



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
MERIDA - VENEZUELA**

**ESTUDIO DE LA PROPAGACION DE DESCARGAS
PARCIALES EN CABLES DE POTENCIA**

www.bdigital.uia.ve

AUTOR: Br. Edgart Miguel Nava Rojas

Mérida, 8 de Noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
MÉRIDA - VENEZUELA

ESTUDIO DE LA PROPAGACION DE DESCARGAS PARCIALES EN CABLES DE POTENCIA

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

AUTOR: Br. Edgart Miguel Nava Rojas.

TUTOR: Jean Carlos Hernández Mejía. Ph.D.

TUTOR INDUSTRIAL: Fernando Elizarraraz Rivera M. Sc.

Mérida, 8 de Noviembre de 2017

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA
MÉRIDA – VENEZUELA**

**ESTUDIO DE LA PROPAGACION DE DESCARGAS
PARCIALES EN CABLES DE POTENCIA**

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

AUTOR: Br. Edgart Miguel Nava Rojas.

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. Ernesto Mora
Jurado

Prof. Ricardo Stephens
Jurado

Prof. Jean Carlos Hernández Mejía
Tutor

DEDICATORIA

Principalmente a Dios y la virgen de Guadalupe y la Chinita por darme fuerzas, paciencia, amor y llenarme de fe en todo momento de mi carrera para atravesar obstáculos que me ayudaron a tener una mejor formación como persona y profesionalmente.

A mi Amada Madre Delsy Rojas, por ser fuente de mi inspiración para alcanzar cada meta, por estar a mi lado como amiga para darme consejos oportunos que me han ayudado a fortalecer los valores que me ha infundido, en pocas palabras eres un todo para mí, este reto logrado es nuestro, te amo con toda mi alma.

A mi Hermano e hijo, que ha sabido darme grandes consejos, su apoyo incondicional ha sido de gran importancia para salir adelante, te llevo siempre en mi corazón te amo.

A mis Abuelos, por ser otros padres en mi vida darme su apoyo incondicional y amor en cada etapa de mi vida.

A mi Gran Amor, Fiorella Betancourt por ser paciente y darme todo su cariño para lograr avanzar en los momentos importantes de la carrera, te amo.

.

A mi Padrino, Ousama Mougawiche por darme consejos que me han ayudado para lograr esta meta, eternamente agradecido.

A mi prima hermana Génesis Nava por ser una gran fuente de apoyo en cada momento de mi vida y ayudarme a dar pasos certeros.

A mis amigos por estar siempre el apoyo, compañía y ayuda dada en los momentos más difíciles de mi carrera.

A los profesores y personal administrativo de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes por su tiempo dedicado para mí formación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a la Virgen de Guadalupe y la Virgen de la Chinita de por haberme dado la fortaleza necesaria para llegar a esta etapa de mi vida, darme la oportunidad de llegar a un nuevo país para mejorar mi formación dándome el aliento y la compañía en todo momento para avanzar.

A mi Mamá y hermano, por ser mi fuente de motivación, perseverancia, apoyo, consejos, amor, amistad y ayuda dada en todo momento para mi formación profesional y personal.

A mi Tío Jesús Rojas por el apoyo como padrino y padre, en ser un ejemplo a seguir en todo momento.

A mis tíos que me han cuidado desde el cielo y han estado en todo momento conmigo Miguel Rojas y Rubén Nava.

A la Ilustre Universidad de Los Andes y la empresa LAPEM agradecido por su formación en mi etapa profesional, ayudándome en la capacitación técnica y académica en la formación de mi carrera.

A mi tutor industrial Fernando Elizarraraz Rivera, agradecido por tiempo prestado para la asesoría en la elaboración de esta investigación.

A mi tutor académico Jean Carlos Hernández Mejía, gracias por la oportunidad de ayudarme a crecer personal y profesionalmente en la empresa donde desempeñe las pasantías en todo el periodo de pasantías y conocimiento impartido en la universidad.

A los Ingenieros, personal técnico y administrativo por el apoyo dado en toda mi estancia en la oficina de transmisión.

A los profesores y personal administrativo de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes por su tiempo dedicado para mí formación

Edgart Miguel Nava Rojas, *Estudio de “Propagación de descargas parciales” en cables de potencia*, Universidad de Los Andes. Tutor: Prof. Jean Carlos Hernández Mejía. Noviembre 2017.

RESUMEN

Un gran número de fallas en sistemas de cables subterráneos son asociadas a una deficiente instalación de empalmes y terminales, estos trabajos pueden producir defectos o deterioros con la aparición de descargas parciales, o en condiciones de sobrecalentamiento en su vida operativa, que con el tiempo puede llevarlo a una falla completa. Por esto, es importante conocer de forma clara, conceptos que puedan ser aplicados en campo para la localización de fallas en el diagnóstico, con base en la propagación de onda viajera en un sistema de cable de potencia en alta tensión. En el presente trabajo para conocer el contexto de la problemática planteada, de medición de descargas parciales en sistemas de cables de alta tensión con aislamiento de polietileno reticulado y la propagación de onda viajera en estos sistemas, se realizó una investigación de estado del arte, en el que se observa que, el modelo de J-Marti es el más adecuado para desarrollar un modelo de respuesta transitoria de un sistema completo de cable subterráneo, con ayuda del programa de análisis de transitorios electromagnéticos. Con datos reales de dos sistemas de cables en 115 kV y 15 kV, se desarrollaron casos de estudio con modelo básico y J-Marti de una línea de transmisión para realizar comparaciones entre ambos, partiendo de un caso base considerando solo un cable aislado, con el fin de identificar aspectos de onda reflejada, refractada y velocidad de propagación, en condiciones de en circuito abierto y corto circuito en su terminal. Por medio de los resultados obtenidos se realizaron estudios adicionales con diferentes escenarios y condiciones, tales como: incluir terminales, empalmes y un modelo de descarga disruptiva en aire (basado en la ley de Paschen), con el propósito de observar cómo se propaga, en mediciones de campo. En el laboratorio se implementa un circuito de medición para observar esta característica de propagación y respuesta transitoria (propagación de pulsos) en un sistema de cable de potencia en 15 kV. Los resultados obtenidos en las mediciones, permitieron validar la modelación, confirmando por medio de la velocidad de propagación medida y la plena identificación de las discontinuidades que el sistema bajo prueba tenía, de acuerdo a lo modelado en el ATP. Se presenta el caso de medición con el método directo de un sistema de cable de potencia, dos terminales y un empalme para un sistema de 115 kV, se muestran los patrones de medición de descargas parciales, pero se observa que no son suficientes para identificar cuál elemento del sistema bajo prueba, que contiene la falla, ya que no se contaba con las herramientas necesarias para el análisis de la propagación para complementar el diagnóstico.

Descriptores: Cables de potencia, Propagación de descargas parciales, Descargas parciales, Modelos de líneas, TDR, Método Directo, ATP/EMTP.

INDICE GENERAL

	APROBACION.....	ii
	DEDICATORIA.....	iii
	AGRADECIMIENTO.....	iv
	RESUMEN.....	v
	INDICE GENERAL.....	vi
	INDICE DE FIGURAS.....	ix
	INDICE DE TABLAS.....	x
	INDICE DE GRAFICOS.....	xi
	INTRODUCCION.....	12
CAPITULO		pp.
1.	MARCO REFERENCIAL.....	4
1.1	Planteamiento del problema.....	4
1.2	Justificación de la investigación.....	6
1.3	Objetivos de la investigación.....	6
	1.3.1 Objetivo general.....	6
	1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4	Alcance y limitaciones.....	7
1.5	Metodología.....	8
1.6	SUMARIO.....	9
2.	MARCO TEORICO DE SISTEMA ELECTRICO DE CABLE DE POTENCIA.....	10
2.1	Definición de cables de potencia.....	10
	2.1.1. Estructura de cables de potencia.....	11
	2.1.1.1 Núcleo del conductor.....	11
	2.1.1.2 Pantalla semiconductor del conductor.....	12
	2.1.1.3 Aislamiento principal.....	12
	2.1.1.4 Chaqueta semi conductora del aislamiento del conductor.....	12
	2.1.1.5 Pantalla metálica.....	12
	2.1.1.6 Chaqueta externa.....	13
2.2	Características de los materiales de aislamiento.....	13
	2.2.1 Constante de aislamiento.....	13
	2.2.2 Permitividad eléctrica.....	13
	2.2.3 Capacitancia.....	14
	2.2.4 Factor de pérdidas o tangente delta ($\tan \delta$).....	14
	2.2.5 Temperatura de operación de sobre carga y corto circuito.....	14
2.3	Tipos de aislamiento de cables de potencia.....	15
	2.3.1 Cloruro de polivinilo (PVC).....	15
	2.3.2 Goma etileno propileno (EPR).....	15
	2.3.3 Polietileno reticulado (XLPE).....	15
2.4	Definición de descargas parciales.....	16
	2.4.1 Efectos que causan las descargas parciales.....	18
	2.4.2 Ubicación de las descargas parciales en una onda sinusoidal y unidad de medida.....	20

2.4.3	Medición de descargas parciales	21
2.4.3.1	Método eléctrico.....	22
2.5	Definición y aplicación del TDR en la medición de la propagación de ondas electromagnéticas.....	25
2.6	Definición de ondas	27
2.6.1	Características de las ondas electromagnéticas.....	28
2.6.1.1	Velocidad de onda.....	28
2.6.1.2	Frecuencia y longitud de onda.....	28
2.7	Clasificación de líneas de transmisión.....	29
2.8	Circuito básico de la línea de transmisión.....	30
2.8.1	Impedancia característica.....	33
2.9	Modelo J. Martí.....	36
2.9.1	Fenómeno físico.....	37
2.9.2	Desarrollo matemático del modelo.....	39
2.9.3	Síntesis de impedancia equivalente.....	40
2.9.4	Función de propagación y convolución.....	42
2.10	SUMARIO.....	43
3.	PROPAGACION DE LAS ONDAS DE DESCARGAS PARCIALES EN CABLES DE POTENCIA.....	44
3.1	Origen de la propagación de onda de descargas parciales.....	44
3.2	Parámetros para el estudio de propagación de descargas parciales en cables de potencia.....	45
3.3	Análisis de medición de descargas parciales con método UHF de acuerdo a norma IEC 60270.....	48
3.5	SUMARIO.....	49
4.	MODELACION DE CABLE DE SUBTERRANEO PARA PROPAGACION DE ONDAS A TRAVES DEL SOFTWARE ATP/EMTP.....	50
4.1	Descripción del programa.....	50
4.2	Modelos de líneas.....	51
4.2.1	Modelo básico.....	51
4.2.2	Modelo J. Martí.....	52
4.3	Funcionamiento interno de la programación de ATP/EMTP, para soluciones graficas de los modelos de cables de potencia.....	52
4.4	Elementos de una línea de transmisión LCC en ATP/EMTP.....	54
4.4.1	Parámetros de simulación para modelación de cable subterráneo.....	55
4.5	Descripción y geometría de los parámetros del cable.....	56
4.6	Verificación de la corrida del programa para cable de 15 kV.....	59
4.7	Verificación de la corrida del programa para cable de 115 kV.....	60
4.8	Casos de análisis para modelación con circuito sin empalme y terminales..	63
4.8.1	Caso 1 circuito acoplado.....	63
4.8.2	Caso 2 corto circuito.....	65
4.8.3	Caso 3 circuito abierto.....	67
4.9	Casos para sistema de cable con empalmes y terminales.....	68
4.9.1	Comparación de modelo J. Martí y Básico.....	69

4.9.2	Caso 1 para sistema de cable con empalmes y terminales.....	69
4.9.3	Caso 2 para sistema de cable con empalmes y terminales.....	71
4.9.4	Caso 3 para sistema de cable con empalmes y terminales.....	72
4.10	modelación de descargas parciales en cable de potencia de media y alta tensión con pulso.....	73
4.11	Modelación de descargas parciales en cable de potencia de media y alta tensión con pulso.....	75
4.12	Mediciones de propagación de pulsos en cable LATINCASA de 15 kV...	79
4.13	Medición de descargas parciales en cable GENERAL CABLE de 115 kV.	81
4.14	SUMARIO.....	85
	CONCLUSIONES.....	86
	RECOMENDACIONES.....	88
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

www.bdigital.ula.ve

INDICE DE FIGURAS

Figura		pp.
2.1	Partes de un cable (Grupo Condumex).....	11
2.2	Tipo de cableado (CENTELSA,2008).....	12
2.3	Modelo de perdidas sobre el dieléctrico.....	14
2.4	Ramificaciones de una descarga parcial.....	17
2.5	Modelo de circuito de la cavidad de aire en el aislamiento.....	17
2.6	Grafica de descargas parciales.....	20
2.7	Corriente de descargas parciales.....	21
2.8	Circuito de medición.....	22
2.9	Esquema de propagación de una descarga parcial medida con TDR (Inducor, 2010).....	24
2.10	Partes del empalme.....	27
2.11	Circuito equivalente de longitud diferencial de una LT de dos conductores. (Cheng, 1997).....	30
2.12	Onda incidente vista desde el generador.....	32
2.13	Onda reflejada vista desde el generador.....	33
2.14	Funciones de peso. (Martí, 1982).....	37
2.15	Interpretación física de la propagación en la función $a_1(t)$. (Martí, 1982). ..	38
2.16	Funciones de propagación $a_1(t)$ y $a_2(t)$ en el modelo de J. Martí. (Martí, 1982).....	38
2.17	Modelo de línea de J. Martí. (Martí, 1982).....	40
2.18	Circuito equivalente para síntesis de Z_{eq} . (Martí, 1982).....	41
3.1	Sistema de medición para sistema de cable de potencia sin anomalías (ideal).....	46
3.2	Diagrama de celosía de Bewley para sistema de potencia sin anomalías (ideal).....	46
3.3	Sistema de medición para sistema de cable de potencia real.....	47
3.4	Diagrama de celosía de Bewley para sistema de potencia con empalmes y terminales.....	47
3.5	Sistema de medición de propagación de pulsos de descargas parciales.....	48
3.6	Efectos de descargas parciales en sistema de cable de potencia.....	49
4.1	Modelo Básico o de Clarke con parámetros para línea monofásica transpuesta.....	51
4.2	Modelo J. Martí, con parámetros para línea monofásica.....	52
4.3	Diagrama de flujo de funcionamiento interno de ATP/EMTP en la modelación de la propagación de ondas en el sistema de cables de potencia.....	53
4.4		
4.5	Esquemas de cables subterráneos Latincasa 15 kV y General Cable 115 kV.....	57
4.6	Geometría de los radios tomados para modelado de cable monofásico.....	59

INDICE DE TABLAS

Tabla	pp.	
2.1	Permitividades de materiales aislantes (Inducor, 2010).....	19
2.2	Valores de coeficiente de refracción y reflexión para distintos casos.....	35
4.1	Parámetros para definir cables compactos.....	51
4.2	Parámetros para definir datos de la geométrica del conductor.....	55
4.3	Parámetros para definir ajustes de tiempo de integración para la solución numérica y grafica de la simulación.....	56
4.4	Características generales del cable Latincasa 15 kV y General Cable 115 kV.....	57
4.5	Parámetros de la red para modelación del cable de 15 kV y 115 kV.....	58
4.6	Parámetros de la geometría del conductor para modelación del cable 15 kV	58
4.7	Parámetros de la geometría del conductor para modelación del cable 115 kV	58
4.8	Característica del viaje de onda caso 1 para cable de 15 kV.....	65
4.9	Característica del viaje de onda caso 1 para cable de 115 kV.....	65
4.10	Característica del viaje de onda caso 2 para cable de 15 kV.....	66
4.11	Característica del viaje de onda caso 2 para cable de 115 kV.....	66
4.12	Característica del viaje de onda caso 3 para cable de 15 kV.....	67
4.13	Característica del viaje de onda caso 3 para cable de 115 kV.....	67
4.14	Característica del viaje de onda caso 1 para cable de 15 kV.....	70
4.15	Característica del viaje de onda caso 1 para cable de 115 kV.....	70
4.16	Característica del viaje de onda caso 2 para cable de 15 kV.....	71
4.17	Característica del viaje de onda caso 2 para cable de 115 kV.....	71
4.18	Característica del viaje de onda caso 3 para cable de 15 kV.....	72
4.19	Característica del viaje de onda caso 3 para cable de 115 kV.....	72
4.20	Características del pulso de una descarga parcial en cable de 15 kV.....	74
4.21	Características del pulso de una descarga parcial en cable de 115 kV.....	74
4.22	Características del pulso de una descarga parcial en cable de 15 kV.....	76
4.23	Características del pulso de una descarga parcial en cable de 115 kV.....	76
4.24	Resultados de prueba de descargas parciales en cable de 115 kV.....	84

INDICE DE GRAFICOS

Tabla	pp.	
4.1	Modelación del circuito sin empalmes y terminales.....	63
4.2	Pulso de entrada en el sistema sin empalmes.....	64
4.3	Viaje del pulso para caso 1 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente	64
4.4	Viaje del pulso para caso 2 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente	65
4.5	Viaje del pulso para caso 3 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente	66
4.6	Modelación del circuito con empalmes y terminales.....	68
4.7	Espectro de propagación de onda con un sistema de empalmes y terminales en cables de 15 y 115 kV.....	68
4.8	Viaje del pulso inicial en su primer retorno para modelo J. Martí y Básico.....	69
4.9	Viaje del pulso para caso 1 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente	70
4.10	Viaje del pulso para caso 1 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente	71
4.11	Viaje del pulso para caso 1 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente	72
4.12	Modelo de descargas parciales en sistema de cable de potencia.....	73
4.13	Descarga parcial ocasionada a 340 metros de la línea.....	73
4.14	Distorsión del pulso en falla por descarga parcial en el cable de potencia de 15 kV y 115 kV.....	74
4.15	Respuesta del sistema con respecto a la tensión para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, con fase de 90°, visto desde la resistencia.....	75
4.16	Distorsión del pulso final debido a falla en el sistema por descarga parcial en el cable de potencia de 15 kV y 115 kV.....	76
4.17	Respuesta del sistema con respecto a la tensión para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, con fase de 90°, visto desde el capacitor.....	77
4.18	Carga del capacitor con nivel de tensión y corriente para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, visto desde el interruptor.....	78
4.19	Respuesta del sistema con respecto a la tensión y corriente para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, visto desde el interruptor.....	78
4.20	Sistema de medición en campo para propagación de pulsos en cable latincasa 15 kV.....	79
4.21	Sistema de medición de cable de 15 kV, método directo.....	79
4.22	Medición de campo cable latincasa 15 kV, con sistema en circuito abierto.....	80
4.23	Medición de campo cable latincasa 15 kV, sistema con carga.....	80
4.24	Medición de campo cable latincasa 15 kV, con sistema en corto circuito.	81
4.25	Ruido de fondo y medición de descargas parciales a 66 kV, etapa 1.....	83
4.26	Montaje de medición de cable de 115 V General Cable.....	83
4.27	Medición de descargas parciales a 128 kV, etapa 5.....	84

INTRODUCCION

Los cables son un elemento muy importante para transportar la energía en el sistema eléctrico, ya que su continuidad tiene una dependencia del funcionamiento del servicio, tanto en sectores industriales como comerciales siempre estarán expuestos a fallas, es decir es imposible evitar que se produzcan fallas de diferentes tipos. Por lo antes expuesto existe una gran motivación en el análisis y desarrollo de métodos para detectar y localizar las posibles fallas que puede tener un cable antes de que ocurra el evento de falla, estas pueden ayudar a el remplazo de la línea, tramos o elementos que conforman su trayectoria como empalmes y terminales.

Observando la mayoría de los cables de potencia están constituidos por capas de aislamiento solido como el polietileno reticulado (XLPE), goma etileno propileno (EPR), como los más comunes debido a sus buenas características dieléctricas. Los cables y sus accesorios al igual que cualquier equipo eléctrico sufren el envejecimiento propio de los materiales que los constituyen, elevando al paso del tiempo una probabilidad de presentar fallas, de acuerdo a estudios realizados se ha demostrado que el desgaste propio de ellos se presenta en varios casos, en imperfecciones en fabricación tales como impurezas, delaminación o cortes en la pantalla semiconductor, protuberancias en acabados del cable o en su defecto cavidades de aire dentro del aislamiento, son unas de las muy conocidas imperfecciones que se presentan. Sin embargo, las fallas en los accesorios que se utilizan en el cable como terminales y empalmes suelen ser muy frecuentes en las fallas si estas no tienen una correcta fabricación e instalación de la mismos.

El estudio del aislamiento ha diagnosticado que son uno de los puntos más propensos a sufrir fallas, cuando dentro de ellos están presente deformaciones que van aumentando con el tiempo debido a cavidades de aire que se encuentran dentro del medio, que al momento de ser energizado en el sistema se producen esfuerzos eléctricos dentro del mismo realizando pequeñas rupturas dieléctricas, creando caminos de fuga de corriente que con el paso del tiempo pueden ser mortales para la vida del cable, debido a las descargas parciales ya que pueden estar presentes en

tres tipos de aislamiento: sólido, gaseoso y líquidos; para efectos de la presente investigación que se titula “ Estudio de la propagación de ondas de descargas parciales en cables de potencia”, el cual se realizara mediante el análisis en los aislamiento de tipo sólido, tomando en cuenta cómo interpreta la propagación de estas reflexiones a lo largo de su trayectoria, realizando modelos que se asemejen a la realidad de un sistema de potencia por medio del software *Alternative Transcient Program* (ATP/EMTP), por medio de los modelos de líneas de Clarke independientes de la frecuencia y J. Martí dependiente de la frecuencia, para poder establecer criterios de análisis confiables y certeros en el momento de emitir resultados. para parámetros distribuidos en general este material pertenece a los aislamientos no recuperables y son los que sufren una mayor degradación debido a la existencia o aparición de las descargas parciales, este problema se presenta debido a que la fabricación defectuosa de los cables provocando la presencia de este fenómeno a causa de burbujas de aire presentes en el aislante (XLPE), el gran inconveniente de ellos es que no son auto recuperables y pueden causar daños catastróficos al avance de este fenómeno en estados críticos de falla donde se pueda llegar a dejar fuera de servicio el sistema.

La siguiente investigación estará regida bajo las normas realizadas en el 2011, por la Coordinación de Trabajo de Grado de la Escuela de Eléctrica, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, donde se presentarán a continuación la descripción de los capítulos:

En el capítulo I, se propone en el entorno teórico-práctico del problema a solucionar, con sus objetivos, justificación y limitaciones propias presentadas en realización de la misma. En el capítulo II, se hace alusión a los conceptos básicos sobre cables de potencia, características principales, efectos que causan posibles fallas en el sistema y modelos de líneas de transmisión.

Capitulo III, se definen teorías propias que definen la “Propagación de ondas de descargas parciales”, casos de estudio teórico y práctico para la interpretación correcta de este fenómeno. En el capítulo IV, se manifiesta todo lo referido al

software *Alternative Transcient Propgram* (ATP/EMTP), usado para la modelación de un sistema de cable de potencia, así mismo las características de la geometría de cables de 15 kV y 115 kV, presentando resultados y análisis sobre la propagación de la onda en este medio, para una mejor interpretación de trazos de TDR, de igual manera se emplean mediciones reales en propagación de ondas en cable de 15 kV, como una medición en método directo en un cable de 115 kV, para compensar el estudio de descargas parciales en el medio. Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones generadas del estudio realizado que aclaran y facilitan la interpretación de resultados obtenidos, finalizando con las referencias bibliográficas consultadas que le dan soporte al desarrollo del presente estudio.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de potencia actualmente tienen mayores exigencias con relación al desempeño libre de fallas, más aún cuando se trata de líneas de transporte de grandes bloques de energía, lo que lleva al uso cada vez más frecuente de la instalación de líneas de transmisión con cables de potencia aislados, en niveles de tensión de la alta y extra alta tensión.

Si bien ante esta necesidad la tecnología de fabricación de los cables de potencia se considera madura y de buena calidad en general, en la realidad el cable de potencia aislado no trabaja sólo, pues es parte de un sistema completo que incluye, empalmes, terminales, accesorios, además de los trabajos de instalación del cable, que en conjunto determinan el desempeño en servicio de la línea.

También se debe considerar que estos sistemas de cables de potencia se ven expuestos a los eventos de sobretensiones tanto de agentes externos como internos, tales como descarga atmosférica y maniobras en la red. Estos eventos se manifiestan en diferentes formas como esfuerzos eléctricos sobre el aislamiento principal de estos sistemas de cables de potencia, lo que lo puede llevar a un deterioro a largo plazo o eventualmente la pérdida de rigidez dieléctrica y por lo tanto a una falla inminente.

Los ensayos de aceptación de aplicar alta tensión por una hora, que se realizan después de la instalación de un cable de potencia, dan cierta confiabilidad a la operación segura ante una evidente falta de calidad de la instalación final, pero normalmente no son capaces de observar la aparición de deterioro incipiente en el aislamiento principal, para esto se recomiendan técnicas de medición de descargas parciales.

