



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

“Mantenimiento Predictivo de Líneas de Transmisión  
con el uso de Equipos de Onda Viajera”

Propuesta de TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERIA  
CON OPCION TERMINAL EN  
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

Eduardo Mestizo Sánchez.

Asesores de tesis:

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez.  
M.I. Julio Román Gómez Calderón.

Puebla, México

marzo 2022

## Contenido

1. Capítulo 1.....	7
1.1 Introducción y estado del arte. ....	7
1.2 Planteamiento del Problema.....	15
1.3 Justificación.....	15
1.4. Objetivo.....	16
1.5 Hipótesis.....	16
2 Capítulo 2.....	17
2.1 Metodología (tipo de investigación).....	17
2.2 Delimitación del Trabajo de Investigación.....	17
2.3 Límite metodológico.....	17
2.4 Muestra e instrumentos de medición. ....	17
2.5 Marco Histórico.....	18
2.6 Marco Teórico.....	19
2.6.1 Parámetros Eléctricos en las Líneas de Transmisión Monofásicas. ....	20
2.6.2 Parámetros Eléctricos en Líneas de Transmisión Multiconductoras. ....	22
2.6.3 Modelado de Líneas de Transmisión de múltiples segmentos y el fenómeno de la onda viajera.....	25
2.6.4 Modelado de Líneas de Transmisión Monofásicas en el dominio de la frecuencia. ....	31
2.6.5 Modelado de Líneas de Transmisión Multiconductoras en el dominio de la frecuencia. ....	33
2.6.6 Método de Bergeron.....	39
2.6.7 Método Final único.....	40
2.6.8 Método de celosía de Bewley.....	41
2.6.9 Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. ....	43
3 Capítulo 3.....	43
3.1 Resultados.....	43
3.2 Descripción del equipo eléctrico primario, protección, control, y comunicaciones utilizado.43	
3.3 Medición de la impedancia y de la velocidad de propagación de la onda en líneas de transmisión.....	45

3.4.	Uso de equipos digitales localizadores de falla por onda viajera .....	46
3.5.	Registros de onda viajera. ....	50
3.6	Observaciones del análisis del registro de onda viajera. ....	55
3.7	Análisis Costo Beneficio .....	55
3.8	Conclusiones.....	58
3.9	Trabajos a futuro .....	58
4	Referencia Bibliográfica.....	59

Índice de Tablas

Tabla 3.1.....	57
----------------	----

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1. Sistema Eléctrico Nacional</b> [3] Ilustración 1 .....	7
<b>Figura 1.2. Mapa de la República Mexicana con la densidad de descargas atmosféricas por kilómetro cuadrado al año</b> [4] [5] Ilustración 2.....	8
<b>Figura 1.3. Línea de Transmisión de 400 kV en zona montañosa de la República Mexicana.</b> [8] Ilustración 3 .....	9
<b>Figura 1.4 Revisión física de aislamiento contaminado en LT de 230 kV</b> [9] Ilustración 4.....	10
<b>Figura 1.5 Grafica del porcentaje de las causas de desconexión de Líneas de Transmisión de 400 kV, 230 kV y 161 kV en el periodo 2010 al 2020.</b> Ilustración 5 [10].	11
<b>Figura 1.6. Medición de descargas atmosféricas, en base a un sistema de monitoreo que indica ubicación, horario e intensidad de la corriente de la descarga.</b> Ilustración 6 .....	12
<b>Figura 1.7. Aislador con evidencia de una descarga atmosférica.</b> Ilustración 7 [16] .....	13
<b>Figura 2.1. Método de las imágenes de una línea monofásica.</b> Ilustración 8 .....	21
<b>Figura 2.2 Estructura de doble circuito con distancias media entre conductores Dab, Dca y Dbc.</b> Ilustración 9 [35].....	24
<b>Figura 2.3. Método de las imágenes complejas para el cálculo de parámetros de Líneas Multiconductoras.</b> Ilustración 10 [33] .....	24
<b>Figura 2.4 Representación de una línea de transmisión con múltiples segmentos.</b> Ilustración 11 [36] .....	26
<b>Figura 2.5 Circuito Equivalente de una LT</b> Ilustración 12 [19] .....	26
<b>Figura 2.6 Imagen de las ondas incidentes <math>i_i</math> transmitidas <math>i_t</math> y reflejadas <math>i_r</math></b> Ilustración 13 [19] .....	31
<b>Figura 2.7. Impulso y reflexión de la falla</b> Ilustración 14 [39] .....	40
<b>Figura 2.8 Onda viajera hacia ambos extremos</b> Ilustración 15 [39] .....	41
<b>Figura 2.9. Diagrama de Celosía</b> [39] Ilustración 16.....	42
<b>Figura 3.1 Diagrama General de conexión del Equipo Primario de Alta Tensión con Equipo Localizador de Fallas</b> [54] Ilustración 17 .....	47
Ilustración 18.....	47
<b>Figura 3.2. Línea de Transmisión con tres terminales</b> Ilustración 19 .....	49
<b>Figura 3.3. Cable de Potencia de alta tensión con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE)</b> Ilustración 20 .....	49
<b>Figura 3.5.1 Registro de la LT1 en formato COMTRADE</b> Ilustración 21 de Subestacion Uno del día 08/05/2021 07:20:09.651757 .....	51
<b>Figura 3.5.3 Registro de perturbación con una distancia 475.6 km visto de la S.E. 3,</b> Ilustración 22 donde se detectó contaminación en un aislador. ....	52
<b>Figura 3.5.5 Registro con una distancia de 0 km,</b> Ilustración 23 este caso fue la detección de un punto caliente en un transformador de corriente en la Subestacion. ....	53
<b>Figura 3.5.7 Sistema de Monitoreo de Líneas de Transmisión</b> Ilustración 24 [56] .....	53
<b>Figura 3.5.8 Histograma de Caso de éxito en la detección de aislamiento contaminado</b> Ilustración 25 [56] .....	54
<b>Figura 3.5.8 Aislamiento contaminado detectado con Equipos de detección de onda viajera.</b> Ilustración 26 [56] .....	55

## Agradecimientos

Quiero agradecer a las personas que hicieron posible la realización de esta tesis al Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez y al M.I. Julio Román Gómez Calderón, quienes asesoraron esta tesis y dieron puntos clave del desarrollo, a los Ingenieros Antolín Mestizo Rivera (q.e.p.d.), Francisco Javier Santander Velazquez, Antonio Paniagua Silva, Gerardo Aguirre Rivadeneyra, Javier Ruíz Andrade, Alfredo Lopez Tagle, que han brindado un gran apoyo para el desarrollo de los conocimientos aquí mencionados, así como a los Ingenieros Inocencio Martinez Herrera, Gustavo Torrero Perez, Víctor Rogelio Mena Martí, Vicente Neri Ponce, Francisco Manuel Torres Galindo y Enrique Trinidad Gonzalez Amador, que compartieron sus experiencias y brindaron informacion fundamental de los resultados obtenidos a los largo de la República Mexicana.

## Resumen

Este documento presenta técnicas aplicadas para el mantenimiento predictivo de Líneas de Transmisión, se analiza el desarrollo teórico del modelado de Líneas de Transmisión que, en conjunto con los avances en las tecnologías de la información y comunicación, han permitido el análisis de transitorios electromagnéticos para su aplicación en el mantenimiento, haciéndolo más eficiente, económico y confiable.

## Abstract

This paper presents techniques applied for predictive maintenance in Transmission Lines. The theoretical development of the modeling of Transmission Lines is analyzed. Additionally by incorporating advances in information and communication technologies we have been able to analyze electromagnetic transients for its application in maintenance, making it more efficient, economical, and reliable.

# 1. Capítulo 1

## 1.1 Introducción y estado del arte.

Las fuentes primarias de energía utilizadas para la generación de energía eléctrica, como las represas hidráulicas o los lugares de extracción de combustibles, regularmente se encuentran alejadas de los centros de consumo, la forma más sencilla para poder enviar grandes bloques de energía eléctrica entre grandes distancias, es elevando los voltajes por ello se han creado los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), para lograrlo se requiere de Líneas de Transmisión (LT) que forman una Red Eléctrica. [1]

Para el caso de México se cuenta con un Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con una Red Nacional de Transmisión (RNT) que está formada por todo el equipo que se requiere para transmitir la energía eléctrica en los niveles de tensión de 400 kiloVolts (kV), 230 kV, 161 kV, 138 kV, 115 kV, 85, y 69 kV [2]

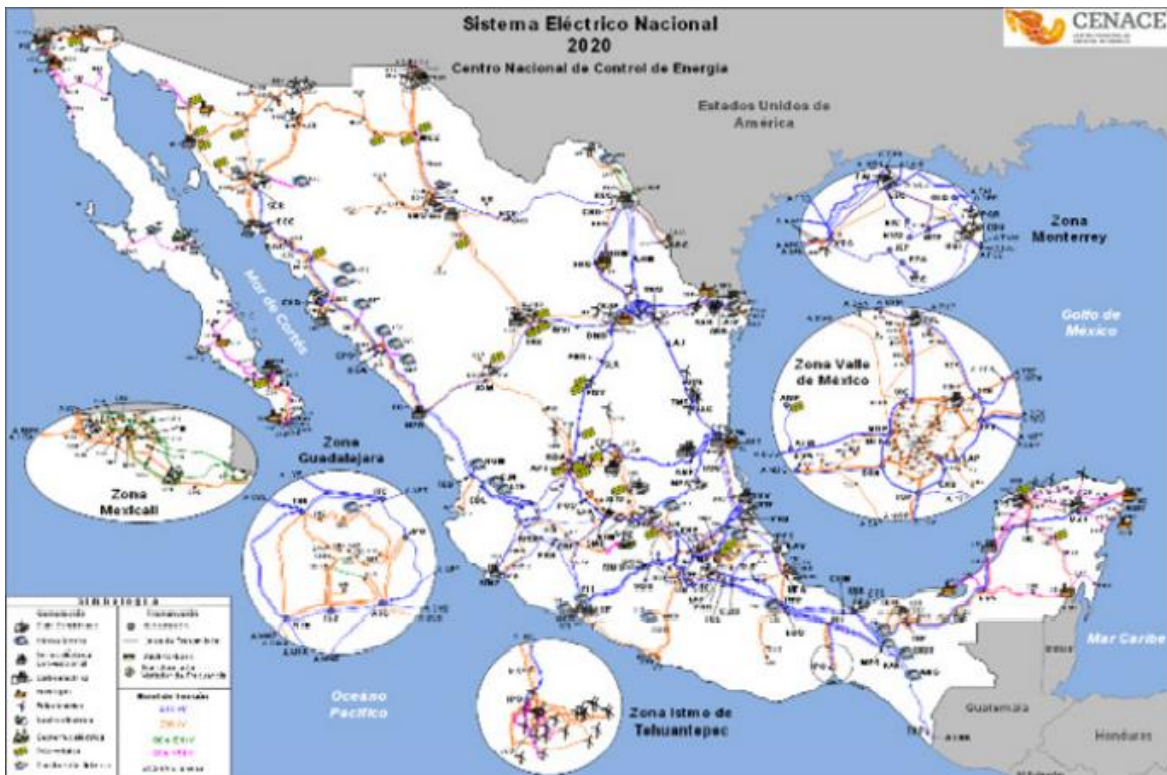
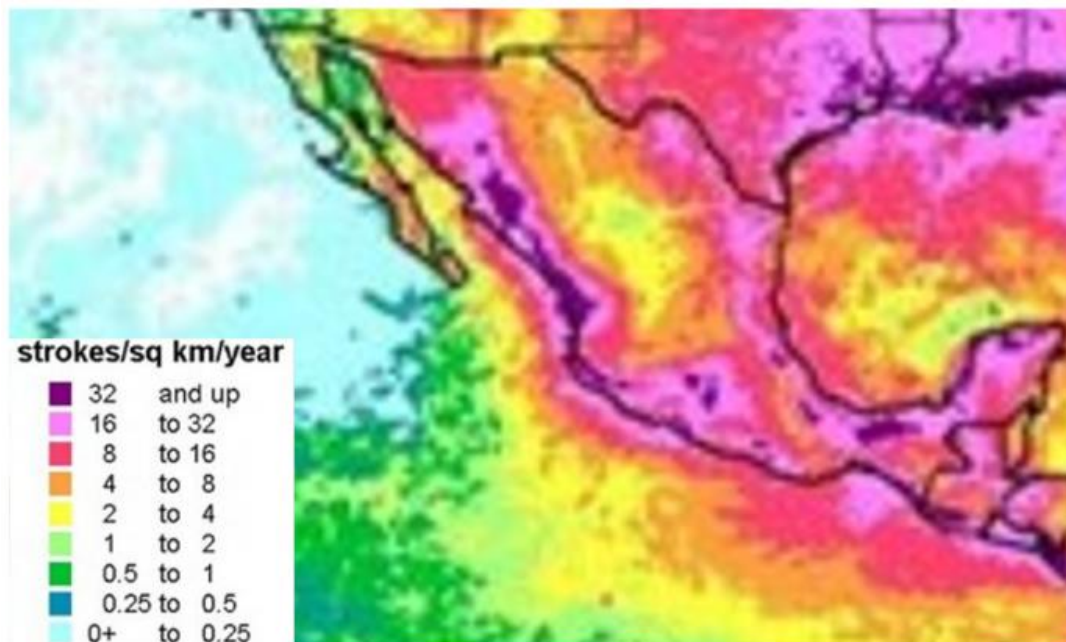


Figura 1.1. Sistema Eléctrico Nacional [3] Ilustración 1

La transmisión de grandes bloques de energía eléctrica se da por la propagación de la onda electromagnética en frecuencia fundamental de estado estable de 60 Hz, por medio de las líneas de transmisión de alta tensión, esta onda es monitoreada por los transformadores de corriente y voltaje en las subestaciones que se encuentran en los extremos de las LT, esas mediciones son comparadas con valores predeterminados en las protecciones eléctricas para mantener la operación de SEP en condiciones de seguridad, ante alguna falla eléctrica por corto circuito se produce un disturbio de la onda fundamental de 60 Hz y se presentan ondas viajeras, de manera similar a cuando se presenta una perturbación al arrojar una piedra sobre un cuerpo de agua en reposo.

Las Líneas de Transmisión dan servicio de transporte de energía eléctrica en todas las entidades federativas del país, por lo tanto, se encuentran expuestas a condiciones que pueden originar fallas eléctricas de corto circuito por la pérdida del aislamiento que se tiene entre el conductor energizado y la tierra.

Las fallas eléctricas en las LT pueden ser provocadas por descargas atmosféricas, contaminación industrial, salinidad, excremento de aves, lluvia ácida, incendios, vegetación, y por el colapso de estructuras por robo de acero, vandalismo, tormentas de nieve o incendios, fuertes vientos producidos por frentes fríos, huracanes y tornados.



