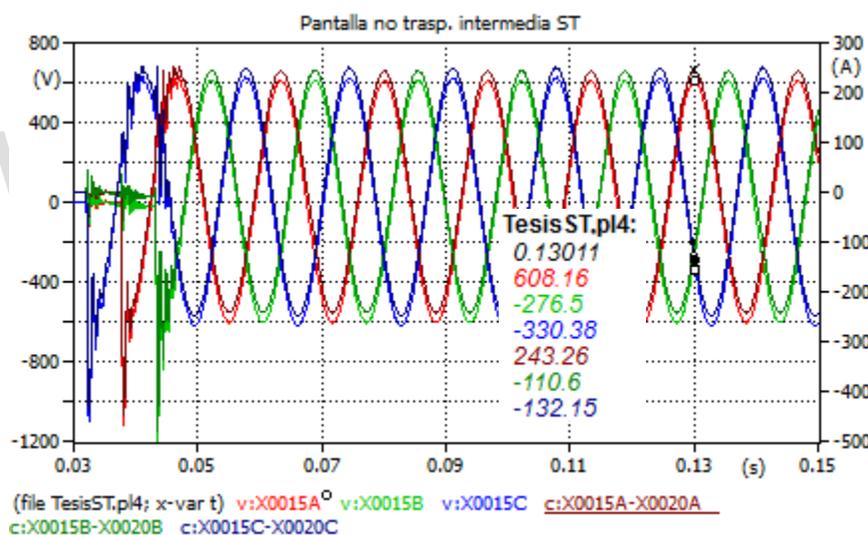


Grafico 4.35 Voltajes y corrientes de las pantallas en el punto intermedio sin trasposición.

Los efectos de la trasposición son bastante apreciables en este caso, tanto la formación de elevados picos de tensión y corriente al conectar la carga nominal al sistema, como la amplitud en régimen permanente de estos parámetros ponen en evidencia el efecto de reducción generado al trasponer el apantallamiento de los cables. El amperaje de las pantallas aumento aproximadamente el doble, mientras que la tensión un poco más del doble, significa que las pérdidas de potencia a lo largo de la ruta del cable aumentarían un poco más del doble. Los

elevados picos de corriente son principalmente perjudiciales para el aislamiento ya que el estrés eléctrico generado por los picos de tensión y adicionalmente el sobrecalentamiento generado por efecto Joule acortan la vida útil de los materiales aislantes, sobre todo si el estrés eléctrico o térmico e incluso ambos a la vez, se producen con frecuencia.

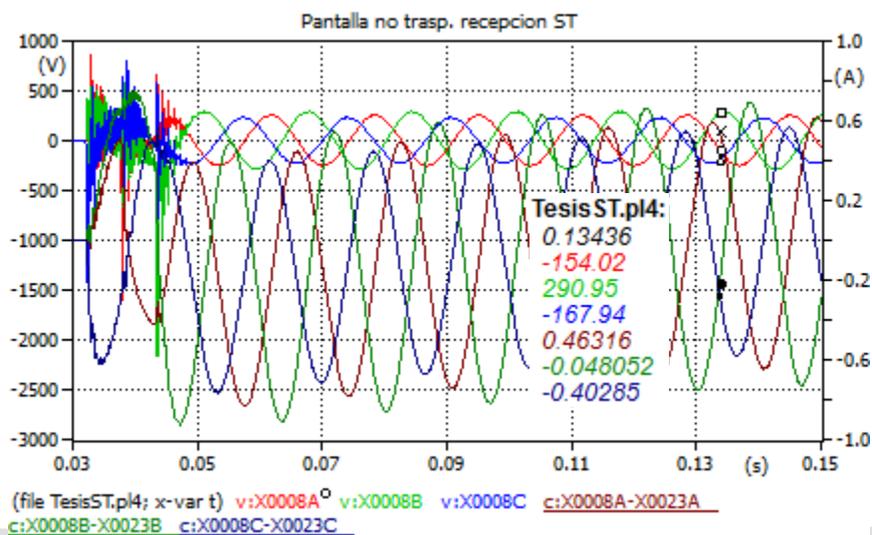


Grafico 4.36 Voltajes y corrientes en las pantallas de recepción sin trasposición.