Sin embargo, la medición de descargas parciales fuera del ambiente controlado de un laboratorio de alta tensión, significa un gran reto el poder obtener una medición confiable y útil para identificar estos deterioros incipientes del aislamiento principal del cable de potencia, principalmente por el hecho del control,

identificación y tratamiento del ruido electromagnético que se tiene en una instalación como lo es una subestación eléctrica o el poste de la terminal del cable de potencia en su transición.

Existen técnicas de medición de descargas parciales que ayudan a medir en estos ambientes con ruido electromagnético en la cercanía del punto de interés, como es el caso del método por Ultra Alta Frecuencia (UHF) (IEC 60270), pero la aplicación de estas técnicas obliga al probador a conocer cómo se desarrolla el fenómeno físico que originan las descargas parciales.

Como es conocido, el evento de descarga parcial está compuesto de un pulso de corriente de alta frecuencia que actúa como onda viajera a través de la línea de transmisión, por lo que se puede conocer el estado del aislamiento de la línea bajo estudio, si se observa cómo es el camino por el que transita este pulso de corriente de alta frecuencia, es decir, su forma de propagación, por lo que se podría distinguir la presencia de un empalme, una terminal, la transición de aéreo – aislado, o puntos de deterioro incipiente a lo largo de la trayectoria de la línea aislada.

El conocimiento y dominio de la propagación de la descarga parcial en un sistema de transporte de energía con cable aislado, debe ser la base para lograr un monitoreo de la condición de su aislamiento a través de su vida útil, logrando la identificación de manera temprana el desarrollo de un deterioro que lo pueda llevar a la falla. Más aún es tan importante identificar que existe un deterioro incipiente, como identificar la ubicación defecto o falla incipiente.

Con la aplicación de algunas de las tecnologías como lo es la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), que trabaja mediante el análisis del coeficiente de reflexión de las ondas viajeras, mediante un diagrama en que se puede detallar el tiempo de viaje de la onda y por medio de este se puede localizar la discontinuidad o defecto, velocidad de propagación del medio y amplitud con que se va atenuando a medida que viaja en toda la trayectoria del cable, es donde nace la interrogante en cómo detectar de manera confiable el origen y propagación de la onda en un cable de potencia subterráneo cuando ocurre una descarga parcial, por medio del uso de este fenómeno mediante la propagación de onda cuando se produce la discontinuidad a lo largo de la trayectoria de la línea.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En el aislamiento de un cable de potencia pueden existir defectos tales como cavidades o burbujas de aire (entre otros), en los cuales se pueden producir pequeñas descargas disruptivas eléctricas, estas descargas son llamadas descargas parciales (DP). Las mismas generan pulsos eléctricos que viajan a lo largo del cable hasta sus extremos en los cuales generalmente éstos son detectados, medidos y cuantificados para posteriormente ser analizados con el fin de localizar e identificar el deterioro que allí ocurre, generando como resultado un posible diagnóstico de la condición del aislamiento del cable.

Las DP han sido utilizadas las últimas 4 décadas para el diagnóstico localizado de cables de potencia. Durante este periodo de tiempo ha habido un gran desarrollo en ambos: 1) la forma en cómo éstas se detectan y 2) cómo hacer su interpretación a través de indicadores de diagnóstico apropiados. Uno de los indicadores más comúnmente usados es la magnitud de las DP. A pesar de la importancia de este indicador existe escasa información con utilidad práctica sobre el entendimiento de cómo la magnitud de la DP se ve afectada cuando el pulso generado se propaga a través del cable.

Por lo tanto, este trabajo consiste en investigar de manera teórica y práctica el cómo se propagan las DP a través de un cable de potencia considerando modelos actuales que mejor representan el comportamiento de un cable y su posible impacto en indicadores que son usados comúnmente para el diagnóstico. El trabajo de grado abarca, pero no está limitado a cables de potencia de MT y AT tomando en cuenta los estándares y procedimientos más recientes en lo concerniente a la aplicación de las DP al diagnóstico de cables de potencia.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

Estudiar la propagación de descargas parciales en cables de potencia.

1.3.2 Específicos

- Entender los conceptos fundamentales.
- Revisar el estado del arte.
- Establecer modelos y casos de estudio.
- Realizar simulaciones y experimentación.
- Análisis de casos de estudio.
- Analizar los resultados y establecer conclusiones y recomendaciones.

1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES

El presente trabajo abarca el análisis en estudio teórico y práctico de la “Propagación de ondas de descargas parciales” en cables de potencia de 15 kV y 115 kV, con empalmes y terminales simulando por medio del software *Alternative Transient Program (ATP/EMTP)*, los modelos de líneas: Clarke (Basico) y J. Martí, realizando estimaciones reales de los componentes del sistema, donde existen elementos dependientes de la frecuencia y otros no para realizar comparaciones entre modelos. Para posteriormente realizar pruebas en el laboratorio de alta tensión de LAPEM de comisión federal de electricidad, para obtener un mejor aprendizaje e interpretación en tiempo real de la medición.

En cuanto a las limitaciones, se encontró problemas para la medición correcta con el método UHF ya que no se contaba con los instrumentos necesarios para proteger los equipos de medición en caso de una falla eléctrica, ya que se necesitaba una tensión muy baja alrededor de 2 a 5 (kV), y se quería realizar esto con un transformador de 30 kV, dada que los equipos de prueba del laboratorio tienen un nivel mínimo de 10 kV y para observar este fenómeno debe de irse incrementando tensión paulatinamente de 0 V, hasta el nivel de tensión donde se produzca la falla.

1.5 METODOLOGIA

Por medio del siguiente proyecto se podrá obtener técnicas que faciliten el estudio de la propagación de ondas de descargas parciales en cables de potencia.

En la presente investigación de la propagación de pulsos de descargas parciales en cables de potencia está basada en dar posibles soluciones a el análisis e interpretación de los resultados debido a la alteración que se produce en el sistema cuando ocurre un deterioro en el aislamiento principal, mediante el estudio de conceptos fundamentales para el desarrollo de este trabajo como son los siguientes: cables de potencia, descargas parciales y propagación de ondas, teórico-prácticos, ya que esta es una investigación de campo.

Se utilizaron modelos implementados en el ATP/EMTP con datos reales definiendo parámetros de la geometría del cable, permitividad, permeabilidad, resistividad, distribución del cable en el suelo y condiciones del sistema del cable orientadas al modelo de estudio para la lectura y observación de la velocidad de propagación de pulsos en cables de potencia de 15 kV y 115 kV, reflexiones y refracciones respectivamente, en aislamiento de polietileno reticulado (XLPE), donde se establecieron comparaciones entre los modelos de línea Básico y J. Martí en alta frecuencia. Donde se estudiaron las ventajas y desventajas de los modelos de línea Básico y J. Martí en alta frecuencia, estableciendo casos de estudio en corto circuito, circuito abierto y con carga acoplada al sistema.

Se implementa un circuito de medición para observar esta característica de propagación y respuesta transitoria (propagación de pulsos) en un sistema de cable de potencia en 15 kV. Los resultados obtenidos en las mediciones, permitieron validar la modelación confirmando por medio de la velocidad de propagación medida y la plena identificación de las discontinuidades que el sistema bajo prueba tenía, de acuerdo a lo modelado en el EMTP. Se presenta el caso de medición con el método directo de un sistema de cable de potencia, dos terminales y un empalme para un

sistema de 115 kV, se muestran los patrones de medición de descargas parciales, pero se observa que no son suficientes para identificar cuál elemento del sistema bajo prueba, es el que tiene descargas parciales, no se tuvo la herramienta del análisis de la propagación para complementar el diagnóstico.

Finalmente se emplearon técnicas de medición de niveles de descarga parcial y tiempos de propagación de ondas por medio de un sistema de cable de potencia en 15 kV, ya que los resultados obtenidos en las mediciones, permitieron confirmar por medio de la velocidad de propagación medida y la plena identificación de las discontinuidades que el sistema bajo prueba tenía, la validación de los modelos implementados en ATP/EMTP, por último se dispuso el caso de medición con el método directo de un sistema de cable de potencia, dos terminales y un empalme para un sistema de 115 kV, en el que se muestran los patrones de medición de descargas parciales, en donde obtenemos una conclusión puntual, que es necesario un análisis de propagación para perfeccionar la interpretación de resultados, porque estos no son suficientes para identificar cual es el elemento que presenta la discontinuidad del objeto bajo prueba.

1.6 SUMARIO

En este capítulo, se presenta el problema el que se enfoca en el conocimiento del viaje de ondas en cables de potencia y como se distorsiona cuando existe una descarga parcial. Estableciendo técnicas de estudio para geometrías de cable distintas en modelos de líneas: modelo básico y J. Martí, que permitan verificar resultados para comparar con pruebas realizadas en campo, con la visión de conseguir los objetivos planteados en esta investigación.

CAPITULO II

MARCO TEORICO DE SISTEMA

ELECTRICO DE CABLES DE POTENCIA

Desde los principios de la transmisión de energía eléctrica siempre se quería saber transportar electricidad desde la fuente de generación hasta los puntos de consumo, donde se logrará transformar en luz y otras formas de energía, es por ello que los cables de potencia juegan un rol muy importante en el avance de nuestra vida y se realizan estudios sobre su comportamiento para garantizar, resguardar y optimizar la vida de ser humano.

Los cables de potencia en la fabricación pueden existir problemas en que no sean totalmente herméticos y por ello se encuentren pequeñas cavidades en su aislamiento, que al aplicarle tensión pueden ocurrir las descargas parciales, que con el tiempo puedan ser un gran problema para la estabilidad de la energía o en el peor de los casos una falla total del tramo que pueda traer consecuencias irreparables. Es por este principio es que da pie a la investigación de *"la propagación de las ondas de descargas parciales en cables de potencia"*, por medio el programa digitalizado de transitorios electromagnéticos *Alternative Transient Program (ATP/EMTP)*, para poder conocer y detectar de una manera más cómoda este fenómeno a lo largo de su longitud.

2.1 DEFINICION DE CABLES DE POTENCIA.

Se puede definir como conductor eléctrico aquel componente de un sistema, capaz de permitir el paso continuo de una corriente eléctrica cuando es sometido a una diferencia de potencial entre dos puntos. El cual se puede definir por medio de cuatro propiedades eléctricas fundamentales: resistencia, inductancia, capacitancia y resistencia de aislamiento. (Manual Eléctrico, Viakon, p 72.), como también esta empresa define un conductor eléctrico que consta de un filamento o alambre, de una

serie de alambres cableados y/o torcidos, de material conductor, que se utiliza desnudo, o bien cubierto con material aislante. Estos son utilizados en instalaciones subterráneas, ductos o bandejas y en tensiones mayores a 5 kV. De acuerdo a los niveles de tensión oscilan de 25 kV a 230 kV para extra alta tensión.

2.1.1 Estructura de un cable de potencia

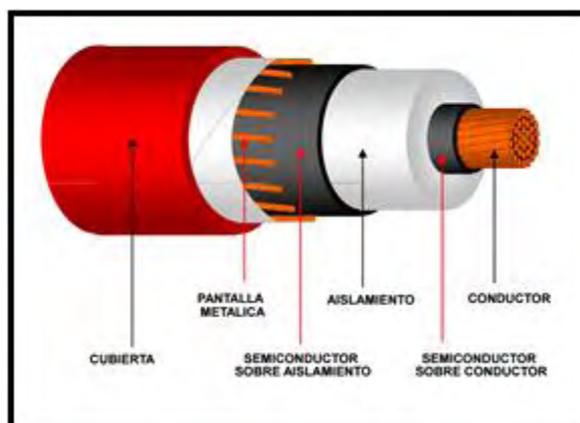


Figura 2.1 Partes de un cable (Grupo Condumex).

2.1.1.1 Núcleo del conductor: es el encargado de transportar la energía eléctrica a los consumidores, está construido en cobre y en condiciones especiales de aluminio.

Los espacios libres que existe entre la unión de los hilos de les llama intersticios del conductor, es por ello que los procesos de unión se manipulan de tal manera que sean lo más unidos posibles y que exista la menor cantidad de espacios de aire entre ellos.

Por ello tenemos el tipo de cableado:

- Comprimido.
- Compactado (menos espacios de aire).

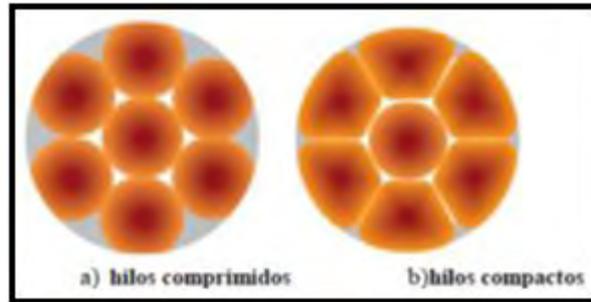


Figura 2.2 Tipo de cableado (CENTELSA, 2008).

2.1.1.2 Pantalla semiconductor del conductor: Esta capa se encuentra en contacto directo con el núcleo y está formada por un material termoestable, generalmente polietileno con características semiconductoras penetrando entre los intersticios para lograr que el campo eléctrico sea radial en su superficie es decir mantener todo su radio equipotencial (equilibrio de cargas), evitando concentraciones de campo puntuales que puedan producir efecto joule y por lo tanto un funcionamiento defectuoso del mismo, causando degradación prematura del cable.

2.1.1.3 Aislamiento principal: Este brinda la rigidez necesaria contra fugaz de corriente, fallas entre fases (neutro del sistema), y que pueda confinar el campo eléctrico producido por el conductor al interior de él. El material más usado es el XLPE y EPR usado en menor proporción.

2.1.1.4 Pantalla del aislamiento: es una pantalla que cubre el aislamiento y está hecha de polietileno, su objetivo es reducir la interacción de las líneas de campo hacia el interior del aislamiento.

2.1.1.5 Pantalla metálica: Está formado por material metálico no magnético, se coloca sobre la pantalla de aislamiento, con el fin de ayudar el aislamiento y permitir una buena conexión de puesta a tierra.

2.1.1.6 Chaqueta externa del cable: Es la que recubre el cable y este queda finalmente expuesto al medio ambiente en que debe de cumplir os siguientes requisitos para poder tener una buena operación:

- Resistencia a la humedad.
- Comportamiento bueno frente a la llama.
- Resistencia de los rayos UV.
- Resistencia de impacto y abrasión.
- Resistencia a los hidrocarburos.

2.2 Características de los materiales de aislamiento.

2.2.1 Constante de aislamiento.

Es también llamada resistencia dieléctrica “que ofrece el aislamiento al flujo de corriente resultante de la aplicación de una tensión eléctrica al mismo” (Viakon, 2013), Este valor es medido en ($M\Omega \cdot Km$).

Por esto es necesario que el conductor tenga un alto nivel de la constante de aislamiento para evitar que esta corriente de fuga sea lo suficientemente elevada y cause daños , ya que a medida que tenemos mayor longitud esta corriente de fuga aumenta y el tiempo del operación o envejecimiento del conductor afecta sobre este parametro.

2.2.2 Permitividad eléctrica.

Esta variable mide la capacidad de un material para permitir el almacenamiento de cargas o fugas de corriente por efectos capacitivos (CENTELSA, 2008, p.7), dicho en otras palabras, es la intensidad del flujo de campo eléctrico que debe de ser sometido para que exista la ruptura dieléctrica y se produzca por medio de la ionización del medio una perforación del material esta es medida en (V/m).

2.2.3 Capacitancia.

La relación entre la carga electrostática entre dos conductores y la diferencia de potencial requerida para mantener esa carga (Viakon, 2013), de acuerdo a que esta mide la capacidad de almacenamiento entre conductor y pantalla metálica, que a su vez se ve en el sistema como una corriente de fuga, entendemos que la resistencia dieléctrica debe de ser mayor que esta para evitar daños.

2.2.4 Factor de pérdidas o tangente delta ($\tan \delta$).

Factor de pérdidas de energía debidas al aislamiento, factor utilizado comúnmente en alambres magneto (Viakon, 2013), en otras palabras, es la medida del grado de pérdida de potencia activa en el material dieléctrico, las cuales modelan el capacitor como el comportamiento dieléctrico y la resistencia como las pérdidas por calentamiento es por ello que se pueden tomar pérdidas por $\tan \delta$ o fp , ya que se quiere un buen aislamiento el fp debe de ser bajo partiendo de la relación por Pitágoras.

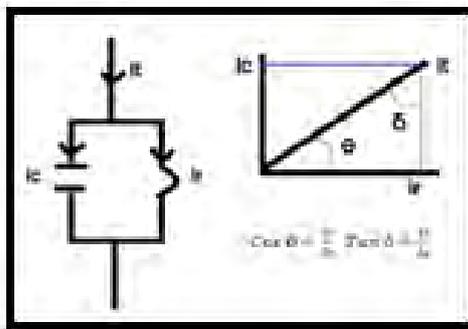


Figura 2.3 Modelo de pérdidas sobre el dieléctrico.

2.2.5 Temperatura de operación de sobre carga y corto circuito.

El aislamiento XLPE y el EPR tienen una temperatura de operación máxima de 90°C , una temperatura máxima en estado de sobre carga de 130°C y de 250°C en corto circuito, (CENTELSA, 2008, p.7), en este caso se debe de cuidar que no sobrepase estos niveles de temperatura en rangos de tiempo no estimados ya que puede comprometer el desempeño óptimo del cable o en el peor de los casos su ruptura.

2.3 TIPOS DE AISLAMIENTO DE CABLE

2.3.1 Cloruro de polivinilo (PVC).

Este pertenece a los termoplásticos se utiliza preferentemente en conductores de baja tensión debido a su bajo costo. Con mezclas adecuadas se obtiene un rango de temperaturas de servicio de entre 60 y 105 °C en operación normal.

2.3.2 Goma etileno propileno (EPR).

Perteneciente a los termo fijos del tipo tela sintética; posee propiedades de aislamiento tales como resistencia a la ionización y una temperatura de servicio de 90°C. Este tipo de aislante se utiliza especialmente en instalaciones de alta tensión hasta 60 (kV), en forma general.

2.3.3 Polietileno reticulado (XLPE).

Es un aislamiento que mezcla las propiedades de la goma con las características eléctricas y mecánicas del polietileno. Posee una temperatura de servicio de 90°C y necesita menor cantidad de material comparativamente con otros aislantes, además posee alta resistencia al ozono, humedad, calor, agentes químicos y rayos solares. Pero tiene un gran problema que es su baja resistencia a la ionización por lo que tiende a aparecer el efecto de árboles de agua o arborescencias.

Para observar el desempeño de estos aislamientos se colocan en comparación el aislamiento EPR y XLPE para redes de media tensión:

- **Comportamiento Frente al Fuego:** Ninguno de los dos propaga la llama debido a que ambos aislantes son recubiertos por un compuesto poliolefínico que no contiene hidrocarburos volátiles ni

halógenos metálicos (excepto el plomo que le da el color rojo). El plomo incrementa también la resistencia a agresiones externas (fuego, rayos ultra violeta, humedad, entre otros) y evita la llama.

➤ **Capacidad de transporte:** a igual sección conductora la capacidad de transporte de XLPE es superior a la de EPR, ya que el XLPE disipa mejor el calor, permitiendo circular mayor corriente, de entre un 10 y un 30% más. Sin embargo, ante sobrecargas eléctricas, el comportamiento del EPR es mejor que el de XLPE ya que el EPR soporta una temperatura de conductor de hasta 140/150°C, mientras que el XLPE llega hasta 130/135°C.

➤ **Manipulación:** El EPR es más flexible que el XLPE, por lo tanto, más adaptable en circuitos que presentan muchas curvas.

➤ **Comportamiento frente a inundaciones:** El EPR es intrínsecamente resistente al agua a diferencia del XLPE, sin embargo, ambos cables llevan cubiertas protectoras especialmente preparadas, pero suponiendo que esta se dañe, el EPR se mantiene impermeable. Para esto se utiliza otra versión del XLPE, que es el que viene con una malla impermeable extra, aparte de la cubierta normal que también es impermeable.

➤ **Estabilidad frente al envejecimiento:** Ante el envejecimiento eléctrico ambos son muy similares, sin embargo, el EPR tiene más resistencia al envejecimiento térmico (provocada por los cambios de temperatura).

2.4 DEFINICION DE DESCARGAS PARCIALES.

Es la producción de un rompimiento dieléctrico debido a la concentración de campo eléctrico en una burbuja de aire que alcanza prácticamente la distancia entre electrodos del aislamiento que mediante el proceso de ionización del aire en cual se produce un estallido en la zona crítica donde se ubica la cavidad y se van originando

ramificaciones sobre el material como se muestra a continuación en la siguiente imagen:

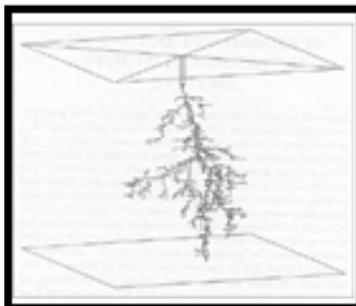


Figura 2.4 Ramificaciones de una descarga parcial.

Estas ramificaciones antes observadas comienzan por una pequeña cavidad de aire alojada dentro del polimero en el que campo electrico rompe la rigidez dielectrica del gas, este es el efecto quimico que ocurre sobre el mismo provocando una carbonizacion del material al momento de la descarga de corriente, es llamada parcial porque tiene un tiempo de extision muy corto, pero la tasa de repetitividad es el punto critico en este efecto sobre el material como se puede observar en la siguiente imagen:

www.bdigital.ula.ve

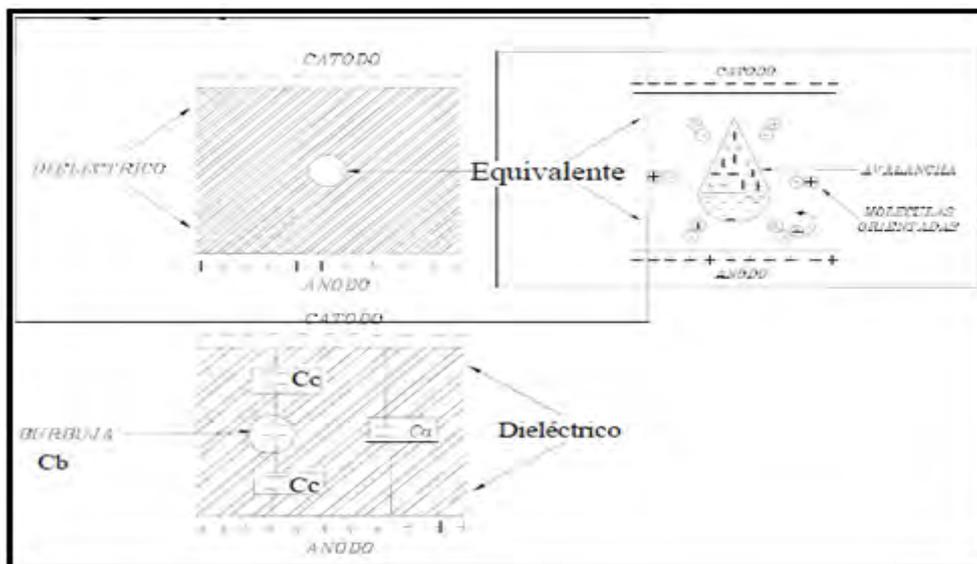


Figura 2.5 Modelo circuito de la de cavidad de aire en el aislamiento.

2.4.1 Efectos que se causan en una descarga parcial:

- Efecto eléctrico: Produce ionización del gas en la cavidad, descarga eléctrica y destrucción de las moléculas del aislamiento por el bombardeo de iones y electrones, causando finalmente la falla del aislamiento.
- Efecto químico: Produce ozono que ataca químicamente al aislamiento por medio de erosión.
- Efecto mecánico: Produce ondas ultra sonoras, del orden de 40 kHz.
- Efecto óptico: Produce emisión luminosa (no siempre visible).
- Efecto térmico: Hay desprendimiento de calor muy concentrado.
- Efecto electromagnético: Produce una emisión importante de ondas electromagnéticas radiadas que se propagan en el medio, pudiendo provocar interferencias electromagnéticas.

Las descargas parciales (DP) no suelen ser de grandes magnitudes, pero su tasa de repetitividad puede ser perjudicial para la vida útil del aislamiento ya que su efecto puede ser comparado como el cáncer en la vida de los aislamientos, estas pueden ser tomadas de acuerdo a los siguientes criterios:

- Son de baja energía.
- Son de alta frecuencia.
- Se deben debido a burbujas de aire.
- Rompimiento dieléctrico debido a la permitividad del material.
- La corriente de fuga interactúa con las DP mas no es una DP.

Material	Rango	Típico
Goma butil	3,0 - 4,5	3,2
PVC	3,4 - 10	6,0
Varnished cambric	4 - 6	4,5
Papel impregnado	3,3 - 3,7	3,5
Goma GRS, natural	2,7 - 7,0	3,5
HMWPE	2,1 - 2,6	2,2
XLPE or TRXLPE	2,1 - 2,6	2,3
XLPE - filled	3,5 - 6,0	4,5
EPR	2,5 - 3,5	3,0
Goma de Silicon	2,9 - 6,0	4,0

Tabla 2.1 Permitividades de los materiales aislantes.