**Figura 1.2. Mapa de la República Mexicana con la densidad de descargas atmosféricas por kilómetro cuadrado al año [4] [5] Ilustración 2**

Para poder atender la causa que origino la salida de una Línea de Transmisión se requiere inspeccionar físicamente la línea que ha salido de operación, la RNT tenía líneas de 400 kV con más de 500 km de longitud y se han modificado a longitudes de 300 kilómetros, para cumplir con las recomendaciones de la longitud de las líneas de transmisión dadas por la curva de St. Clair relacionada con la máxima transferencia de energía que permita mantener la estabilidad angular basándose en la Impedancia de Carga de la Línea (Surge Impedance Loading SIL). [6]

Las estructuras de las líneas están instaladas en zonas montañosas, pantanosas, y de difícil acceso, la revisión física requiere conocer de la manera más aproximada la distancia donde ocurrió el evento que originó la salida, para disminuir los tiempos que se encuentra desconectada y los costos que representan las revisiones. [7]

La localización visual de las fallas eléctricas en el aislamiento o el conductor de las Líneas de Transmisión es una actividad que requiere una revisión detallada, por la altura de los conductores y la ubicación de la superficie de los aisladores, el personal sube a la torre para poder identificar el elemento fallado. Estas actividades generalmente no son reemplazables con patrullajes aéreos con helicópteros por los costos y el detalle visual de los elementos.



**Figura 1.3. Línea de Transmisión de 400 kV en zona montañosa de la República Mexicana. [8] Ilustración 3**

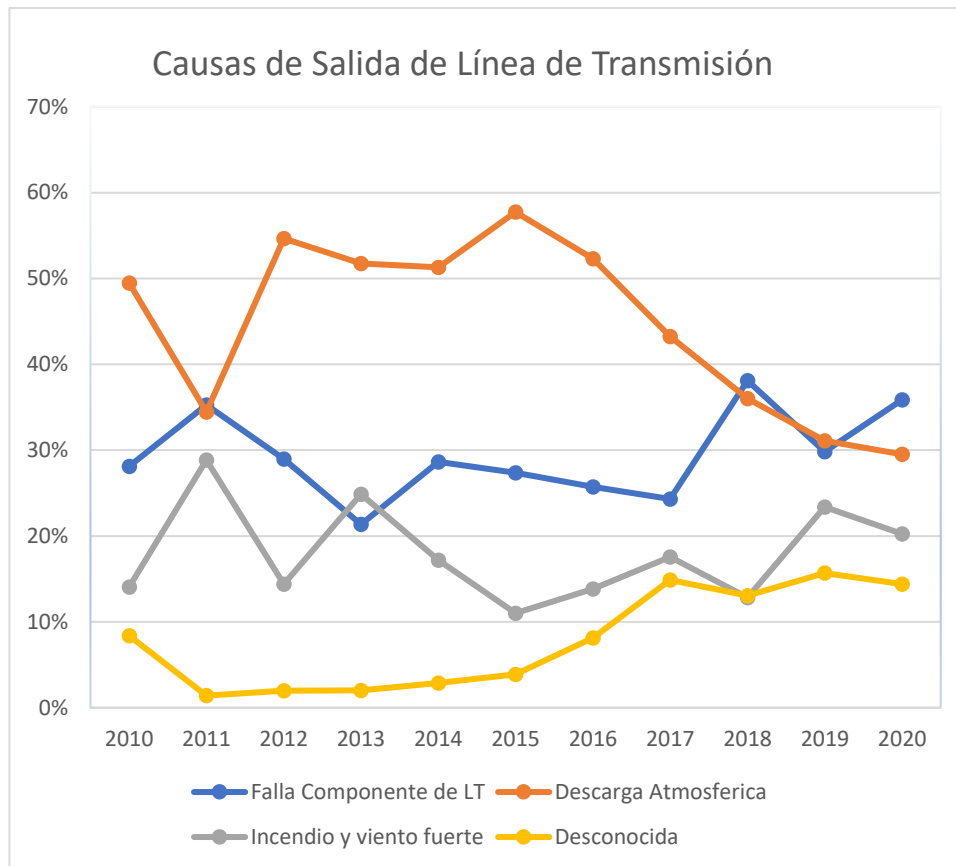


**Figura 1.4 Revisión física de aislamiento contaminado en LT de 230 kV [9]**

Ilustración 4

Se adjunta una gráfica donde se muestran las tendencias en valores porcentuales de las 4 principales causas, que ocasionan las salidas de la línea de transmisión de 400 kV, 230 kV y 161 kV de la RNT que son:

- 1.-Fallas de componentes, que incluyen los daños en los elementos propios de la línea como: falla de estructuras, herrajes, aisladores, conductores, hilo de guarda, contacto de vegetación por falta de mantenimiento a la brecha forestal del derecho de vía, y contaminación,
- 2.-Incendios por quema de caña o de vegetación y fuertes vientos.
- 3.-Descargas atmosféricas y fallas en los apartarrayos de línea.
- 4.-Desconocidas, es cuando no se identifica la causa que origino la salida de la línea.



**Figura 1.5 Grafica del porcentaje de las causas de desconexión de Líneas de Transmisión de 400 kV, 230 kV y 161 kV en el periodo 2010 al 2020.**  
Ilustración 5 [10]

De acuerdo con la estadística de las desconexiones de Líneas de Transmisión, se observa que la causa principal es las descargas atmosféricas, por ello es importante conocer el comportamiento de una línea de transmisión ante una descarga atmosférica. [11]

Las descargas atmosféricas pueden impactar el hilo de guarda de una LT y producen una sobre tensión transitoria que puede llegar a superar el nivel de aislamiento y ocasionar un corto circuito a tierra del conductor por medio de los aisladores.

Los principales factores que se consideran para prevenir la salida de una línea de transmisión ante una descarga atmosférica son:

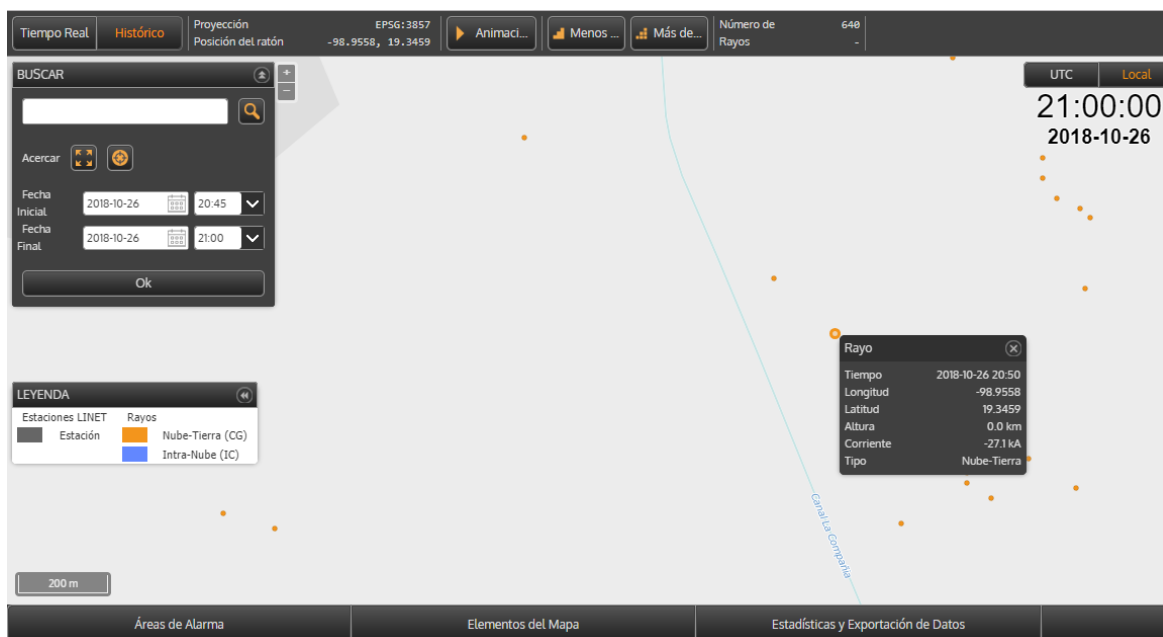
- El análisis del modelo electro-geométrico para la definición del ángulo de blindaje en base a la geometría de la estructura.

- La densidad e intensidad de las descargas atmosféricas en la región, es importante conocer los valores actualizados en base a mapas de densidad o mediciones reales tomadas por sensores de descargas atmosféricas
- El valor de la resistencia de puesta a tierra de la estructura.

Para determinar la influencia de estos factores se han propuestos múltiples métodos, el más directo se define por la ecuación de Burgsdorf-Kostenko [12] quien relaciono la probabilidad de falla en base al ángulo de blindaje.

Para disminuir las salidas por descargas se ha destacado históricamente la propuesta de “Guide for improving the lightning performance of transmisión”, [13], mismo que fue actualizado hasta el 2008. [14].

Las descargas pueden ser monitoreadas por sistemas informáticos que tienen mediciones de la intensidad de corriente de la descarga y la ubicación y el horario del impacto, lo anterior sirve para realizar cálculos de coordinación de aislamientos donde la corriente de la descarga es fundamental.



**Figura 1.6. Medición de descargas atmosféricas, en base a un sistema de monitoreo que indica ubicación, horario e intensidad de la corriente de la descarga.** Ilustración 6 [15]

Cuando ocurre un corto circuito a tierra por medio de una descarga atmosférica deja un rastro en el aislador puede llegar a desaparecer al cabo de unos días por la lluvia

al limpiar la superficie de los aisladores, por ello es difícil identificar la causa de la salida de algunas líneas que están en zonas de difícil acceso.



**Figura 1.7. Aislador con evidencia de una descarga atmosférica.** Ilustración 7 [16]

Para localizar las fallas en Líneas de Transmisión se ha utilizado la Protección de Distancia (21), [17] que opera por el principio de la impedancia medida en un relevador en base a las señales de corriente y voltaje, tomadas por medio de Transformadores de Corriente y Voltaje conectadas a la LT, la impedancia calculada por las mediciones se compara con el valor calculado en base a la longitud, disposición de los conductores, y otros parámetros que sirven para modelar la LT. [18].

Las protecciones de distancia (21L), normalmente se ajustan para cubrir en la Zona 1 el 80% de la Línea, debido a la forma en que se calcula la distancia de la línea puede tener un sobre alcance y operar de manera incorrecta ante algún evento fuera de la zona de protección. El valor que se obtiene de la Protección de distancia (21) donde calcula que ocurrió la falla eléctrica no es exacto e implica la revisión de hasta 12 estructuras más, o hasta 6 kilómetros de inspección lo que en una zona de difícil acceso puede representar hasta 8 horas adicionales de revisión y por lo tanto el incremento en el tiempo que la línea se encuentra indisponible y los recursos utilizados para la inspección. [19].

El principio de operación de la protección de distancia (21) implica que los tiempos de detección de la distancia de la falla y la operación de apertura de los interruptores

estén alrededor de los 80 milisegundos, que es un tiempo suficiente para mantener la estabilidad en el Sistema Eléctrico de Potencia.

Los principios de operación de la protección de distancia están basados en el funcionamiento de los relevadores electromecánicos donde una bobina inducía corriente sobre un núcleo que hacía girar un volante para cerrar contactos que mandaban la apertura de los interruptores.

El desarrollo y avance en el tratamiento de señales digitales y la velocidad de cálculo de los relevadores digitales con microprocesadores, así como las comunicaciones digitales y satelitales han permitido evolucionar, de esquemas de protección basados en la medición de valores eléctricos de corriente y voltaje, a esquemas de protección basados en algoritmos en el dominio del tiempo. [19].

Las fallas originadas por pérdida de aislamiento originan una onda viajera transitoria que se encuentran en frecuencias entre 20 kHz y 2 MHz, la detección de onda viajera requiere una exactitud de microsegundos y la capacidad de comunicación con la Subestacion colateral para registrar de manera sincronizada el evento por medio de localizadores globales de posición (GPS). [19]

Actualmente los equipos de localización de falla por medio de onda viajera se diseñan y utilizan internacionalmente en países como Estados Unidos, Canadá Italia, España, Holanda, China, Colombia y Brasil, lo anterior se hace para la localización precisa de fallas que han ocasionado la salida de operación de la Línea de Transmisión por la operación de una protección eléctrica [20]. [21] [22] [23] [24]

En la ciudad de México se desarrolló un Sistema para el Monitoreo de Líneas de Transmisión (SIMLON) el cual tuvo casos de éxito en la detección y ubicación de fallas incipientes en líneas de transmisión en base al monitoreo de las alarmas producidas por equipos digitales de onda viajera. [25]

Las Redes Eléctricas Inteligentes (REI) son el futuro en la gestión de los Sistemas Eléctricos de Potencia, su funcionamiento dependerá de la gestión de los activos para lo cual se han desarrollado metodologías de Mantenimiento Basado en Condición (MBC) , estas incluyen monitorear la confiabilidad en la operación de los equipos, los métodos de localización de falla con onda viajera serán de gran ayuda para la integración de las Líneas de Transmisión en los sistemas de Redes Eléctricas Inteligentes. [26]

## 1.2 Planteamiento del Problema

Ante la salida de operación de una línea de transmisión por falla eléctrica, se puede obtener un valor aproximado de la ubicación de la falla por medio del Relevador de Distancias (21L), los valores obtenidos tiene una exactitud de aproximadamente 2 % lo que puede representar una revisión de hasta 6 km para una línea de 300 km, en lugares de difícil acceso, se hacen revisiones con jornadas de 8 horas o más, con un mínimo de 10 personas, por la dificultad de algunos terrenos, es necesario que en algunos casos el personal de campo deba pernoctar fuera de sus centros de trabajo un promedio de tres días, lo que incrementa el costo de las revisiones, por ello se busca un método de localización de fallas más exacto, así como métodos que permitan detectar las fallas incipientes antes de que se presente la salida de la Línea de Transmisión.

Las salidas transitorias de las Líneas de Transmisión son aquellas donde operan correctamente protecciones de recierre (79) o de disparo con recierre monopolar (DRM) que generalmente son libradas en menos 1 minuto, en ocasiones no se logran identificar las causas de la falla debido a que ya está en operación y se les clasifica como desconocidas, el uso de equipos que permitan una localización más exacta permitirá detectar el origen de las fallas para evitar las recurrencias.

La integración de fuentes de energía renovables derivadas de la reforma energética en México y el incremento de la demanda en zonas con alto crecimiento por actividades industriales, turísticas y residenciales ha llevado a algunos enlaces eléctricos de LT a niveles de operación superiores a los históricos y a la necesidad de que disminuyan las salidas de las líneas de transmisión, por lo que la detección predictiva de fallas, permitirá mantener la integridad, continuidad y estabilidad en el sistema eléctrico de potencia.

## 1.3 Justificación

Se requiere hacer una investigación para la aplicación de mantenimiento predictivo de Líneas de Transmisión por medio de la localización de fallas con el uso de equipos de detección de Onda Viajera.

Dentro de los beneficios del trabajo se encuentra disminuir los costos de mantenimiento, así como las inversiones necesarias para incrementa la capacidad de transmisión ya que permitirá mejorar los Indicis de Disponibilidad de la Red Nacional de Transmisión.