CAPITULO V

ANÁLISIS Y RESULTADOS

La implementación de un modelo para cables de transmisión submarinos supuso una tarea muy compleja y cuidadosa, de hecho los programas de transitorios electromagnéticos más comerciales no poseen aun una subrutina que permita seleccionar el medio submarino como entorno de simulación, a diferencia de líneas aéreas, cables en entornos aéreos o subterráneos, entre otros. Esta es una de las razones por la cual los trabajos relacionados con el presente trabajo son muy escasos y de accesibilidad limitada; sin embargo, entre los trabajos disponibles existe información relevante para guiar el proceso de modelaje.

Adicionalmente el modelaje de cables de potencia submarinos es similar al modelaje de cables subterráneos, las diferencias más resaltantes son la resistividad y permeabilidad del medio, las amenazas del medio, las características térmicas y las estrategias aplicables en cada caso para contrarrestar corrientes capacitivas, sobretensiones, calentamiento, entre otros.

El cable en si fue el foco de estudio ya que en él se generan los transitorios electromagnéticos. El perfil de tensión del sistema es de 400 kV , los cables diseñados para estos perfiles de tensión se fabrican a pedido y con características únicas por la complejidad que representa el proceso. En consecuencia los cables de A.T. y E.A.T. no poseen hojas de datos estandarizadas que especifiquen los diámetros de las capas, conductividad, permitividad, permeabilidad, entre otros; la información adquirida con

estas características se seleccionó de la hoja de datos de la ABB ya que fue la más completa para cables de 400 kV.

El ATPDraw permitió además calcular los parámetros del cable en base a una subrutina del componente LCC que utiliza los datos geométricos del cable y características eléctricas de los materiales para realizar dicha operación.

Las S/Es conectadas a través del cable se modelaron de forma representativa debido a la falta de información necesaria, para este fin se emplearon datos básicos encontrados en la propuesta de Oliveira, Duarte y Maninat en “*características de diseño de los cables sublacustres a 400 kV en el lago de Maracaibo y sus obras de transmisión asociadas*” que definen la carga nominal del sistema, capacidad de corto circuito y parte de la topología del circuito. El modelado de las S/Es es simple pero permite observar los transitorios electromagnéticos generados en el sistema de cables.

5.1. Validación

Para el proceso de validación se seleccionó el trabajo realizado por Gudmundsdottir Unnur sobre el “*Modelado de largos cables de CA de alto voltaje en sistemas de transmisión*”, principalmente por dos ventajas, la primera es que el trabajo está basado en la validación de modelos para cables de transmisión respaldado por pruebas de campo, y la segunda está relacionada a los cables, a pesar de ser subterráneos poseen el mismo perfil de tensión, tipo de cable similar (XLPE de núcleo simple), longitud del cable similar y están dispuestos en formación horizontal al igual que los cables empleados en el presente trabajo.

Los resultados obtenidos son similares a las simulaciones y mediciones de campo realizadas por Gudmundsdottir, las diferencias encontradas son en su mayoría desplazamientos en el tiempo, estos desplazamientos están relacionados a dos factores de peso: Primero el modelo empleado por Gudmundsdottir es “Dependiente

de la frecuencia en el dominio de la fase” en el software PSCAD, mientras que el empleado en el ATPDraw es el de “J. Martí”, ambos modelos están basados en ondas viajeras pero difieren en la forma de procesar y calcular los parámetros. Este hecho ocasiona que las respuestas tengan ligeros desplazamientos en el tiempo al comprarlas, adicionalmente los tiempos de cálculo del programa influyen en la respuesta debido a la velocidad con que se presentan los cambios en las señales. Por último los programas empleados en cada caso, PSCAD y ATPDraw difieren en la información requerida, esto significa que ambos programas toman en consideración algunos datos que el otro no y por ende termina generando discrepancias en los resultados.

En cuanto a la amplitud, los resultados son idénticos exceptuando el caso las mediciones de campo en donde el pulso registrado es de menor amplitud e introduce ruido a diferencia del pulso ideal empleado en la simulación.

5.2. Simulaciones

El modelo de cable empleado representa un circuito de los dos propuestos por Oliveira, Duarte y Maninat en “*características de diseño de los cables sublacustres a 400 kV en el lago de Maracaibo y sus obras de transmisión asociadas*”, esto reduce la capacidad de transmisión a la mitad y en consecuencia se trabajó con la mitad de la potencia nominal (434 MVA). Para observar los efectos que provocan los transitorios electromagnéticos se seleccionaron los casos de estudio más comunes analizados en otros trabajos de transitorios electromagnéticos.