De acuerdo a su ubicación las descargas parciales pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- Internas (huecos en sólidos o líquidos).
- Externas (corona, conductores).
- Superficiales (superficie entre dieléctricos).

En el caso de estudio tomara enfoque en las internas ya que estas pueden ocurrir por inclusiones de materiales extraños que se caracterizan por tener bajar rigidez dieléctrica, en comparación con la que tiene el material aislante del equipo eléctrico; esto hace que se presente primero una ruptura dieléctrica en el material extraño a una intensidad de campo mucho más baja que la que presenta el aislante, tomando en cuenta que la distribución de campo eléctrico en corriente alterna resulta ser inversamente proporcional a las magnitudes de las permitividades dieléctricas (capacitancias), ocasionando el fenómeno de descargas parciales en la inclusión que estas pueden ser:

- Burbujas gaseosas.
- Cavidades de aceite.
- Partículas extrañas.
- Protuberancias metálicas.

Estas se deben o se pueden producir por la mala calidad de los materiales o empleo inadecuado en la manufactura y puesta en servicio de los equipos eléctricos.

En las burbujas gaseosas se presenta aproximadamente la misma tensión, como si estuviera entre los dos electrodos a la misma separación, el efecto entre separación entre electrodos y presión, sobre la tensión de ruptura dieléctrica de la cavidad, para determinado tipo de gas se rige por la ley de Paschen.

2.4.2 Ubicación de la descarga parcial en una onda sinusoidal y unidad de medida.

Al producirse la DP por el cambio de permitividades entre la del aire y la del dieléctrico, el dieléctrico se encuentra a una diferencia de potencial $U(t)$, la cual se puede explicar mejor en la figura 2.11:

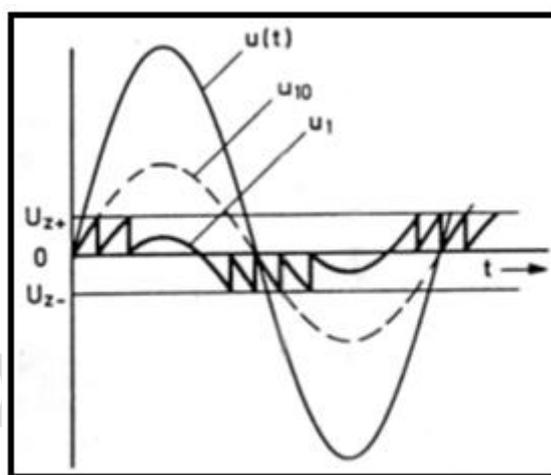


Figura 2.6 Grafica de descargas parciales.

Dónde:

- $U(t)$, es la tensión en el dieléctrico completo.
- U_{10} , es la tensión en el hueco sino hay descarga.
- U_1 , es la tensión en el hueco a la descarga.

El mecanismo de la producción de la DP cuando a un equipo eléctrico se somete a niveles de tensión se tiene una diferencial de potencial en la cavidad, sin embargo, si esta no es capaz de soportar dicha tensión es donde se origina la ruptura dieléctrica en la cavidad U_{z+} (que se comporta de acuerdo a la ley de Paschen). La descarga parcial es asumida como un pulso de corriente de Dirac, que se extingue rápidamente (en un tiempo menos a los 10^{-7} seg, siendo un valor muy pequeño comparado con los 60 Hz de la onda de tensión senoidal), y si la onda de tensión de corriente alterna continua incrementando al valor cresta, entonces la tensión dentro

de la burbuja aumenta, por la superposición del campo eléctrico principal del aislamiento y el campo eléctrico generado por las cargas superficiales en las paredes de la cavidad, hasta alcanzar el nivel de U_{z+} y vuelve a ocurrir la descarga parcial, estas se presentan en cada semiciclo cuando el potencial que se aplica es lo suficientemente elevado, dicho fenómeno se repite varias veces hasta que decrece.

Como sabemos las DP son flujos de corriente en un instante corto de tiempo se mide en (Coulomb), ya que la descarga parcial es el flujo de corriente entre placas o electrodos que se comporta como un capacitor en donde está la cavidad de aire, ya que parte de la energía disipada es por medio de carga eléctrica y su medición se logra por medio de la pequeña caída de tensión producida en ese instante normalmente esta medida está en el orden de los (Pico coulomb), ya que es la carga almacenada en la burbuja en ese instante.

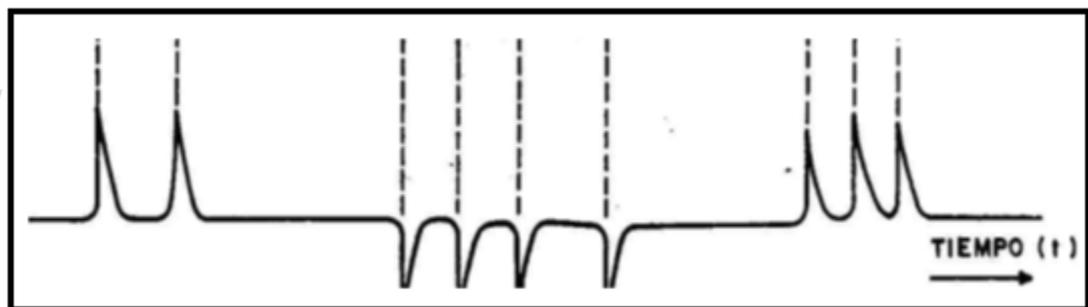


Figura 2.7 Corriente de las descargas parciales.

2.4.3 Medición de las descargas parciales.

- La medición generalmente trata de la detección de pulsos eléctricos en un circuito de alta tensión.
- La sensibilidad, se limita por el ruido de fondo del circuito, ya sea por radiación electromagnética, tensiones y corrientes inducidas y conducidas (interferencia).
- Detección y medición por el método de carga aparente de banda ancha de las descargas parciales, en aislamiento sólido o líquido.

La carga aparente es la carga que, si se aplica instantáneamente entre las terminales del objeto bajo prueba, producirá un cambio momentáneo en la tensión entre las terminales, de la misma magnitud que una descarga parcial.

2.4.3.1 Método Eléctrico

El más usado es el método directo el cual consiste en una fuente alterna, un capacitor de acople (C_k), el cual está libre de descargas parciales en que se inyecta un pulso o carga para calibrar el equipo de medición (M_i) y observar que esté funcionando correctamente, una impedancia (Z_m) que junto con el objeto bajo prueba se conecta en serie o paralelo para garantizar el efecto de una capacitancia, el circuito de medición tiene un cuadripolo el cual atenúa las señales del ruido externo al sistema y mejorar la sensibilidad.

Sobre el objeto de prueba se aplica instantáneamente entre las terminales del mismo una carga aparente, que producirá un cambio momentáneo en la tensión entre las terminales, de la misma magnitud que una descarga parcial la que es medida y captada en equipo de medición.

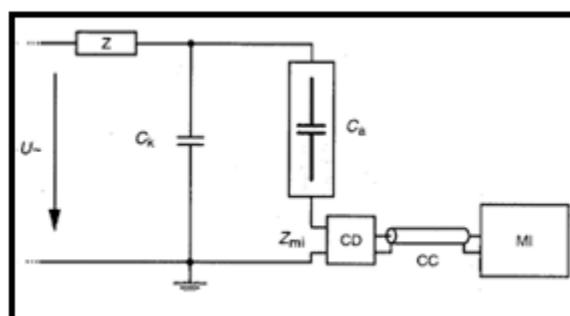


Figura 2.8 Circuito de medición.

Para el proceso de calibración del circuito se va aplicar un pulso al capacitor de acople el cual debe ser de acuerdo al nivel que nos indique la norma que se vaya a evaluar el nivel máximo de descargas parciales. Siempre es importante luego de ello apreciar cual es nuestro ruido de fondo y que se encuentre en niveles bajos, para que puedan ser apreciables las respuestas del sistema y este ruido blanco no influya

totalmente sobre la misma para así poder dar observaciones certeras del estado del aislamiento.

Condiciones para la medición en LAPEM:

- Generalmente se acostumbra medir las descargas parciales a una tensión por arriba de la fase – tierra del OBP.
- Debe registrarse el valor de ruido de fondo del circuito con el OBP, conectado y sin energizar, éste debe ser menor al 5% del nivel deseado o de al menos menor a 5pC.
- Se calibra el circuito con la carga conocida y al rango de medición deseado.
- Previo a la prueba se aplica una tensión de pre-esfuerzo (excitación) de aproximadamente un 5% a un 10% por arriba de la tensión de prueba, por al menos 30 s, para luego bajar la tensión hasta la de prueba especificada.
- Esta tensión de prueba especificada va de un 5% a un 50% por arriba de la nominal, dependiendo del OBP, y es a la cual se debe tomar el nivel de DP medido.
- Se acostumbra identificar las tensiones de inicio y extinción de DP, generalmente se cumple que $V_{\text{inicio}} \geq V_{\text{extinción}}$.

Los denominados ensayos de diagnóstico son de naturaleza no destructiva, y cuya finalidad es la de determinar, medir o analizar las características de la aislación y su condición inicial, o actual, para permitir establecer un punto de partida, permitiendo luego un seguimiento de evolución.

Los ensayos de diagnóstico, más allá de la aplicación de una tensión de prueba, están orientados a la determinación de la condición de un cable y de sus empalmes en particular, y son los únicos considerados de carácter no destructivos.

Se debe tener en cuenta que ni siquiera los ensayos de mantenimiento que son aquellos que se realizan durante la operación normal de cable o vida útil del tendido

eléctrico, cuyo objeto es solo detectar un deterioro del sistema, o su confiabilidad inmediata para seguir en servicio, entran dentro de los ensayos de diagnóstico.

Para entender las reflexiones de las descargas parciales se tiene que tener presente lo siguiente:

La actualización tecnológica en materia de ensayos de "Diagnostico de Estado", más allá de cuantificar un valor "global" de las Descargas Parciales de un tendido de alta tensión, acorde a IEC-60270, lo cual sería muy poco útil dado que no se podría identificar cual sería el accesorio, empalme, terminal y/o tramo de cable que las producen en mayor medida, permite también realizar un trazado o mapa integral de las Descargas Parciales que posee un sistema de cables instalados, posicionadas en función a su metraje (mapa pico-coulombs vs metros).

El principio de medición para el trazado de este mapa, está basado en la reflectometría de señales. Una vez que se producen las DP mediante la aplicación de una tensión de prueba VLF, las mismas viajarán hacia ambos extremos del cable; reflejándose en los terminales y produciendo, un trazo típico de tres impulsos por cada evento de descarga.

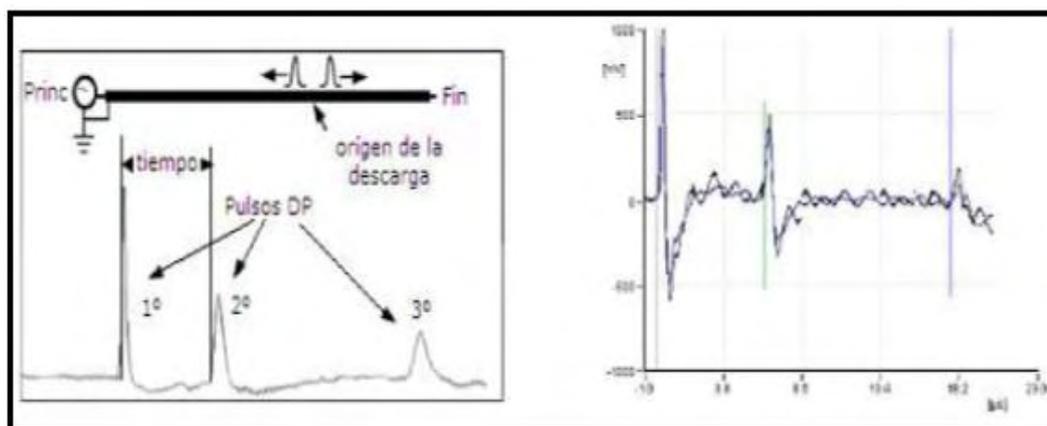


Figura 2.9 Esquema de la propagación de una descarga parcial medida con TDR (Inducor).

En esta traza, el tiempo entre el primer y el segundo impulso, corresponde a la distancia existente entre el origen de la DP (ubicación), y el extremo final del cable; así mismo, el tiempo entre el primer y el tercer impulso, refleja el tiempo en desplazarse dos veces por el cable. Luego un simple cálculo computarizado, resuelve la posición (origen) de la descarga, en función a la longitud del cable. Basado en los resultados de la ubicación/nivel de descarga, el mapa de las DP, es mostrado en una gráfica que detalla todas las actividades de descargas según sus coordenadas.

Comparando este diagrama con el plano de instalación del cable, y con las posiciones de los empalmes existentes (verificadas durante la calibración), se pueden identificar los lugares defectuosos del sistema con este método de detección de fallas.

2.5 DEFINICION Y APLICACION DEL TDR EN LA MEDICION DE PROPAGACION DE ONDAS.

es un reflectómetro del dominio del tiempo que mide la distancia de un cable enviando una señal eléctrica a través de él, la señal se refleja cuando encuentra la conexión abierta más lejana, para que pueda determinar cuáles son las conexiones defectuosas sobre un tendido de cables, se debe conectar el TDR al cable de conexión del panel de conexión.

Se dice que la Reflectometría Convencional, permite "ver" en el interior de un cable y a lo largo de todo su recorrido. Un empalme que forma parte de un tendido subterráneo, puede ser analizado en cuanto a su calidad y estado actual, por medio de la aplicación de las técnicas de Reflectometría convencional.

A diferencia de lo que sucede con un instrumento de lectura directa, en donde la magnitud a leer queda definida numéricamente, sin lugar a discusiones; en un reflectómetro aparece ahora el término "interpretación", es decir que el especialista no tendrá ante sus ojos un valor numérico absoluto, si no que deberá interpretar la gráfica.

Un TDR diferencial identifica y posiciona temporalmente mediante una reflexión de su señal incidente, todo cambio de impedancia en un cable. Estos

cambios de impedancias pueden ser atribuidos a una gran variedad de circunstancias, entre ellas daños en el cable, ingreso de humedad, cambios en tipo de cable, instalación inapropiada, radios de curvaturas extremos.

Uno o todos los empalmes que forman parte de un tendido subterráneo, pueden ser analizados en cuanto a su calidad y estado actual, por medio de la aplicación de las técnicas de Reflectometría convencional, pero para la interpretación eficiente de sus resultados, es necesario manejar cuidadosamente los conceptos de: atenuación, ubicación, cantidad total de empalmes existentes en el tendido, y la existencia o no de otros empalmes ubicados en forma previa al analizado.

Como se mencionaba anteriormente se encuentran la aparición de las DP en los empalmes debido a un mal empleo o realización del mismo y se causan esfuerzos causando un estrés dieléctrico grande hasta encontrar su ruptura.

Hasta el día de hoy los mejores cables son de papel impregnado en aceite con su chaqueta metálica en plomo, estos pueden durar hasta 100 años aproximadamente, en México aún hay gran cantidad de instalaciones con este tipo de cables, pero su fabricación ha disminuido considerablemente debido al grado de contaminación que este emite, por lo general los XLPE y EPR pueden durar hasta 30 años. Para ayudar a disminuir este efecto, se le tienden a colocar controlador de esfuerzos de terminales que ayudan a que estas líneas de flujo sean más uniformes y no tengan un impacto sobre el cable.

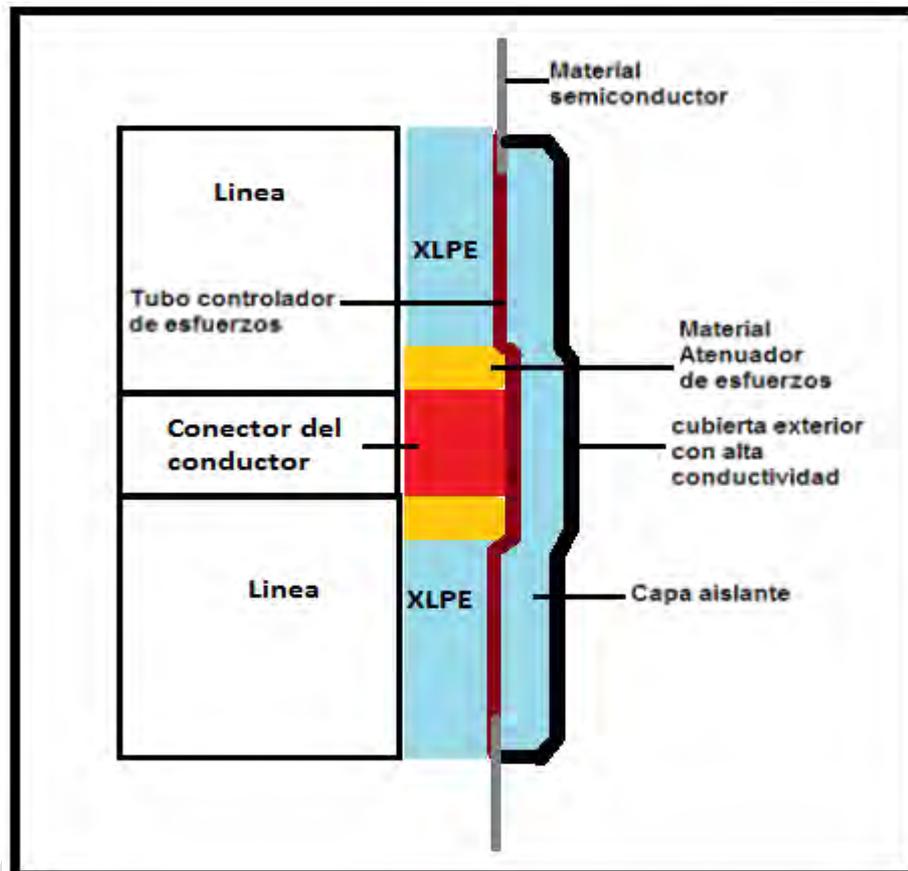


Figura 2.10 Partes del empalme.

2.6 DEFINICION DE ONDAS

Una onda es la difusión de energía eléctrica a través de la línea de transmisión que ocurre en forma de ondas electromagnéticas transversales, ya que estas vienen acompañadas por un campo eléctrico y magnético en la zona fronteriza donde viajan, ellas se propagan principalmente en un material no conductor (dieléctrico) que es el separador de los dos conductores, potencial y pantalla metálica en el caso de un cable subterráneo.

El sentido de viaje de la onda que se transporta a lo largo de una línea de transmisión, pueden ser llamadas como incidentes aquellas que van desde la fuente de generación hasta a la carga, y las que viajan en sentido contrario se llaman ondas reflejadas, estas se trasladan en el espacio libre, aunque entendemos este término como el vacío, es decir libre de pérdidas y perturbaciones que causan deformaciones

en la onda original, es por ello que se presenta el problema principal, porque en sistema real se introducen este tipo de pérdidas que traen como consecuencia atenuación y distorsión de la señal, inconveniente que no tienen en el vacío.

2.6.1 Características de las ondas electromagnéticas.

2.6.1.1 Velocidad de onda.

Las ondas viajan a distintas velocidades, dependiendo del tipo de onda y de las características del medio de propagación. Debido a esto de acuerdo a estudios las ondas electromagnéticas viajan mucho más rápidas que la del sonido. En el vacío viajan a la velocidad de la luz, (186,283 mi/s o 299,793,000 m/s). Sin embargo, en el aire las ondas viajan ligeramente más despacio, y en líneas de transmisión se ven afectadas de manera considerable en su velocidad.

2.6.1.2 Frecuencia y longitud de onda.

Las oscilaciones de una onda electromagnética (OEM), son periódicas y repetitivas. Por lo tanto, se caracterizan por una frecuencia, la distancia de un ciclo ocurriendo en el espacio se llama la longitud de onda y se determina por la siguiente ecuación fundamental:

$$d = v * t \quad (2.1)$$

Si el tiempo para un ciclo se sustituye en la ecuación anterior, obtenemos la longitud de un ciclo, que se llama longitud de onda y cuyo símbolo es la letra griega lambda (δ).

$$\delta = \lambda * T \quad (2.2)$$

Para entender estos conceptos llevados a el tema de interés es necesario saber la función que cumplen en una línea de transmisión, el modelo de la misma y cómo

influyen en la determinación parámetros para observar su comportamiento en toda su dimensión.

2.7 CLASIFICACION DE LINEAS DE TRANSMISION.

Las líneas de transmisión pueden clasificarse generalmente como balanceadas o desbalanceadas. Con líneas balanceadas de dos cables, ambos conductores llevan una corriente; un conductor lleva la señal y el otro es el regreso. Este tipo de transmisión se llama transmisión de señal diferencial o balanceada. La señal que se propaga a lo largo del cable se mide como la diferencia potencial entre los dos cables.

Ambos conductores en una línea balanceada llevan la corriente de la señal y las corrientes son iguales en magnitud con respecto a la tierra eléctrica, pero viajan en direcciones opuestas, flujos de corrientes que en direcciones opuestas por un par de cables balanceados se les llaman corrientes de circuito metálico. Las corrientes que fluyen en las mismas direcciones se llaman corrientes longitudinales. Un par de cables balanceado tienen la ventaja que la mayoría de la interferencia por ruido (a veces llamada el voltaje de modo común) se induce igualmente en ambos cables, produciendo corrientes longitudinales que se cancelan en la carga. Cualquier par de cables puede operar en el modo balanceado siempre y cuando ninguno de los cables esté con el potencial a tierra. Esto incluye el cable coaxial que tiene dos conductores centrales y una cubierta metálica generalmente se conecta a tierra para evitar interferencia estática al penetrar a los conductores centrales.

Con una Línea de transmisión desbalanceada, un cable se encuentra en el potencial de tierra, mientras que el otro cable se encuentra en el potencial de la señal. Este tipo de transmisión se llama transmisión de señal desbalanceada o de terminación sencilla. Con la transmisión de señal desbalanceada, el cable de tierra también puede ser la referencia a otros cables que llevan señales. Si éste es el caso, el cable a tierra debe ir en donde va cualquiera de los cables de señal. A veces esto crea un problema porque una longitud de cable tiene resistencia, inductancia y

capacitancia, por lo tanto, puede existir una pequeña diferencia de potencial, entre cualquiera de los dos puntos, en el cable de tierra. En consecuencia, el cable de tierra no es un punto de referencia perfecto y es capaz de inducir un ruido en él.

2.8 CIRCUITO BASICO DE UNA LINEA DE TRANSMISION.

Las características de una línea de transmisión se representan por medio de un cuadripolo que constituye un tramo pequeño de la misma como se observa en la Figura 2.16, por sus propiedades eléctricas y físicas es posible determinar las constantes eléctricas primarias: resistencia (R) e inductancia (L) en serie, capacitancia (C) y conductancia de derivación (G). La resistencia y la inductancia ocurre a lo largo de la línea, mientras que entre los dos conductores ocurren la capacitancia y conductancia. Las constantes primarias se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la línea y, por lo tanto, se les llama comúnmente parámetros distribuidos. Para simplificar el análisis, los parámetros distribuidos comúnmente se agrupan, por una longitud unitaria dada, para formar un modelo eléctrico artificial de la línea.

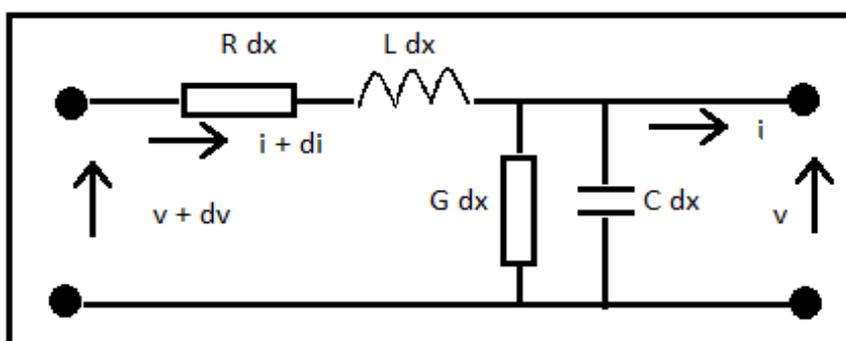


Figura 2.11 circuito equivalente de longitud diferencial de una LT de dos conductores (Cheng,1997).

Al aplicar la ley de Kirchhoff suponiendo variaciones senoidales para las tensiones y para las corrientes en el circuito de la Figura 2.16, ahora de parámetros concentrados, con lo que se tiene:

$$dv = i(R + j\omega L)dx \quad (2.3)$$

$$di = v(G + j\omega C)dx \quad (2.4)$$

$$\frac{dv}{dx} = i(R + j\omega L) = zi \quad (2.5)$$

$$\frac{di}{dx} = v(G + j\omega C) = yv \quad (2.6)$$

Donde $z = R + j\omega L$, es la impedancia en serie por unidad de longitud e $y = G + j\omega C$, la admitancia en paralelo, también por unidad de longitud.