Estos beneficios serán reflejados en el servicio eléctrico a los usuarios de la Red Nacional de Transmisión, ello incluye las empresas privadas interesadas en interconectarse, el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), y los Centros de Carga

No se presenta una opción comercial en particular, se hace una investigación abierta de diferentes opciones tecnológicas y comerciales presentes a nivel nacional e internacional.

#### 1.4. Objetivo

Hacer una investigación cuantitativa para obtener mediciones de onda viajera de voltaje generadas por perturbaciones en la RNT generadas por fallas incipientes para realizar inspecciones de mantenimiento predictivo que eviten salidas no programadas en líneas de transmisión, y ante la salida de la LT identificar con exactitud la distancia de la falla para corregir la causa rápidamente.

Revisar la tecnología implementada actualmente en 2 de los enlaces más importantes, uno entre la Región S con la Región P y otro entre de la Región E con la Región N, se incluirán las características generales equipos eléctricos conectados.

Se analizarán la tecnología de los elementos de líneas, subestaciones, protección, control y comunicación para el monitoreo remoto de las señales producidas por la detección de ondas viajeras, sin preferencias comerciales.

#### 1.5 Hipótesis

La medición de la onda viajera voltaje y corriente de alta frecuencia se puede aplicar para detectar fallas incipientes de líneas de transmisión con una precisión de hasta 60 metros, la ubicación de dichas fallas sirve para programar mantenimiento predictivo y preventivo para realizar revisiones que permitan evitar salidas no programadas, así como identificar la distancia exacta que origino la salida de una LT.

Se analizará la opción de aplicar un mantenimiento predictivo en líneas de transmisión, por medio de la detección recurrente de la presencia de perturbaciones medidas por ondas viajeras que indiquen la misma distancia de manera reiterada para realizar la revisión de manera previa a la salida de operación de la línea de transmisión

## 2 Capítulo 2

### 2.1 Metodología (tipo de investigación)

La metodología para utilizar será definir el estado actual que se utiliza para la localización de fallas en las Líneas de Transmisión, se busca analizar las tecnologías disponibles y las que están implementadas en la República Mexicana y el beneficio de integrar nuevas tecnologías para disminuir los recursos necesarios para el mantenimiento

### 2.2 Delimitación del Trabajo de Investigación

El trabajo se delimitará a analizar el estado del arte que se tiene para la localización de fallas de líneas de transmisión de 69 kV a 400 kV en la República Mexicana y se analizará la integración de equipos de localización de fallas por medio de Onda Viajera se analizarán las siguientes LT

- 2 de los enlaces más críticos en la Red Nacional de Transmisión de 400 kV de la región S hacia la región de la P.
- 2 enlaces en la RNT de 400 kV de la región N a la región E.

### 2.3 Límite metodológico

Los límites dentro de la investigación se encuentran en la falta de regulación y normalización a nivel nacional para la implementación

No se cuenta con una gran cantidad de equipos instalados, por lo que los datos obtenidos son un desarrollo innovador que puede servir de ejemplo para el análisis y comprensión de las ondas viajeras buscando siempre una mayor cantidad de casos de éxito comprobado.

### 2.4 Muestra e instrumentos de medición.

Se analizan los registros de la onda viajera en los enlaces de transmisión en 400 kV de la Red Nacional de Transmisión de los enlaces mencionados.

Se enlistan los equipos eléctricos utilizados en la detección de ondas viajeras y se citan las especificaciones con los que normalmente son suministrados en México.

Transformadores de Corriente, medidores de corriente de alta exactitud [27]

Relevadores de protección [28]

Esquema de protección de Líneas de Transmisión [18]

Tableros de Control en Subestaciones Eléctricas. (LAPEM, 2016)

Equipos de teleprotección [29]

Programa para diagnóstico y análisis de archivos COMTRADE de relevadores digitales. [30]

Equipo Localizador de Fallas (DFR, Digital Fault Recorder) son equipos electrónicos inteligentes que operan basados en el principio de ondas viajeras de alta frecuencia, detecta fallas con una precisión de +/- 300 metros, que tienen la capacidad de generar registros binarios durante transitorios de Sistemas Eléctricos de Potencia y pueden generar un registro de fallas y oscilografía en formato COMTRADE con capacidad de tomar 4,992,000 muestras por segundo.

Sistema de posicionamiento global (GPS) basado en satélites para proveer posición y tiempo con una exactitud menor o igual a 1  $\mu$ segundo [31]

## 2.5 Marco Histórico

La representación matemática de los parámetros eléctricos de voltaje, corriente, inductancia y admitancia de una línea de transmisión representa cálculos matriciales que deben ser iterados en distintas frecuencias para el análisis de los transitorios electromagnéticos, es por ello que la aplicación de equipos que pudieran detectar la onda viajera de alta frecuencia en los sistemas eléctricos comenzó a ser utilizada en mayor medida a partir de los años 80's cuando se empezaron a reemplazar los equipos electromecánicos de protección por equipos con funciones digitales que permitían el computo avanzado de los parámetros y la medición de corriente y voltaje en alta frecuencia

La mayoría de los dispositivos de protección digitales actuales utilizan algoritmos basados en cantidades fasoriales e impedancias para la localización de fallas usando los mismos principios que los equipos electromecánicos tenían para la detección de

falla, los avances tecnológicos en el tratamiento de las señales y la velocidad de los cálculos de los relevadores digitales abren nuevas posibilidades para la determinación de algoritmos en el dominio del tiempo, y la respectiva sincronización de los equipos ubicados en distintos puntos geográficos dentro del sistema eléctrico de potencia

Los equipos de localización de falla por onda viajera han sido utilizados por la última década a nivel internacional, y han demostrado un buen nivel de exactitud lo que permite identificar fácilmente el origen de la falla. [32]

## 2.6 Marco Teórico

Los avances teóricos desarrollados en el modelado de Líneas de Transmisión considerando los parámetros distribuidos de Líneas Monofásicas y Trifásicas y el estudio de Transitorios Electromagnéticos así como la medición y análisis del comportamiento de la onda electromagnética en alta frecuencia han permitido el desarrollo presentando en este trabajo, es por ello que a continuación se presentan los principios para el cálculo del modelado de Líneas de Transmisión por medio de las Ecuaciones del Telegrafista que sirven para determinar los valores de Inductancia y Capacitancia que permiten obtener la constante de velocidad de propagación de una onda viajera así como los Métodos que se han utilizado para el análisis de dicha onda como lo son el Método de Celosía de Bowley, el Método de Bergeron y el Método de Final Único.

La medición de las perturbaciones en la señal eléctrica y el cálculo de la distancia donde se origina ha sido perfeccionada por medio de la implementación de la detección de la onda viajera como fenómeno transitorio de alta frecuencia.

- Las fallas en las líneas de transmisión generan ondas viajeras que se propagan desde la localización de la falla hasta las terminales de la línea con una velocidad de propagación que depende de los parámetros eléctricos como la capacitancia y la inductancia distribuida de la línea en base al circuito equivalente de un segmento de dos conductores de una línea de transmisión.
- El análisis de la onda viajera como fenómeno eléctrico que viaja a través de la distancia y del tiempo puede ser medidos en los transformadores de medición de corriente y voltaje de los extremos y registrados con equipos de protección digitales que tengan la función de localizador de fallas basado en el principio de ondas viajeras.
- La sincronía del tiempo de registro de los equipos de medición por medio de relojes con sistemas de posicionamiento global (GPS), así como la automatización y el monitoreo remoto de la localización exacta del disturbio

transitorio detectado por la onda viajera permitirá realizar mantenimiento predictivo o correctivo en Líneas de Transmisión

### 2.6.1 Parámetros Eléctricos en las Líneas de Transmisión Monofásicas.

Para la determinación de los parámetros de líneas de transmisión se han utilizado los parámetros concentrados en donde no importa la distancia entre un elemento y otro, ni el tiempo en el que se desplaza la energía de un punto a otro es el modelado de los elementos más sencillos y se realiza por medio de ecuaciones diferenciales por otro la determinación de parámetros distribuidos si importan la distancia entre un elemento y otro así como el tiempo en que se desplaza la energía de un punto a otro, este modelo se realiza por medio de ecuaciones diferenciales parciales, son más complejos y más exactos por lo tanto son los modelos más comúnmente empleados en el análisis de transitorios electromagnéticos por medio de los cuales se pueden identificar fallas incipientes con descargas parciales con duraciones del orden de microsegundos y descargas atmosféricas.

La determinación de los parámetros eléctricos de una línea de transmisión monofásica depende significativamente de la altura de los conductores con respecto al suelo y el radio del conductor.

La caída de tensión depende de la impedancia ( $Z$ ) serie que está dada por:

$$Z = R + j\omega L \quad (1)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad angular, ( $R$ ) es la resistencia y ( $L$ ) la Inductancia

La Admitancia ( $Y$ ) transversal de la línea se define como:

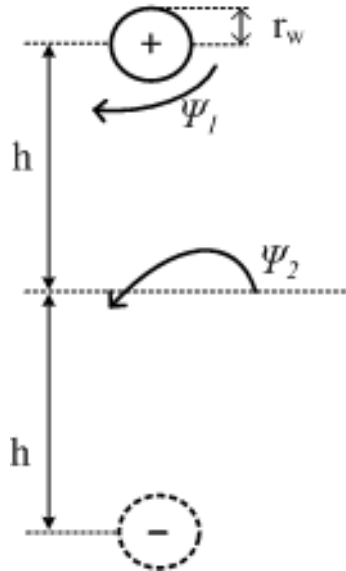
$$Y = G + jB \quad (2)$$

Donde ( $G$ ) es la Conductancia y ( $B$ ) es la Susceptancia.

La resistencia generalmente es mínima por lo que se considera calcula únicamente la inductancia y capacitancia geométrica, para lo cual se utilizara el método de las imágenes asumiendo un retorno por tierra equidistante con la altura del conductor.

La Inductancia (L) se origina por el flujo magnético ( $\Psi$ ) producido por la corriente que circula en el conductor (I)

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (3)$$



**Figura 2.1. Método de las imágenes de una línea monofásica.** Ilustración 8 [33]

Del método de las imágenes se obtiene que

$$\Psi = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \ln \left( \frac{2h - r_{cond}}{r_{cond}} \right) \quad (4)$$

Donde (h) es la altura del enganche del conductor,  $r_{cond}$  es el radio del conductor y  $\mu_0$  es la permeabilidad del vacío.

De lo anterior se obtiene que la Inductancia Geométrica (Lg) está dada como:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2h - r_{cond}}{r_{cond}} \right) \quad (5)$$

Donde la permeabilidad del vacío esta definida como  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (N * A^{-2})$

La capacitancia (C) está dada por

$$C = \frac{q_c}{v_c} \quad (6)$$

En donde  $q_c$  es la carga del conductor y  $v_c$  es el voltaje, aplicando el método de las imágenes deducimos

$$v_c = \frac{q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{2h - r_{cond}}{r_{cond}} \right) \quad (7)$$

Sustituyendo obtenemos

$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left( \frac{2h - r_{cond}}{r_{cond}} \right)} \quad (8)$$

Donde la permitividad del vacío es  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$

Con lo que podemos tener los valores para el modelado de líneas monofásicas si consideramos que es una línea sin pérdidas debidas al Efecto Joule producido por la resistencia del conductor, mismos que en términos reales son mínimas y por tanto despreciables.

[34]

## 2.6.2 Parámetros Eléctricos en Líneas de Transmisión Multiconductoras.

Las líneas de transmisión de alta tensión están formadas por circuitos trifásicos de uno, o más conductores por fase, para lo cual es necesario calcular el Radio Medio Geométrico y la Distancia Media Equivalente

El Radio Medio Geométrico representa la distancia entre los conductores de una misma fase y se describe por la siguiente ecuación.

$$RMG_n = \sqrt[n]{n * RadioCond * A^{n-1}} \quad (9)$$

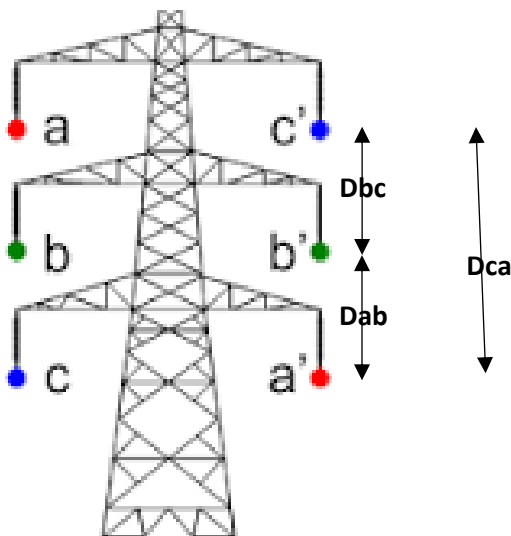
Donde n = número de conductores

RadioCond= Radio del conductor que es un valor dado por el fabricante del conductor

A= la Distancia Media entre el centro de los conductores.

La Distancia Media Geométrica es el valor medio entre las tres fases de una misma línea y este dado por

$$DMG = \sqrt[3]{Dab * Dca * Dbc} \quad (10)$$



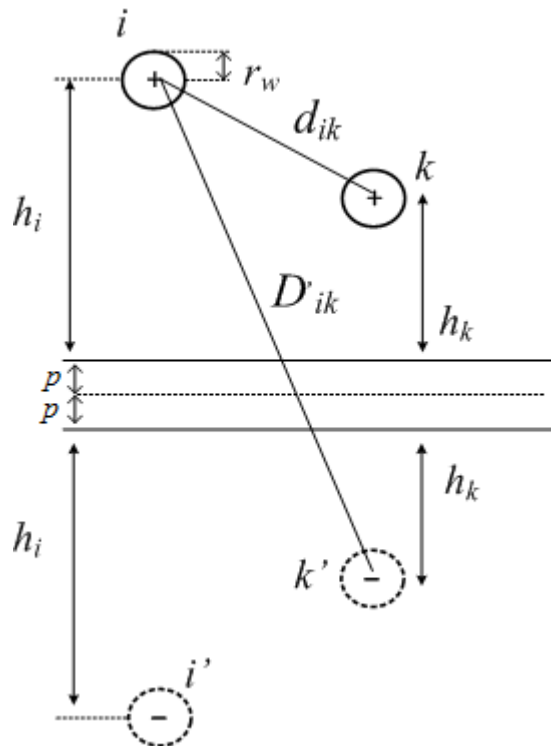
**Figura 2.2 Estructura de doble circuito con distancias media entre conductores  $D_{ab}$ ,  $D_{ca}$  y  $D_{bc}$ .** Ilustración 9 [35]

Estos valores son aplicados para el cálculo de los parámetros trifásicos y con múltiples conductores de Inductancia y Capacitancia de las fórmulas Ecuación 5 y 8 obteniendo lo siguiente.

$$L_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{DMG}{RMG} \right) n \quad (11)$$

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left( \frac{DMG}{r_{cond}} \right)} \quad (12)$$

Se puede obtener el cálculo de los parámetros de la línea multiconductoras considerando el método de imágenes complejas



**Figura 2.3. Método de las imágenes complejas para el cálculo de parámetros de Líneas Multiconductoras.** Ilustración 10 [33]

De donde obtenemos la ecuación

$$L = \frac{\Psi_{1,2}}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2h}{r_w} \right) \quad (13)$$

Donde ya se integra la distancia media geométrica y el radio medio geométrico para el cálculo de la inductancia de la línea, a partir de la cual podemos obtener una matriz de impedancia de retorno por tierra para el cálculo de las combinaciones de los conductores con sus imágenes.

$$L_{ii}^{g,t} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2h + p}{r_w} \right) \quad (14)$$

El arreglo matricial de las distancias también se aplica para el cálculo de los diferentes valores de la capacitancia de manera matricial y la ecuación 12 se reescribe como

$$C_{ik} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left( \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right)} \quad (15)$$

Considerando que los valores de capacitancia e inductancia dependen de la frecuencia y para el análisis en fenómenos transitorios con altas frecuencias dichos valores se modifican y se puede obtener un “n” cantidad de frecuencias que dará una “n” cantidad de matrices relacionadas a cada frecuencia.