En régimen permanente se confirmó la condición de carga nominal pudiendo observar la diferencia entre la corriente enviada y la corriente recibida debido principalmente a las pérdidas de potencia a lo largo del cable, el efecto capacitivo del

cable es la razón principal de pérdida ya que induce corrientes capacitivas en el apantallamiento generando así pérdidas de potencia tanto reactivas como activas.

En el caso de la descarga atmosférica sobre una fase, se observó como se inducen tensiones y corrientes sobre las fases adyacentes y en los apantallamientos. En las fases los efectos son leves y la energía de la descarga se disipa en poco tiempo sin presentar picos muy elevados de tensión o corriente excepto en la fase afectada, la forma en la que se disipa la energía de la descarga está relacionada con el apantallamiento, su configuración (trasposición), la separación entre las fases y las conexiones a tierra, adicionalmente las reactancias de compensación contribuyen a disipar la energía sin que se produzcan grandes picos de tensión o corriente.

En las pantallas se inducen tensiones de aproximadamente el 70% de la descarga en el punto de impacto, este nivel de tensión es bastante elevado sobre todo si la descarga es de gran magnitud. Por otro lado las corrientes que circulan en las pantallas son mayores en el punto intermedio y esto se debe a la forma en la que se distribuye la corriente de carga de la pantalla según la cantidad, capacidad y ubicación de las reactancias.

La cargabilidad de los cables se refiere a la capacidad de carga de los mismos y está dada por la energía que puede almacenar el cable en forma de campos electromagnéticos. Los efectos en las fases son relativamente bajos alcanzando picos de corriente que doblan el valor nominal. En las pantallas se producen picos de tensión menores a los 8 kV, este nivel de tensión es pequeño comparado con la tensión nominal del cable, pero es perjudicial para el aislamiento si se produce con frecuencia.

El amperaje en las pantallas es de 96 A aproximadamente en el punto intermedio con el cable en vacío. Estos valores pueden dar una idea sobre la capacidad de carga de la línea, pero un cálculo específico no se puede realizar debido a que las condiciones de tensión y corriente en las pantallas varían a lo largo de las mismas. Es

por ello que el programa posee una subrutina para calcular el consumo reactivo del cable.

Para las maniobras de carga se emplearon interruptores independientes por fase, cada carga se conectó en un instante de tiempo diferente. Los efectos en los conductores de fase son mínimos principalmente por el uso de interruptores de potencia ideales ya que en el ATPDraw no hay componentes que simulen los efectos de un interruptor real.

En los extremos de las pantallas aterrizadas se puede observar que al momento de conectar carga en el sistema se producen picos de tensión por debajo de los 2 kV , nuevamente estos picos son pequeños comparados con la tensión nominal del cable pero, si ocurren con mucha frecuencia deterioran el aislamiento acortando su vida útil. En el punto de aterrizaje intermedio circulan corrientes de amplitud considerable, son del orden del 30% de la corriente nominal de las fases, la magnitud de esta corriente está relacionada con la ausencia de reactancias inductivas conectadas en este punto, en la bibliografía citada en este trabajo no se encontró referencia al uso de reactancias submarinas, por el contrario en los proyectos de aplicación submarina se instalaron reactancias en los tramos subterráneos y subestaciones. Estas corrientes pueden ser perjudiciales si el calentamiento por efecto Joule incrementa la temperatura del cable más de lo debido, de lo contrario se traduce solo en pérdidas de potencia.

En el caso de corto circuito monofásico a tierra se obtuvo una corriente de 162 kA en la fase afectada. En el resto de las fases se generan perturbaciones razonables que no requieren mayor atención.

El apantallamiento por otro lado, se ve afectado considerablemente en los puntos de envío (lado oriental) e intermedio. En el punto de envío se tienen tensiones de hasta 50 kV que representan el 12,5% de la tensión nominal del cable, picos de tensión de esta magnitud son altamente perjudiciales para el aislamiento del cable y los elementos conectados a la pantalla. Por otro lado los picos de corriente en el punto

intermedio se aproximan a 1.5 kA , es importante que estos picos sean de muy corta duración debido a los problemas que causarían si incrementan demasiado la temperatura por tratarse de aislamiento XLPE, al exceder la temperatura máxima de este material termina destruyéndose por pirolisis en lugar de deformarse por derretimiento.