Tomando la segunda derivada de las ecuaciones anteriores se tiene:

$$d^2v/dx^2 = zyv \quad (2.7)$$

$$d^2i/dx^2 = zyi \quad (2.8)$$

Y, la solución general de las ecuaciones (2.7) y (2.8) puede expresarse como:

$$V(x) = V^+ e^{-\gamma x} + V^- e^{\gamma x} \quad (2.9)$$

$$i(x) = I^+ e^{-\gamma x} + I^- e^{\gamma x} \quad (2.10)$$

Donde:

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.11)$$

Se define como constante de propagación de la línea que, como se ve de (2.11), es compleja y puede escribirse como:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.12)$$

Donde α es la constante de atenuación, expresada en neper/m y β la constante de fase en rad/m.

Las ecuaciones (2.9) y (2.10) son las soluciones de la ecuación de onda para el voltaje y la corriente en la línea y conviene analizar su significado, utilizando para

ello la ecuación (2.9), siendo la argumentación igualmente válida para la (2.10). La ecuación (2.9) representa una onda de voltaje vista desde el extremo del generador que, con ayuda de (2.12) puede escribirse como:

$$V(x) = V^+ e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + V^- e^{\alpha x} e^{j\beta x} \quad (2.13)$$

Y, en función del tiempo en forma compleja:

$$V(x) = V^+ e^{-\alpha x} e^{-j(\alpha x - \beta x)} + V^- e^{\alpha x} e^{j(\alpha x + \beta x)} \quad (2.14)$$

Un análisis similar puede hacerse para la corriente, obteniéndose una ecuación de onda para la corriente, formalmente igual a (2.13). El primer término de la derecha representa un voltaje de amplitud V^+ en el extremo del generador, que decrece exponencialmente a lo largo de la línea según $e^{-\alpha x}$ como se muestra en la figura 2.17 Esta componente de la onda, que viaja de la fuente hacia la carga se designa como onda incidente.

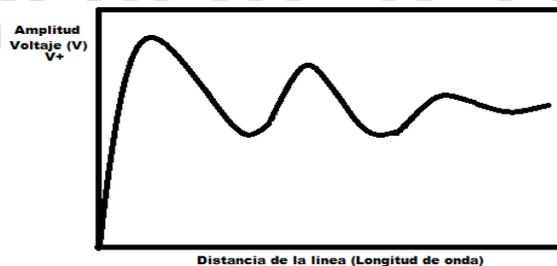


Figura 2.12 Onda incidente vista desde el generador.

El segundo término de la derecha representa una onda de voltaje que viaja en dirección opuesta a la onda incidente, cuya amplitud en el extremo del generador es V^- . Vista desde el generador, la amplitud de la onda es creciente al aumentar la distancia, como se muestra en la figura 2.18 se trata de una onda reflejada por la carga.

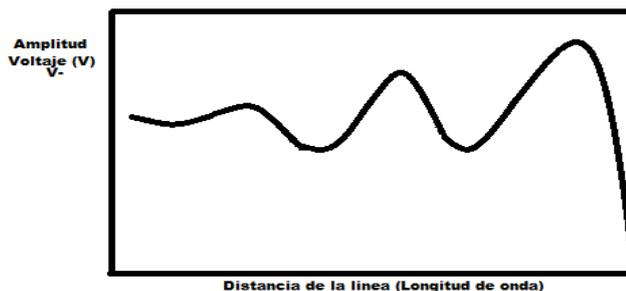


Figura 2.13 Onda reflejada por la carga, vista desde el generador.

Es importante notar que la distribución del voltaje en la línea está dada por la suma de las ondas incidente y reflejada como indica la ecuación (2.9), lo que da lugar a una onda estacionaria a lo largo de la línea. Este proceso es análogo al que ocurre cuando una onda electromagnética no confinada, que viaja en un medio de impedancia característica (Z_0), incide sobre la frontera de un segundo medio de impedancia diferente (Z_d), una parte de la energía de la onda incidente se transmite hacia el segundo medio y otra se refleja hacia el primero. En el caso de la línea de transmisión, el primer medio sería la propia línea y el segundo la impedancia de carga.

2.8.1 Impedancia característica

En las ecuaciones (2.9) y (2.10), v^+ , v^- , i^+ e i^- , son las constantes de integración, representadas aquí por la impedancia de carga y el voltaje aplicado a la línea. De estas cuatro constantes, solamente dos son independientes, ya que:

$$I^+ = \frac{v^+}{\sqrt{\frac{Z}{Y}}} = \frac{v^+}{Z_0} \quad (2.15)$$

$$I^- = -\frac{v^-}{Z_0} \quad (2.16)$$

Donde:

$$Z_0 = \sqrt{z/y} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (2.17)$$

Se define como impedancia característica de la línea (Z_0), junto con la constante de propagación, se designan como parámetros secundarios de la línea y son

independientes de la longitud de la misma. Esta depende de la permitividad, permeabilidad, frecuencia y geometría de la línea. Como se observa en la ecuación (2.17), la impedancia característica es, en general, compleja, es decir:

$$Z_o = R_o + jX_o \quad (2.18)$$

Si la frecuencia es suficientemente alta como para que se cumpla que $R \ll \omega L$ y $G \ll \omega C$, (2.17) puede aproximarse como:

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.19)$$

Y, en tales condiciones, la impedancia característica es real, es decir, puramente resistiva y no depende de la frecuencia, únicamente de la inductancia y capacidad distribuidas y, esta última, a su vez, de la permitividad del dieléctrico. Como se mencionó antes, la impedancia característica de una línea es, entre otras cosas, una propiedad geométrica de la línea, de modo que dicha impedancia característica es la misma, independientemente de la longitud de la línea.

De la constante de atenuación tenemos que, para una línea de bajas pérdidas, se define con las condiciones siguientes:

$$\omega L \gg R \quad \omega C \gg G$$

Con lo que las constantes de atenuación que parten de las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(RG - \omega^2 LC) + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad (2.20)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\omega^2 LC - RG) + \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)}} \quad (2.21)$$

De las cuales se reducen aproximadamente:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(R \sqrt{\frac{c}{L}} + G \sqrt{\frac{L}{c}} \right) \quad (2.22)$$

$$\beta = w \sqrt{LC} \quad (2.23)$$

Existe una estricta condición de proporcionalidad entre el voltaje y las ondas de corriente en una línea de transmisión, cuando una onda llega a una discontinuidad en una línea donde cambia (Z_0), este ajuste lleva a cabo en la forma de la iniciación de dos pares de la nueva onda: la onda de tensión reflejada y su compañero actual hacia atrás en el cable y se superpone a la onda incidente. La onda refractada penetra más allá de la discontinuidad y pueden ser calculadas mediante las siguientes expresiones:

Coefficiente de refracción es n :

$$n = \frac{2 \cdot Z_d}{Z_d + Z_0} \quad (2.24)$$

Coefficiente de reflexión es ρ :

$$\rho = \frac{Z_d - Z_0}{Z_d + Z_0} \quad (2.25)$$

Z_0 es impedancia característica del equipo.

Z_d es impedancia característica de la discontinuidad.

Valores de impedancia	Coefficiente de Refracción	Coefficiente de Reflexión	Análisis
Corto circuito $Z_0 = \text{cero}$	0	-1	No hay adaptación de impedancia.
Circuito Abierto $Z_0 = \text{infinito}$	2	1	No hay adaptación de impedancia.
$Z_0 = Z_d$	1	0	No hay reflexión la carga esta acoplada.

Tabla 2.2 valores de coeficiente de refracción y reflexión para distintos eventos.

Observando que los medios en los cuales se puede propagar una onda pueden variar, la velocidad de propagación (V_p), para un medio cualquiera de permitividad $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ y permeabilidad $\mu = \mu_0 \mu_r$, esta viene expresada por:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r} \sqrt{\mu_0 \mu_r}} \quad (2.26)$$

2.9 MODELO J. MARTI.

Este modelo se encarga de aproximar la constante de propagación e impedancia característica por funciones racionales y utiliza una matriz de transformación constante para cambiar valores del dominio modal al dominio de fases, cuya influencia para líneas aéreas no es muy importante, pero en cables es de suma relevancia, puesto que evita que lleguen resultados inservibles (Martí, 1982). Una limitación en su comportamiento inestable para frecuencias muy bajas, si bien es posible obtener resultados convincentes, requiere de ciertas manipulaciones en los datos efectuar el ajuste.

Cuando incluyen pérdidas en el circuito como es el caso del modelo J. Martí se vuelve complicado escribir de manera práctica la respuesta de las ecuaciones en el dominio del tiempo, en esta relación puede darse fácilmente en el dominio de la frecuencia.

$$Vk(w) = \cosh(\gamma(w)l) Vm(w) - Zc(w) \sinh(\gamma(w)l) Im(w) \quad (2.39)$$

$$Ik(w) = \frac{1}{Zc(w)} \sinh(\gamma(w)l) Vm(w) - Zc(w) \cosh(\gamma(w)l) Im(w) \quad (2.40)$$

Donde la impedancia característica de la línea está definida como:

$$Zo(w) = \sqrt{Z(w)Y(w)} \quad (2.41)$$

Y la constante de propagación:

$$\gamma(w) = \sqrt{\frac{Z(w)}{Y'(w)}} \quad (2.42)$$

$$Z(w) = R(w) + jwL(w) \quad (2.43)$$

$$Y(w) = G(w) + jwC(w) \quad (2.44)$$

Donde:

R(w) es la resistencia serie por unidad de longitud.

L(w) es la inductancia serie por unidad de longitud.

G(w) es la conductancia de derivación por unidad de longitud.

C(w) es la capacitancia de derivación por unidad de longitud.

2.9.1 Fenómeno físico

En los primeros modelos de línea dependientes de frecuencia (Budner,1970), se usó el concepto de funciones de peso, las cuales fueron incorporadas para relacionar los voltajes y corrientes, pero estas funciones de este tipo de modelos son altamente oscilatorias y difíciles de evaluar como se muestra en la figura 2.23 con las funciones $a_1(t)$ y $a_2(t)$.

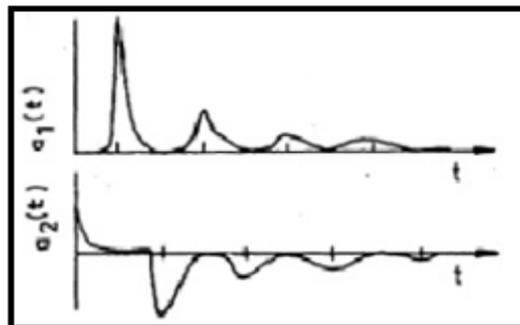


Figura 2.14 Funciones de peso (Marti,1982).

De las funciones de peso vistas anteriormente, $a_2(t)$ Es la más complicada de calcular, es por ello que se hace una nueva formulación en la cual se elimina y se

reduce la oscilación en $a_1(t)$; en el sentido físico el modelo de la función de propagación de $a_1(t)$ se muestra en la figura 2.24, donde la línea se excita con un pulso de tensión y sus extremos termina con una impedancia equivalente (Z_{eq}). Es allí donde se ve claramente que $a_2(t)$ está relacionado con el voltaje del nodo k y $a_1(t)$ con el del nodo m.

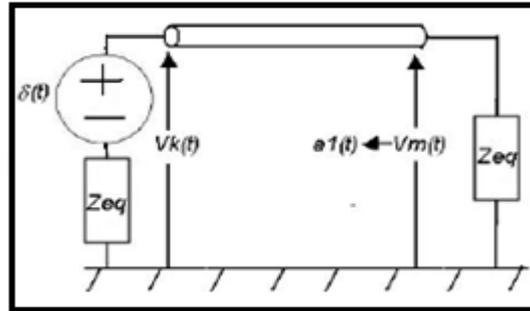


Figura 2.15 Interpretación física de la propagación de $a_1(t)$.

Los picos en las oscilaciones que se muestran en la figura 2.23, se deben a sucesivas reflexiones en ambos extremos de la línea. Si se ubica la impedancia cuya respuesta de frecuencia sea la misma que la impedancia característica no habrá reflexiones en ambos extremos de línea como se puede notar en la figura 2.25, donde la constante relacionada con el envío $a_2(t)$ se hace cero y la constante $a_1(t)$ en la recepción es un único pulso (Martí,1982).

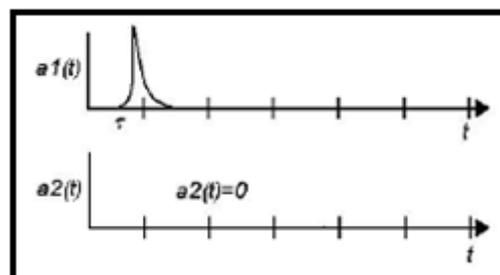


Figura 2.16 Funciones de propagación $a_1(t)$ y $a_2(t)$ en el modelo J.Martí (Martí, 1982).

2.9.2 Desarrollo matemático del modelo

Para representar matemáticamente el modelo, este se puede separar en dos componentes, funciones de onda viajera que va alejándose del nodo emisor y funciones de onda viajera que van acercándose al nodo emisor, como la muestran las ecuaciones siguientes (2.45) y (2.46) para las que se alejan y las ecuaciones (2.47) y (2.48) para las que se acercan.

$$Fk(w) = Vk(w) + Zeq(w)Ik(w) \quad (2.45)$$

$$Fm(w) = Vm(w) + Zeq(w)Im(w) \quad (2.46)$$

$$Bk(w) = Vk(w) - Zeq(w)Ik(w) \quad (2.47)$$

$$Bm(w) = Vm(w) - Zeq(w)Im(w) \quad (2.48)$$

Donde (Zeq) es la impedancia en la red y es aproximadamente la impedancia de la línea (Zo). Al comparar las ecuaciones (2.45) a (2.48), con las ecuaciones básicas de la línea en frecuencia (2.39) y (2.40), se obtiene lo siguiente:

$$Bk(w) = A1(w)Fm(w) \quad (2.49)$$

$$Bm(w) = A1(w)Fk(w) \quad (2.50)$$

Donde:

$$A1(w) = e^{-\gamma(w)L} = \frac{1}{\cosh(\gamma(w)L) + \sinh(\gamma(w)L)} \quad (2.51)$$

Por lo tanto, las relaciones de tensión y corriente que caracterizan el modelo de la línea de JMartí se encuentra en las ecuaciones que estarán expuestas seguidamente, cuyo circuito equivalente se presenta en la figura 2.26.

$$Vk(w) = Zc(w)Ik(w) + Emh(w) \quad (2.52)$$

$$Vm(w) = Zc(w)Im(w) + Ekh(w) \quad (2.53)$$

Donde:

$$Emh(w) = (Vm(w) + Zc(w)Im(w))A1(w) \quad (2.54)$$

$$Ekh(w) = (Vk(w) + Zc(w)Ik(w))A1(w) \quad (2.55)$$

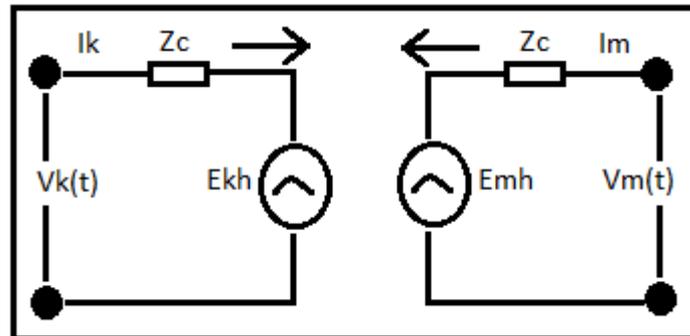


Figura 2.17 Modelo de línea de JMartí (Martí, 1982).

Que las transformadas en el dominio del tiempo se convierten en:

$$Vk(t) = Zc * Ik + (Vm(t) + Zc * Im(t)) * a1(t) \quad (2.56)$$

$$Vm(t) = Zc * Im + (Vk(t) + Zc * Ik(t)) * a1(t) \quad (2.57)$$

Donde el símbolo (*), significa la evaluación numérica de la convolución; dicha operación para el cálculo de transitorios es lenta. Para acelerar este proceso, es necesario sintetizar los elementos involucrados en la convolución, como son la impedancia equivalente y la función de propagación, debido a la naturaleza irracional de $a_1(t)$ y (Zeq) . La síntesis por medio de funciones racionales permite que la evaluación numérica de la convolución se vuelva más rápida, ya que se obtiene exponenciales en el dominio del tiempo, aplicando así las técnicas de convolución recursiva (Martí,1982).

2.9.3 Síntesis de la impedancia equivalente

La impedancia equivalente (Zeq) que representa la impedancia característica de la línea (Zo) es simulada por una serie de bloques de resistencia y capacitancia (R-C), paralelos como se muestra en la siguiente figura.

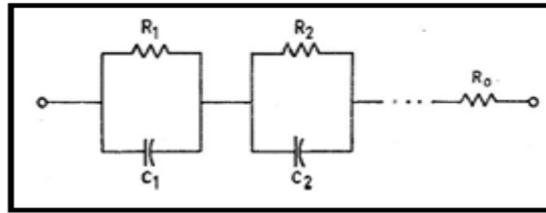


Figura 2.18 Circuito equivalente de la síntesis de (Z_{eq}) (Marti,1982).

El número de bloques se determina de manera automática con el procedimiento:

Primero se sintetiza la (Z_{eq}) por medio de la función (Z_o), que se hace con la ecuación (2.41), con parámetros dependientes de la frecuencia obtenidos con las ecuaciones de Carson y se hace la primera aproximación en el plano complejo ($s = \sigma + jw$), por funciones racionales.

$$Z_{eq}(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = H \left(\frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \right) \quad (2.58)$$

Por los polos y ceros de esta función son reales y positivos, y los valores de los bloques (R-C), se obtienen al expandir la ecuación antes expuesta en una serie de fracciones simples(Marti,1982).

$$Z_{eq}(s) = K_o + \frac{K_1}{s+p_1} + \frac{K_2}{s+p_2} + \dots + \frac{K_n}{s+p_n} \quad (2.59)$$

Donde en la figura de circuito equivalente de la síntesis de la impedancia equivalente (Z_{eq}):

$$\begin{aligned} R_o &= K_o \\ R_i &= \frac{K_i}{p_i} \\ C_i &= \frac{1}{K_i} \end{aligned} \quad (2.60)$$

2.9.4 Función de propagación y convolución.

De la figura 2.25, se puede ver que la función $a_1(t)$ puede ser expresada de la siguiente forma:

$$a_1(t) = p(t - \tau) \quad (2.61)$$

Donde $p(t)$ tiene la misma forma que $a_1(t)$, pero se desplaza τ unidades de tiempo hacia el origen, por las propiedades de transformada de Fourier la ecuación anterior en la frecuencia es:

$$A_1(w) = P(w)e^{-jw\tau} \quad (2.62)$$

La función $p(w)$ es aproximadamente en el plano complejo por una función racional de la forma.

$$Pa(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = H \left(\frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \right) \quad (2.63)$$

Ya que $A_1(w)$ corresponde a la respuesta de un sistema físico pasivo y tiende a cero cuando $w \rightarrow \infty$. el número de ceros debe de ser menos que el número de polos y la parte real del polo debe de estar en la parte izquierda del plano complejo.

Después de un desarrollo en fracciones parciales de la ecuación antes vista y correspondiente transformación en el dominio del tiempo la aproximación $a_1(t)$ de transforma en:

$$a_1(t) = (K_1e^{-p_1(t-\tau)} + K_2e^{-p_2(t-\tau)} + \dots + K_me^{-p_m(t-\tau)})u(t - \tau) \quad (2.64)$$

El número de exponenciales en la aproximación depende de la línea particular del modo.

2.10 SUMARIO

En esta sección de la investigación, se presenta el estudio teórico de los conocimientos básicos de cables de potencia, descargas parciales, ondas y modelos de líneas de. Siendo el base análisis de técnica de TDR, para el diagnóstico de propagación de ondas. Por lo que, se desarrolló el estudio en distintas geometrías de cables y en los modelos de líneas: básico y J. Martí utilizando la herramienta del ATP/EMTP y con distintos casos de estudio, que ayudaran a una mejor interpretación de las trazas.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO III

PROPAGACION DE LAS ONDAS DE DESCARGAS PARCIALES EN CABLES DE POTENCIA

En la actualidad la medida de descargas parciales constituye una herramienta eficaz para el diagnóstico de fallos de aislamiento en los cables de potencia y posibles fallas en un sistema eléctrico de potencia, es por ello que en este capítulo se abordaran estudios y teorías de la propagación de un pulso que viaja libre en el medio y cómo evoluciona este al verse sometido a una imperfección a lo largo de trayectoria debido a cambio de impedancia o discontinuidad en el cable como consecuencia de alteraciones o cambio en el coeficiente de reflexión del pulso, haciendo uso del estudio de las ondas electromagnéticas en el medio aislante.

3.1 ORIGEN DE LA PROPAGACION DE DESCARGAS PARCIALES.

La detección y localización de la descarga parcial es una herramienta útil para el mantenimiento y la condición monitoreo de cables de energía eléctrica y ha atraído esfuerzos de investigación y desarrollo desde los años ochenta un modelo de señal DP utilizando un Pulso Gaussiano estrecho y aproximación cuadrática para la atenuación del cable, teniendo como acotación importante la selección de los parámetros para la propagación en el modelo cuadrático debe tomarse cuidadosamente para proporcionar una aproximación veraz debido a la variación de la función de propagación según el tipo de cable y el grado de envejecimiento,(Z. Liu and T.R.Blackburn, 2005).

3.2 PARAMETROS PARA EL ESTUDIO DE PROPAGACION DE DESCARGAS PARCIALES EN CABLES DE POTENCIA.

Para el análisis más a fondo de esta discontinuidad de campo eléctrico dentro del medio aislante que se ocasiona en el instante de una descarga parcial es necesario interpretar correctamente las reflexiones sucesivas y de acumulación de los voltajes en los puntos de transición, por medio del diagrama de celosía de Bewley, que esencialmente consta de diagramas de espacio en función del tiempo en los que tenemos que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Se inicia de un diagrama de disposición de los componentes bajo estudio tienen distinto valor de impedancia característica, en el que se deben de señalar los puntos de transición, impedancias características y longitudes de tramos en la red.
- Cálculo de coeficiente de reflexión.
- Se distribuye una disposición de ejes cartesianos con los ejes representando la amplitud de voltaje vs el tiempo de recorrido de la onda.

Por medio de esta distribución del diagrama podemos observar los cambios de impedancia característica cuando existe un desacople o cambio de impedancia a lo largo de la línea lo cual generará distintas reflexiones con valores de amplitud más bajos, estos valores pueden ser cálculos por las fórmulas antes mencionadas en el capítulo anterior de coeficiente de reflexión y refracción el cual nos permite entender la magnitud de la onda que viaja a medida que encuentra cambios de impedancia, es por ello que partiendo de un pulso inyectado desde la fuente que viaja hasta el extremo de la carga en un estado estable sin pérdidas, para observar diferencias en lo que se vayan introduciendo empalmes y terminales a lo largo de la línea donde encontraremos perturbaciones en el pulso original debido a las reflexiones por cambio de impedancias, uniones de cables o fallas en el sistema que tengan como consecuencia algún cambio en la geometría del cable y este interactúe directamente en el viaje de la onda como se podrá observar en las siguientes figuras cuando tenemos un sistema sin reflexiones (ideal) y luego el de un sistema de potencia.

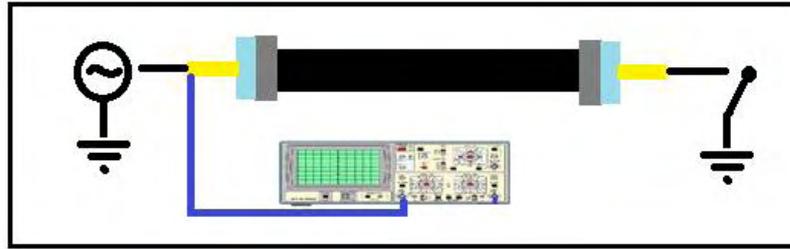


Figura 3.1 Sistema de medición para sistema de cable de potencia sin anomalías (ideal).

Por medio de la figura 3.1, que representa el circuito de medición se tomaran muestras del viaje de la onda en el medio y serán representadas en un diagrama de Bewley cuando estas no tienen cambio de impedancia a lo largo de su longitud.