[33]

### 2.6.3 Modelado de Líneas de Transmisión de múltiples segmentos y el fenómeno de la onda viajera

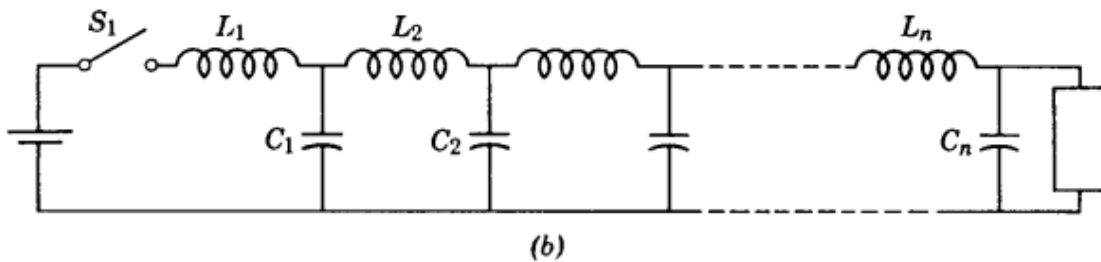
Para la representación del comportamiento de una línea de transmisión se han utilizado las funciones conocidas como ecuaciones del Telegrafista desarrolladas por Oliver Heavside donde se expresa que el flujo eléctrico  $\Psi$  y el flujo magnético  $\phi$  originados por una onda electromagnética causan un voltaje instantáneo  $V(x, t)$  y una corriente instantánea  $I(x, t)$ , cuyas variaciones están en función de la Capacitancia y la Inductancia respectivamente.

$$d\Psi(t) = V(x, t)C\Delta x \quad (16)$$

$$d\phi(t) = I(x, t)C\Delta x \quad (17)$$

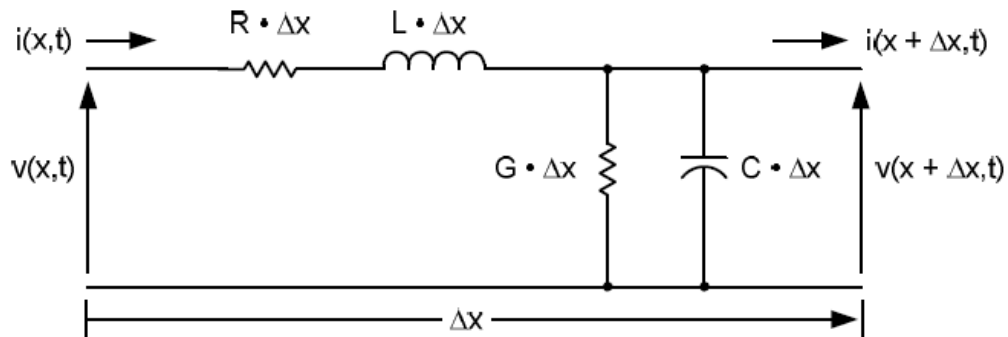
La propagación de cualquier onda viajera en las líneas de transmisión se puede analizar considerando una variación en la longitud descrito como  $\Delta x$ , que se puede deducir a partir del circuito equivalente de una línea de transmisión.

En la siguiente figura se observa la representación de una línea de transmisión con múltiples segmentos.



**Figura 2.4 Representación de una línea de transmisión con múltiples segmentos.** Ilustración 11 [36]

En la siguiente figura se observa el circuito equivalente de un segmento de una línea de transmisión.



**Figura 2.5 Circuito Equivalente de una LT** Ilustración 12 [19]

Donde

$R \cdot \Delta x$ .-Resistencia por unidad de longitud

$L \cdot \Delta x$ . Inductancia por unidad de longitud.

$G \cdot \Delta x$ .- Conductancia por unidad de longitud

$C \cdot \Delta x$ .-Capacitancia por unidad de transmisión

$i(x, t)$ .-La corriente  $i$  en el punto  $x$  y tiempo  $t$

$i(x + \Delta x, t)$ .-La corriente  $i$  en el punto  $\Delta x$

$v(x, t)$ .-El voltaje  $v$  en el punto  $x$  y tiempo  $t$

$v(x + \Delta x, t)$ .-El voltaje  $v$  en el punto  $\Delta x$

Podemos usar la ley de voltajes de Kirchhoff mostrada en la ecuación 18 y la ley de corrientes de Kirchhoff mostrada en la ecuación 19. para relacionar el voltaje y la corriente a la ubicación de  $x$  y de  $x + \Delta x$ .

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R \cdot \Delta x \cdot i(x, t) + L \cdot \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (18)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = G \cdot \Delta x \cdot v(x + \Delta x, t) + C \cdot \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (19)$$

Podemos dividir ambos lados de las ecuaciones 18 y 19. por el segmento de la longitud de la línea  $\Delta x$  para obtener la tasa de cambio del voltaje y la corriente por un cambio en la ubicación  $\Delta x$

Si asimismo que el cambio en la ubicación  $\Delta x$  es aproximadamente cero, podemos obtener derivadas del voltaje y la corriente con respecto a la posición como mostramos en las ecuaciones siguientes.

Estas ecuaciones determinan el voltaje y la corriente como una función de la distancia ( $x$ ) y el tiempo ( $t$ )

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = R \cdot i(x, t) - L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (20)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G \cdot v(x,t) - C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (21)$$

De las ecuaciones 20 y 21 consideramos la sustitución de la variación con respecto al tiempo con el operador de la función escalón Heaviside para considerar el impulso como un valor escalón producido por un transitorio.

$$s = \frac{\partial}{\partial t} \quad (22)$$

Utilizando el operador Heaviside en las ecuaciones 2.3 y 2.4 podemos transformar las ecuaciones del dominio del tiempo en el dominio de Laplace como se muestra en 23 y 24

$$\frac{\partial v(x,s)}{\partial x} = -(R + sL) \cdot i(x,s) \quad (23)$$

$$\frac{\partial i(x,s)}{\partial x} = -(G + sC) \cdot v(x,s) \quad (24)$$

En el dominio de Laplace la Impedancia se define en base a la ecuación 25 y la admitancia en base a la ecuación 26

$$Z = R + sL \quad (25)$$

$$Y = G + sC \quad (26)$$

Por lo que utilizando las ecuaciones 25 y 26 para sustituir en 23 y 24 y obtenemos lo siguiente.

$$\frac{\partial v(x,s)}{\partial x} = -Z \cdot i(x,s) \quad (27)$$

$$\frac{\partial i(x,s)}{\partial x} = -Y \cdot v(x,s) \quad (28)$$

Derivado con respecto a x se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\partial^2 v(x,s)}{\partial x^2} = -Z \cdot \frac{\partial i(x,s)}{\partial x} \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,s)}{\partial x^2} = -Y \cdot \frac{\partial v(x,s)}{\partial x} \quad (30)$$

Entonces podemos substituir 29 y 30 en 27 y 28 para obtener las siguientes ecuaciones

$$\frac{\partial^2 v(x,s)}{\partial x^2} = Z \cdot Y \cdot v(x,s) \quad (31)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,s)}{\partial x^2} = Y \cdot Z \cdot i(x,s) \quad (32)$$

La constante de propagación de una onda ( $\gamma$ ) está definida por la siguiente ecuación.

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} \quad (33)$$

Por lo que reemplazando en 31 y 32 e igualando a cero obtenemos las ecuaciones

$$\frac{\partial^2 v(x,s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot v(x,s) = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,s)}{\partial x^2} - \gamma^2 \cdot i(x,s) = 0 \quad (35)$$

La transformada inversa de Laplace de la solución general de las ecuaciones diferenciales de segundo orden conforme al Teorema de Superposición de soluciones de las ecuaciones 34 y 35 son las siguientes.

$$v(x,t) = v_I e^{-\gamma x} + v_R e^{\gamma x} \quad (36)$$

$$i(x,t) = i_I e^{-\gamma x} + i_R e^{\gamma x} \quad (37)$$

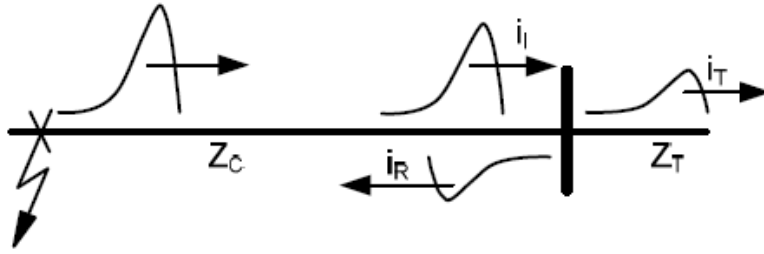
En base a las ecuaciones 36 y 37 se observa que el voltaje y la corriente son la suma de dos componentes, estos componentes son las ondas incidentes de voltaje ( $v_I e^{-\gamma x}$ ) y corriente ( $i_I e^{-\gamma x}$ ), así como las ondas reflejadas de voltaje ( $v_R e^{\gamma x}$ ) y corriente ( $i_R e^{\gamma x}$ )

Con base a la corriente y voltaje medidos en una línea de transmisión se pueden calcular los valores de voltaje y corriente incidentes y reflejados en base a los parámetros característicos de impedancia de la línea.

$$Z_c = v_I / i_I \quad (38)$$

$$Z_c = -v_r / i_r \quad (39)$$

Cuando una onda viajera de corriente incidente  $i_i$  en el punto final de una línea, parte de esa onda se transmite a la siguiente línea  $i_t$  y otra parte se ve reflejada  $i_r$  [37]



**Figura 2.6 Imagen de las ondas incidentes  $i_i$  transmitidas  $i_t$  y reflejadas  $i_r$**   
Ilustración 13 [19]

### 2.6.4 Modelado de Líneas de Transmisión Monofásicas en el dominio de la frecuencia.

Para el modelado de líneas partimos de las ecuaciones del telegrafista en el dominio de la frecuencia que se pueden expresar en forma matricial como:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} V(z, s) \\ I(z, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z \\ -Y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(z, s) \\ I(z, s) \end{bmatrix} \quad (40)$$

Donde  $I(z, s)$  y  $V(z, s)$  son los vectores de voltaje y de corriente en la trayectoria  $z$ ,  $Z$  y  $Y$  representan la matrices de impedancia serie y de admitancia.

Utilizando la transformada de Laplace respecto a la coordenada  $z$  obtenemos:

$$\begin{bmatrix} qU & 0 \\ 0 & qU \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(q, s) \\ I(q, s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_0(s) \\ I_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z \\ -Y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(z, s) \\ I(z, s) \end{bmatrix} \quad (41)$$

Donde  $I_0(s)$  y  $V_0(s)$  son las corrientes y los voltajes medidos al inicio de la Línea y  $U$  es la matriz de identidad  $n \times n$  para  $n$  conductores. Resolviendo para

$$\begin{bmatrix} V(q, s) \\ I(q, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q & Z \\ Y & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0(s) \\ V_L(s) \end{bmatrix} \quad (42)$$

Los voltajes y corrientes al inicio de la línea pueden obtenerse de la matriz de admitancias de la línea en el dominio de la frecuencia.

$$\begin{bmatrix} I_{S0}(s) \\ I_{SL}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + Y_s & -B \\ -B & A + Y_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0(s) \\ V_L(s) \end{bmatrix} \quad (43)$$

Donde:

$$A = Y_0 \coth(\Psi L) \quad (44)$$

$$B = Y_0 \operatorname{csch}(\Psi L) \quad (45)$$

$$Y_0 = \sqrt{Z^{-1}Y} \quad (46)$$

$$\Psi = \sqrt{ZY} = \alpha + j \quad (47)$$

Los vectores  $I_{S0}(s)$  e  $I_{SL}(s)$  son las mediciones de corrientes en las subestaciones en los extremos de la línea, se considera un equivalente de Norton en  $z=0$

$$I_{S0}(s) = Y_s V_s \quad (48)$$

$$I_{SL}(s) = 0 \quad (49)$$

Sustituyendo las ecuaciones 48 y 49 y resolviendo para la ecuación 50

$$V_0(s) = \beta V_s \quad (50)$$

obtenemos

$$\beta = [B^{-1}(A + Y_S) - (A + Y_L)^{-1}B]^{-1}B^{-1}Y_S \quad (51)$$

Donde el cálculo de la corriente lo obtenemos de

$$I_0(s) = Y_S(U - \beta)V_s \quad (52)$$

Sustituyendo 50 y 52 en 42 obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V(q, s) \\ I(q, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q & Z \\ Y & Q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \beta V_s \\ Y_S(U - \beta)V_s \end{bmatrix} \quad (53)$$

[38] [33]

### 2.6.5 Modelado de Líneas de Transmisión Multiconductoras en el dominio de la frecuencia.

Para el modelado de líneas multiconductoras en el dominio de la frecuencia partimos de las ecuaciones monofásicas.

$$\frac{\delta^2 V}{\delta^2 \zeta} = ZYV \quad (54)$$

$$\frac{\delta^2 I}{\delta^2 \zeta} = YZ I \quad (55)$$

Aplicando la siguiente identidad

$$[ZY]^t = Y^t Z^t = YZ \quad (56)$$

Obtenemos

$$\frac{\delta^2 V}{\delta^2 \zeta} = AV \quad (57)$$

$$\frac{\delta^2 I}{\delta^2 \zeta} = A^t I \quad (58)$$

Aplicando análisis modal

$$A = M \lambda M^{-1} \quad (59)$$

Obtenemos

$$\frac{\delta^2 V}{\delta^2 \zeta} = M \lambda M^{-1} V \quad (60)$$

Por tanto

$$\frac{\delta^2 V_m}{\delta^2 \zeta} = \lambda V_m \quad (61)$$

De donde se obtienen los modos de propagación del voltaje

$$V = \mathbf{M}_1 V_{m1} + \mathbf{M}_2 V_{m2} + \dots + \mathbf{M}_n V_{mn} \quad (62)$$