Las estrategias de reducción de todos estos efectos transitorios son principalmente las trasposiciones tanto de conductores como de los apantallamientos, la compensación reactiva y los limitadores de sobretensión. En las simulaciones realizadas fueron aplicados los métodos de trasposición de pantallas y compensación reactiva.

Para demostrar sus efectos se simuló el mismo circuito pero eliminando las trasposiciones entre las pantallas, en este caso los resultados arrojaron un aumento del doble del amperaje en las pantallas y un poco más del doble en las tensiones, es evidente que las reducciones de la trasposición son considerables y permiten mayor tolerancia a los fenómenos electromagnéticos tanto en el cable como en los elementos que componen el sistema de transmisión.

CONCLUSIONES

Siguiendo las líneas de acción propias de una metodología de investigación de carácter combinada, los distintos enfoques teóricos que respaldaron el conocimiento de los “Transitorios Electromagnéticos” en sistemas de cables de potencia submarinos y de acuerdo resultados obtenidos en las simulaciones del software ATPDraw comparado con otros autores, se concluye:

Que los objetivos de la investigación se cumplieron por cuanto se estableció y estudio un modelo para cables de potencia sublacustre a $400kV$ de siete capas de tipo extruido (XLPE), en el cruce que interconecta las subestaciones El Tablazo-Cuatricentenario mediante el Modelo de J. Martí, enfocado en la correcta parametrización del cable y el establecimiento de pruebas transitorias en esquemas circuitales de potencia.

En el primer caso se reprodujo el modelo de cable de potencia subterráneo de Gudmundsdottir U. similar al caso bajo estudio, el trabajo de Gudmundsdottir está basado en la validación de modelos para cables de potencia subterráneos de AT mediante metodologías teórico-prácticas y de campo, empleando pulsos de $5 kV$ y $1.2 \times 50 \mu s$ a través de una fase en el sistema de cables de potencia aislado y aterrizado adecuadamente para obtener respuestas apreciables en las otras fases.

El resultado de la validación derivó en la comparación del modelo de J. Martí empleado en el ATPDraw, el Modelo dependiente de la frecuencia en el dominio de la fase empleado en el PSCAD y las mediciones de campo. Entre ambos programas se compararon múltiples respuestas encontrando ligeras discrepancias propias casi en su

totalidad de las diferencias entre los modelos y programas respectivamente. Por otro lado las mediciones de campo resultaron mucho más similares con pequeñas discrepancias en amplitud y fase propias de la fuente empleada por Gudmundsdottir U. y la exactitud de los parámetros que describen el comportamiento eléctrico del cable dependientes de del fabricante en sí. Por ende se consideró válido el modelo desarrollado y aplicable a otros sistemas de cables similares realizando los ajustes correspondientes.

En el segundo caso se implementó el modelo bajo los requerimientos necesarios realizando los ajustes pertinentes, la topología del circuito fue adaptada a partir de trabajos realizados por otros autores que exponen estrategias relevantes para optimizar los sistemas de cables de potencia. De forma similar se plantearon los casos más comunes para estudios transitorios: descargas atmosféricas, maniobras de carga, corto circuitos, entre otros. Esto permitió validar estrategias de reducción de alteraciones electromagnéticas basándose en la disminución de tensiones y corrientes inducidas de aproximadamente el 50%, a la vez que observan puntos clave como el de los apantallamientos en los terminales de envío y el punto intermedio de aterrizaje de las pantallas, por presentar tensiones y corrientes más elevadas respectivamente.

Las soluciones encontradas permiten establecer un procedimiento teórico-práctico para desarrollar el modelaje apropiado de sistemas de cables de potencia de AT en el ATPDraw, a partir de los parámetros eléctricos del cable y las características de los fenómenos electromagnéticos a simular. Los fenómenos electromagnéticos son en concreto la interacción de campos eléctricos y magnéticos, estas interacciones derivan en alteraciones de tensión y corriente en un área determinada a su alrededor; por lo tanto, se encuentra válido y útil el procedimiento desarrollado en este trabajo de grado siempre y cuando los niveles de ruido (interferencias electromagnéticas) sean suficientemente pequeños como para considerarlos despreciables.