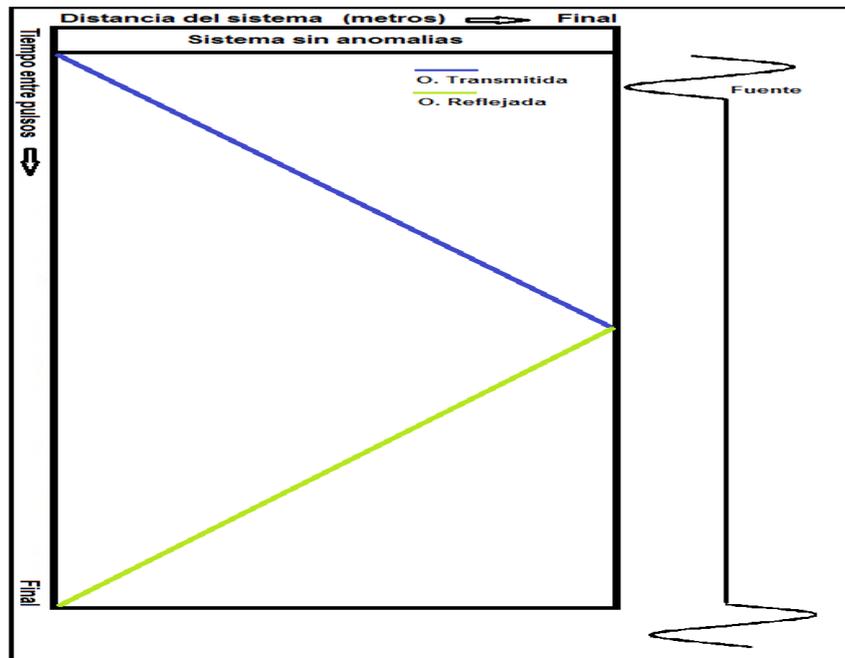


Figura 3.2 Diagrama de celosía de Bewley para sistema de potencia sin anomalías (ideal).

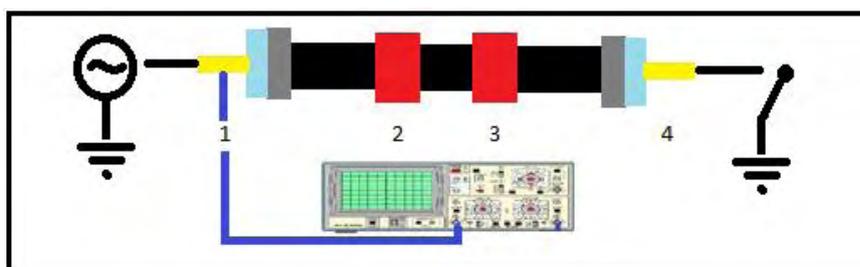


Figura 3.3 Sistema de medición para sistema de cable de potencia real.

Por medio de la figura 3.3, que representa el circuito de medición se tomaran muestras del viaje de la onda en el medio y serán representadas en un diagrama de Bewley cuando a lo largo del sistema encontramos cambio de impedancia a lo largo de su longitud, ocasionados por empalmes y terminales como ocurre en la vida real.

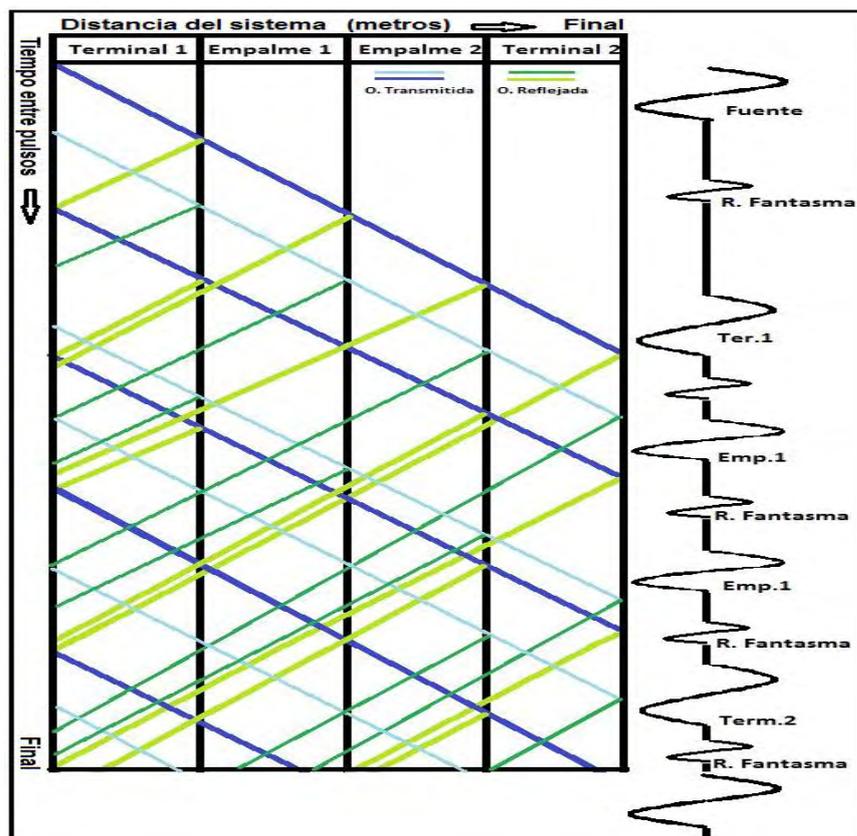


Figura 3.4 Diagrama de Celosía de Bewley para sistema de potencia con empalmes y terminales.

3.3 ANALISIS DE MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES CON EL METODO DE ULTRA ALTA FRECUENCIA (UHF), DE ACUERDO A LA NORMA DE LA IEC 60270.

De acuerdo a la norma nos establece que la detección de descargas parciales por ultra banda ancha o de alta frecuencia, que va a ser el método usado en esta investigación, se puede realizar los análisis de diagramas de respuesta de

viaje de pulso por medio de un osciloscopio con ancho de banda altos (2MHz) o por instrumentos de frecuencia selectiva como el analizador de espectros junto con un dispositivo de acoplamiento, el objetivo de la aplicación es la medición y cuantificación de la forma o espectro de frecuencia de los pulsos de descarga parcial de corriente o tensión en equipos de parámetros distribuidos, por ejemplo cables, maquinas rotatorias o equipos aislados en gas o bien para proporcionar información acerca de la física u origen del fenómeno de la descarga parcial (IEC 60270, 2000).

El circuito de medición usado será el descrito en la figura 3.3, el que consta de unos transformadores de corriente de alta frecuencia grabara y será enviada la señal al osciloscopio donde se observara el viaje de la onda y por medio del mismo saber a qué distancia encontramos la falla, que es la ventaja que se puede obtener con este tipo de medición.

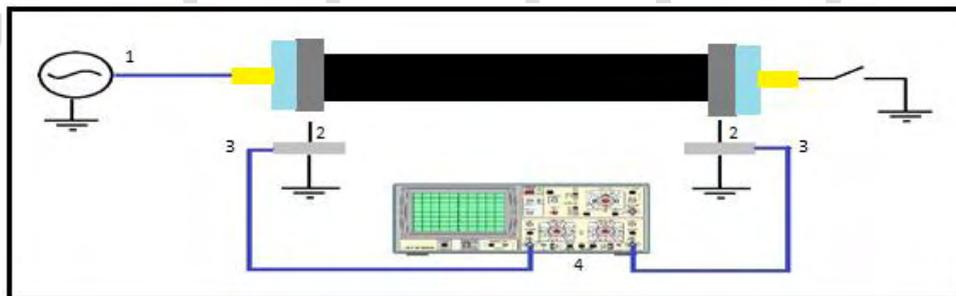


Figura 3.5 Sistema de medición de propagación de pulsos de descargas parciales, donde 1. Fuente alterna, 2. Pantalla metálica, 3. Transformadores de corriente de alta frecuencia, 4 osciloscopio.

3.4 EFECTOS DE LA PROPAGACION DE DESCARGAS PARCIALES

Este ítem es muy importante ya que se divide en dos grandes efectos tanto la distorsión que ocurre en la onda, así como el efecto sobre el cable ya que son capaces de generar una serie de eventos enlazados a causa de su presencia, los efectos más comunes que éstas provocan se describen a continuación:

- Provocan que el sistema de aislamiento se degrade con mayor rapidez.
- Pueden ocasionar fallas a tierra.
- Pueden inducir una la salida de operación inesperada.

Por consiguiente, todas estas causas contribuyen a disminuir el ciclo de vida del cable de potencia. Es por ello que es importante saber las principales características de las ondas cuando realizan su viaje bajo esta condición partiendo de la figura 3.4, como sabemos el efecto de disminución de energía propio de la onda debido al cambio de impedancia pierde amplitud hasta atenuarse totalmente como la explica el diagrama de Bewley, y su cambio de frecuencia se debe al efecto capacitivo de la descarga disruptiva dentro de la cavidad que altera el viaje de la onda provocando consecuencias como se verán en la siguiente figura.

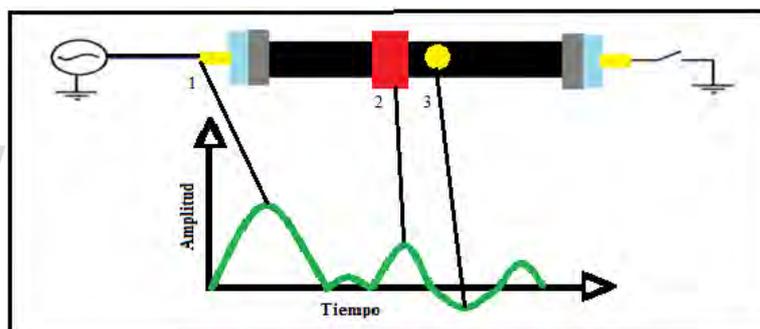


Figura 3.6 Efectos de descargas parciales en sistema de cable de potencia. Donde 1. Señal de entrada, 2. Reflexión referente al empalme y 3. Distorsión por descarga parcial.

3.5 SUMARIO

En este capítulo, se explican las teorías que permiten comprender el comportamiento de la propagación de ondas, bajo los efectos que están presentes en un sistema de cable de potencia de los empalmes o anomalías que se dan bajo ciertas condiciones. Especificando, los diferentes parámetros que permiten la elaboración e interpretación del diagrama de Bewley, así como los casos básicos establecido para el diagnóstico preciso de las traza TDR.

CAPÍTULO IV

MODELACION DE CABLE SUBTERRANEO PARA LA PROPAGACION DE ONDAS A TRAVES DEL SOFTWARE ATP/EMTP

4.1 DESCRIPCION DEL PROGRAMA.

El programa de transitorios electromagnéticos EMTP (Electro Magnetic Transient Program), o ATP (Alternative Transient Program), es un programa utilizado para simular transitorios electromagnéticos. El EMTP fue desarrollado a fines de la década del 60 por el Dr. Hermann DOMMEL, quien cedió el programa a la Boneville Power Administration (BPA). Desde entonces, el EMTP ha sido expandido y distribuido bajo la dirección de la BPA hasta que la empresa lo libero para evadir el mantenimiento y lo siguiera soportando el Electric Power Research Institute (EPRI).

El ATPDRAW/EMTP, posee un software confiable y rápido que puede configurarse con un programa adicional, el cual actúa como un procesador de datos, permitiendo ensamblar los distintos componentes del modelo en forma gráfica como el ATPDRAW y el ATPLOT, entre otros. (Sergio Joya y Alexander Pacheco, 2010).

Los estudios que involucran el uso del EMTP/ATP, puede ser adaptado para casi todos los elementos eléctricos y sus casos de estudio, en particular tienen distintos modelos de líneas de transmisión que pueden ser adaptados a cables subterráneos que son relevantes en el presente estudio, entre los cuales se mencionan los siguientes:

- Modelo constituido por elementos concentrados RLC, estos modelos pueden ser simples ramas RLC serie, circuitos Pi polifásicos que pueden representar línea de transmisión o transformadores.

- Modelo de onda viajera para representar adecuadamente una línea o un cable.
- Impedancias de tipo no lineal: Resistencias no lineales, inductancias no lineales, resistencias variables con el tiempo.
- Función de voltaje y corriente ideales de tipo escalón, sinusoidal, rampa, exponencial y definida punto a punto.

4.2 MODELOS DE LINEAS

Tomando en cuenta de las diferentes alternativas que se nos presentan para realizar el modelo de un cable de potencia en el cual se va a estudiar la propagación de ondas a través del medio aislante cuando en este ocurra una descarga parcial, es por ello que definiremos a continuación el funcionamiento de cada uno de los modelos dentro del programa.

4.2.1 Modelo básico

El Modelo básico o de Clarke utiliza para los cálculos numéricos una matriz de transformación constante, debido a que en las líneas transpuestas los parámetros de secuencia siempre se pueden evaluar de la misma forma. Una matriz de transformación descompone la propagación dada por línea acoplada en varios modos de propagación en caso que estos sean perpendiculares entre sí, siendo el caso de un sistema trifásico. Si la línea es monofásica no se requiere matriz de transformación. Los valores que se introducen en el modelo serán mostrados en la figura 4.1.

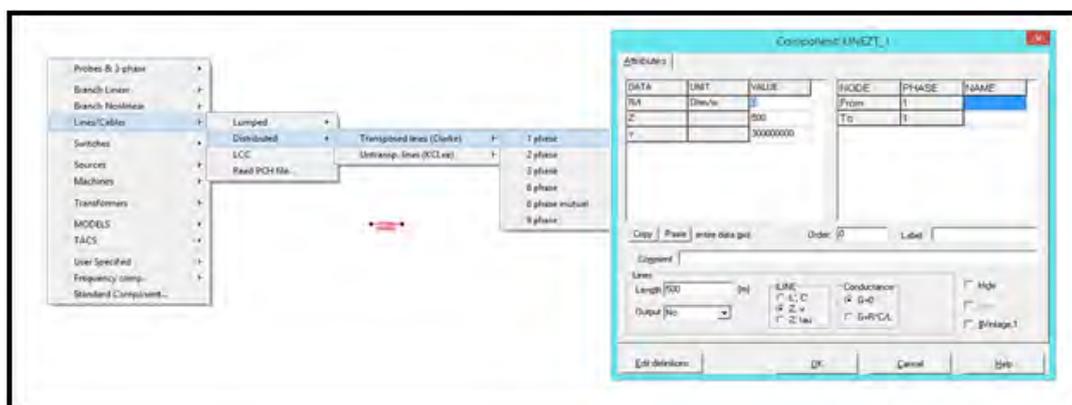


Figura 4.1 Modelo Básico con parámetros para línea monofásica

4.2.2 Modelo de J. Martí

Este modelo se caracteriza por realizar una aproximación de la impedancia característica y la constante de propagación de la onda en funciones racionales, de los modelos anteriormente mencionados es que tiene una mejor aproximación a los resultados de la respuesta de cables subterráneos ya que este trabaja con parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia. En la figura 4.3 se muestra los valores que se deben de ingresar en modelo para una línea monofásica.

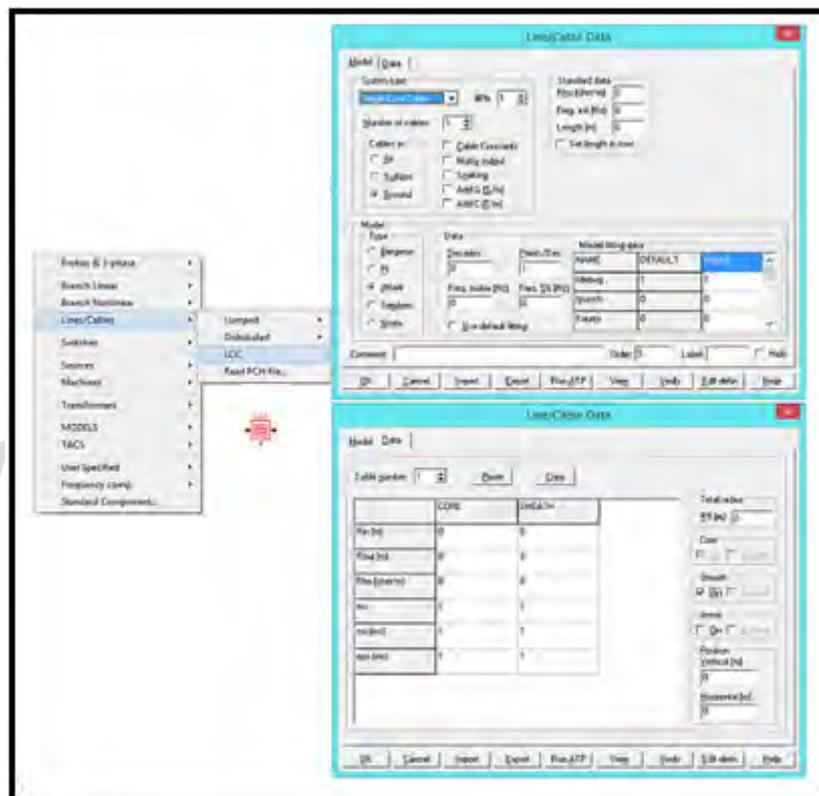


Figura 4.2 Modelo J. Martí con parámetros para línea monofásica.

4.3 FUNCIONAMIENTO INTERNO DE PROPAGACION DE ATP/EMTP, PARA DAR SOLUCIONES GRAFICAS DE DOS MODELOS DE CABLES DE POTENCIA.

De los modelos anteriormente expuestos se tomarán en cuenta para la simulación del cable de potencia el modelo Básico y J. Martí para observar la propagación de la onda electromagnética en el medio y así comparar cual es más

preciso en la obtención de resultados. A continuación, se explicará por medio del siguiente diagrama de flujo el proceso de simulación de los modelos en el ATPDraw.

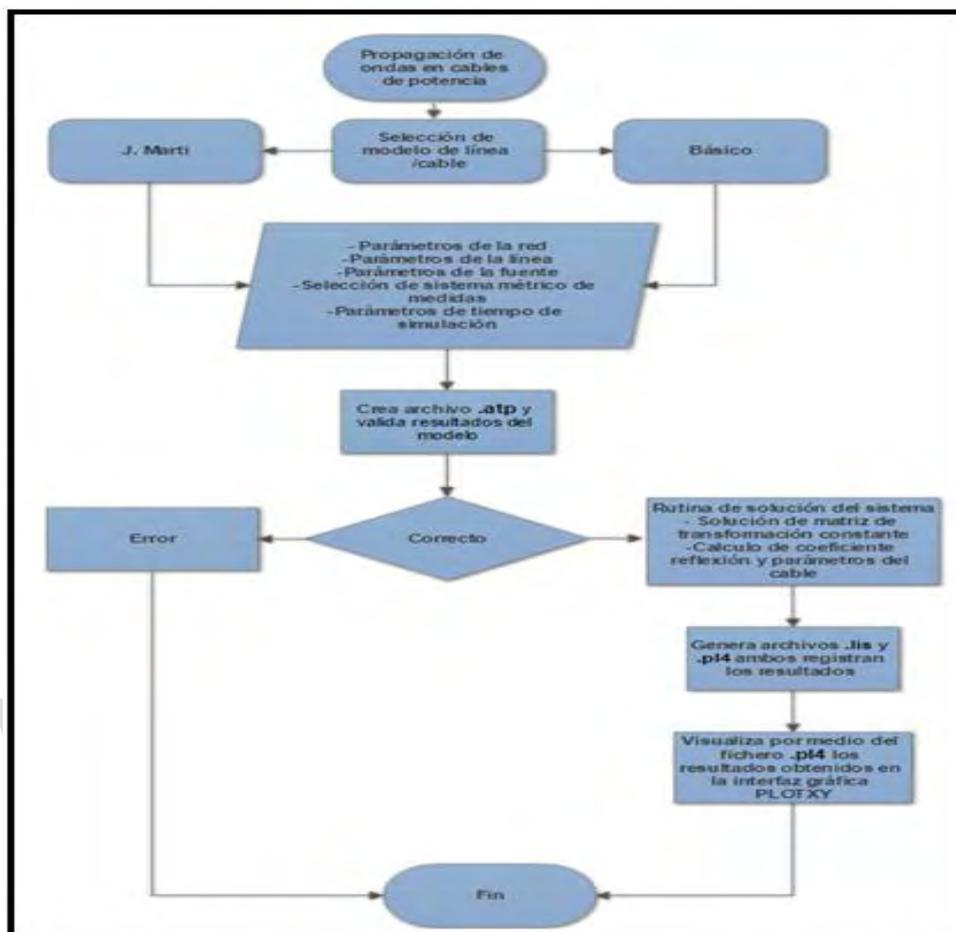


Figura 4.3 Diagrama de bloques del funcionamiento interno del ATP/EMTP en la modelación de la propagación de ondas en el sistema de cable de potencia.

En el diagrama de flujo antes expuesto se explica el funcionamiento interno del programa de acuerdo a las instrucciones que sigue para la representación gráfica del fenómeno electromagnético, en donde el primer paso es seleccionar el modelo por el cual se quiere obtener la representación, seguidamente introducen parámetros del cable y condiciones del terreno, se crea un archivo de validación de resultados que ayuda para corroborar si los datos son correctos y de ser positivo realiza una rutina donde arroja la interfaz gráfica junto con los resultados de viaje de onda en el caso que se representa.

4.4 ELEMENTOS DE UNA LINEA DE TRANSMISION LCC del ATP/EMTP.

Con este tipo de elemento podemos seleccionar el tipo de configuración de la red a través de los parámetros del cable a continuación en las siguientes tablas se dará a conocer los datos a ingresar para la simulación de los modelos, en las primeras tablas se detallarán los valores de los modelos como condiciones del terreno, frecuencia del sistema, número de conductores, tipo del modelo entre otros y luego los datos del conductor.

Cables compactos (un solo núcleo) (Single Core Cable)	
Cable Constants	Esta opción nos permite pasar de los parámetros del cable a ingresar las constantes, aparte la opción de puesta a tierra esta activada y la opción de conductancia y capacitancia se desactivan (Add G y Add C).
Matrix Output	Permite imprimir los datos de la matriz de admitancia e impedancia (R, wL y wC).
Skaning	Si es seleccionado este ítem, se asume los cables transpuestos.
Add G	Si se selecciona este parámetro se permite la conductancia entre conductores.
Add C	Si se selecciona este parámetro se permite la conductancia entre conductores.
Cable In	Permite seleccionar si los cables van aéreos, en superficie o subterráneos.
Number of cables	Nos da el número de conductores en el sistema.

Tabla 4.1 Parámetros para definir cables compactos.

Datos del conductor (Data)			
	Conductor (Core)	Pantalla metálica (Sheath)	Radio total del conductor (Total Radius)
Rin	Radio Interior del conductor	Radio Interior de la pantalla metálica	No aplica
Rout	Radio exterior del conductor	Radio Exterior de la pantalla metálica	No aplica
Rho	Resistividad de conductor	Resistividad de la pantalla	No aplica
Mu	Permitividad relativa del conductor	Permitividad relativa de la pantalla	No aplica
Mu(ins)	Permitividad del aislante	Permitividad del aislante	No aplica
Eps(ins)	Permeabilidad del aislante	Permeabilidad del aislante	No aplica
R3	No aplica	No aplica	Radio total del cable
Core	No aplica	No aplica	Activa la capa del conductor
Sheath	No aplica	No aplica	Activa la capa de la chaqueta metálica
Vertical	No aplica	No aplica	Distancia Vertical del conductor
Horizontal	No aplica	No aplica	Distancia Horizontal del conductor

Tabla 4.2 Parámetros para definir datos de la geometría del conductor.

Existen datos estándares para todos los modelos, estos son: la resistividad del suelo (Rho), bajo punto de frecuencia para el modelo de J. Martí (Freq. Init) y por último la longitud la cual está dada en kilómetros o millas según el sistema de medidas seleccionado. En las simulaciones se emplearon el sistema para Cables Compactos **Single Core Cable** (Subterráneo).

4.4.1 Parámetros de simulación para modelación de cable subterráneo

De acuerdo a las características del viaje del pulso de una descarga parcial que es de interés en este estudio se definen los siguientes parámetros para facilitar la visualización del evento, el resto de parámetros se tomaran los que arroja el programa por defecto.

Parámetros de simulación en el ATP en el dominio del tiempo (ATP Settings)							
Simulation	valores	Simulation Type	On/Off	Output	Variables	Printout	On/Off
DeltaT	2e-11s	Time domain	On	Print Freq.	500	Network connectivity	On
Tmax	2.5us	Frequency scan	Off	Plot Freq.	1	Steady-state phasors	On
Xop	0	Harmonic (HFS)	Off	Plotted Output	On	Extremal values	On
Cop	0	Power Frequency	On	MemSave	Off	Extra Printout control	Off
Freq.	60			Auto-detection errors	Off		

Tabla 4.3 Parámetros para definir ajustes de tiempo de integración para la solución numérica y grafica en la simulación.