De donde podemos obtener las constantes de velocidad de propagación modales para la onda viajera.

$$V_{mi} = C_{1i} e^{-\gamma_i \zeta} + C_{2i} e^{\gamma_i \zeta} \quad (63)$$

Obteniendo la ecuación anterior en análisis modal para múltiples frecuencias

Considerando la constante de propagación en múltiples frecuencias consideramos la ecuación 64

$$\gamma = \sqrt{\lambda_i} = \alpha + j\beta \quad (64)$$

Para poder obtener los voltajes modales se utilizan constantes de propagación para cada una de las frecuencias consideradas obteniendo la siguiente matriz

$$\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ \vdots \\ V_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma_1 \zeta} & & & \\ & e^{-\gamma_2 \zeta} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{-\gamma_n \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{1m1} \\ C_{1m2} \\ \vdots \\ C_{1mn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^{\gamma_1 \zeta} & & & \\ & e^{\gamma_2 \zeta} & & \\ & & \ddots & \\ & & & e^{\gamma_n \zeta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{2m1} \\ C_{2m2} \\ \vdots \\ C_{2mn} \end{bmatrix} \quad (65)$$

Definiendo una matriz de constantes de propagación para cada frecuencia como  $\mathbf{\Gamma}$

Donde

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \gamma_n \end{bmatrix} = \sqrt{\lambda} \quad (66)$$

Remplazando en el voltaje

$$\mathbf{V}_m = \mathbf{C}_{1m} \text{Exp}(-\mathbf{\Gamma} \zeta) + \mathbf{C}_{2m} \text{Exp}(\mathbf{\Gamma} \zeta) \quad (67)$$

Para obtener los voltajes modales se aplica.

$$V_m = M^{-1}V \quad (68)$$

Reemplazando en la ecuación anterior.

$$V = MC_{1m}Exp(-\Gamma\zeta)M^{-1} + MC_{2m}Exp(\Gamma\zeta)M^{-1} \quad (69)$$

Se aplica el siguiente teorema:

$$Vf(M\lambda M^{-1}) = f(A) = Mf(\lambda)M^{-1} \quad (70)$$

Reemplazando la siguiente ecuación

$$\Psi = M\Gamma M^{-1} \quad (71)$$

Obtenemos la solución para voltajes de la ecuación 60 sin valores modales.

$$V = C_{1m}Exp(-\Psi\zeta) + C_{2m}Exp(\Psi\zeta) \quad (72)$$

Así como la solución para las corrientes.

$$I = Y_0[C_{1m}Exp(-\Psi\zeta) - C_{2m}Exp(\Psi\zeta)] \quad (73)$$

De lo anterior se puede aplicar la constante de integración  $\zeta = 0$

$$V_0(0) = C_1 + C_2 \quad (74)$$

$$I_0(0) = Y_0[C_1 - C_2] \quad (75)$$

Resolviendo para las constantes  $C_1$  y  $C_2$

$$C_2 = \frac{V_0 - Z_0 I_0}{2} \quad (76)$$

$$C_1 = \frac{V_0 + Z_0 I_0}{2} \quad (77)$$

Aplicando una constante de integración  $\zeta = L$

Resolvemos para el voltaje

$$V(L) = V_L = C_1 \text{Exp}(-\Psi L) + C_2 \text{Exp}(\Psi L) \quad (78)$$

Así como para la corriente

$$-I_L = Y_0[C_1 \text{Exp}(\Psi L) - C_2 \text{Exp}(\Psi L)] \quad (79)$$

Sustituyendo las constantes de integración en las ecuaciones anteriores y agrupando términos se obtiene

$$V_L = \left[ \frac{\text{Exp}(\Psi L) + \text{Exp}(-\Psi L)}{2} \right] V_0 - \left[ \frac{\text{Exp}(\Psi L) - \text{Exp}(-\Psi L)}{2} \right] Z_0 I_0 \quad (80)$$

$$I_L = Y_0 \left[ \frac{\text{Exp}(\Psi L) - \text{Exp}(-\Psi L)}{2} \right] V_0 - Y_0 \left[ \frac{\text{Exp}(\Psi L) + \text{Exp}(-\Psi L)}{2} \right] Z_0 I_0 \quad (81)$$

Utilizando identidades trigonométricas

$$\cosh \theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2} \quad (82)$$

$$\sinh \theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2} \quad (83)$$

Obtenemos

$$A = \cosh(\Psi L) \quad (84)$$

$$B = (-Z_0) \sinh^t(\Psi L) \quad (85)$$

$$C = Y_0 \sinh(\Psi L) \quad (86)$$

$$D = -\cosh^t(\Psi L) \quad (87)$$

Que se puede simplificar en la matriz de transferencia.

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (88)$$

Con lo que se pueden resolver los voltajes y corrientes modales para un barrido en la frecuencia.

## 2.6.6 Método de Bergeron

El Método de Bergeron analiza la propagación de las ondas en una LT con parámetros constantes distribuidos y sin pérdidas debidas a la resistencia.

Como vimos en el capítulo anterior podemos definir el comportamiento de las tensiones y sobretensiones que se propagan en una línea de transmisión con dichas ecuaciones, si despreciamos el valor de la resistencia las podemos definir como:

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (89)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (90)$$

Resolviendo estas ecuaciones diferenciales 89 y 90 obtenemos 91 y 92 con ellas se pueden determinar las características de la onda viajera incidente  $v^+$  y reflejada  $v^-$  descritas en la Figura 2.6.

$$v(x,t) = v^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) + v^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \quad (91)$$

$$i(x,t) = Y_c \left( v^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) - v^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \right) \quad (92)$$

De la combinación de la de la 91 y 92 se obtiene lo siguiente

$$2v^+ \left( t - \frac{x}{v} \right) = 2v^- \left( t + \frac{x}{v} \right) \quad (93)$$

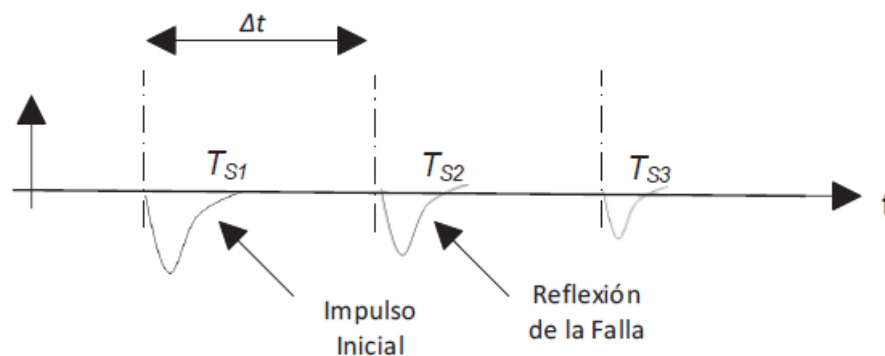
$$v(x, t) + Z_c i(x, t) = v(x, t) - Z_c i(x, t) \quad (94)$$

Donde  $Z_c$  es la impedancia característica que podemos calcular por el método de las imágenes para obtener los valores de la distancia (x)

[34]

### 2.6.7 Método Final único

El primer método que se analizara para localizar el punto donde se produjo la falla es el que usa el registro de las formas de onda viajera registradas en un extremo de la Línea de Transmisión, con los datos registrados por los equipos de detección de onda viajera, se determina la diferencia de tiempo  $\Delta t$  entre el impulso inicial y la reflexión de la falla que se observa en la figura 2.7



**Figura 2.7. Impulso y reflexión de la falla** Ilustración 14 [39]

La distancia de la localización de la falla (m) es descrita mediante.

$$m = \Delta t \cdot v/2 \quad (95)$$

Donde  $v$  es la velocidad de propagación de la onda viajera

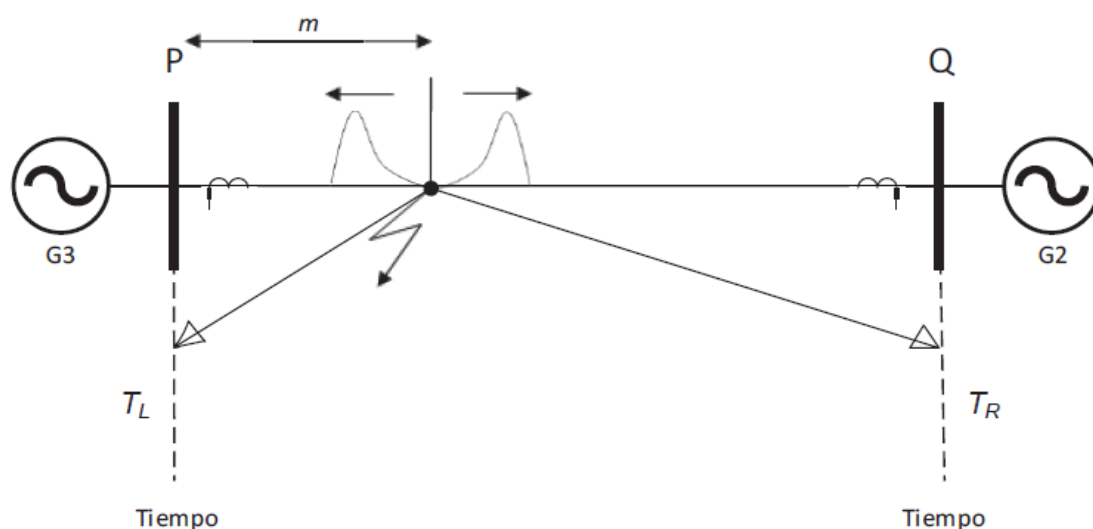
$$v = 1/\sqrt{LC} \quad (96)$$

[40]

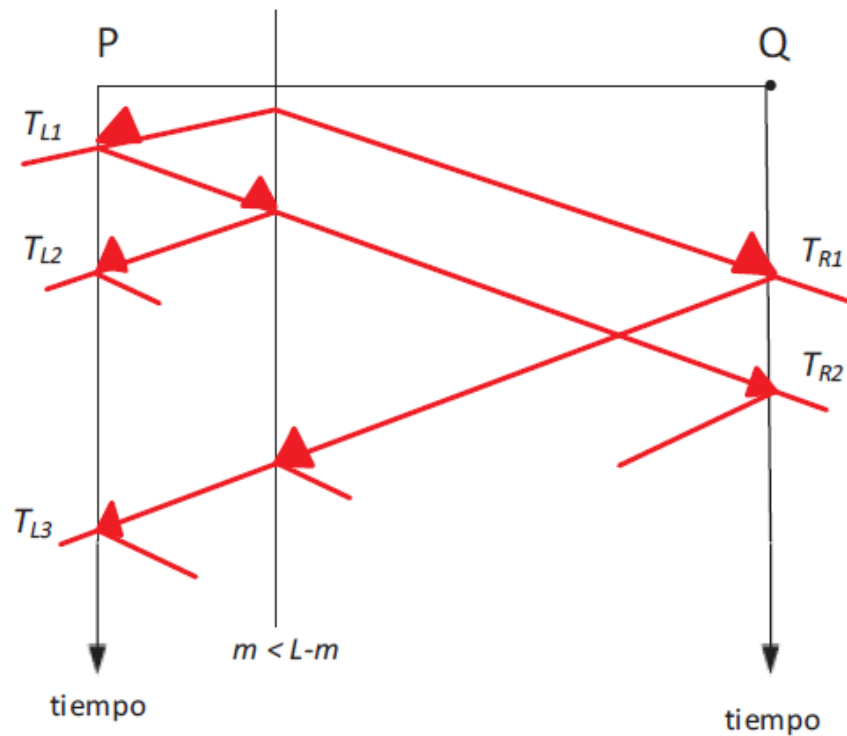
### 2.6.8 Método de celosía de Bewley.

Este método utiliza mediciones en ambos extremos y el tiempo de llegada relativo en cada uno.

La energía de las ondas viajeras se comporta de tres maneras distintas, una que es reflejada de regreso hacia la falla, una que se transmite delante de la barra colectora donde limita la línea de transmisión y la última es absorbida por los elementos de la barra colectora en la subestación del extremo de la línea de transmisión, estos fenómenos se presentan en los dos extremos de las líneas con falla, como se observa en la figura 2.4.



**Figura 2.8 Onda viajera hacia ambos extremos** Ilustración 15 [39]



**Figura 2.9. Diagrama de Celosía [39] Ilustración 16**

Este método mide los tiempos de llegada de las ondas viajeras a los extremos de las Líneas de Transmisión y con equipos de comunicación obtenemos la sincronización satelital de la estampa de tiempo, con ello se puede calcular la distancia de la falla en base a la diferencia del tiempo en el que se registra el evento en cada uno de los extremos como se describe matemáticamente a continuación.

$$mn = \frac{[(Tr-Tl) \cdot vn + Lon]}{2} \quad 97$$

Donde se observan dos tiempos Tr y Tl distintos por la llegada de la onda viajera a los respectivos extremos, y Lon representa la longitud de la Línea de Transmisión

Para el uso de este método se requiere determinar la velocidad de propagación de la onda para lo cual se debe calcular la inductancia y la capacitancia en la línea en base a los parámetros geométricos analizados con el Radio Medio Geométrico y la Distancia Media Geométrica.

## 2.6.9 Modelos de líneas de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia.

Se presentaron los fundamentos que han servido de sustento teórico para el desarrollo de los equipos digitales que detectan las ondas viajeras que se presentan ante una sobre tensión o sobre corriente transitoria en una línea de transmisión, se analizaron los métodos gráficos de Bawley también conocido como Diagrama de Lattice, así como los métodos de Final único y de Bergeron, estos métodos han sido reflejados en programas digitales comerciales como el programa de simulación digital en el dominio del tiempo “Electromagnetic Transient Program (EMTP)” posteriormente se desarrollaron sistemas donde se analiza el comportamiento ante las variaciones de la frecuencia que han sido la base para el análisis de los transitorios en altas frecuencias que han permitido el desarrollo de registradores digitales de alta frecuencia para medir la onda viajera producida por sobretensiones transitorios y ubicar con gran exactitud su origen.

[41]

## 3 Capítulo 3

### 3.1 Resultados

Por motivos de confidencialidad se han designado nombres genéricos a las Subestaciones, Líneas y Equipos Digitales que se presentan en los resultados, no se pretender hacer análisis de las propuestas comerciales, únicamente se analizaran los eventos registrados.

### 3.2 Descripción del equipo eléctrico primario, protección, control, y comunicaciones utilizado.

A continuación, se describe de una manera general el equipo eléctrico en las instalaciones.