RECOMENDACIONES

Al Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes, continuar estudiando el modelaje de cables de potencia submarinos introduciendo modelos de las terminaciones y juntas de transición, tanto de fábrica como de instalación en el conductor, apantallamiento y los puntos de aterrizaje, ya que en el presente trabajo se consideraron prácticamente ideales representados por la inductancia por metro de cable. Esto permitiría definir un modelo más preciso de cable submarino.

En el futuro implementar un software de simulación con capacidad de parametrizar entornos submarinos o subacuáticos en general, para observar diferencias en el comportamiento de los fenómenos simulados, ya que en el ATPDraw e incluso otros programas de transitorios no existe esta posibilidad.

Utilizar modelos de líneas más avanzados que el de J. Martí con el fin ampliar los estudios de transitorios que se pueden realizar como transitorios de bajas frecuencias y sistemas de transmisión con alta asimetría en los que el modelo de J. Martí se vuelve inexacto e impreciso.

Desde el punto de vista técnico, realizar pruebas de campo en sistemas de cables de AT para compararlos con los resultados de los modelos desarrollados.

Emplear un software de simulación que permita estudiar el estrés térmico y eléctrico ya que ambos son determinantes en la vida útil del cable de potencia, porque contribuyen al acelerado envejecimiento del aislamiento del cable.

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABB. (2010). *XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems – User’s Guide*. Suecia: 5ª Rev.
- Barbosa, Z. (2011). Coordinacion de Trabajo de Grado (CTG). *Normas de trabajo de grado* . Merida, Universidad de Los Andes. Facultad de Ingenieria, Escuela de Ingenieria Electrica, Venezuela: CTG, ULA.
- Barbosa, Z. (2011). Coordinacion de Trabajo de Grado (CTG). *Manual ilustrado para la elaboración del trabajo de grado*. Merida, Universidad de Los Andes. Facultad de Ingenieria, Escuela de Ingenieria Electrica, Venezuela: CTG, ULA.
- Coordinacion de Trabajos de Grado (CTG). (26 de Febrero de 2007). *REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA*. Merida, Venezuela: CTG, ULA.
- Faria Da Silva, F. M., & Leth Bak, C. (2010). *ASSESSMENT OF 42 Km, 150 kV AC SUBMARINE CABLE*. Department of energy Technology, Aalborg University: Electrical Energy Engineering.
- Gudmundsdottir, U. S. (2010). *Modelling of long High Voltage AC Cables in the Transmission System*. Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Gudmundsdottir , U. S., Leth Bak, C., Wiechowski, W., Søgaaard, K., & Knardrupgård, M. R. (2009). *Measurements for validation of high voltage underground cable modelling*. International Conference on Power Systems, Kyoto, Japon.

International Electrotechnical Commission. (Diciembre de 1996). International Standard. *IEC 60071-2*. Suiza: ed 3.0.

International Electrotechnical Commission. (2001). International Standard. *IEC 60287-2-1*. Suiza: ed 1.1.

International Electrotechnical Commission. (Noviembre de 2004). International Standard. *IEC 60228*. Suiza.

International Electrotechnical Commission. (2006). International Standard . *IEC 60287-1-1*. Suiza: ed 2.0.

Oliveira , J., Duarte, M., & Maninat, P. (Junio de 2009). *CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE LOS CABLES SUBLACUSTRES A 400 KV EN EL LAGO DE MARACAIBO Y SUS OBRAS DE TRANSMISIÓN ASOCIADAS*. Venezuela: II Congreso Venezolano de Redes y Energia Electrica.

Prikler, L., & Høidalen, H. K. (2009). *ATPDraw User's Manual version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual*. Noruega: University of Technology Trondheim.

Protecciones eléctricas. (23 de abril de 2017). *YouTube*. Recuperado el 3 de Octubre de 2017, de <https://www.youtube.com/channel/UCq5-tekFdoGgma9pKkQ-qmA/videos>

Ramirez Benitez, A. (2016). Análisis de Transitorios Electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia. *Power Systems and Quality*.

Restrepo, L., Caicedo Delgado, G., & Castro Aranda, F. (4 de Julio de 2008). *Modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia*. Cali, Colombia: Escuela de Ingeniería Eléctrica y electrónica, Universidad del Valle.

Viqueira, J. (1993). *Redes Electricas*. Mexico, Mexico: Ediciones Alfaomega S.A.

Worzyk, T. (2009). *Submarine Power Cables*. Berlín: SPRINGER.