4.5 DESCRIPCION Y GEOMETRIA DE LOS PARAMETROS DEL CABLE

Para la verificación del modelo y las pruebas se tomaron en cuenta dos cables de media y alta tensión, el cable de media tensión es de 15 kV instalado en el laboratorio de extra alta tensión de LAPEM, en cual sirve de respaldo para la línea principal que alimenta el transformador de 900 kV, y está conformado por conductor de cobre suave, con pantalla semiconductor sobre el conductor y aislamiento de polietileno de cadena cruzada (XLPE), pantalla sobre el aislamiento extruida, pantalla metálica a base de alambres de cobre y cubierta de policloruro de vinilo (PVC). En cuanto a el cable de alta tensión correspondiente a 115 kV es monopolar formado por conductor de aluminio duro compacto, con pantalla semiconductor sobre el conductor, aislamiento de polietileno de cadena cruzada, pantalla sobre el aislamiento extruida, cinta semiconductor bloqueadora de agua, pantalla metálica a base de alambres de cobre y cinta de cobre dispuesta en hélice abierta sobre los alambres, cinta bloqueadora de agua y cubierta de Polietileno de alta densidad negro

con franjas rojas; el cual se tiene un tramo de 20 metros con configuración de dos terminales y un empalme ubicado a 14 y 6 metros respectivamente de las terminales del cable, en la siguiente tabla se expondrán de manera detalla los datos fundamentales de los cables a estudiar y en la figura 4.5 los geometría de cada uno de los cables.

Tensión de operación (kV)	15	115
Calibre (AWG o Kcmil)	500	1500
Área de sección transversal nominal (mm ²)	253	760.1
Numero de alambres del conductor	37	91
Diámetro nominal del conductor (mm)	18.6	34.8
Espesor del aislamiento nominal (mm)	4.45	20.32
Diámetro sobre aislamiento nominal (mm)	29.0	77.9
Diámetro exterior nominal (mm)	37.2	96
Peso aproximado (Kg/100 m)	601	1216

Tabla 4.4 características generales de cable Latincasa de 15 kV de Latincasa y General Cable de 115 kV.

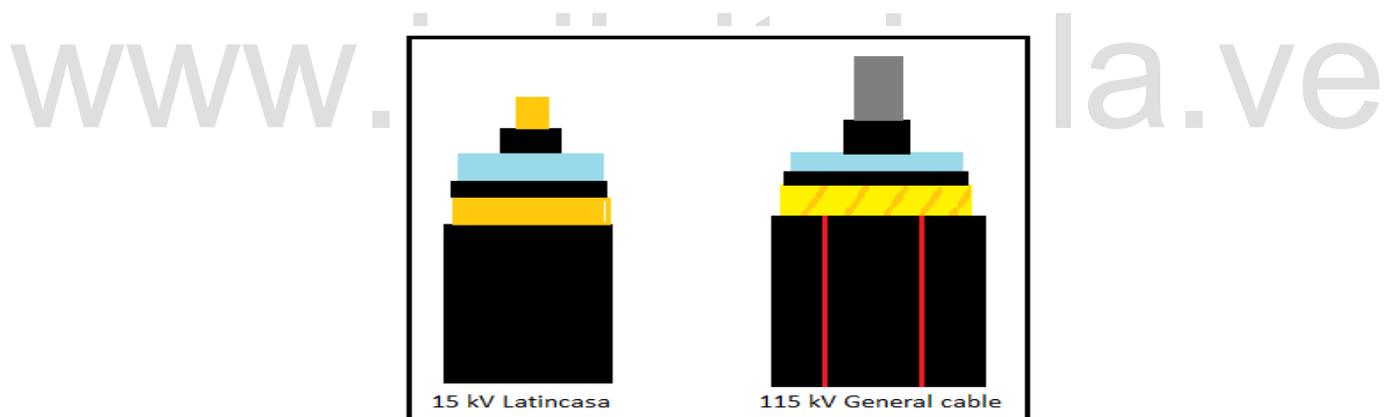


Figura 4.5 Esquemas de cables subterráneos Latincasa 15 kV y General Cable 115 kV.

En la tabla 4.5 se mostrarán los valores que fueron insertados para la modelación del estado de la red del sistema, y en las tablas 4.6 y 4.7 la geometría de cada uno de los cables.

Modelado del sistema de cable de potencia (LCC Model)					
System type	Single Core	Standar data		Model Data	
Number of cable	1	Rho (ohm*m)	30	Decades	8
# PH	1	Freq. Init.(Hz)	1	Freq. Matrix (Hz)	5000
Cable in	Ground	Lenght (m)	400	Points/ Dec	10
Cable Constants	On	Set Lenght in icon	On	Freq. SS(Hz)	60
Matrix Output	Off	Model Type	J. Marti	Use default fitting	on

Tabla 4.5 Parámetros de la red para modelación de cable de 15 kV y 115 kV.

Modelado del sistema de cable de potencia (LCC Data)				
	Core	Sheath	Total radius R5 (m)	
Rin (m)	0	0.0138	Core	0.01865 Ground
Rout(m)	0.00935	0.01455	Sheat	Ground y On
Rho (ohm*m)	1.72e-8	1.72e-8	Armor	-
Mu	1	1	Position Vertical (m)	1
Mu (ins)	1	1	Position Horizontal (m)	-1
Eps (ins)	2.3	2.3		

Tabla 4.6 Parámetros de la geometría del conductor para modelación de cable de 15 kV.

Modelado del sistema de cable de potencia (LCC Data)				
	Core	Sheath	Total radius R5 (m)	
Rin (m)	0	0.03772	Core	0.048 Ground
Rout(m)	0.0174	0.03895	Sheat	Ground y On
Rho (ohm*m)	2.7e-8	1.72e-8	Armor	-
Mu	1	1	Position Vertical (m)	1
Mu (ins)	1	1	Position Horizontal (m)	-1
Eps (ins)	2.3	2.3		

Tabla 4.7 Parámetros de la geometría del conductor de para modelación de cable de 115 kV.

Donde los radios tomados con respecto al conductor son los reflejados con las trazas negras y para la pantalla metálica con las rojas como se muestra a continuación en la Figura 4.6.


```

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 10000.4927 22414.3005 46128
Times of maxima : .124E-8 .124E-8 .50672E-6
Variable minima : 0.0 - .01905215 0.0
Times of minima : 0.0 .10706E-5 0.0

Blank card terminating all plot cards. [BLANK PLOT]

Memory storage figures for the preceding, now-completed data case. ----- Present Program
A value of "9999" indicates that no figure is available. 15-Apr-17 18:45:24 figure limit (name)
Size List 1. Number of electric network nodes. 4 6000 (LEBS)
Size List 2. Number of electric network branches. 3 10000 (LEBRCH)
Size List 3. Number of data values in R, L, C tables. 2 192000 (LDATA)
Size List 4. Number of electric network sources. 1 900 (LEKCT)
Size List 5. Storage for [Y] and triangularized [Y]. No. times = 1 Factors = 3 6 420000 (LYMAT)
Size List 6. Number of entries in switch table. No. flops = 0 0 1200 (LSWICH)
Size List 7. Number of distinct ALPHANUMERIC data names plus program SPY variables. 3 15000 (LSIZE7)
Size List 8. History points of distributed lines. 25265 120000 (LPAST)
Size List 9. Number of nonlinear elements. 0 2250 (LNOML)
Size List 10. Points of nonlinear characteristics. 0 3800 (LCHAR)
Size List 11. Number of Type-59 S.M. outputs. 0 720 (LSMOU7)
Size List 12. Total number of EMT output variables. 3 2000 (LSIZ12)
Size List 13. Working space for batch/SPY plotting. -9999 72800 (LSIZ13)
Size List 14. S.M./U.M. connections to TACS. -9999 510 (LBTAC)
Size List 15. Character storage in bytes for MODELS. -9999 90000 (LCTACS)
Size List 16. Total number of Type-59 S.M. masses. 0 800 (LMASS)
Size List 17. Number of Type-59 Synchronous machines. 0 90 (LSYN)
Size List 18. Branch and switch power/energy outputs. 0 254 (MAXPE)
Size List 19. Total floating-point TACS table space. 23 120000 (LTACST)
Size List 20. Non-copied recursive convolution data. 187 100000 (LPSEM)
Size List 21. Total nodal/phase [T] matrix storage. 1 3000 (LFD)
Size List 22. Total recursive convolution history. 15 15000 (LHIST)
Size List 23. Giant vectors for renumbering phasors; also extrema accumulation. 1 192000 (LSIZ23)
Size List 24. Peak phases of compensation for data. 0 120 (LCOMP)
Size List 25. Total table space for all U.M. usage. -9999 45000 (LSPCUM)
Size List 26. Square of max number of coupled phases. 1 260000 (LSIZ26)
Size List 27. Maximum number of MODELS top variables. -9999 600 (LSIZ27)
Size List 28. MODELS. Total work space is divided into INTEGER and REAL. 1st. REAL: -9999 210000 (LRTACS)
2nd. Second and last. statistics for INTEGER work space. 0 0 (LITACS)
Size List 29. RAM disk used by "TAPSAV" table saving (limit is "LABCOM" size ITLABL). -9999 600 (LSIZ29)
Size List 30. Taku Noda frequency-dependent circuits. 0 19 (LSIZ30)

Timing figures characterizing central processor (CP) solution speed. ----- CP sec Wait sec Real sec
Data input time (through blank card ending branches) .... 0.000 0.000 0.000
Node renumbering and phasor solution .... 0.000 0.000 0.000
After phasor solution, but before time-step loop .... 0.000 0.000 0.000
Integration of equations (time-step loop) .... 0.141 0.000 0.141
Plotting or STATISTICS termination overlays .... 0.000 0.000 0.000

Totals 0.141 0.000 0.141

```

4.8 CASOS DE ANALISIS PARA MODELACION CON CIRCUITO SIN EMPALMES Y TERMINALES.

Partiendo del siguiente circuito se procederá a modelar cada uno de los casos para los cables en estudio como se muestra en la figura 4.7.

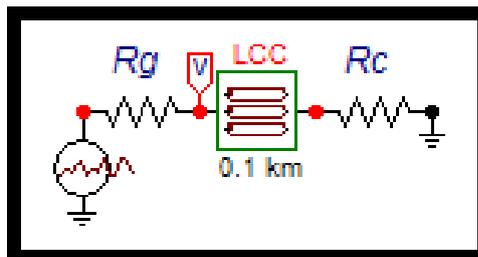


Figura 4.1 Modelación de circuito sin empalmes y terminales.

4.8.1 Caso 1 Circuito acoplado

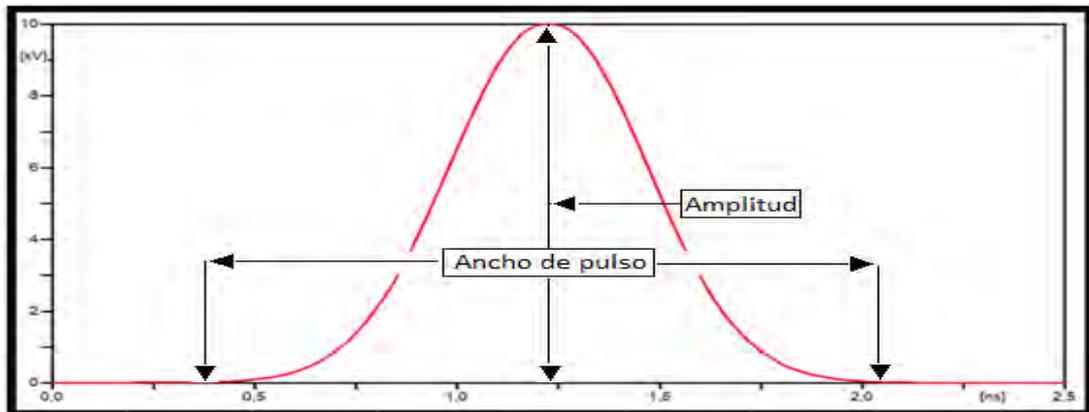
Con el sistema totalmente acoplado en el cual la resistencia del generador (R_g) es igual a la resistencia de la carga (R_c), se dice que esta acoplada porque posee todo el sistema el mismo valor de impedancia que el cable subterráneo (LCC), en la cual no deben de existir reflexiones ya que de acuerdo a esta configuración de

parámetros no tenemos distorsión de la señal lo que conlleva a una transmisión total de la energía sin pérdidas.

Impedancia característica del cable de 15kV 15.5Ω .

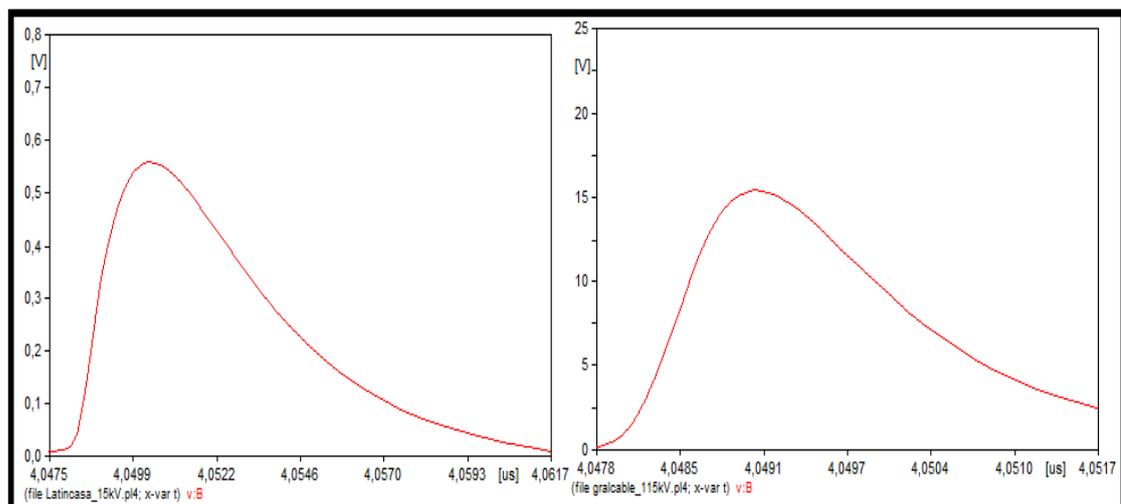
Impedancia característica del cable de 115kV 31.5Ω .

El pulso de entrada tiene una amplitud de 10kV y un ancho de 2 ns como se puede mostrar en la siguiente gráfica.



Gráfica 4.2 Pulso de entrada del sistema sin empalmes y terminales.

En la gráfica 4.3 se estudiará el viaje del pulso y se detallará las características de viaje del pulso



Gráfica 4.3 Viaje del pulso para caso 1 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
5000	2	0.6	197653000	14.3	99.988

Tabla 4.8 características del viaje de la onda caso 1 para cable de 15 kV.

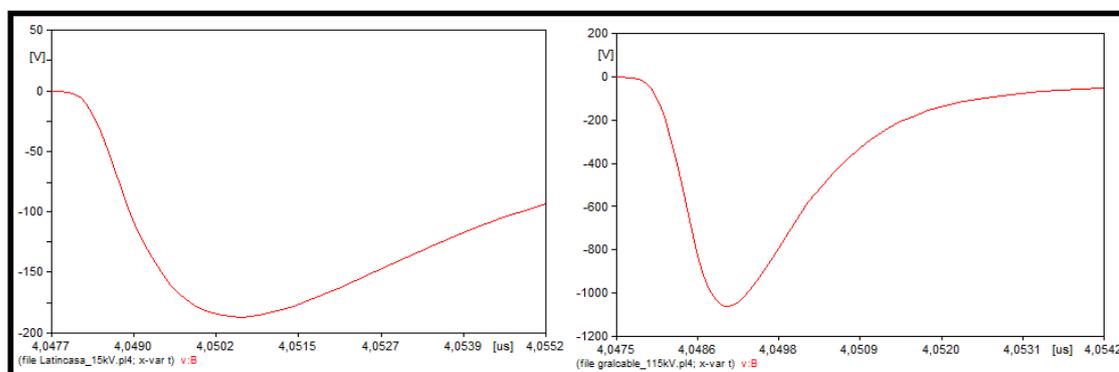
Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
5000	2	15.5	197638000	13.9	99.69

Tabla 4.9 características del viaje de la onda caso 1 para cable de 115 kV.

De acuerdo a las gráficas y los valores obtenidos la onda está viajando en el aislante del cable (XLPE) que teóricamente está en 60% de la velocidad de la luz, con lo que podemos ver que este modelo realiza una aproximación muy buena con un 66% de la velocidad de la luz, en cuanto a la atenuación vemos que el tiempo de viaje en un solo recorrido se logra atenuar casi instantáneamente lo que lo reafirma el crecimiento de los anchos de pulso por la distancia recorrida.

4.8.2 Caso 2 (Corto circuito)

En el siguiente caso vamos a observar una falla en caso que existiera un corto circuito en la línea que esta se fuera totalmente a tierra y observar el índice de reflexión en el sistema de cable de potencia.



Grafica 4.4 Viaje del pulso para caso 2 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
5000	2	-110	197643000	390.52	103.8

Tabla 4.10 características del viaje de la onda caso 2 para cable de 15 kV.

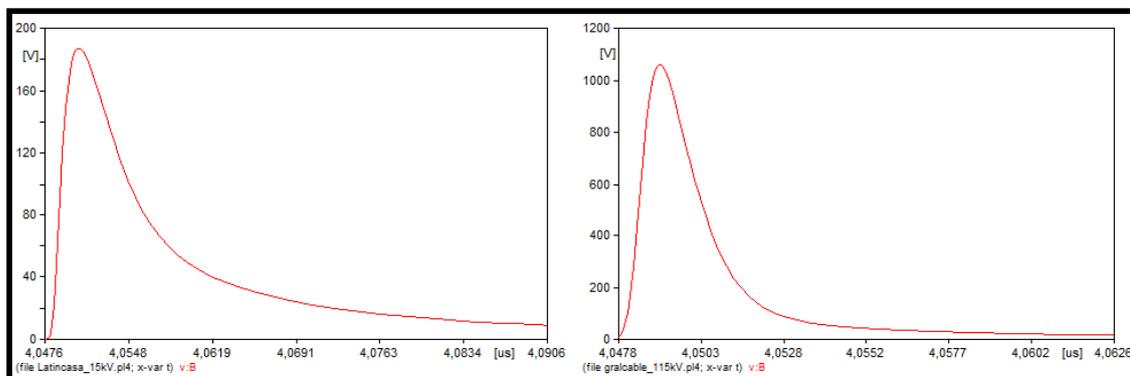
Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
5000	2	-1100	197653000	78.3	122

Tabla 4.11 características del viaje de la onda caso 2 para cable de 115 kV.

Partiendo del mismo análisis de caso anterior seguimos teniendo un valor de velocidad de propagación del 66% aproximadamente y este valor de amplitud en los pulsos son de polaridad negativa debido a que el fenómeno físico de un estado de corto circuito la señal de voltaje se hace cero y como el principio de la energía nos dice que este no puede ser destruida, por lo tanto, se devuelve con la señal de corriente aumentándola por consecuencia de la suma de amplitudes.

4.8.3 Caso 3 (Circuito abierto)

Este caso modelamos que la carga que se está alimentando queda fuera del sistema y esta se ve como una impedancia infinita.



Grafica 4.5 Viaje del pulso para caso 3 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
5000	2	110	197653000	132.4	96.2

Tabla 4.12 características del viaje de la onda caso 3 para cable de 15 kV.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
5000	2	1100	197653000	30.7	122

Tabla 4.13 características del viaje de la onda caso 3 para cable de 115 kV.

El tiempo de viaje de la onda se ve que viaja alrededor del 66% de la velocidad de la luz, como sucedió en el análisis anterior con el principio de energía se ve afectada esta representación gráfica del viaje de la onda donde la corriente se hace cero y la onda de voltaje se duplica mostrando su reflexión positiva y su magnitud atenuada debido a la distancia de viaje las otras sucesivas ondas de reflexión se ven atenuadas a esta escala de amplitud de voltaje.

4.9 CASOS PARA SISTEMA DE CABLE CON EMPALMES Y TERMINALES.

Un sistema de potencia en que se quiere observar el comportamiento del viaje de una onda a lo largo de la trayectoria es necesario acondicionar el modelo a la situación real como se puede observar en la figura 4.6.

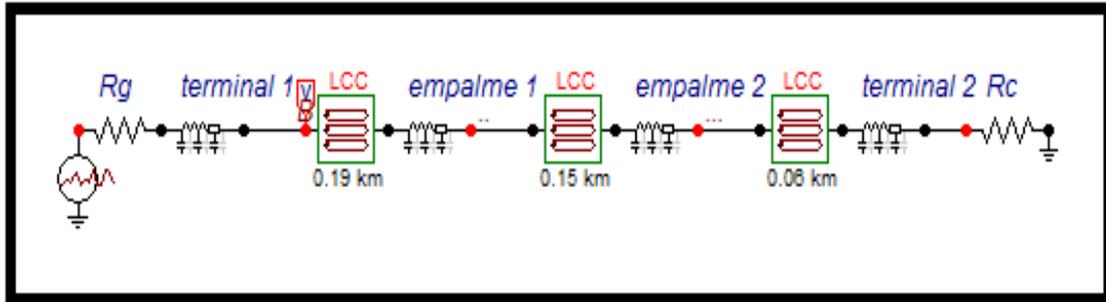
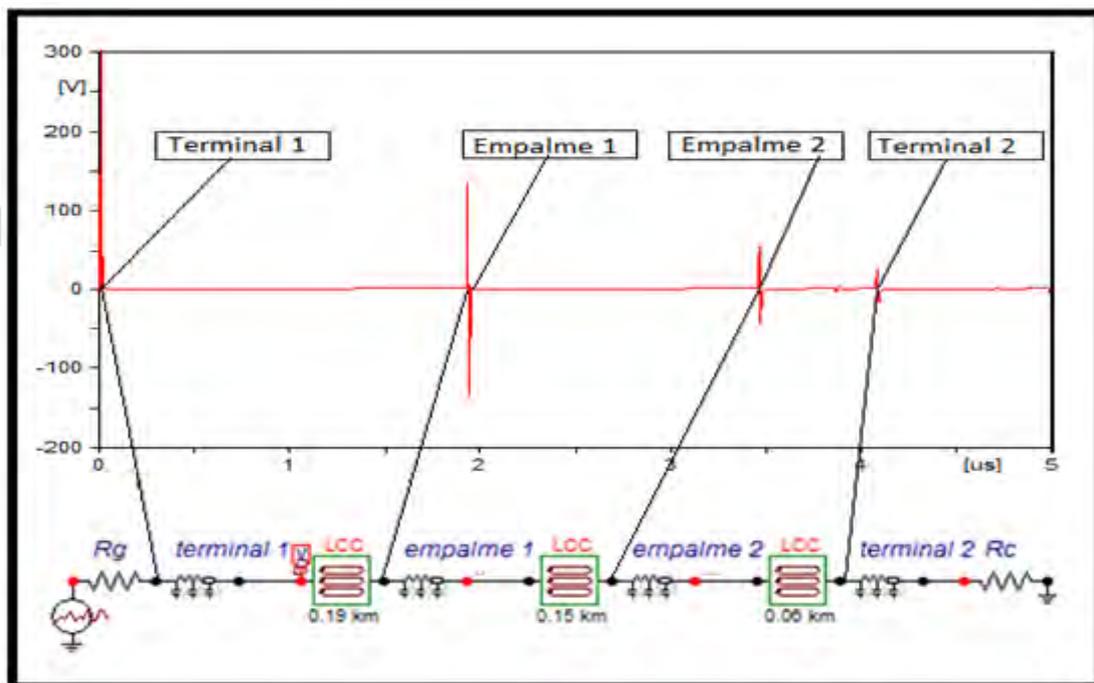


Figura 4.6 Modelación de circuito con empalmes y terminales.

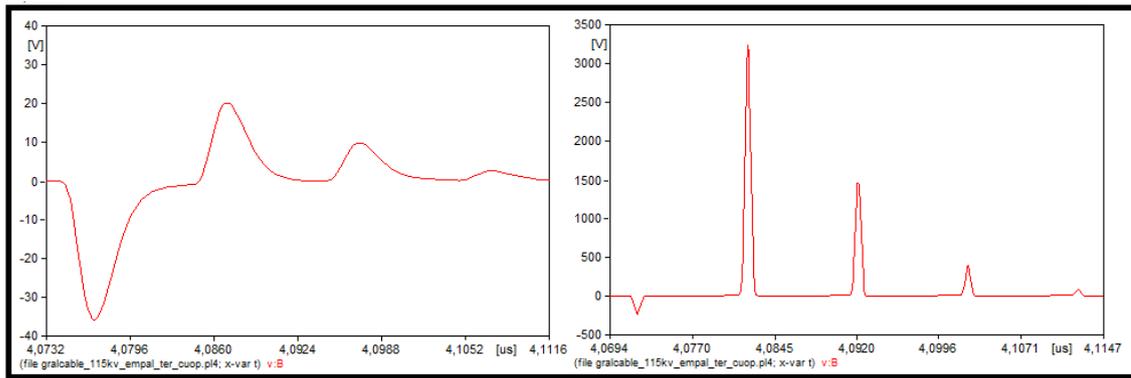
Antes de realizar los estudios de cada uno de los casos es necesario y de vital importancia señalar donde se encuentra la distorsión provocada por cada cambio de impedancia a lo largo de la trayectoria de la línea como se podrá ver en la Grafica 4.7.