El conductor utilizado en las líneas de transmisión de 230 kV y 400 kV es regularmente calibre 1113 ACSR/AS tiene un área nominal de sección transversal total de  $603 \text{ mm}^2$ , con un radio de 1.5 centímetros con 45 alambres de aluminio con 4 milímetros cada uno y 7 alambres de acero con un diámetro de 2.66 milímetros

cada, una masa de 1822 kg/km, una carga de ruptura de 130 kN y una resistencia eléctrica a 20°C de 0.050 Ohms/kms [42] [43]

Las Líneas de Transmisión de 230 kV y 400 kV Cuenta con diferentes Estructuras de Líneas de Transmisión [44], en base a la altura necesaria para librar los claros y las necesidades de tensión mecánica o suspensión propias de la orografía, dichas estructuras tienen generalmente una altura que va de los 25 a los 40 metros al primer conductor en el punto de enganche, con disposición vertical u horizontal entre las fases, cuya distancia depende de la tensión de la línea, con un claro medio vertical de 550 metros y un claro medio horizontal de 750 metros.

Aislamiento de 400 kV coordinado en base a la altura sobre el nivel del mar y al grado de contaminación del proyecto, considerando el aislamiento de fase a tierra, de fase a fase y el libramiento en el claro efectivo máximo [45]

Red de puesta a tierra de las estructuras de línea de transmisión para drenar la corriente de descarga atmosférica o de falla de corto circuito de las líneas de transmisión aéreas que incluyen hilo de guarda, colas de rata, bajante, red de puesta a tierra, terreno natural y conectores. [46]

Equipo Localizador de Fallas (DFR, Digital Fault Recorder) son equipos electrónicos inteligentes que operan basados en el principio de ondas viajeras de alta frecuencia, detectan fallas con una precisión de +/- 300 metros, tienen la capacidad de generar registros binarios durante transitorios de Sistemas Eléctricos de Potencia y pueden generar un registro de fallas y oscilografía en formato COMTRADE con capacidad de tomar 4,992,000 muestras por segundo o 20 MHz.

Sistema de posicionamiento global (GPS) basado en satélites para proveer posición y tiempo con una exactitud menor o igual a 1 microsegundo ( $\mu$ s) que pueden ser sincronizados por medio de señales IRIG-B Inter-Range Instrumentation Group-Time Code Format B [31]

Transformadores de corriente de 400 kV con una exactitud que permite detectar mínimo 20 veces la corriente nominal con un 10% de error y soportar sobre tensiones. [47]

Transformadores de voltaje de 400 kV con una capacidad de transformar en relaciones de hasta 2100/3500 a 1 con cargas nominales de 100 VA y una exactitud de clase 0.2 con un factor de potencia de 0.8 lo que representa un error de tensión de 0.2 % [48]

Sistema de adquisición de datos SCADA con protocolos de comunicación IEC 61850, DNP 3.0 y TCP/IP, estos permiten tener un acceso remoto a los DFR, así mismo generan señales de alarma que se pueden enviar por diferentes tipos de mensajería incluyendo SMS y aplicaciones Web. [49]

De manera adicional se puede considerar el uso de Sensores de precisión para la detección de tormentas eléctricas y la generación de alarmas, ante la caída de descargas atmosféricas. [50]

### 3.3 Medición de la impedancia y de la velocidad de propagación de la onda en líneas de transmisión

Debido a que el cálculo de la impedancia de la línea depende de múltiples factores geométricos y geográficos, considerando que las líneas de 400 kV cuentan con una densidad de 2.4 estructuras/km, se puede definir que con 300 km de longitud tienen alrededor de 720 estructuras por línea, lo que da una gran variedad de parámetros en cuanto a distancia media geométrica, por otro lado aun cuando se conozcan los parámetros geométricos que permiten calcular la impedancia se tienen diferentes factores a considerar como variaciones en las geo resistividades del terreno, e inducción mutua de circuitos de alta tensión cercanos, es por ello que se han aplicado técnicas para medir físicamente los parámetros eléctricos de la línea de transmisión, que permiten obtener la distancia exacta. [51]

Para realizar esas mediciones comúnmente se inyecta corriente de alta potencia a frecuencia del sistema de 60 hz desde un extremo y se aterriza el otro extremo para poder crear un bucle de impedancias por medio del cual se calculan los parámetros eléctricos de la línea de transmisión, el mercado cuenta con diferentes equipos comerciales que pueden realizar dichas mediciones.

Por otro lado, se pueden realizar inyecciones de corriente de alta potencia a frecuencia diferente a la fundamental para evitar las interferencias que se pueden dar por la inducción mutua de líneas cercanas. [52]

Otro método de prueba que se puede realizar con los equipos DFR conectados al sistema por medio de los Transformadores de Instrumento de la Subestacion, en donde se cierra el interruptor de un extremo y se deja abierto el otro extremo de la línea, el evento transitorio del cierre del interruptor generará una onda viajera que se reflejará en el extremo abierto en base a lo cual se podrá determinar la longitud de la línea con la velocidad de propagación de la onda con la formula

Longitud de la línea = (Tiempo registrado\*velocidad de propagación de la onda) /2

La velocidad de la propagación de la onda en línea aéreas es cercana a la velocidad de la luz y está definida como un factor que varía entre 0.985 y 0.995, estos valores pueden variar en base a constantes como la humedad, presión atmosférica, variación

en la distancia de los conductores por efecto del viento y otras condiciones medioambientales por lo que comúnmente se utiliza un valor de 0.99

De la formula básica de la velocidad de propagación de la onda viajera

$$t_{\text{linea}} = \frac{\text{Longitud de la línea}}{v_p} \quad 98$$

Tiempo de llegada de la onda viajera

$v_p$  es la velocidad de la onda viajera

La velocidad de la onda es aproximadamente iguala a la velocidad de la luz que es de 300,000 km/seg, para el caso de las líneas de transmisión aéreas.

Sin embargo, mediante las constantes de una línea se puede determinar la velocidad de la onda como se vio en el método de final único.

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 99$$

L es la inductancia de la línea

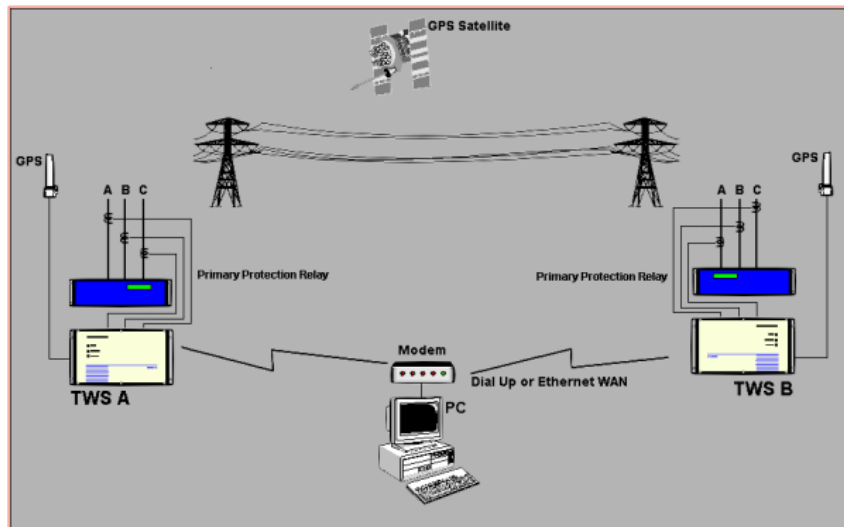
C es la capacitancia paralela de la LT

Típicamente para una línea de transmisión de 400 kV los valores de inductancia son de  $L=8.852 \times 10^7$  H/m y  $C=1.302 \times 10^{-11}$  F/m y con un coeficiente de la velocidad de la propagación de la onda utilizado que es de 0.982 [53]

### 3.4. Uso de equipos digitales localizadores de falla por onda viajera.

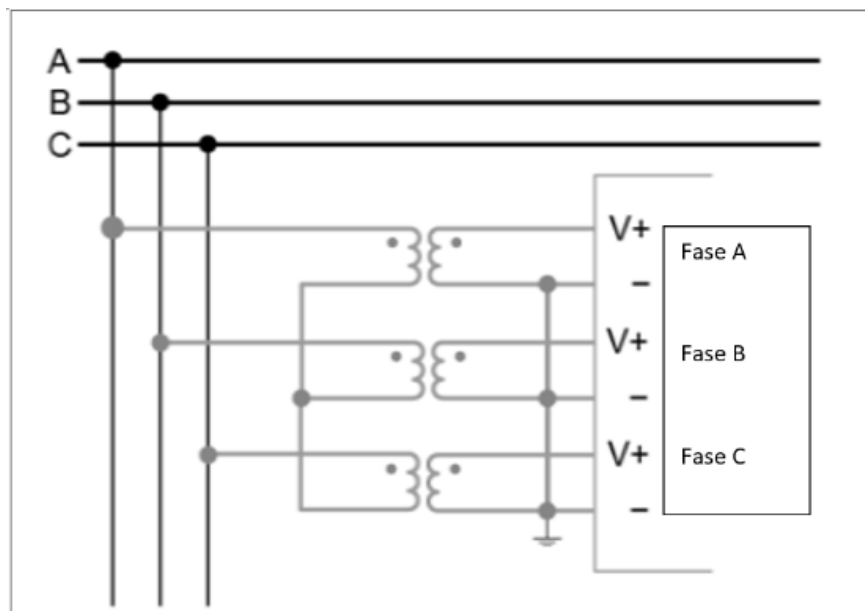
En este apartado se dará una explicación general del modo de operación de los equipos localizadores de falla, comenzando por un diagrama general donde se observa la forma en la que se realiza la conexión, se toma la señal de corriente o voltaje de los transformadores de instrumento que están conectados a la bahía de la Línea, las mediciones secundarias de los transformadores de instrumento se conecta en los equipos digitales, estos equipos están sincronizados por medio de un reloj digital con sistema de posicionamiento global (GPS) y comunicados por algún

canal de comunicación como la fibra óptica o ethernet en base a la tecnología disponible en ambos extremos de la Línea.



**Figura 3.1 Diagrama General de conexión del Equipo Primario de Alta Tensión con Equipo Localizador de Fallas [54] Ilustración 17**

La forma de operar de los equipos para la localización de fallas por onda viajera en línea de transmisión funciona con los siguientes pasos



**Figura 3.1 Diagrama de conexión de señales de entrada para el Equipo Localizador de Fallas.**

*Ilustración 18*

Se conectan las señales de voltaje tomado de los transformadores de instrumento en el Registrador Digital.

Se presenta un transitorio que genera un frente de onda viajera en las frecuencias determinadas

Se registra el tiempo de llega en ambas subestaciones y se registra la estampa de tiempo en base al sincronismo que otorgan los relojes con localizadores globales de posición (GPS) y se comunica por algún protocolo como IRIG -B.

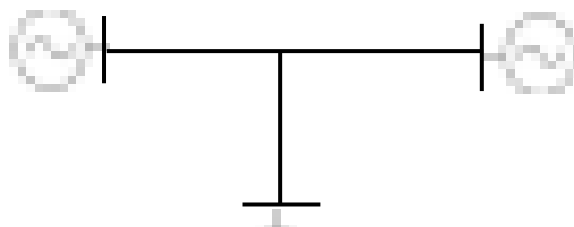
Se compara el tiempo de llegada y con la constante de velocidad de propagación que se definió se determina la distancia.

El equipo en base a los ajustes precargados emite una señal de alarma a los equipos de control remoto, se puede comunicar por diferentes protocolos como el MODBUS para tener comunicación con el equipo SCADA de cada subestación y de ahí por algún protocolo como TCP/IP se pueden mandar señales a centros de control o a los responsables de la línea de transmisión.

Los registros de onda viajera se pueden almacenar en formatos de registro digital para el análisis e interpretación de la oscilografía como el COMTRADE que permiten identificar el estado de los elementos, estos archivos pueden almacén informacion previa a la falla para verificar la estampa en la que se presenta el cambio entre el estado estable a la perturbación de sobretensión o sobre corriente, las mediciones se registran de manera monofásica por lo que en caso de que se presenten condiciones en dos o más fases el archivo almacenara la informacion con respecto al que se presente primero.

Los archivos COMTRADE se pueden reproducir en los programas de las diferentes propuestas comerciales de los fabricantes de relevadores digitales, así como en algunos de los diferentes softwares de simulación, por lo general las propuestas comerciales que ofrecen los Equipos Localizadores de Falla (DFR) incluyen un software que permite hacer la configuración de los parámetros de la línea para la localización de falla y obtener de manera automática la distancia.

La identificación de la falla se puede realizar también en líneas con tres puntos terminales y con fuentes de energía en cada extremo, para ello se debe configurar dos líneas con diferentes longitudes, en cada extremo, se deberá revisar la configuración del equipo DFR para esta aplicación



**Figura 3.2. Línea de Transmisión con tres terminales** *Ilustración 19*

Los equipos también pueden ser configurados para línea que tengan secciones de cables de potencia con secciones de líneas aéreas, para esta aplicación se debe considerar que se tienen diferentes coeficiente para la velocidad de propagación, como se mencionó en capítulos anteriores el coeficiente de la velocidad de propagación en líneas aéreas es cercana a la velocidad de la luz por lo que se utilizan valores alrededor de 0.9, para el caso de cables de potencia es posible calcular la velocidad de propagación en base a los materiales aislantes con los que está construido ya que tienen parámetros de permeabilidad y admitancia definidos, por lo general el material aislante utilizado en cables de potencia de alta tensión es el polietileno reticulado (XLPE) que tiene un coeficiente de velocidad de propagación de aproximadamente 0.6 en proporción a la velocidad de la luz. [55]



**Figura 3.3. Cable de Potencia de alta tensión con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE)** *Ilustración 20*

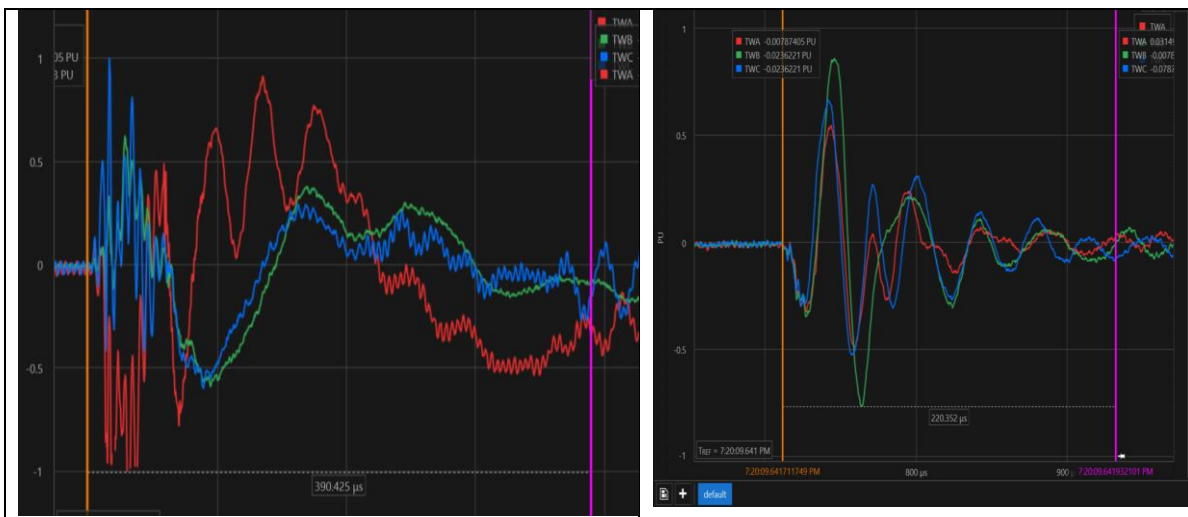
La detección de la onda viajera también puede identificar disturbios que se

presenten en los buses y en los transformadores de instrumento esto permite detectar fallas incipientes en equipo eléctrico primario de las subestaciones, estos registros tendrán polaridades opuestas en ambos extremos.