Grafica 4.7 Espectro de propagación de onda con un sistema de empalmes y terminales en cables de 15 kV y 115 kV.

4.9.1 Comparación de modelo J. Martí y Básico

La modelación de este sistema antes de ser definido con el estudio de uno de estos modelos es necesario ver cual tiene un mejor comportamiento a las condiciones reales y nos de valores más acertados como se observa en la Grafica 4.8.

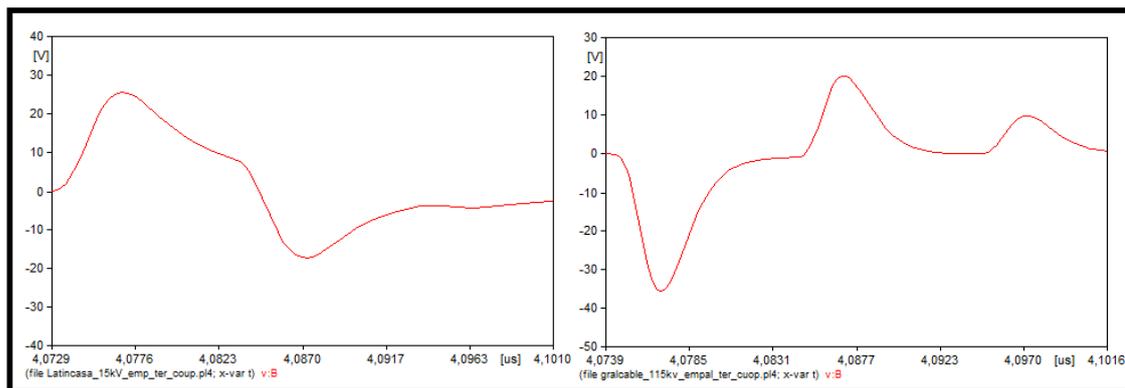


Gráfica 4.8 Viaje de pulso inicial en su primer retorno para modelo J. Martí y Básico.

Como se logra observar el modelo de J. Martí tomado en la izquierda de la figura antes vista muestra deformaciones en el ancho del pulso y amplitudes que son consecuencia del cambio de impedancia que se encuentra en el sistema, debido a los diferentes elementos que la conforman, observando valores más aproximado a la realidad y en contra parte se puede analizar la graficas correspondiente a el modelo básico en la que no sufren grandes alteraciones la onda que viaja en amplitud y tiempo para el ancho de pulso, punto de muy importante para el estudio realizado ya que nos permite observar que para parámetros constantes es muy bueno, pero para valores en elementos dependientes de la frecuencia es mejor el modelo de J. Martí como se hizo énfasis en la explicación de los modelos.

4.9.2 Caso 1 para sistema de cable de potencia con empalmes y terminales

Un sistema de cable de potencia puede ser afectado por múltiples situaciones, pero es necesario partir de un sistema que se encuentre acoplado en la carga y la generación de energía con respecto a la impedancia característica del cable, y así observar los detalles de cada reflexión como se muestra en la gráfica 4.9.



Gráfica 4.9 Viaje del pulso para caso 1 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 900	2	28	196 420 000	4.6	99.43

Tabla 4.14 características del viaje de la onda caso 1 para cable de 15 kV.

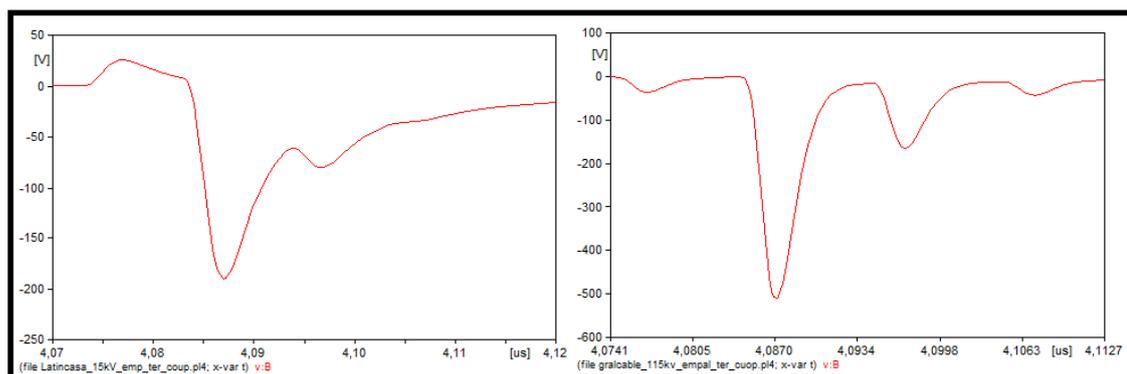
Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 660	2	-35	196 382 000	6	100.75

Tabla 4.15 características del viaje de la onda caso 1 para cable de 115 kV.

Partiendo de análisis anteriores con respecto a la velocidad de propagación se puede observar que no hay cambios notables ya que se mantiene en un 66% aproximadamente de la velocidad de la luz, aunque en la amplitud se pueden ver que debido a la cantidad de elementos que tiene el sistema se ven totalmente atenuados muy rápido casi instantáneo, ya que al realizar cada cambio de impedancia en cada uno de los elementos, se observan valores drásticos en comparación al inicial, en cuanto a la polaridad vemos un cambio en el cable de 115kV como consecuencia de impedancia de carga representada es muy baja que para el sistema lo puede ver como un estado de cortocircuito y la señal de voltaje se vea atenuada y regrese con la señal de corriente en su reflexión duplicándose.

4.9.3 Caso 2 para sistema de cable de potencia con empalmes y terminales

Un sistema se puede ver sometido a un exceso de carga y poder quedar fuera por algún tiempo bien sea reducido o prologado, causando efectos en la estabilidad, es por ello que es importante observar el viaje de las ondas en este caso y ver el impacto que causa en el equipo.



Gráfica 4.10 Viaje del pulso para caso 2 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 900	2	-190	195 910 000	7	103.88

Tabla 4.16 características del viaje de la onda caso 2 para cable de 15 kV.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 660	2	-510	195 872 000	5.2	110.94

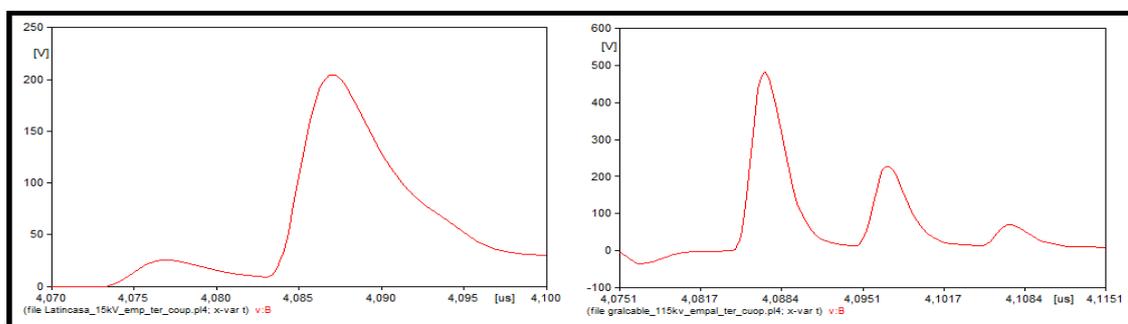
Tabla 4.17 características del viaje de la onda caso 2 para cable de 115 kV.

Una de las grandes observaciones es que a medida que se aumenta la cantidad de elementos en una línea hay una caída de tensión apreciable debido a un cambio de impedancia en cada trayecto que se traducen en imperfecciones del medio, lo que hace que no sea totalmente un espacio libre sin pérdida de energía, en cuanto a los

valores de velocidad de propagación se ven afectados, pero aún muy insignificante y los valores de amplitud negativa debido al fenómeno que ocurre en cortocircuito.

4.9.4 Caso 3 para sistema de cable de potencia con empalmes y terminales

Una red eléctrica se permiten reparaciones o dejar fuera del sistema ciertas cargas para aliviar un poco el esfuerzo de generación y mantener una estabilidad y calidad de energía en las zonas de importancia, de acuerdo a esta posibilidad se toma en cuenta el estudio del sistema con esta condición, ya que viajan ondas en sentido al generador y es de interés el análisis de estas reflexiones.



Gráfica 4.11 Viaje del pulso para caso 3 en cable de 15 kV y 115 kV respectivamente.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4900	2	210	195 882 000	6.1	95.71

Tabla 4.18 características del viaje de la onda caso 3 para cable de 15 kV.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4660	2	500	195 872 000	5.8	89.27

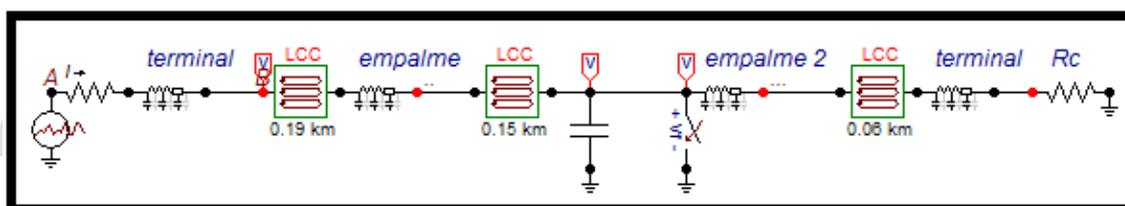
Tabla 4.19 características del viaje de la onda caso 3 para cable de 115 kV.

Se logra verificar los valores de velocidad de propagación que se mantienen muy estables con un 65% de la velocidad de la luz, en cuanto a la amplitud tomada en ambos resultados están un poco más bajos en comparación a los estudios

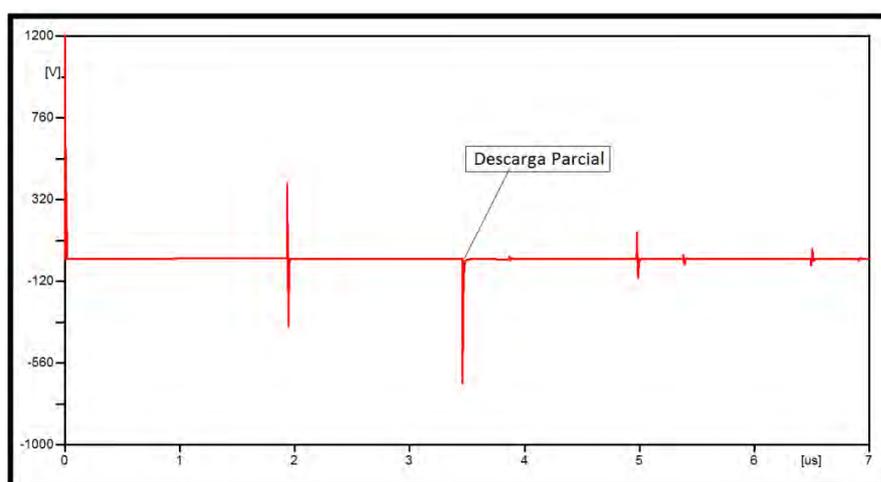
anteriores sobre todo en el cable de alta tensión, aunque si se toma en cuenta el valor del pulso inicial este tarda un poco más en ser atenuado y se puede dar el lujo de tener otros viajes de ida y vuelta a la fuente con valores muy cercanos a cero, sobre el ancho de pulso se van achatando un poco aunque en ambos sistemas se logra observar una simetría con respecto al cálculo de ambos anchos de pulsos.

4.10 MODELACION DE DESCARGAS PARCIALES EN CABLE DE POTENCIA DE MEDIA Y ALTA TENSION CON PULSO.

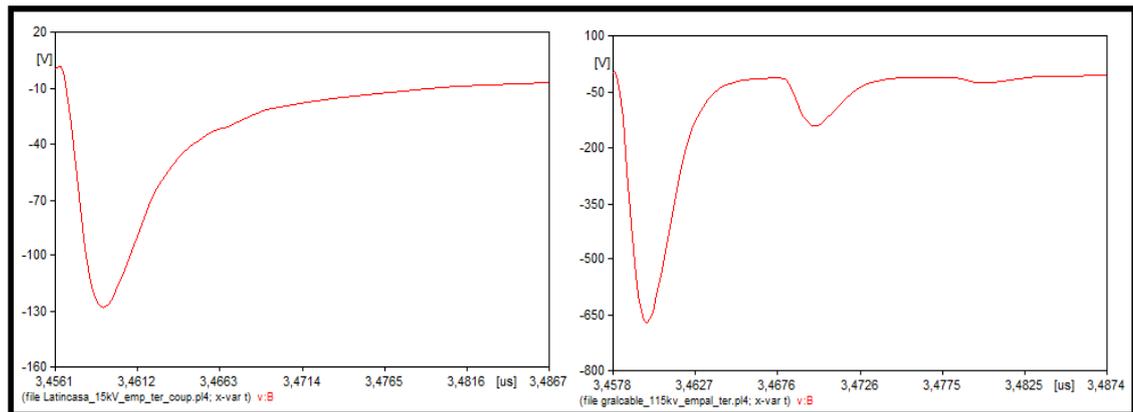
En los cables de potencia es de importancia plena observar a tiempo las fallas o alteraciones en su funcionamiento estable, debido a ello se realizará un análisis de viaje de onda en el sistema cuando ocurra una descarga parcial, en cada uno de los casos anteriormente estudiados, para observar los métodos de detección de defectos en el sistema de acuerdo a su viaje en el medio.



Grafica 4.12 Modelo de descargas parciales en sistema de cable de potencia.



Grafica 4.13 descarga parcial ocasionada a 340 metros de la línea.



Gráfica 4.14 distorsión del pulso en falla por descarga parcial en cable de potencia de 15 kV y 115 kV.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 900	2	-275	196 754 000	6	105.61

Tabla 4.20 características del pulso de una descarga parcial en cable de 15 kV.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 660	2	-670	196 657 000	4	114.38

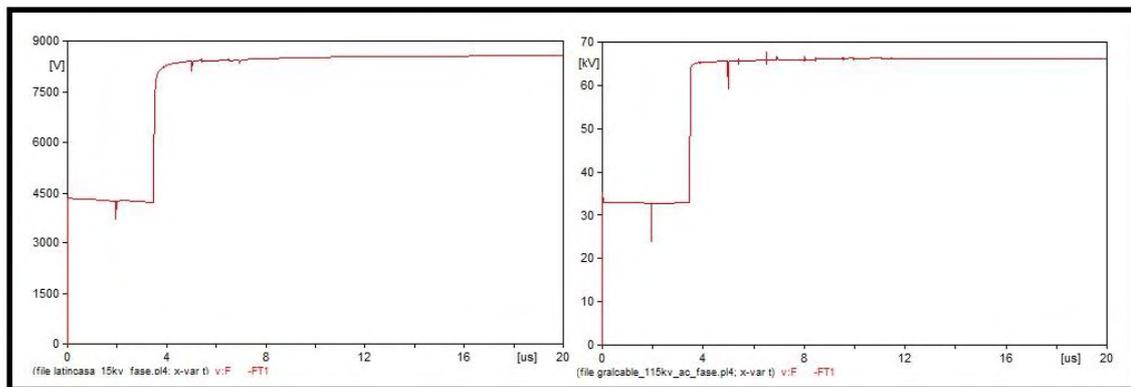
Tabla 4.21 características del pulso de una descarga parcial en cable de 115 kV.

Con el respectiva interpretación de la propagación de pulsos de la gráfica 4.13, se detalló a fondo la distorsión del pulso que ocurre a los 340 metros de longitud que es donde está localizada la falla, obteniendo resultados para cada uno de los casos anteriores las mismas características del pulso como se menciona en las tablas expuestas para los cables en estudio, encontrando una pequeña alteración en su viaje original como se puede observar con mayor claridad en el pulso de 115 kV, donde la señal emitida viajaría en sentido positivo pero debido a la falla en el sistema (descarga parcial), se configuro por medio de un interruptor y un capacitor que al llegar a un nivel de tensión que cause la ruptura dieléctrica del medio, este

interruptor se active ocasionando un corto circuito, logrado observar el proceso de una descarga disruptiva en el ley de Paschen y como consecuencia se observa un cambio de polaridad en la señal por el efecto físico que ocurre cuando se proporciona este defecto en el sistema anulando la señal de tensión y haciendo que este viaje por medio de la señal de corriente duplicándola como se explicó en los casos anteriores, ya que la energía no puede ser destruida de acuerdo al principio de la conservación de la energía.

4.11 Modelación de descargas parciales en cable de potencia de media y alta tensión con señal sinusoidal.

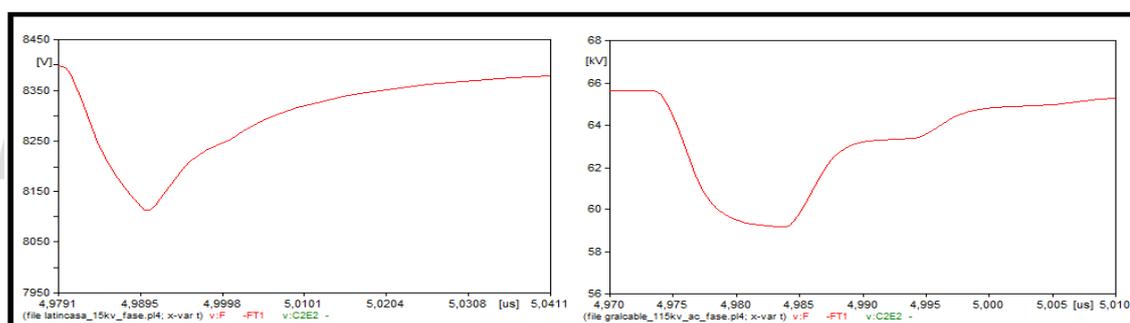
Conocido el funcionamiento de un sistema de potencia, se realizará un estudio sobre la respuesta del mismo cuando se presente el evento de una descarga parcial sobre el elemento de transmisión de energía con una fuente alterna de frecuencia del sistema eléctrico (60Hz), con tensión nominal de acuerdo al tipo de cable que se esté utilizando y por medio del estudio de la ley de Paschen para una descarga disruptiva en el medio se utilizará la misma configuración de la descarga parcial mencionada en el ítem anterior.



Gráfica 4.15 respuesta del sistema con respecto a la tensión para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, con fase de 90°, visto desde la resistencia de la fuente.

En la gráfica mostrada se logra obtener el comportamiento del sistema frente al incremento de voltaje en la que se logra notar la falla ocasionada cuando se carga el capacitor en función el tiempo, donde se observa que en el primer punto de reflexión

referente a la primera terminal que causa el primer pico como está representado en la gráfica para ambos cables desde el inicio, y luego se estabiliza hasta que actúa la reflexión debido a cambio de impedancia por el cable y el empalme ya que están muy próximos uno del otro y se puede asumir como un mismo rebote ya que su separación es de 1 metro y para efectos visuales están representados en el mismo pulso, el cambio significativo ocurre a un tiempo de $3.462 \mu\text{s}$, correspondiente a donde está ubicada la falla a 340 metros y las sucesivas reflexiones ocasionadas por los viajes múltiples de la onda hasta que se atenúe totalmente, el incremento de tensión en donde se presenta la descarga parcial se debe a la medición que se está tomando directamente en la resistencia de la fuente, ya que la gráfica representa el nivel de tensión correspondiente a la diferencia entre la generación y los elementos del sistema del cable, es por ello que se logra apreciar una amplitud de polaridad opuesta.



Gráfica 4.16 Distorsión del pulso final debido a falla en sistema por descarga parcial en cable de potencia de 15 kV y 115 kV.

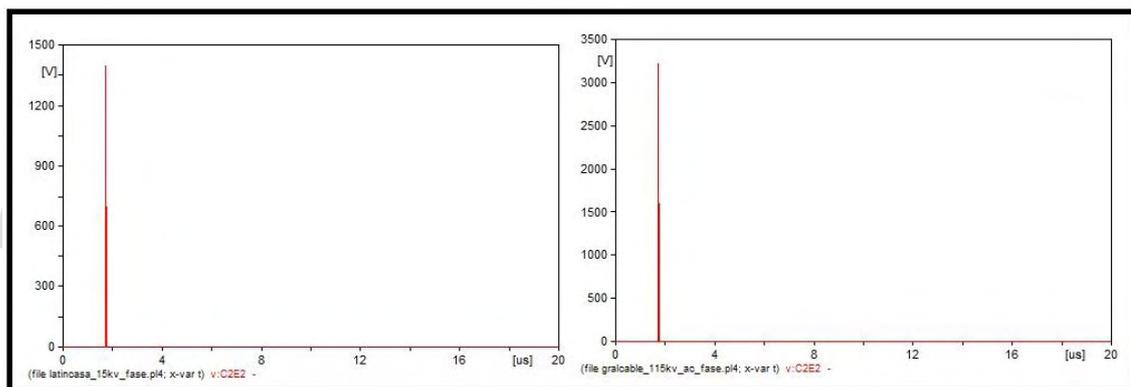
Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
4 400	10	300	160 672 000	31.1	93.18

Tabla 4.22 características del viaje de la onda de descarga parcial en 15 kV.

Amplitud inicial (V)	Ancho del pulso Inicial (ns)	Amplitud final (V)	Velocidad de propagación (m/s)	Ancho del pulso final (ns)	Atenuación (%)
35 500	10	7 400	160 869 000	20	79.15

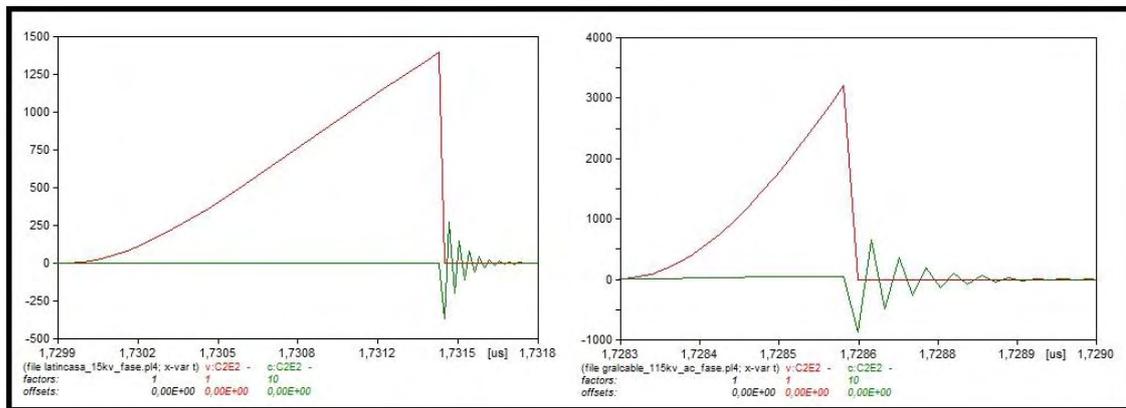
Tabla 4.23 características del viaje de la onda de descarga parcial en 115 kV.

Como consecuencia de la falla en el sistema la velocidad de propagación se ve que esta disminuye para la propagación del pulso final disminuyendo a 53.5 % de la velocidad de propagación de la luz, disminuyendo en un 18.9 % con respecto a la velocidad con que se propaga en el medio aislante (XLPE), debido al efecto capacitivo que influye sobre el sistema ya que se cambia su topología y la cavidad modelada por medio de un capacitor distorsiona el mismo retrasando en un 929.086 ns a la respuesta esperada en el cambio de impedancia con el tercer tramo de línea y la terminal, notando en el análisis de la propagación de pulsos que estos se observa en cada repetición de pulsos hasta que se atenúan totalmente, los anchos de pulso son más rápidos en el cable de mayor tensión debido a los valores de voltaje que maneja, observando mayor atenuación del pulso en cables menor tensión.

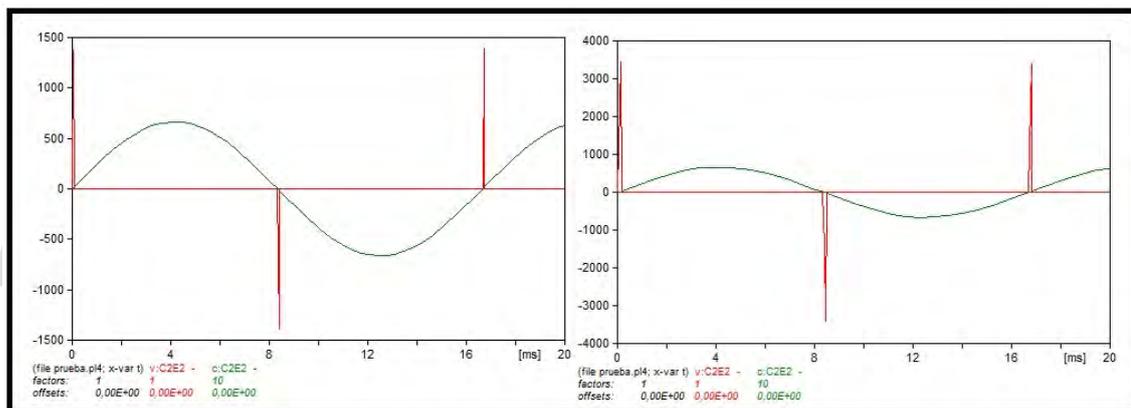


Gráfica 4.17 Respuesta del sistema con respecto a la tensión para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, con fase de 90°, visto desde el capacitor.

De los resultados obtenidos con la carga del capacitor se puede verificar que está actuando de manera adecuada para la modelación de la descarga disruptiva en el medio como se explicó anteriormente, donde en la gráfica representa el voltaje con el color rojo y la corriente por el verde, la sobreoscilación que se genera producto de la corriente al momento de la descarga del elemento que proporciona aún más reflexiones en el sistema, teniendo como consecuencia la multiplicación de reflexiones que aumenta el nivel de dificultad para la selección e interpretación de pulsos de la propagación de los de los elementos correspondientes del sistema del cable.



Gráfica 4.18 Carga del capacitor con nivel de tensión y corriente para cable de potencia de 15 kV y 115 kV.



Gráfica 4.19 Respuesta del sistema con respecto a la tensión y corriente para cable de potencia de 15 kV y 115 kV, visto desde el interruptor.

Se puede percibir los cambios en la señal sinusoidal del sistema de 60 Hz con amplitudes distintas ya que la tensión de ruptura en cada modelación de cable es distinta, al igual que la tensión con que se está alimentando ya que este es el comportamiento de ellos a tensión de operación, examinando los picos de color rojo representan los cambios de tensión cuando el interruptor se encuentra abierto es decir que no hay falla aparente en el sistema hasta que se presenta la tensión de ruptura dieléctrica en la cavidad y se activa el interruptor causando el flujo de corriente instantáneo sobre el aislamiento y una caída de tensión permanente o parcial de acuerdo al estado en que se presente el grado de la falla, verificando de esta manera

la representación en una onda sinusoidal las descargas parciales sobre los picos de subida de tensión en ambas polaridades, que es donde se realiza el mayor estrés eléctrico en la imperfección alojada en el aislamiento.

4.12 MEDICIONES DE PROPAGACION DE PULSOS EN CABLE LATINCASA DE 15 kV.

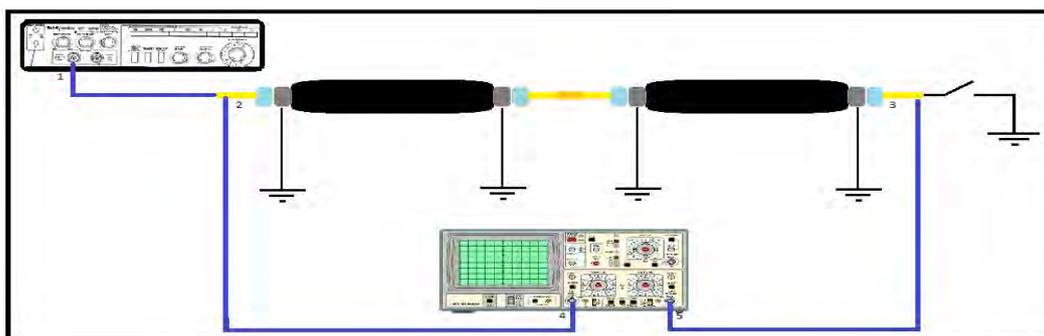


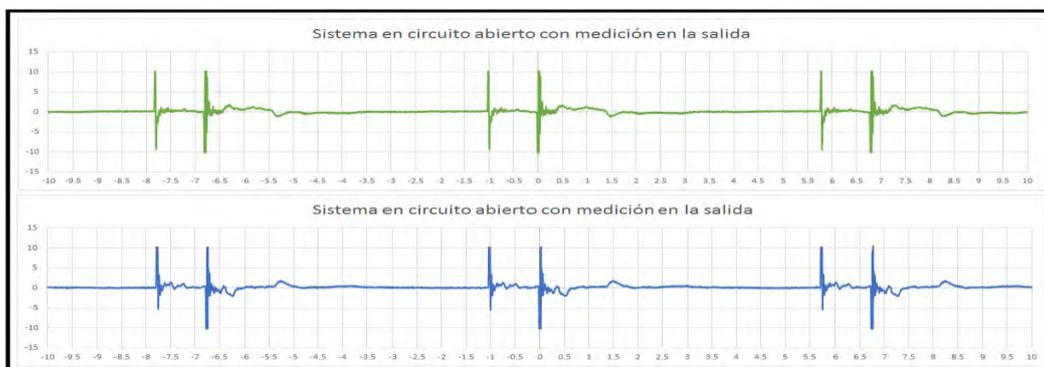
Figura 4.20 Sistema de medición en campo para propagación de pulsos en cable latincasa 15 kV, donde 1. señal del generador de funciones, 2. entrada , 3. salida , 4. canal 1 y 5. canal 2 .



Figura 4.21 Sistema de medición de cable de 15 kV.

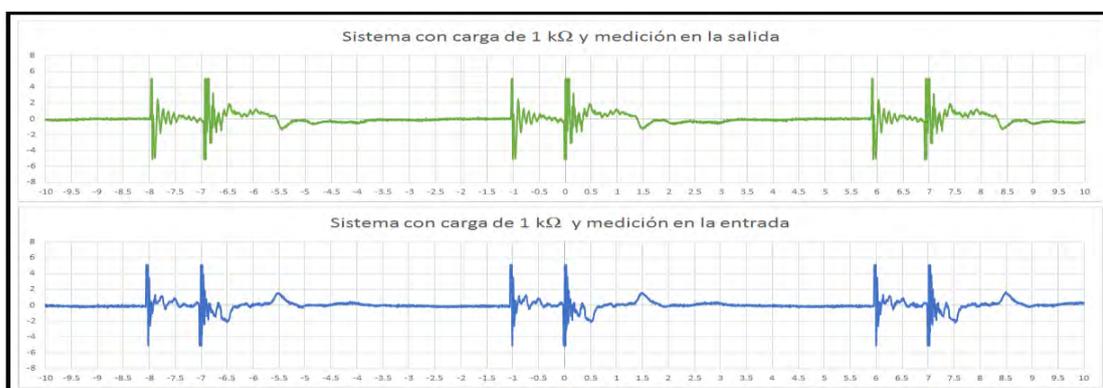
De acuerdo a la configuración del cable se estima que tiene aproximadamente 150 metros cada tramo, por lo que se realizara el siguiente montaje como se muestra en la figura para el estudio de la propagacion de las ondas sobre el mismo este tiene una funcion de cable auxiliar para la alimentacion del transformador de 900 kV, de la sala de extra alta tension libre de descargas parciales lo que se comprobara en las siguientes pruebas que seran detalladas a continuacion, y observar detalles que nos

ayuden a dar comparaciones con respecto a las simulaciones para el estudio correcto de la propagación de ondas en el XLPE.



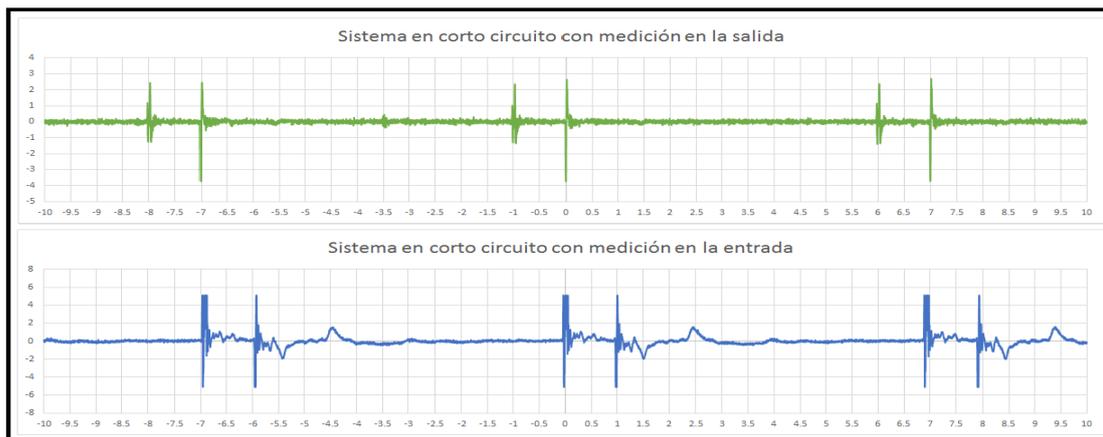
Gráfica 4.22 Medición de campo cable latincasa 15 kV, con sistema en circuito abierto.

Se puede observar que los valores de estimación del cable de 150 metros variaron ya que no tenemos las medidas exactas a 120 metros y con una velocidad de propagación de 65% se encuentra dentro de los tiempos esperados, donde se logra comprobar visualmente la ida y vuelta de la onda al comparar los pulsos relevantes a mitad del cable y su terminal a $1,22 \mu\text{s}$ y $2,44 \mu\text{s}$ respectivamente como se logró ver en el diagrama de medición donde afecta la unión de este tramo justo en la mitad de la cuchilla y causa esta reflexión.



Gráfica 4.23 Medición de campo cable latincasa 15 kV, sistema con carga.

Como se notó en la medición anterior los parámetros son similares en tiempo y polaridad de onda solo que a medida que la carga disminuye los valores de amplitud se atenúan, y el ruido de fondo incrementa hasta que hace que los efectos ocasionados en el sistema no puedan ser totalmente visibles para un estudio completo del fenómeno que ocurre.



Gráfica 4.24 Medición de campo cable latincasa 15 kV, con sistema en corto circuito.

La comparación tanto visual y analítica del sistema de potencia del cable se observa la presencia del ruido de fondo a mayor escala en la salida de la terminal donde esta ocasionado el corto circuito, lo que puede incrementar al tener puntos flojos en la conexión y elementos electrónicos en el sistema de medición que actúan sobre la señal, las interferencias externas a la como capacitancias parasitas que en este caso son equipos que no están involucrados en la medición pero el campo eléctrico que se encuentra alrededor puede cargar estos equipos como montacargas, gaps de esferas, transformadores, entre otros. Que se encuentren en la sala de medición y estos se presenten en dicha respuesta del sistema.

4.13 MEDICION DE DESCARGAS PARCIALES EN CABLE GENERAL CABLE de 115 kV.

El sistema está formado por dos terminales, un cable de 20 m, seccionado en dos tramos de 6 m y 14 m respectivamente, donde se instaló el empalme. Los despachos de los materiales antes descritos se identifican como "Terminal 115 kV, marca Pfisterer y el empalme sin una identificación clara. Los criterios a tomar serán tomados de las siguientes normas para una medición de descargas parciales por método directo:

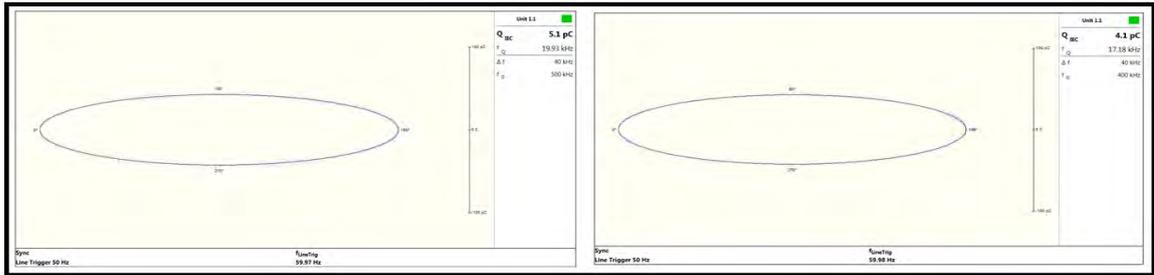
- IEC 60840 (2004-04)
- IEC 60060-1 (2010-09)

El proceso de pruebas realizada en el sistema es como se describe en los apartados del a) al f), considerando los procedimientos de ensayos descritos en la norma IEC 60840 (2004-04).

- a) Elevar de 0 V hasta una tensión de 66 kV aplicando por 1 minuto, midiendo Descargas Parciales.
- b) Elevar tensión de 66 kV hasta 96 kV aplicando por 1 minuto, midiendo Descargas Parciales, que es al nivel de tensión que se califican las descargas parciales.
- c) Elevar tensión de 96 kV hasta 128 kV aplicando por 1 minuto, midiendo Descargas Parciales.
- d) Elevar tensión de 128 kV hasta 160 kV aplicando de manera momentánea para medir Descargas Parciales, este es el nivel de tensión de pruebas de prototipo que se aplica a terminales y empalmes durante un tiempo de 30 minutos, en este caso se aplica por menos de 1 minuto para obtener un patrón y nivel de descargas parciales en el caso de presentarse éstas.
- e) Disminuir tensión de 160 kV hasta 128 kV aplicando por 60 minutos, midiendo Descargas Parciales a intervalos de cada 5 minutos, este es el nivel de CALIFICACIÓN de la prueba de ACEPTACIÓN. Esto de acuerdo a la Tabla 4 de la norma IEC 60840.
- f) Disminuir tensión de 128 kV hasta 96 kV aplicando por 1 minuto, midiendo Descargas Parciales para calificación del nivel máximo de descargas parciales permitido.

Los resultados obtenidos serán reflejados en las siguientes figuras:

Se tomaron en cuenta las siguientes respuestas ya que es donde se logra observar la falla aparente en el sistema en la que de acuerdo al patrón presenta descarga disruptiva en el aislamiento interno como fueron definidos anteriormente como no autorecuperables, con un nivel de ruido de fondo de 4.0 pC, como se puede notar de lado izquierdo en la figura 1.

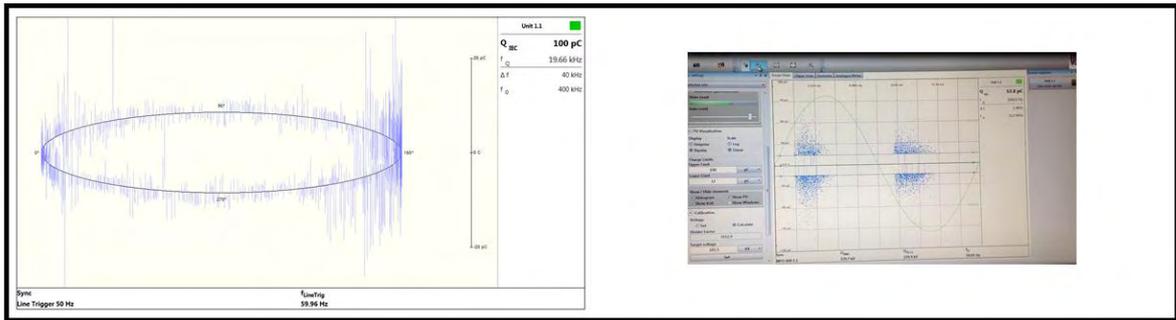


Grafica 4.25 Ruido de fondo y medición de descargas parciales a 66 kV, etapa 1.



Figura 4.26 Montaje de medición de cable de 115 V, método directo.

Como se puede observar el equipo fue alimentado por el transformador de 900 kV, donde se fue aumentando tensión gradualmente hasta el nivel de tensión indicado como se establece en los pasos a seguir anteriormente, para evitar puntos flotantes e interferencia en la medición se observan que los puntos de conexión estén firmes y la sala se encuentre libre de equipos que puedan causar capacitancias flotantes.



Gráfica 4.27 Medición de descargas parciales a 128 kV a los 2 minutos, y patrón de descargas parciales, etapa 5.

Tomando en cuenta el patrón de DP, esta es una falla interna que se logra hacer presente luego del calentamiento del equipo y de esta manera presentar la falla, el orden de la prueba es una combinación de test de prototipo que son regidas con base en la norma IEC 60840, y tiene como finalidad evaluar el funcionamiento óptimo del ensamble cable bajo estas condiciones de operación.

Requerimientos del ensayo			Nivel de descargas parciales medido (pC)	Soportó la tensión durante el período indicado
Etapa	Tensión (kV)	Período* (s)		
1	66	60	4 a 5	Si
2	96	60	4 a 5	Si
3	128	60	4 a 5	Si
4	160	45	4 a 200	Si
5	128	3600	5 a 200 000	No

Tabla 4.28 Resultados de prueba de descargas parciales en cable de 115 kV.

Con los valores obtenidos y analizados se concluye que el equipo presenta descargas parciales, para efectos de la prueba no logra tener el visto bueno el equipo, ya que es una prueba de aceptación, aunque con esta medición con el método directo, no fue posible identificar en que elemento del sistema bajo prueba se encontró el inicio de descargas parciales ni donde se presentó la falla.

4.14 SUMARIO

En este capítulo se describe el software utilizado para las simulaciones ATP/EMTP, y modelos de línea empleado para esta investigación seguidamente se parte de un caso base para realizar comparaciones en topologías de circuito abierto, acoplado y cerrado, con un pulso Gaussiano, haciendo comparaciones de cómo se comporta el viaje de la onda reflejada y las reflexiones fantasma al detectar un cambio de impedancia característica de la línea, luego se efectuaron modificaciones del sistema del cable de potencia en el cual se implementaron con condiciones reales (terminales y empalmes) para equiparar con mediciones en campo tomadas en cables de 15 kV, por consiguiente se introdujo un circuito que realiza la función de una descarga disruptiva en la que se logró observar que esta se comporta como un corto circuito cuando existe el camino entre el conductor y la pantalla metálica. Finalmente para complementar la investigación se tomaron mediciones con método directo para observar patrones de descargas parciales en un cable de potencia de 115 kV, concluyendo que la unión de estos métodos puede ser muy poderosa para el diagnóstico de aislamiento y de esta manera poder prevenir posibles fallas.

CONCLUSIONES

Empleando técnicas de propagación de ondas se calcularon los tiempos de propagación y validación de velocidades de propagación donde se encontraban los cambios de impedancia o discontinuidades presentes en el sistema de cable con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE) de 15 kV y 115 kV.

Se examinó posibles puntos de fallas en la instalación de cables de potencia donde los empalmes son muy importantes en el funcionamiento óptimo del sistema, debido a que una mala implementación del mismo puede ocasionar descargas parciales por el esfuerzo de campo eléctrico que origina un sobrecalentamiento en esta zona, es por ello que se han implementado mejoras en este dispositivo mejorando los conos atenuadores.

La observación de propagación de ondas o reflexiones presentes en el medio presentan una mejor resolución del espectro por medio del modelo J. Martí, en vez que del Básico porque este está adaptado para el análisis en alta frecuencia como se logró observar en la respuesta del mismo, ya que las señales deben de tener distorsión debido a los pulsos que se sobreponen en el viaje de ida y vuelta (reflexiones y refracciones) de cada discontinuidad presente en el sistema de cable de potencia.

La medición de descargas disruptivas debe de estar libre de equipos cercanos que no actúen sobre la prueba ya que puedan interferir en la medición presentándose como capacitancias parasitas, presentando puntos flotantes en la prueba, este fenómeno es más usual encontrarlo en mediciones de alta tensión.

Las mediciones en campo para las DP son más comunes en método UHF, debido a que se encuentra disponible en la instalación de cables el acceso a la pantalla metálica o tierra del sistema eléctrico, por lo que su implementación es la más sencilla y apropiada para realizar estudios sobre los diagnósticos de cables de potencia, porque como este se hace por medio de la instalación de transformadores de corriente de alta frecuencia en la tierra del mismo y es mucho más cómodo el

equipo de medición, en cambio para laboratorio es más recomendado el método directo por la facilidad de equipo para la realización de la prueba y que este tenga condiciones aptas para tener el menor ruido de fondo posible, por lo general estos se encuentran blindados de manera que forman una jaula de Faraday para evitar cualquier interferencia en mediciones.

Para disminuir el ruido de fondo, distorsiones o puntos mal aterrizados es importante antes de cada medición comprobar que la unión de cada conexión sea lo más firme posible, que los equipos se encuentren aterrizados al mismo punto, de igual manera la alimentación debe de hacerse por medio de tubos porque logran uniformizar el campo eléctrico y no emiten distorsión en la medición, como las tierras deben de ser de lámina de aluminio o cobre para evitar cualquier interferencia en la señal.

Por medio de la medición UHF, se observó que este solo es conveniente para detectar la distancia de donde está localizada la falla, mas no permite saber en qué zona se encuentra la misma ya que este dispositivo solo nos ayuda a observar distancias de viajes de onda y para analizar patrones de descargas parciales que nos permitan ubicar la capa o zona donde se encuentra la falla uno de los métodos utilizados es el método directo, ya que por medio de su implementación se pueden observar este tipo de características, pero su desventaja es que es un método aplicable en laboratorio debido a su implementación de equipos necesarios y condiciones necesarias para la medición.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de mediciones en los distintos medios de propagación de ondas como aire, aceite y sólido, para estudiar de forma detallada la variación de la velocidad de propagación en cada uno de estos eventos, así como el análisis de patrones considerando los diferentes elementos que actúan sobre el equipo cuando está en operación.
- Se requieren realizar pruebas de campo con el método UHF, para mejorar la interpretación de resultados y contribuir en el desarrollo de nuevos patrones.
- Desarrollo de nuevas técnicas de medición que permitan identificar la distancia y área donde se encuentra alojada la discontinuidad partiendo de casos conocidos para su mejor interpretación de resultados.
- Identificación y separación de diferentes fuentes en la misma muestra de estudio en campo con altos niveles de ruido.
- Dar resultados fidedignos y de fácil interpretación para el cliente o el usuario que solicita la prueba de diagnóstico.

REFERENCIAS CONSULTADAS

1. EMTP Theory Book 1994, pp4-57
2. Elizarraraz Fernando (2005). “*Modelado de simulación de la descarga interna en apartarrayos de Zno de tipo estación en condiciones de contaminación humeda*” (Trabajo de maestría). Universidad de Guanajuato, Salamanca, México
3. Hernandez, J. (2008).” *Characterization of real power cable defect by diagnostic Measurements*”. [Tesis en línea]. Georgia Institute of Technology. Trabajo de Grado de Doctor en Filosofía. Consultado: 09/01/2016. Disponible: [hernandezmejias_jean_c_200812_phdpdf](#).
4. Inducor Ingeniería S.A. (n/a). “*diagnostico por descargas parciales en generadores y motores dirigidos a supervisores y dueños de grandes maquinas la realidad y el oportunismo*”. 2016, de Electrical testing group, Sitio web: www.inducor.com.ar
5. Inducor Ingeniería S.A. (n/a). “Diagnóstico de estado de cables”. Electrical testing group, Sitio web: [www.inducor.ar/cable testing.html](http://www.inducor.ar/cable%20testing.html)
6. Inducor Ingeniería S.A. (n/a). “*diagnóstico de estado de cables subterráneo*”. 2016, de Electrical testing group, Sitio web: www.inducor.com.ar
7. López A. Humberto P. (2011). “*Estudio del cambio de magnitud de descargas parciales en cables de potencia*” (tesis de pregrado). Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
8. López Humberto (2011). “*Estudio de cambio de magnitud de descargas parciales en cables de potencia*” (Trabajo de grado). Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

9. Méndez Raúl (1990), *“Técnicas y localización de descargas parciales en transformadores”*, México.
10. Marti, J.R. (1982). *“Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient calculations”*. IEEE Transactions
11. Martínez Carlos (2010). *“Análisis de los esfuerzos eléctrico y térmico en empalmes de cables de media tensión alimentados con señales no sinusoidales”* (Trabajo de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Distrito Federal, México.
12. Mor Armando (2012). *“Nueva Metodología de descargas parciales en cables de alta tensión”* (Trabajo de grado). Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.
13. Norma Mexicana ANCE NMX-J-271-1-ANCE (2000), *“Técnicas de Pruebas en AT”*.
14. Norma Mexicana NMX-J-271-2-ANCE (2002), *“Técnicas de prueba en Alta Tensión Sistemas de medición”*.
15. Norma Mexicana NMX-J-335-ANCE (2006), *“Medición de descargas parciales”*.
16. Ramírez Francisco (2016). *“Estudio de reflexiones en sistemas de cables de potencia”* (Trabajo de grado). Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
17. R.Villefrance, J.T.Holboll and M.Henriksen, *“Estimación de parámetros de Cable de media tensión para la detección de PD”*, procedimiento de la Conferencia del 1998 IEEE Simposio Internacional de aislamiento eléctrico, Arlington, Virginia, Estados UNIDOS, Vol. 1, pp109-pp112
18. Stevenson William (1996), *“Análisis de sistemas de potencia”*, México.

19. Suarez Sergio (2010). “*Estudio del cambio de magnitud de descargas parciales en cables de potencia*” (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
20. Zapata Julio (2012). “*Analisis de líneas de trasmisión en estado permanente*” (tesis de pregrado). Universidad Veracruzana, Mendonza
21. Z. Liu (S/F) “*Partial Discharges in Electrical Insulation*”. University of New South Wales.
22. Z.Du, P.K.Willett and M.S.Mashikian, “*Rendimiento límites de PD ubicación basado en reflectometría de dominio de tiempo*”, transacciones de IEEE en dieléctricos y aislamiento eléctrico, Vol. 4 No 2,1997, pp182 - 188

www.bdigital.ula.ve