### 3.5. Registros de onda viajera.

A continuación, se presentan algunos registros obtenidos de eventos transitorios de las líneas mencionadas.

Se analizará la LT1 que enlaza el área S con el área P que conecta la Subestación 1 con la Subestación 2, La LT1 mide 298 kilómetros opera en 400,000 volts, con 2 conductores por fase calibre 1113 ACSR/AS, una capacidad de conducción de corriente de 2,000 Amperes, en base al equipo eléctrico primario que está conectado en serie en las subestaciones, con una capacidad de transmitir 1,384 MW, la LT1 junto con una línea paralela son los enlaces principales para una región que tiene una demanda de 1500 MW y que ha sido deficitaria en generación debido a la escases de los energéticos que alimentan las plantas de generación de esa área, por lo que dicha línea reviste gran importancia para el suministro eléctrico de la región.



**Figura 3.5.1 Registro de la LT1 en formato COMTRADE Ilustración 21 de Subestacion Uno del día 08/05/2021 07:20:09.651757**

**Figura 3.5.2 Registro de la LT1 en formato 1 COMTRADE de Subestacion Dos 08/05/2021 a las 07:20:09.657616**

Se observan señales de voltaje de alta frecuencia detectadas en las LT1 en valores por unidad (P.U.)

Para determinar la distancia se cuenta con la ecuación

$$d = \frac{l + k * c * (t_a - t_b)}{2}$$

Donde

d= Distancia de la perturbación

l=Longitud de la Línea

k=Constante de la velocidad de propagación de la onda (0.9 Línea de Transmisión Aérea, 0.6 Cable de Potencia.

c=constante de la propagación de la onda de luz (300,000 km/s)

ta=tiempo de llegada en la Subestacion 1

tb= tiempo de llegada en la Subestacion 2

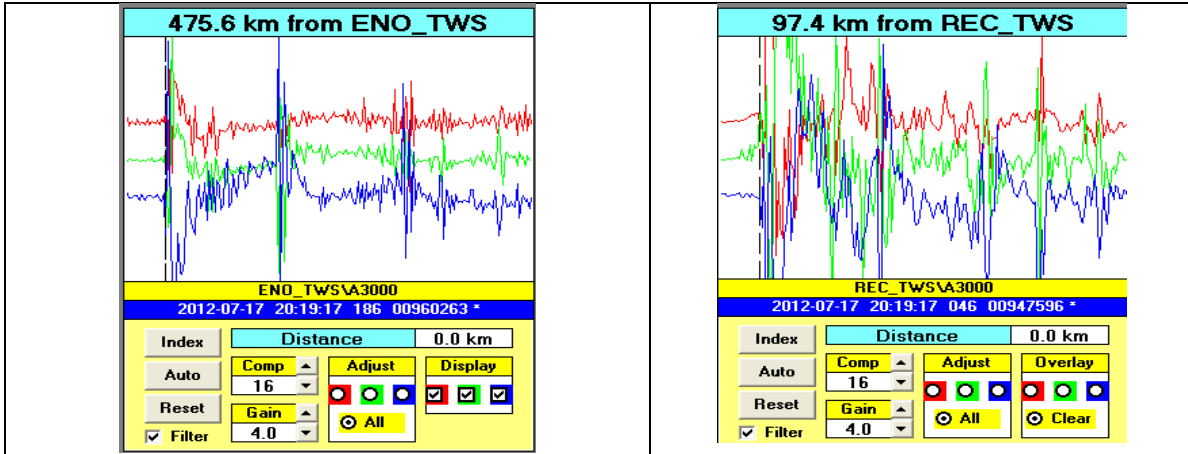
En base a las estampas de tiempo donde se consideran únicamente los segundos y la longitud de la línea aérea k= 0.9 queda definido de la siguiente manera

$$d = \frac{298km + (0.9 * 300,000 km/s * (0.9657616 - 0.9651757)s)}{2} = 228 km$$

Por lo que el registro arroja una perturbación a 228 km vistos desde la subestación 1, no se realizó inspección de este registro ya que no se presentó la salida de la línea, sin embargo, representa una oportunidad de la aplicación de mantenimiento predictivo en la Línea de transmisión

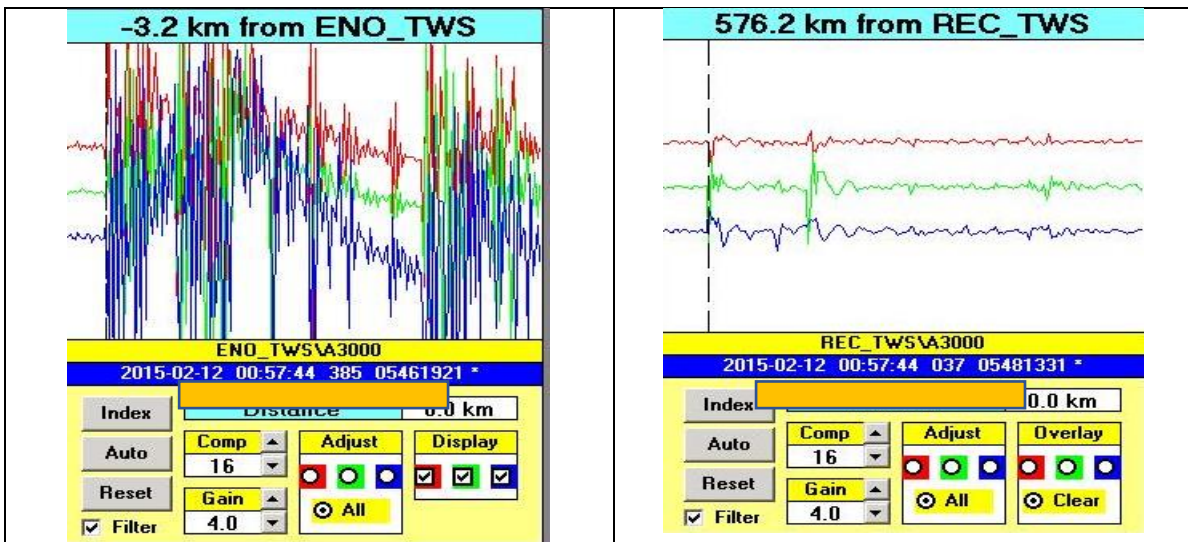
A continuación, se analizará la LT2 que en laza el área N con el área E desde la Subestación 3 a la Subestación 4, es un enlace de 400 kV con una longitud de 573 km. con unos 2 conductores por fase calibre 1113 ACSR/AS, una capacidad de

conducción de corriente de 2,000 Amperes con una capacidad para transmitir 1384 MW.



**Figura 3.5.3 Registro de perturbación con una distancia 475.6 km visto de la S.E. 3, Ilustración 22 donde se detectó contaminación en un aislador.**

**Figura 3.5.3 Registro de perturbación con una distancia 97.4 km visto desde la S.E. 4**



**Figura 3.5.5 Registro con una distancia de 0 km, Ilustración 233este caso fue la detección de un punto caliente en un transformador de corriente en la Subestacion.**

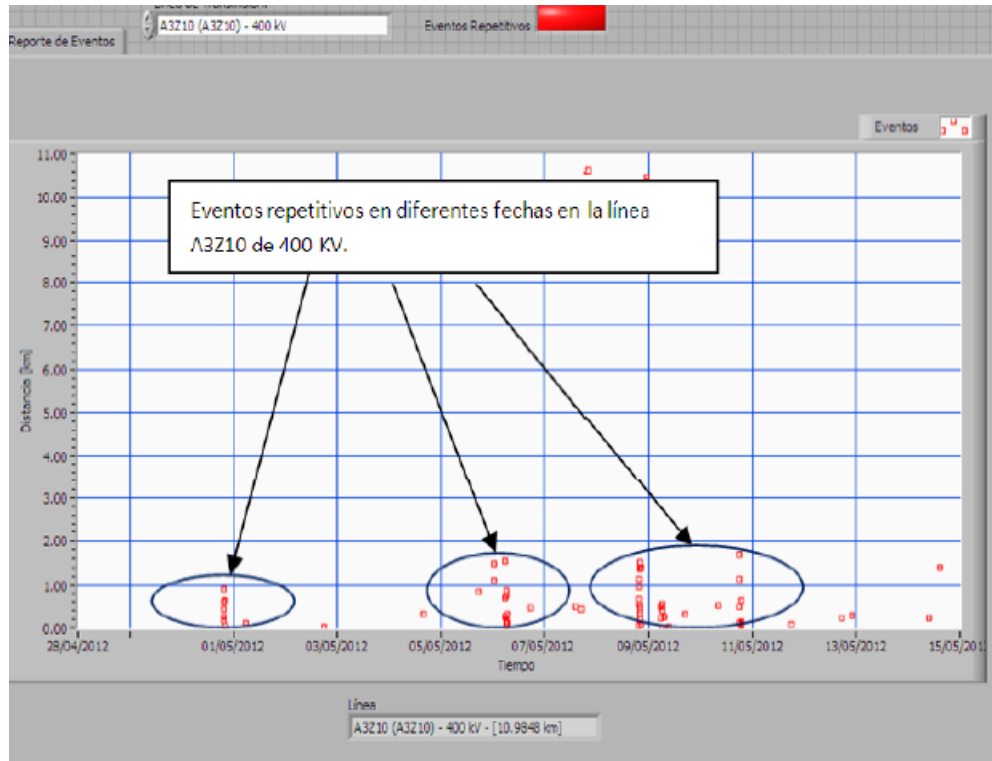
**Figura 3.5.6, es el registro de la subestación colateral de la figura 3.5.5. se observa que marca una distancia de 576 km en una línea que tiene una distancia de 573 km, esto aunado a la polaridad indica que se encuentra en la Subestacion.**

A continuación, Se presenta la experiencia generada por el desarrollo de un Sistema de Monitoreo de líneas de transmisión (SIMOLIN) en la Ciudad de México, desarrollada por el M.I. Julio Román Gómez Calderón

El sistema fue desarrollado para el monitoreo de las Líneas Aéreas y los Cables Subterráneos de alta tensión de la Ciudad de México, está configurado para adquirir la información de diferentes equipos digitales, cuenta con la capacidad para realizar graficas de cada línea donde se tiene la distancia en la que se encuentra la perturbación y en caso de recurrencia se programa la inspección.



**Figura 3.5.7 Sistema de Monitoreo de Líneas de Transmisión Ilustración 244 [56]**



**Figura 3.5.8 Histograma de Caso de éxito en la detección de aislamiento contaminado Ilustración 255 [56]**

En base al histograma de eventos repetitivos, observados en la figura 3.5.8. que fueron detectados a 1 km de distancia, se pudo identificar aislamiento contaminado en la línea de 400 kV de la Ciudad de México



**Figura 3.5.8 Aislamiento contaminado detectado con Equipos de detección de onda viajera. Ilustración 266 [56]**

### 3.6 Observaciones del análisis del registro de onda viajera.

Del análisis realizado a las mediciones documentadas de onda viajera en algunos equipos registradores DRF podemos concluir que se tiene una gran exactitud al encontrar la ubicación de una falla, aunado a ellos se pueden desarrollar métodos que permitan definir el origen de la falla como un árbol o una descarga en base a la naturaleza altamente resistiva de algunas fallas, o el frente de onda de las descargas atmosféricas.

Utilizando este método en conjunto con los esquemas de protección que operan en base a las mediciones de corriente y voltaje de frecuencia nominal se puede realizar un uso más eficiente de los recursos humanos y material al momento de inspeccionar una línea de transmisión

### 3.7 Análisis Costo Beneficio

Se presenta un análisis costo beneficio donde se analiza el ahorro que representa la identificación exacta de la ubicación de una falla, basado en los costos generados por los salarios del personal para la inspección, en comparación con el costo aproximado de los equipos, también se incluyen los costos que pueden representar los ahorros de Energía No Suministrada.

Para analizar los costos de las inspecciones se considera un punto de falla de 50 km desde el punto de reunión de personal, con una Jornada laboral de un día de 8 horas, el personal, vehículos y equipo, para identificar el origen de la falla tiene un costo total de \$ 17,807.86 pesos por jornada [57] lo que representa un valor de \$ 861.9 USD. [58], suponiendo de una manera muy conservadora el ahorro de una jornada de trabajo, gracias a la precisión de los equipos al detectar la falla.

Las líneas de 400 kV están diseñadas para un índice de falla de 1 Salida por cada 100 km al año, por lo que podríamos suponer que ese costo se podría repetir de manera anual. [59]

El costo aproximado de los equipos es de \$10,000 USD, considerando que el costo de la puesta en servicio es de aproximadamente 10% podemos suponer que el costo total del equipo ya instalado es de \$11,000 USD. [60]

El costo de la energía no suministrada es de \$2600 USD por cada Mega Watt hora(MWh). [61]

El Reporte de Confiabilidad del Sistema Eléctrico Nacional en materia de confiabilidad 2020 indico que se tuvo una Energía No Suministrada (ENS) de 1,538.9 MWh atribuible al Transportista. [62]

Suponiendo que con el uso de 1 equipo en una de las líneas que ocasionó mayor ENS se disminuyera el 0.1%, podemos considerar que sería una disminución del costo de energía no suministrada de

$$2600USD/MWh * 1,538.9MWh * 0.001 = 4,001.14 USD$$

Año	Costos			Ahorro		Flujo anual	Flujo total de efectivo
	Adquisición	Instalación	Total	Mano de Obra	ENS		
2022	\$ 10,000.00	\$ 1,000.00	\$ 11,000.00	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ -6,998.86	\$ 3,001.14
2023	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2024	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2025	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2026	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2027	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2028	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2029	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2030	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
2031	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 861.00	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14	\$ 4,001.14
<b>Total</b>	<b>10,000</b>	<b>1,000</b>	<b>11,000</b>		<b>40,011</b>	<b>29,011</b>	<b>39,011</b>
<b>VP</b>	<b>10,000</b>	<b>1,000</b>	<b>11,000</b>		<b>27,044</b>	<b>16,044</b>	<b>26,044</b>

**Tabla 3.1 Flujo de Efectivo y Valor Presente de la inversión considerando una tasa de descuento de 10%, se observa un beneficio de \$26,044 USD, con criterios muy conservadores en cuanto a los ahorros de mano de obra y de ENS.**

Del análisis de la tabla podemos observar que si consideramos ahorros anuales por diez años podemos obtener un beneficio económico de \$26,044 USD por equipo, estos beneficios han sido calculados con criterios muy conservadores en cuanto a los ahorros que se pueden obtener.

Adicional a lo anterior los equipos ofrecen mejoras en la calidad de la energía al evitar interrupciones, Sag, Swell, Variaciones de larga duración, Transitorios, distorsión armónica, fluctuaciones de voltaje y ruido. [63], son costos que se podrán definir en base a las afectaciones de carga que se tienen por variaciones de voltaje y las inversiones necesarias para el cumplimiento de la calidad del suministro, como la reserva rodante que se requiere para mantener la estabilidad en el sistema ante un disturbio.

Por otro lado, está el costo que representa el cumplimiento Regulatorio de las Disposiciones Administrativas de Carácter General en materia de acceso abierto y prestación de los servicios en la Red Nacional de Transmisión, donde se pueden considerar la evaluación de indicadores de disponibilidad, continuidad y calidad [64].

### 3.8 Conclusiones.

Los sistemas de localización de fallas por onda viajera son una herramienta que provee la información de las anomalías en altas frecuencias, su alta funcionalidad permite ubicar la distancia de la falla con un alto grado de exactitud y miden las ondas viajeras que son generadas por maniobras en el sistema o fuera de la zona de protección.

Los registros históricos generados deben ser comparados con la evidencia física del origen de la onda viajera para poder hacer diagnósticos que permitan la prevención de fallas.

La velocidad de propagación es fundamental para la exactitud en la detección de fallas en líneas de transmisión

En base a la experiencia que se genere de la detección física y la confirmación de las anomalías detectadas por onda viajera se podrá determinar si mandar el disparo de interruptores en base al origen, ubicación y dirección de la falla.

Se podrá disminuir la salida de líneas para mejorar los parámetros establecidos de 1 salida al año por cada 100 km en líneas de 400 kV, 1.5 Salidas por año por cada 100 km de líneas de 230 kV y 3 salidas por año en líneas de 115 kV [59]

Ayudará a la digitalización de la red donde se podrá trabajar con sistemas de redes georreferenciadas para optimizar aún más el mantenimiento realizado en líneas de transmisión

### 3.9 Trabajos a futuro

Desarrollo de sistemas de monitoreo de líneas de transmisión por medio de la localización de fallas incipientes en base al arranque de los equipos digitales

Uso de Inteligencia Artificial para caracterizar patrones de fallas incipientes por medio del modelado de las ondas viajeras producidas por descargas parciales en Líneas de transmisión de Alta Tensión

El uso de onda viajera para la disminución de los tiempos de operación en interruptores de potencia y su efecto en el nivel de corto circuito.

Disminución de las curvas de transformadores de potencia por el uso de esquemas de protección en el dominio del tiempo.

## 4 Referencia Bibliográfica

- [1] H. Saadat, Power System Analysis, New York: Mc Graw Hill, 1999.
- [2] D. O. d. I. Federación, «Disposiciones Administrativas de Carácter General que Establecen los Criterios de Eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red,» Diario Oficial de la Federación , CDMX, 2019.
- [3] SENER, «PRODESEN 2021-2031,» SENER , Ciudad de México , 2021.
- [4] Vaisala, «Sistema de localización de rayos y análisis de fallas - FALLS,» Vaisala, Ciudad de México. , 2021.
- [5] NASA, «[https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data\\_lis-otd-climatology.html](https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data_lis-otd-climatology.html),» 31 12 2021. [En línea]. Available: [https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data\\_lis-otd-climatology.html](https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data_lis-otd-climatology.html).
- [6] IEEE, «Extended Transmission Line Loadability Curve by Including Voltage Stability Constraints.,» IEEE, Alberta, 2002.
- [7] C. R. Paul, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, Hoboken NJ: Wiley Interscience, 1994.
- [8] Archivo, «Inspección Aérea de Líneas de Transmisión,» Queretaro, Queretaro, 2021.
- [9] Archivo, «Inspección Visual en Líneas de Transmisión,» Ciudad de México., 2021.
- [10] Gerencia de Líneas de Transmisión, «Estadística de Salidas de Transmisión,» Archivo Gerencia de Líneas de Transmisión, CDMX, 2010-2020.
- [11] H. Torres, «Ground Flash Density: definition of the appropriate grid size,» CIGRE, Texas, 2003.
- [12] EPRI, «Transmission Line Reference Book: 345 kV and above,» EPRI , Palo Alto C.A. , 1975.
- [13] IEEE-1243-1997, «Guide for improving the lightning performance of transmission,» IEEE, Nueva Jersey , 1997.
- [14] F. G. Y. Guevara, «Cálculo del comportamiento de una Línea de Transmisión frente al flameo inverso basado en el método Montecarlo,» Escuela Politécnica Nacional de Ecuador , Quito Ecuador, 2010.
- [15] VAISALA, «Archivo análisis de fallas,» CDMX, 2018.
- [16] Sector Electricidad, «<https://www.sectorelectricidad.com/19547/aislador-danado-por-descarga-atmosferica/>,» 21 02 2018. [En línea]. Available: <https://www.sectorelectricidad.com/19547/aislador-danado-por-descarga-atmosferica/>.

- [17] IEEE, «IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations STD C37.2,» IEEE, New York , 2008.
- [18] CFE, «NRF-041-CFE-2013 Esquemas Normalizados de protección para Líneas de Transmisión,» CFE, Ciudad de México , 2013.
- [19] Graninger-Stvenson, Analisis de sistemas de potencia, Nueva York: McGraw Hill, 1996.
- [20] Instrumentazioni Sistemi Automatici , «Travelling Wave Fault Locator System,» ISA, Taino Italia, 2016.
- [21] Arbiter Systems , «<https://www.arbiter.com/solutions/traveling-wave-faults.php>,» 30 12 2021. [En línea]. Available: <https://www.arbiter.com/solutions/traveling-wave-faults.php>.
- [22] Hindawi, Wuhan University , «<https://downloads.hindawi.com/journals/scn/2021/6648257.pdf>,» 12 31 2021. [En línea]. Available: <https://downloads.hindawi.com/journals/scn/2021/6648257.pdf>.
- [23] Sichuan University , «<http://www.ijscience.org/download/IJS-7-6-292-302.pdf>,» 12 31 2020. [En línea]. Available: <http://www.ijscience.org/download/IJS-7-6-292-302.pdf>.
- [24] University of Kentucky , «<http://www.ijscience.org/download/IJS-7-6-292-302.pdf>,» 31 12 2011. [En línea]. Available: <http://www.ijscience.org/download/IJS-7-6-292-302.pdf>.
- [25] J. R. G. Calderón, «Localizadores de Fallas para el mantenimiento basado en condición en Líneas de Alta Tensión en la Cd de México,» Comisión Federal de Electricidad , CDMX , 2013.
- [26] W. L. Dabo Zhang, «Overhead Line Preventive Maintenance Strategy Based on Condition Monitoring and System Reliability Assessment,» IEEE , Chongqing China , 2014.
- [27] A. d. N. y. C. ANCE, «Transformadores de corriente Especificaciones y Método de Prueba,» Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 2018.
- [28] C. LAPTEM, «Características Técnicas para Relevadores de Protección,» CFE LAPTEM , Ciudad de México , 2008.
- [29] C. LAPTEM, «Equipo de teleprotección,» CFE LAPTEM, Ciudad de México , 2013.
- [30] SEL, «Synchrowave Event,» SEL , Pullman WA, 2019.
- [31] C. LAPTEM, «Esquemas de sincrofasores para medición de área amplia y acciones remediales,» CFE LAPTEM, Ciudad de México, 2013.
- [32] Michel J. Pakeltis, Jay Russell, Elias Marquez, David Cole , Improvements in Fault Location Capability at Centery Point Energy to reduce response Time and Improve accuracy of fault reporting, Huston Texas.: CenterPoint Energy , 2012.

- [33] J. C. Escamilla, «Transitorios Electromagneticos,» BUAP, Puebla, 2021.
- [34] M. L. C. I. A. P. R. G. Juan C Escamilla, «Revision del Modelo Bergeron Aplicado al Análisis de Sobretensiones Transitorias.,» de *IEEE Sección México* , Acapulco Guerrero, Mexico , 2017.
- [35] Steel tower CHN, «<http://www.steeltowerchn.com/es/transmission-line-video/double-circuit-transmission-tower-manufacturer-stronger-steel-tower/>,» 30 12 2021. [En línea]. Available: <http://www.steeltowerchn.com/es/transmission-line-video/double-circuit-transmission-tower-manufacturer-stronger-steel-tower/>.
- [36] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, New York : Jhon Wiley , 1970.
- [37] P. Clyde, *Analysis of multiconductor transmision Lines*, New York: John Wiley & Sons Publications , 1994.
- [38] P. G. Rodrigo Nuricumbo Guillen, «Calculo de Sobreteniones transitorias internas en Líneas de transmisión por medio de la aplicacion sucesiva d ela transformada numerica de Laplace,» IEEE, Acapulco, Gro. , 2013.
- [39] W. F. G. Feijoo, «Localización de fallas en Líneas de Transmision mediante mediciones sincrofasoriale sy ondas viajeras,» Escuela Politécnica Nacional Ecuador , Quito , 2019.
- [40] A. M. Elhaffar, «Power Transmission Line Fault Location Based on Current Traveling Waves,» Helsinki University , Helsinki , 2008.
- [41] G. C. D. F. C.-A. Luis H-Restrepo, «Modelos de línea de transmisión para transitorios,» Escuela de Ingenieria Electrica y Electronica Universidad del Valle , Cali Colombia , 2008.
- [42] C. LAPEM, «CFE E1000-18, Cable de Aluminio con cableado concentrico y núcleo de alambres de acero recubierto de aluminio ACSR/AS,» CFE LAPEM, Ciudad de México. , 2015.
- [43] IEEE, IEEE 738 Standar for calculating the currente temperature of bare overhead conductors, New York EUA : IEEE, 2012.
- [44] ASCE , ASCE 52 Guide for Design of steel Transmission Tower, Virginia EUA : ASCE , 1988.
- [45] ANCE , NMX-J-150/1 y 2 ANCE Coodinacion de aislamiento, Ciudad de México : ANCE , 2004.
- [46] CFE LAPEM , Red de puesta a tierra para estructura de líneas de transmision aereas de 60 kV a 400 kV en construccion., Ciudad de Mexico : CFE LAPEM , 2019.
- [47] C. LAPEM, «VE100-13 Transformadores de corriente para sistemas con tensiones nominales de 0.6 a 400 kV,» CFE LAPEM, Ciudad de México, 2016.
- [48] C. LAPEM, «Transformadores de potencial capacitivo y capacitores de acoplamiento para sistemas de 69 kV a 400 kV,» CFE LAPEM , Ciudad de Mexico , 2016.

- [49] IEC, IEC 61850 Communication Network and Systems for Power Utility, Ginebra Suiza : IEC , 2011.
- [50] IEC, «IEC 62793:2016, Protection against lightning – Thunderstorm warning systems.,» IEC, Ginebra Suiza, 2016.
- [51] Z. Peterson, «Medición de impedancias en líneas de transmisión,» 30 12 2021. [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/transmission-line-impedance-measurement-even-vs-odd-mode>.
- [52] Omicron, «omicronenergy.com,» 30 12 2021. [En línea]. Available: <https://www.omicronenergy.com/es/solucion/medicion-de-impedancia-de-linea/#>.
- [53] G. Torrero, «Reporte Uso de Equipos de Onda Viajera,» Gomez Palacio, Durango , 2016.
- [54] G. A. Taylor, «Design and Analysis of a Traveling Wave Fault Locator,» Louisiana Tech Digital Commons , Louisiana , 2019.
- [55] GE Grid Solutions, «Techinal Manual Distributed Multifunction Faul Recorder,» New York, 2020.
- [56] J. R. G. Calderón, «Localizadores de fallas para el mantenimiento basado en condicion en líneas de alta tension de la CDMX,» XI Simposio Iberoamericano sobre protección de Sistemas Electricos de Potencia 2013 , CDMX , 2013.
- [57] Indice Nacional de Precios al Consumidor, Indice Nacional de Precios al Consumidor Anexo H, Ciudad de Mexico : INPC , 2021 .
- [58] Banxico, «Banxico.org.mx,» 26 01 2022. [En línea]. Available: <https://www.banxico.org.mx/tipCamb/main.do?page=tip&idioma=sp>.
- [59] DLT , «Diseño de Líneas de Transmisión Aéreas,» CFE, México, 2014.
- [60] Micrositio de concursos y contrataciones., «Micrositio de contrataciones,» 01 12 2021. [En línea]. Available: <https://msc.cfe.mx/Aplicaciones/NCFE/Concursos/Procedure/Details>.
- [61] SENER, «Diario Oficial de la Federación.,» 28 02 2017. [En línea]. Available: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5473221&fecha=28/02/2017](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5473221&fecha=28/02/2017).
- [62] Comisión Reguladora de Energía , «<https://www.gob.mx/cre/documentos/reporte-de-confiabilidad-del-sistema-electrico-nacional>,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cre/documentos/reporte-de-confiabilidad-del-sistema-electrico-nacional>.
- [63] A. Kusko, Power Quality in Electrical Systems, New York : Mc Graw Hill , 2007.
- [64] Diario Oficial de la Federación , «misión Reguladora de Energía expide las disposiciones administrativas de carácter general en materia de acceso abierto y prestación de los servicios

en la Red Nacional de Transmisión y las Redes Generales de Distribución de Energía Eléctrica.,» 16 02 2016. [En línea]. Available:  
[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5425779&fecha=16/02/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5425779&fecha=16/02/2016).

- [65] P. Barnett, «The analysis of travelling waves on power system transmission lines,» University of Canterbury, Christchurch, New Zealand , 1974.
- [66] J. Snelson, «Propagation of Travelling Waves on Transmission Lines Frequency Dependent Paramters,» IEEE , New York , 1972.
- [67] J. Marti, «Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations,» IEEE , New York , 1974.
- [68] C. LAPTEM, «Esquemas Normalizados de Protecciones para Líneas de Transmision y Subtransmisión,» CFE LAPTEM, Ciudad de México. , 2015.
- [69] C. LAPTEM, «Tableros de Protección, Control, Medición, Supervision y Registro para unidad,» CFE LAPTEM, Ciudad de Mexico, 2016.
- [70] V. D. R. J. D. M. Eliel Garcia Wong, Localizacion de fallas en Línea de Transmisión por medio del reconocimiento de ondas viajeras, Ciudad Madero, Tampico: IEEE Sección Mexico, 2018.
- [71] Secretaria de Energia de Argentina , «Anuarios de Energía Eléctrica,» Argentina, Argentina , 2016.
- [72] Diario Oficial de la Federación.,  
«[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5422390&fecha=11/01/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5422390&fecha=11/01/2016),» 01 11 2016. [En línea]. Available:  
[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5422390&fecha=11/01/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5422390&fecha=11/01/2016).